

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАЗИМИРЕНКО ЮЛІЯ ОЛЕКСІЇВНА

УДК 629.56:539.388:666.1.037.3:621.793

ДИСЕРТАЦІЯ
НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСТУ
МЕТАЛ-СКЛЯНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ЕЛЕМЕНТІВ СУДЕН ДЛЯ
РАДІОАКТИВНИХ ВАНТАЖІВ

ЧАСТИНА І

Спеціальності 05.08.03 – конструювання та будування суден

135 – суднобудування

05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

161 – хімічні технології та інженерія

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ю. О. Казимиренко

Науковий консультант

Дубовий Олександр Миколайович
доктор технічних наук, професор

Миколаїв – 2019

АНОТАЦІЯ

Казмиренко Ю. О. Наукові основи проектування і підвищення захисту метал-скляними матеріалами елементів суден для радіоактивних вантажів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.08.03 – конструювання та будування суден (135 – суднобудування); 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів (161 – хімічні технології та інженерія). – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2019 р.

Запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено вирішення **науково-технічної проблеми** розробки принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення.

Во **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження за двома спеціальностями, де вирішення проблем з конструювання і будування суден досягається шляхом створення нових комплексно-захисних матеріалів і покриттів на основі скла; наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; визначено об'єкт і предмет досліджень, поставлені мета і завдання; наведено методи та інформаційну базу досліджень, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій; сформульовано наукову новизну та практичну цінність роботи (окремо за кожною спеціальністю); викладено відомості про апробацію та впровадження результатів.

У **першому розділі** наведено нормативна база та умови перевезення радіоактивних вантажів (РАВ) водним транспортом, їх класифікація та властивості; за викладеним досвідом вітчизняних та зарубіжних компаній проаналізовано конструктивні особливості суден-прототипів, висвітлено проблематику і практику проектування, наведено досвід сучасних наукових шкіл та проектних організацій, розглянуто дослідження теплових процесів в задачах технічних засобів для радіоактивних вантажів; проаналізовано корозійні пошкодження цистерн для рідких РАВ та технологічні напрямки

підвищення захисту. Розглянуто методи, критерії та інформаційні ресурси оцінювання технічного стану суднових конструкцій.

Визначено умови експлуатації та напрямки застосування неметалічних та ультрадисперсних матеріалів для формування шаруватих конструкцій суден; висвітлено сучасний досвід застосування стекол в технологіях ізолювання радіоактивних відходів та проаналізовано радіаційні дефекти в стеклах; розглянуто використання порожніх скляних мікросфер в технологіях виготовлення суднобудівних та рентгенозахисних матеріалів; обґрунтовано теоретичні і технологічні передумови з'єднання стекол з металами.

У другому розділі [1, 5, 18, 31] наведено науково-методичну базу дисертаційного дослідження, яка пов'язує розробку нових наукових засад в області суднобудування з проведенням теоретичних і експериментальних досліджень з розробки нових матеріалів і покриттів з переважним впливом на фізико-хімічні процеси формування їх структури і властивостей скляної складової. Висунуто наукові гіпотези; надано теоретичне обґрунтування щодо вибору стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, металевих порошків та зварювальних дротів, наведено їх характеристики. Сформульовано дослідницькі завдання, теоретичні передумови постановки та методи досліджень. Охарактеризовано елементи біологічного захисту: модульного типу, що встановлюються, в основному, на суховантажних суднах, та блоків – для плавучих споруд, на яких зберігаються радіоактивні відходи у рідкому та твердому агрегатному станах. Сформульовано проектні, конструкторські та технологічні завдання, обрано методичне забезпечення з теоретичними і експериментальними методиками.

Третій розділ [6, 21, 22, 25, 35, 36, 38–40, 41, 43] досліджено структуру, морфологію та процеси розм'якшення порожніх скляних мікросфер (система $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) та порошків, одержаних механічним здрібненням до дисперсності 10...90 мкм бою кристалевого посуду (система $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$) та рентгенозахисного скла дифрактометра (система $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$). Удосконалено конструкцію та виготовлено лабораторний зразок експериментальної установки для спікання у вільному стані та гарячого пресування металевих і неметалевих порошків, за допомогою якої можна досліджувати термодетформаційні та усадочні процеси. Розроблено спосіб отримання склоалюмінієвих матеріалів, який полягає у гарячому пресуванні ($P = 0,7...1,2$ МПа, $t = 375...490$ °C) формувальної суміші, яка складається зі

скляних мікросфер з порошком або пудрою алюмінію у рівних об'ємних долях з наступною ізотермічною витримкою при $t = 600...700$ °С. Спосіб дає змогу виготовляти плитки, для кріплення яких до сталевій поверхні конструкцій запропоновано клейову композицію на основі ЕД-20 з додаванням порожніх скляних мікросфер. Досліджено фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час спікання, а саме: усадочні процеси; вигорання силанового апрету та утворення ультра- та мікропор, які завдяки капілярному ефекту та зовнішньому тиску заповнюються рідким алюмінієм; ліквідаційні процеси у структурно-неоднорідних стінках мікросфер; утворення локальних ділянок спечених між собою мікросфер з утворенням на поверхні поділу α -тридиміту з розміром областей когерентного розсіювання до 90 мкм. Встановлені закономірності порівняно з процесами спікання скляних мікросфер з іншими металевими порошками (бронзою та бабітом).

Досліджено фізико-хімічні процеси структуроутворення на сталевій підкладці із Ст3 електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених скляними мікросферами і одержаними порошками: це адгезійні та когезійні процеси через оплавлення поверхні скляних частинок і накопичення склофази; ліквідаційні процеси під час короткочасного температурного впливу, які на відміну від порошків відбуваються у стінках порожніх скляних мікросфер; формування у покриттях на основі Св-08Г2С на поверхні поділу сталь–скло нової ультрадисперсної фази Fe_5Si_3 . Встановлені закономірності порівняно з напиленням керамічних (алюмосилікатних) мікросфер;

У четвертому розділі [9, 18, 23, 24, 26–29, 32–34, 37, 41] надано теоретичне і експериментальне обґрунтування доцільності застосування розроблених матеріалів і покриттів для проектування та виготовлення за їх участю елементів біологічного захисту, науковим підґрунтям для чого є: наведений у аналітичному вигляді вплив пористості і об'ємного вмісту скляних наповнювачів на ефективні механічні характеристики композицій; розрахунково-експериментальні дослідження демпфіруючих властивостей, зокрема коефіцієнта вібраційних втрат та коефіцієнта розсіювання енергії, залежно від об'ємного вмісту скляних наповнювачів результати досліджень їх теплопровідності та рентгенозахисних характеристик та моделювання процесу послаблення іонізуючих випромінювань елементарними комірками. Досліджено вплив скляних включень на радіаційну стійкість метал-скляних електродугових покриттів в умовах γ -випромінювань Co^{60} , в результаті чого

розроблено модель поверхневого зміцнення метал-скляних електродугових покриттів дифузним потоком, де фізична постановка задачі полягає у формуванні під дією теплових ефектів температурних полів; при поглинанні теплоти кожним із шарів покриття в місцях найбільшої концентрації напружень формуються наноструктурні елементи. Розроблена модель описує характер зміцнення метал-скляного покриття в умовах транспортування РАВ, які є джерелами γ -випромінювань, та дає нові наукові уявлення про механізми поглинання теплової енергії під час опромінення шарами структурно-неоднорідних композицій з утворенням субструктурних елементів. Граничні умови руйнування метал-скляного шару конструкцій в умовах підвищених температур і опромінення описані у вигляді удосконаленої термомеханічної моделі поведінки в умовах теплових ефектів, яка на відміну від моделей, запропонованих для сферопластиків, дає змогу на мікрорівні прогнозувати умови руйнування по поверхні поділу скло–метал в залежності від пористості, об'ємного наповнення склом та діаметра ПСМ. Експериментально досліджено термостійкість та корозійну стійкість опромінених метал-скляних покриттів у розчинах кислот.

П'ятий розділ [11, 12, 15–17, 26, 30] містить постановку і розв'язання за допомогою методів системного аналізу задач: підвищення якості композитних судових конструкцій; управління процесами підвищення техніко-економічних показників під час проектування елементів біологічного захисту за умовами дотримання експлуатаційних вимог та шляхом варіювання характеристиками розроблених матеріалів і покриттів; інформаційної підтримки оцінювання технічного стану. Для цього шляхом побудови причинно-наслідкових діаграм виявлено конструктивні та виробничо-технологічні дефекти, розроблено заходи щодо їх попередження. Проектну оцінку підвищення техніко-економічних показників елементів біологічного захисту представлено у вигляді двох когнітивних моделей з реалізацією взаємного впливу внутрішніх і зовнішніх факторів шляхом формування матриці суміжності. На підставі експериментальних випробувань запропоновано класифікацію експлуатаційних дефектів, в основу якої покладено пошкодження матеріалів та зміна їх структури внаслідок опромінення, температурних факторів, хімічно активних середовищ, механічних пошкоджень під час вантажно-розвантажувальних робіт. Для систематизації інформації розроблено нову інформаційно-пошукову систему «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» з масивом документально-

фактографічного типу, до якого заносяться технологічні режими підготовки поверхні, напилення, гарячого пресування; інформація щодо властивостей, характеристики вихідних компонентів з графічними об'єктами, результати випробувань зразків, що дасть змогу виключити певні ремонтні роботи через вживання профілактичних заходів. Діагностика здійснюється шляхом порівняння мікроструктур та властивостей зразків при відборі проб з вихідними даними; розроблено алгоритм оцінювання технічного стану композитних конструкцій.

У шостому розділі [3, 5, 6, 14, 20] удосконалено теоретичний підхід до проектування модулів біологічного захисту, який враховує його раціональне розташування на суховантажному суді, алгоритмізацію вантажних операцій за дотриманням умов міцності та прогнозування руйнування при виникненні пожежонебезпечних ситуацій під час транспортування РАВ середньої і високої активності. Для цього удосконалено модульну конструкцію біологічного захисту, панелі якої виготовлено з радіаційно-стійкого бетону з облицюванням з одного боку листовою вуглецевою сталлю з нанесеним метал-скляним шаром, що дає змогу у порівнянні з існуючими варіантами приблизно на 10 % знизити масу, розширивши тим самим асортимент вантажів та підвищивши завантаженість судна. Розроблено практичні рекомендації щодо виготовлення тришарових панелей та монтажу конструкції у трюмі суховантажного судна. Запропоновано модель функціонування судна, яка включає у себе розробку нової інформаційної системи та розв'язання оптимізаційної задачі щодо ефективного розміщення модуля біологічного захисту як великої вантажної одиниці на суховантажному судні разом з іншими вантажами за критеріями мінімізації сталійного часу. Ефективність застосування захисних модулів підтверджено моделюванням процесів руйнування конструкцій у пожежонебезпечних ситуаціях на судні, для чого сформульовано та розв'язано у пружній постановці методом скінчених елементів задачу короткочасного термічного навантаження панелі модуля.

У сьомому розділі [2, 7–9, 13, 19, 20, 42] науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід до проектування елементів біологічного захисту плавучих споруд, який полягає у моделюванні проектної ситуації з позицій обмежень за потужністю остаточного тепловиділення РАВ. Для цього вперше досліджено процеси теплообміну між вантажами та повітрям, яке циркулює у просторі подвійного борту і дна: сформульовано і розв'язано у спряженій та

плоскій постановці на прикладі суднової цистерни з багатошаровою стінкою стаціонарну задачу про тепловий стан вантажної зони, яка враховує потужність остаточного тепловиділення РАВ ($Q = 2 \dots 20$ кВт), теплопровідність кожного з шарів та дозволяє визначати розподіл температур і потоків повітря в умовах природньої конвенції, що дає змогу моделювати проектну ситуацію та обирати найбільш раціональне конструктивно-компонувальне рішення для безпечного зберігання РАВ на плавучих спорудах. Встановлено вплив метал-скляного захисного шару на зниження температури з найбільш розігрітих ділянок вантажної зони плавучої споруди та проектні обмеження ($Q_{\text{пит}} = 230$ Вт/м³). Розроблено конструкторські рекомендації щодо вибору раціональних конструктивно-компонувальних рішень, які забезпечують не тільки умови теплової безпеки на плавучих спорудах, а й сприяють зниженню маси блока більш ніж у два рази за рахунок можливого зменшення товщини шару бетонної заливки навколо бака з 800 мм до 200 мм.

Показано можливість застосування розроблених метал-скляних електродугових покриттів для захисту внутрішніх поверхонь вертикальних цистерн, у яких зберігаються рідкі РАВ. Технологічні заходи також включають у себе нові способи виготовлення і ремонту деталей запірної арматури (клапанів, фланців, кранів) вантажних систем, які часто зношуються при зберіганні рідин та під час дезактивації.

У *восьмому розділі* [4, 10] розвинуто теоретичні, методичні, практичні засади підвищення інноваційної привабливості нових технічних рішень у проектуванні і виготовленні за участю метал-скляних матеріалів та покриттів елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд, призначених для транспортування та зберігання радіоактивних вантажів. Удосконалено принципи оптимального вибору раціонального конструктивного рішення для елементів біологічного захисту шляхом формування комплексного коефіцієнту технологічності, які ґрунтуються на порівнянні різних варіантів конструкцій з урахуванням нових матеріалів і технологій захисту, що є необхідним для розробки організаційно-технічних заходів і прогнозування динаміки формування факторів економічної ефективності. Результати роботи впроваджено у наукові, проектні, виробничі установи та у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

У *додатках* (окрема частина) наведено допоміжні матеріали (нормативні документи, інструкції, методики, схеми випробувань тощо, тексти програм), акти впровадження, копії патентів, список публікацій здобувача.

Ключові слова: елементи суден і плавучих споруд, радіоактивні вантажі, проектування, конструювання, оцінювання технічного стану, технологія, скляні порошки і мікросфери, аморфний і кристалічний стан, спікання, метал-скляні матеріали і покриття, електродугове напилення.

ABSTRACT

Kazymyrenko Y.A. Scientific foundations of the design and the enhancement of protection level of radioactive cargoes vessels' elements by metal-glass materials. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

The dissertation for a scientific degree competition of doctor of technical sciences in specialties 05.08.03 – design and construction of vessels (135 – shipbuilding); 05.17.11 - technology of refractory non-metallic materials (161 – chemical technologies and engineering). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2019.

The solution of the ***scientific and technical problem*** of the development of a fundamentally new scientific approach to the design of elements of vessels and floating structures for radioactive cargoes has been proposed, theoretically justified and investigated. It is based on compliance with the conditions of thermal safety and the theory of protection of structures on the basis of physical and chemical processes of creating new compositions from the poly- and the ultrafine structure by combining glass microspheres and powders with metal using sintering and electric-arc spraying methods.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation study on two specialties, where solving problems with the design and construction of vessels has been achieved by creating new complex protective materials and coatings based on glass; the connection of work with scientific programs, plans and themes has been given; the object and subject of research have been determined, the purpose and tasks have been set; the methods and informational base of researches, the substantiation of scientific positions, conclusions and recommendations have been given; the scientific novelty and practical value of work (separately for each specialty) have been formulated; the information about testing and implementation of the results has been provided.

The purpose of the work is the creation of scientific bases for designing, manufacturing and evaluating of the technical state of biological protection modules and units, which include the development of complex protective metal-glass materials and coatings, take into account the energetic characteristics of radioactive cargoes and aimed at improving of the vessels and floating structures elements' technical and operational indexes.

The first section contains the statutory framework and the radioactive cargo transportation conditions (RAW) by water transport, their classification and properties; the design features of prototype vessels have been analyzed on the basis of the experience of domestic and foreign companies; the problems and design practices have been highlighted, the experience of modern scientific schools and design organizations has been presented, the research of thermal processes in the tasks of technical means for radioactive cargoes has been considered; the corrosion damage of tanks for liquid radioactive waste and technological directions of protection increase have been analyzed. The methods, criteria and information resources of estimation of the technical state of vessels' structures have been considered.

Conditions of operation and directions of application of nonmetallic and ultrafine materials for formation of layered structures of vessels have been determined; the modern experience of using glasses in radioactive waste isolation technologies has been highlighted and the radiation defects in glasses have been analyzed; the use of hollow glass microspheres in the technologies of shipbuilding and X-ray protective materials has been considered; the theoretical and technological prerequisites of connection of glasses with metals have been justified.

The second section [1, 5, 18, 31] presents the scientific and methodological basis of the dissertation research, which links the development of new scientific foundations in the field of shipbuilding with the conduct of theoretical and experimental research on the development of new materials and coatings with a predominant influence on the physical and chemical processes of formation of their structure and properties of the glass component. Scientific hypotheses have been put forward; the theoretical substantiation for the selection of glasses of $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ systems, metal powders and welding wires (and their characteristics) has been given. The research tasks, theoretical preconditions of the tasks' formulation and methods of research have been formulated. The elements of biological protection have been described: the modular type, which is installed mainly on dry cargo ships, and blocks - for floating facilities,

where radioactive wastes are stored in liquid and solid aggregates. Design, engineering and technological tasks have been formulated, methodological support with theoretical and experimental methods have been chosen.

The structure, morphology and processes of softening of hollow glass microspheres ($\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system) and powders obtained by mechanical crushing of the crystalline bowl bottle ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ system) and X-ray diffractometer glass ($\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ system) to the dispersion of 10 ... 90 microns have been investigated in **the third section** [6, 21, 22, 25, 35, 36, 38–40, 41, 43]. The design has been improved and a laboratory sample of an experimental device for sintering in a free state and for hot pressing of metal and non-metal powders has been made; using this device it is possible to investigate thermal-deformation and shrinkage processes. The method of obtaining glass-aluminum materials has been developed; it is based on hot pressing ($P = 0.7 \dots 1.2 \text{ MPa}$, $t = 375 \dots 490 \text{ }^\circ\text{C}$) of a molding mixture, which consists of glass microspheres with aluminum powder in equal volumetric fractions and it is followed by isothermal endurance at $t = 600 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$. The method makes it possible to produce tiles, which is proposed to fasten to a steel surface of structures by an adhesive composition based on ED-20 with the addition of hollow glass microspheres. The physical and chemical processes that occur during sintering have been investigated, namely: shrink processes; the burning of silane layer and the formation of ultra- and micro- pores, which are filled with liquid aluminum due to capillary effect and external pressure; liquation processes in the structural inhomogeneous walls of microspheres; the formation of local sections of microspheres sintered with each other, with the formation on the surface of α -tridimit with the size of coherent scattering areas up to $90 \text{ }\mu\text{m}$. The regularities in comparison of the processes of sintering of glass microspheres with other metal powders (bronze and babbitt) have been established.

The physical and chemical processes of structure formation on the steel substrate with St3 electro-arc coatings on the basis of Sv-08G2S and Sv-AMg5 filled with glass microspheres and obtained powders have been investigated: these are adhesion and cohesive processes due to the melting of the surface of glass particles and the accumulation of glass phase; liquation processes during short-term temperature influence, which, unlike powders, occur in the walls of hollow glass microspheres; formation of the new ultrafine phase Fe_5Si_3 in coatings on the basis of Sv-08G2C on the surface of the separation of steel-glass. The regularities in

comparison with the spraying of ceramic (aluminosilicate) microspheres have been established.

In the **fourth section** [9, 18, 23, 24, 26-29, 32-34, 37, 41] the theoretical and experimental justification of expediency of application of the developed materials and coatings for designing and manufacturing of the elements of biological protection has been provided; the scientific basis is: the influence of porosity and volumetric content of glass fillers on the effective mechanical characteristics of compositions has been given in analytical form; computational and experimental studies of damping properties, in particular the coefficient of vibration of losses and the energy dissipation coefficient, depending on the volume content of glass fillers, the results of research on their thermal conductivity and X-ray protective characteristics, and the simulation of the process of relaxation of ionizing radiation by elementary cells. The influence of glass inclusions on the radiation resistance of metal-glass electric-arc coatings in the conditions of γ -radiation of Co^{60} has been investigated. As a result, a model of surface hardening of metal-glass electric-arc coatings with a diffuse flow has been developed, where the physical formulation of the problem is the formation under the influence of thermal effects of temperature fields; nanostructured elements are formed in the places of greatest concentration of stress during heat absorption by each of the coating layers. The developed model describes the nature of the strengthening of the metal-glass coating in the conditions of transportation of radioactive wastes, which are sources of γ -radiation, and gives new scientific ideas about the mechanisms of absorption of thermal energy during irradiation with layers of structural-non-uniform compositions with the formation of substructural elements. The boundary conditions of the destruction of the metal-glass layer of constructions in conditions of elevated temperatures and irradiation are described in the form of an improved thermomechanical behavior model in the conditions of thermal effects, which, in contrast to the models proposed for spheroplastics, makes it possible at micro-level to predict the conditions of destruction on the glass-metal separation surface in dependence on the porosity, the volumetric filling with the glass and the diameter of the hollow glass microspheres. The thermal stability and corrosion resistance of irradiated metal-glass coatings in acid solutions have been experimentally investigated.

The fifth section [11, 12, 15-17, 26, 30] contains a statement and solution of tasks with the help of methods of system analysis: improving the quality of composite vessel constructions; management of the processes of increasing the technical and

economic indicators during the designing of biological protection elements on the terms of compliance with the operational requirements and by varying the characteristics of the materials and coatings; informational support for assessing of the technical condition. For this, constructive and technological defects have been identified by constructing of causal diagrams, measures for their prevention have been developed. The project assessment of the increase of technical and economic indicators of biological protection elements has been presented in the form of two cognitive models with the realization of the mutual influence of internal and external factors by formation of contiguity matrix.

Based on experimental tests, a classification of operational defects has been proposed; it is based on materials damage and changes in their structure due to irradiation, temperature factors, chemically active environment, mechanical damage during loading and unloading operations. For the systematization of information, the new informational and retrieval system «PROTECTIVE COATINGS DATA» with a documentary and factual type array has been developed; the technological regimes of surface preparation, spraying, hot pressing, information on properties, characteristics of output components with graphic objects, results of test samples, which allow to exclude certain repair work through the use of preventive measures are recorded to the system. Diagnostics is carried out by comparing microstructures and sample properties during sampling with the initial data; the algorithm for evaluation of the technical state of composite structures has been developed.

In *the sixth section* [3, 5, 6, 14, 20] the theoretical approach to the design of biological protection modules has been improved; it takes into account its rational location at the dry cargo vessel and the algorithmization of cargo operations in compliance with the conditions of durability and prediction of destruction in case of fire hazard situations during the transportation of radioactive waste of medium and high activity. For this purpose, the modular structure of biological protection has been improved; its panels are made of radiation-resistant concrete with lining by carbon steel sheet with applied metal-glass layer on the one side, which makes it possible to reduce mass by about 10% in comparison with existing variants, expanding the cargo assortment and increasing the ship's load. Practical recommendations for the manufacturing of three-layer panels and mounting of the construction in the hold of a dry cargo vessel have been developed. The vessel operation model has been proposed; it includes the development of a new information system and the solution of the optimization problem for the effective placement of the biological protection

module as a large cargo unit on a dry cargo vessel along with other cargoes according to the criteria of laytime minimizing. The effectiveness of the application of protective modules is confirmed by simulation of the processes of destruction of structures in fire hazard situations on a vessel; for this purpose the task of short-term thermal loading of the module panel has been formulated and solved in an elastic setting by the method of finite elements.

The seventh section [2, 7–9, 13, 19, 20, 42] scientifically substantiates and proposes a new approach to the design of elements of biological protection of floating structures, which consists in modeling of design situation from the position of limitation of power of the residual radioactive wastes' heat dissipation.

For this purpose, the processes of heat exchange between cargoes and air, which circulates in the space of a double board and bottom have been investigated for the first time: the stationary problem about the thermal condition of the cargo zone, which takes into account the power of the final radionuclide heat emission ($Q = 2 \dots 20 \text{ kW}$), the thermal conductivity of each of the layers and allows to determine the distribution of temperatures and airflows in the conditions of the natural convention has been formulated and solved in conjugated and flat formulations on the example of a marine tank with multi-layered wall; it allows to simulate the project situation and choose the most rational design and assembly solution for safe storage of radioactive waste on floating facilities. The influence of the metal-glass protective layer on the reduction of temperature from the most heated sections of the cargo area of the floating facility and the design limitations ($Q_{\text{specific}} = 230 \text{ W/m}^3$) has been established. Design recommendations for the choice of rational design and layout solutions have been developed; they provide either the thermal safety conditions on floating facilities or contribute to reducing of the block mass more than twice as a result of the possible reduction of the thickness of the layer of concrete pouring around the tank from 800 mm to 200 mm.

It is shown the possibility of application of the developed metal-glass electric-arc coatings for protection of internal surfaces of vertical tanks, where liquid radioactive wastes are stored. Technological measures also include new ways of manufacturing and repairing of stop valves' parts (vents, flanges, cranes) of cargo systems, which often wear out during storage of liquids and during decontamination.

In **the eighth section** [4, 10] the theoretical, methodological, and practical principles of increasing of the innovative attractiveness of new technical solutions in the design and manufacture of biological protection elements of vessels and floating

facilities intended for the transportation and storage of radioactive cargoes with the use of metal-glass materials and coating have been developed. The principles of the optimal choice of rational structural solution for biological protection elements have been improved by formation of complex coefficient of technological efficiency; they are based on comparison of different variants of designs taking into account new materials and technologies of protection, which is necessary for the development of organizational and technical measures and for forecasting the dynamics of the formation of factors of economic efficiency. The work results have been implemented in scientific, design, production institutions and in the educational process of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

In appendixes (a separate part) are listed auxiliary materials (instructions, methodologies, regulatory documents, test schemes, etc., program texts), acts of implementation, copies of patents, a list of publications of the applicant.

Key words: elements of vessels and floating facilities, radioactive cargoes, design, construction, evaluation of technical condition, technology, glass powders and microspheres, amorphous and crystalline state, sintering, metal-glass materials and coatings, electric-arc spraying.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у іноземних і фахових виданнях за спеціальністю 05.08.03

1. Казимиренко Ю. А. Разработка научных основ проектирования и защиты элементов судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2018. – № 2. – С. 19–24 (*іноземне фахове видання*).

2. Казимиренко, Ю. О. Теоретичне обґрунтування підвищення техніко-економічних і експлуатаційних показників елементів плавучих споруд для радіоактивних вантажів / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 8 (36), vol. 1. – P. 38–45 – (*іноземне видання, НМБ eLIBRARY*).

3. Казимиренко, Ю. О. Аналітична модель функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. Журн. – : науч. Журн. – Х. : Технологический центр, 2018. –

№ 1 (42). – С. 43–49. – **(НМБ: ПИИЦ, ResearchBib, CrossRef, WorldCAD, DOAJ, BASE, DRJI та ін).**

4. Дрозд, О. В. Вплив управління загальноосвітнім процесом на критерії інноваційної привабливості суден для радіоактивних вантажів / О. В. Дрозд, О. С. Рижков, Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 1 (29), vol. 1. – Р. 59–65 **(іноземне видання, НМБ eLIBRARY)** – *авторський вклад: розроблення аналітичної моделі інноваційної привабливості нових технічних рішень.*

5. Казимиренко, Ю. А. Перспективные материалы, способы и технологические направления формирования конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2017. – № 2. – С. 39–44. **(іноземне фахове видання).**

6. Казимиренко, Ю. О. Формування клейового з'єднання для виготовлення багатошарових конструкцій суден / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 3 (7), vol. 2. – Р. 20–24. – **(іноземне видання, НМБ eLIBRARY).**

7. Казимиренко, Ю. А. Решение задач теплообмена при перевозке и хранении радиоактивных грузов на плавучих сооружениях / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2016. – № 2. – С. 20–27 **(іноземне фахове видання).**

8. Казимиренко, Ю. А. Влияние энергетических параметров радиоактивных грузов на процессы теплопереноса и прочность композитных конструкций плавучих сооружений / Ю. А. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 4 (8), vol. 7. – Р. 58–63. – **(іноземне видання, НМБ eLIBRARY).**

9. Казимиренко, Ю. О. Коррозійний захист сталевих цистерн для зберігання рідких радіоактивних речовин на плавучих спорудах / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 7 (11), vol. 2. – Р. 16–21. – **(іноземне видання, НМБ eLIBRARY).**

10. Казимиренко, Ю. А. Оценка технологичности композитных конструкций судов и плавучих сооружений на основе системотехнического подхода / Ю. А. Казимиренко, В. В. Савочкина // Технологический аудит и

резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 4/1 (24). – С. 65–68. – *(фахове видання України, НМБ: Index Copernicus, BASE, ПИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSC та ін.) – авторський вклад: постановка завдання, розрахунок критеріїв технологічності, узагальнення результатів досліджень.*

11. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка оценки технического состояния конструкций судов и плавучих сооружений / **Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова** // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. – К. : КНУБА, 2015. – № 12. – С. 111–117. – *(фахове видання України, НМБ BASE, Index Copernicus, Google Scholar) – авторський вклад: постановка завдання, розроблення структурної інформаційної моделі оцінювання технічного стану.*

12. Казимиренко, Ю. А. Оценка технического состояния композитных конструкций судов с использованием информационной обработки данных / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 8 (18). – С. 31–37. – *(НМБ: ПИНЦ, ResearchBib, CrossRef, WorldCAD, DOAJ, BASE, DRJI та ін).*

13. Казимиренко, Ю. О. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування / **Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедєва** // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 5/7 (25). – С. 24–27. – *(фахове видання України, НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, ПИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD) – авторський вклад: постановка завдання, розроблення устаткування, закономірності та узагальнення результатів досліджень.*

14. Казимиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2014. – № 6/5 (20). – С. 7–9. – *(НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, ПИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD).*

15. Фарионова, Т. А. Механизмы управления свойствами защитных конструкций технических средств для перевозки опасных грузов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – Х. : Технологический центр, 2012. – № 1/11 (55). – С. 35–37. –

(фахове видання України, входить до НМБ РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Googl Scholar) – авторський вклад: визначення основних етапів проектування захисних конструкцій та впливу структурних характеристик матеріалів і покриттів на експлуатаційні властивості.

16. Возный, А. М. Применение когнитивного моделирования при проектировании конструкций технических средств для хранения радиоактивных веществ / А. М. Возный, **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. – К. : КНУБА, 2012. – № 10. – С. 37–41. – *(фахове видання України) – авторський вклад: складання моделі задачі проектування конструкцій, вибір інтервалів варіювання, попарне порівняння критеріїв.*

17. Проектная оценка технического состояния судовых конструкций с использованием информационно-поисковых систем / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Вісн. НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 3 (1046). – С. 60–64 *(фахове видання України). – авторський вклад: визначення механізмів проектної оцінки технічного стану конструкцій, участь у розробці інформаційно-пошукової системи.*

18. Фарионова, Т. А. Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Вісн. НУК (електрон. фахове вид. України). – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 155–164. *(електрон. фахове вид. України, входить до НМБ: WorldCAD, BieleFel, Academic) – авторський вклад: вибір та обґрунтування хімічного складу композиційних матеріалів і покриттів, дослідження структури та властивостей, визначення граничних умов експлуатації.*

19. Казимиренко, Ю. А. Исследование процесса получения псевдосплава из порошков бронзы и баббита / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 5 (404). – С. 29–33 *(фахове видання України).*

Патенти

20. Пат. 111654 Україна, МПК В63В3/00. Спосіб захисту конструкцій суден і плавучих споруд від дії іонізуючих випромінювань / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет

кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а201409822 ; заявл. 10.02.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

Статті у наукових і фахових виданнях за спеціальністю 05.17.11

21. Казимиренко, Ю. О. Порошки систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$: переробка відходів і процеси розм'якшення / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 7 (35), vol. 2. – Р. 21–30. – **(іноземне видання, *НМБ eLIBRARY*)**.

22. Казимиренко, Ю. О. Вплив високотемпературних технологій на структуру порожніх мікросфер / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 5 (33), vol. 1. – Р. 41–49 – **(іноземне видання, *НМБ eLIBRARY*)** – **авторський вклад: дослідження структури ПСМ та процесів структуроутворення покриттів на основі Cv-08G2C .**

23. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in Metal-Glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo / Y. Kazymyrenko // The advanced science. – 2016. – Iss. 2. – Р. 38–44. – **(іноземне видання, *входить до НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar, WorldCAD, CNKI Scholar, РИНЦ та ін.*)**.

24. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2016. – Iss. 1. – Р. 90–94. – **(іноземне видання, *НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar та ін.*)**.

25. Казимиренко, Ю. А. Влияние структурной неоднородности полых стеклянных микросфер на физико-химические процессы формирования материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 6/7 (26). – С. 20–25. – **(фахове видання України, *входить до НМБ: Index Copernicus, Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD*)**.

26. Kazimirenko, Y. A. Radiation Resistange of Metal-Glass Coatings for Floating composite structures / Y. A. Kazimirenko, V. V. Schlapatskaya // Shipbulding & marine infrastructure. – 2015. – № 1 (3). – Р. 111–121. – **(фахове видання України, *НМБ eLIBRARY*)** – **авторський вклад: дослідження структури та властивостей покриттів, узагальнення результатів.**

27. Kazymyrenko, Y. Patterns and Mechanisms of interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrats Structure / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2014. – Iss. 12. – P. 45–48. – *(іноземне видання, НМБ: Index Copernicus, CrossRef, Google Scholar, WorldCAD, CNKI Scholar, РИНЦ та ін.)*.

28. Исследование демпфирующих свойств электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 1 (446). – С. 56–59. – *(фахове видання України, НМБ: Index Copernicus, WorldCAD, BASE, CrossRef) – авторський вклад: вибір складу, дослідження структури, визначення впливу об'ємного вмісту ПСМ на коефіцієнт розсіювання енергії*.

29. Казимиренко, Ю. А. Закономерности формирования металлостеклянных материалов и покрытий с повышенными рентгенозащитными свойствами / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2013. – № 6/2 (14). – С. 4–8. – *(НМБ: Index Copernicus, Ulrich's Periodical Directory, DRIVER, BASE, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCAD, EBSCD)*.

30. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством в проектах создания радиационно-стойких композиционных материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – Х. : Технологический центр, 2013. – № 1/10 (61). – С. 171–179. – *(фахове видання України, входить до НМБ: РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Google Scholar) – авторський вклад: постановка завдання, вибір критеріїв якості, узагальнення результатів*.

31. Фарионова, Т. А. Когнитивное моделирование в проектировании композиционных материалов и покрытий / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – Х. : Технологический центр, 2011. – № 1/6 (49). – С. 36–39. – *(фахове видання України, входить до НМБ РИНЦ, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, EBSCD, DOAJ, Google Scholar) – авторський вклад: складання моделі задачі проектування радіаційностійких композиційних матеріалів і покриттів*.

32. Казимиренко, Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій

технічних засобів перевезення радіоактивних речовин / Ю. О. Казимиренко // Вісн. ЛДУ БЖД. – Л. : ЛДУ БЖД, 2013. – № 8. – С. 134–140 (**фахове видання України**).

33. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / **Ю. А. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – № 41, ч. 1. – С. 117–121 (**фахове видання України**). – **авторський вклад**: встановлення взаємозв'язку між структурою і рентгенозахисними властивостями покриттів.

34. Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными микросферами / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Вісн. НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 109–114 (**електрон. Фахове видання України, НМБ: WorldCAD, BieleFeld, Academic**). – **авторський вклад**: дослідження особливостей структури і поверхні поділу фаз у електродугових покриттях.

35. Казимиренко, Ю. А. Формирование электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 1 (424). – С. 81–86 (**фахове видання України**). – **авторський вклад**: вибір складу та дослідження особливостей структури покриттів.

36. Фарионова, Т. А. Применение метода анализа иерархий в задачах проектирования композиционных материалов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Вестн. ХНТУ. – Херсон, 2009. – № 34. – С. 373–377 (**фахове видання України**) – **авторський вклад**: одержання експериментальних зразків, вибір критеріїв оцінювання захисних властивостей.

37. Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 2 (425). – С. 105–109 (**фахове видання України**). – **авторський вклад**: одержання експериментальних зразків, розрахунки рентгенозахисних характеристик, узагальнення результатів.

38. Казимиренко, Ю. А. Структурные особенности формирования металлостеклянных композиционных материалов на основе полых стеклянных микросфер / **Ю. А. Казимиренко**, Г. В. Волков // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2006. – № 6 (411). – С. 81–86 (**фахове видання України**). – **авторський**

вклад: розроблення способу одержання матеріалів, дослідження усадочних процесів та особливостей мікроструктури.

39. Казимиренко, Ю. А. Новые металлостеклянные композиционные материалы на основе полых стеклянных микросфер / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 2 (401). – С. 40–44 (*фахове видання України*).

Патенти на винахід

40. Пат. 74476 Україна, МПК (2004) C22C1/08, B22F3/16. Спосіб одержання пористого матеріалу / Ю. О. Казимиренко. – № а2004032111 ; заявл. 23.03.2004 ; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

41. Пат. 95678 Україна, МПК⁷ C21D 8/00, C22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, Н. Ю. Лебедєва, Ю. О. Казимиренко та ін. – Заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14. – **авторський вклад:** виявлення закономірностей формування нанорозмірних ефектів при ПТО, якій у подальшому апробовано на метал-скляних електродугових покриттях.

Патенти на корисну модель

42. Пат. 90580 Україна, МПК C23C4/00 (2014), C 4/04 (2006). Спосіб нанесення електродугових покриттів / **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедєва, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № 056162013 ; заявл. 30.04.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11 – **авторський вклад:** вибір складу та встановлення впливу об'ємного вмісту ПСМ на коефіцієнт розсіювання енергії.

43. Пат. 97311 Україна, МПК B22F3/14. Спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № 2014819 ; заявл. 08.09.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

44. Пат. 99331 Україна, МПК B22F3/14. Установка для виготовлення порошкових виробів / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № 201414197 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

Опубліковані праці апробаційного характеру

45. Казимиренко, Ю. О. Вплив температурних факторів на структурний стан дисперсних скляних наповнювачів систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 137–139 (очна участь).

46. Казимиренко, Ю. О. Принципи розробки багатофункціональної установки для термдеформаційних способів формування / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 118–120 (очна участь).

47. Казимиренко, Ю. А. Применение экспертных методов для оценки толщины защитного слоя композитных конструкций судов для перевозки радиоактивных грузов / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 155–157 – ***авторський вклад: встановлення взаємозв'язку між проектними факторами*** (очна участь).

48. Казимиренко, Ю. А. Закономерности, процессы и механизмы взаимодействия ионизирующих излучений с металлостеклянными материалами и покрытиями / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 175–178 (очна участь).

49. Казимиренко, Ю. А. Исследование возможности повышения демпфирующих свойств судовых конструкций / **Ю. А. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева // Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 144–146. – ***авторський вклад: вибір складу метал-скляних електродугових покриттів, аналіз взаємозв'язку між структурою матеріалів і властивостями конструкцій*** (очна участь).

50. Коррозионная стойкость композиционных покрытий в агрессивных средах / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали III міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 200–202 – ***авторський вклад: дослідження механізмів руйнування зразків опромінених метал-скляних покриттів у розчинах кислот*** (очна участь).

51. Kazimirenko, J. Innovative projects of radioactive substances transportation and storage hardware creation / **J. Kazimirenko**, T. Farionova, I. Mihelev // Матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв, 2011. – С. 576–577 – *авторський вклад: аналіз сучасних тенденцій транспортування РАВ з урахуванням їх властивостей* (очна участь).

52. Казимиренко, Ю. А. Композиционные материалы для технических и транспортных средств перевозки и хранения опасных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали I міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв, 2010. – С. 142–143 (очна участь).

53. Казимиренко, Ю. О. Научно-методичні підходи до теоретичних і експериментальних досліджень при проектуванні захисних конструкцій плавучих об'єктів для зберігання радіоактивних речовин / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VI всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». У 2 ч. – Миколаїв : НУК, 2016. – Ч. 1. – С. 18–21 (очна участь, пленарне засідання).

54. Казимиренко, Ю. А. Тепловое состояние грузовой зоны плавучих композитных сооружений, предназначенных для хранения радиоактивных веществ / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 31–35 (очна участь).

55. Казимиренко, Ю. А. Проектирование и формирование композитных конструкций плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали IV всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 22–25 (очна участь).

56. Казимиренко, Ю. О. Вплив енергетичних параметрів радіоактивних вантажів на проектування суднових конструкцій біологічного захисту / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 62–64 (очна участь).

57. Казимиренко, Ю. А. Прогнозирование тепловой безопасности композитных плавучих сооружений, предназначенных для транспортировки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали всеукр.

наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 32–35 (очна участь).

58. Применение методов системного анализа и когнитивного моделирования в задачах перевозки опасных грузов водным транспортом / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. «Современные порты – проблемы и решения». – О., 2012. – С. 238–240. – ***авторський вклад: формулювання сюрвейерських задач при транспортуванні небезпечних вантажів водним транспортом*** (заочна участь).

59. Модели и механизмы управления проектами морских перевозок опасных грузов / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Материалы науч.-практ. конф. «Проблемы развития транспортной логистики». – О. : ОНМУ, 2012. – С. 105–108 – ***авторський вклад: узагальнення результатів досліджень*** (заочна участь).

60. Казимиренко, Ю. А. Применение причинно-следственных диаграмм на этапах технологической подготовки судовых композитных конструкций / **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 68–70 (очна участь).

61. Казимиренко, Ю. А. Информационные технологии в проектировании радиационно-стойких материалов и конструкций / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Матеріали X міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 51–52 – ***авторський вклад: постановка задачі дослідження, розробка структурної моделі інформаційної підтримки*** (заочна участь).

62. Фарионова, Т. А. Системный подход к управлению качеством на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации судовых конструкций / **Т. А. Фарионова**, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали IX міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 301–304 – ***авторський вклад: визначення критеріїв якості радіаційно стійких композиційних матеріалів*** (очна участь).

63. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством новых композиционных материалов и покрытий / **Ю. А. Казимиренко**, **Т. А. Фарионова**, И. Л. Михелев

// Матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв, 2011. – С. 130–132 (очна участь).

64. Возный, А. М. Применение когнитивного подхода для проектирования конструкций из радиационно-стойких композиционных материалов / А. М. Возный, **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 49–52 – *авторський вклад: складання моделі задачі, аналіз взаємного впливу факторів* (очна участь).

65. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка принятия решений на этапе эксплуатации судовых конструкций / Ю. А. Казимиренко // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2017. – С. 254–257 (очна участь).

66. Казимиренко, Ю. О. Застосування інформаційних систем в задачах оцінювання експлуатаційних дефектів композиційних конструкцій суден / Ю. О. Казимиренко // Матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2016. – С. 247–250 (очна участь).

67. Фарионова, Т. А. Информационно-поисковые системы для проектирования и оценки технического состояния композитных конструкций судов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2015. – С. 31–35. – *авторський вклад: розроблення інформаційної моделі оцінювання технічного стану* (очна участь).

68. Kazimirenko, Y. A. The use new informational-search systems for assessing technical conditions of ship constructions / **Y. A. Kazimirenko**, T. A. Farionova // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2014. – С. 54–56. – *авторський вклад: дослідження механізмів проектної оцінки технічного стану конструкцій суден* (очна участь).

69. Фарионова, Т. А. Применение когнитивного моделирования в задачах проектирования новых материалов / Т. А. Фарионова, **Ю. А. Казимиренко** // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2013. – С. 53–55. – *авторський вклад: формулювання задачі проектування нових матеріалів, вибір критеріїв когнітивного моделювання* (очна участь).

70. Казимиренко, Ю. А. Формирование изделий судовой арматуры методом горячего прессования / **Ю. А. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедева // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф, присвяч. 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова ; III всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих науковців. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 46–48 – **авторський вклад: розроблення технології формування покриття для ремонту суднової запірної арматури** (очна участь).

71. Термостойкость облученных металлостеклянных покрытий / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали II всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих науковців «Зварювання, споріднені процеси і технології». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 82–83. – **авторський вклад: дослідження механізмів руйнування опромінених покриттів при термоциклічних навантаженнях** (очна участь).

72. Казимиренко, Ю. А. Применение отходов стекольного производства в процессах формирования покрытий для защиты от ионизирующих излучений / Ю. А. Казимиренко // Материалы XXX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 7–10 июня 2010 г., Ялта. – К., 2010. – С. 429–431 (очна участь).

73. Композиционные материалы для защиты от ионизирующих излучений / **Ю. А. Казимиренко**, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 1–5 июня 2009 г., Ялта. – К., 2009. – С. 339–341 – **авторський вклад: систематизація та узагальнення експериментальних результатів досліджень рентгенозахисних властивостей** (очна участь).

74. Казимиренко, Ю. А. Влияние радиационного облучения на фазовый состав стеклокомпозитов / **Ю. А. Казимиренко**, А.А. Жданов // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 30 мая–3 июня 2007 г., Ялта. – К., 2007. – С. 327. – **авторський вклад: аналіз зміни структури у опромінених матеріалах** (очна участь).

75. Казимиренко, Ю. О. Прогнозування напруженого стану двошарових захисних конструкцій в умовах короткочасних температурних навантажень / Ю. О. Казимиренко, І. А. Колесар // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми інженерної механіки». – О., 2017. – С. 48–51. – **авторський вклад: постановка задачі досліджень та визначення умов руйнування конструкцій** (очна участь).

76. Казимиренко, Ю. О. Моделювання термомеханічних процесів у опромінених композиційних покриттях захисних конструкцій суден і плавучих споруд / Ю. О. Казимиренко // Матеріали III міжнарод. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы инженерной механики». – О., 2016. – С. 84–87 (очна участь).

77. Казимиренко, Ю. О. Металоскляні матеріали і покриття захисних конструкцій суден і плавучих споруд, призначених для перевезення та зберігання радіоактивних вантажів / Ю. О. Казимиренко // Матеріали IX міжнарод. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – К. : Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, 2016. – С. 19 (пленарна доповідь).

78. Казимиренко, Ю. О. Структурна неоднорідність порожніх скляних мікросфер натрійсилікатного складу / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. конф. молодих науковців «Актуальні проблеми сучасної хімії». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 28–30 (пленарна доповідь).

Публікації, які додатково відображають наукові результати

79. Інженерне матеріалознавство : підручник для студ. вищ. навч. закл. (з грифом МОНУ) / О. М. Дубовий, **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедєва та ін. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с. – **авторський вклад: частина 4: «Неметалеві матеріали», р. 12 і 13 в ч. 1.**

80. Казимиренко, Ю. О. Методичні вказівки до виконання курсової і лабораторних робіт з дисципліни «Дисперсні матеріали та композити» / **Ю. О. Казимиренко**, А. А. Карпеченко. – Миколаїв : НУК, 2018. – 98 с. – **авторський вклад: постановка лабораторних робіт з дослідження неметалічних порошків, процесів їх пресування та спікання.**

81. Казимиренко, Ю. А. Инновационные проекты защиты технических средств перевозки и хранения радиоактивных веществ / **Ю. А. Казимиренко**, Т. А. Фарионова, С. О. Слободян // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2010. – С. 117–120. – **авторський вклад: визначення етапів комплексного захисту конструкцій технічних засобів (очна участь).**

ЗМІСТ

ЧАСТИНА 1

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕННЯ, ПОЯСНЕННЯ	35
ВСТУП	39
<i>Розділ 1 Елементи біологічного захисту суден та плавучих споруд для радіоактивних вантажів: наукові проблеми конструювання, проектування і підвищення захисту за участю неметалічних матеріалів з полі- та ультрадисперсною структурою</i>	51
1.1 Спеціалізовані судна та плавучі споруди, транспортне обладнання, нормативна база, класифікація, властивості, умови зберігання і перевезення радіоактивних вантажів	51
1.2 Умови експлуатації та сучасні напрямки застосування неметалічних і ультрадисперсних металоматричних матеріалів для формування шаруватих захисних конструкцій суден	67
1.3 Сучасний досвід застосування стекол в технологіях ізолювання радіоактивних відходів. Радіаційні ефекти у стеклах.	74
1.4 Використання порожніх скляних мікросфер у технологіях виготовлення суднобудівних та рентгенозахисних матеріалів: досвід застосування, хімічний склад, фізико-хімічні процеси одержання	78
1.5 Теоретичні та технологічні передумови з'єднання стекол з металами	82
1.6 Проблемні питання проектування елементів біологічного захисту для суден та плавучих споруд	93
1.6.1 Сучасна практика проектування: головні завдання, наукові школи, провідні організації	93
1.6.2 Дослідження теплових процесів в задачах проектування і безпечного зберігання радіоактивних вантажів	96
1.6.3 Задачі міцності і радіаційної стійкості при проектуванні елементів біологічного захисту	101
1.6.4 Корозійні пошкодження цистерн для рідких радіоактивних вантажів, вихід з ладу запірної арматури та технологічні напрямки підвищення захисту	104

1.6.5 Методи, критерії та інформаційні ресурси оцінювання технічного стану суднових конструкцій на етапах проектування, технологічної підготовки і експлуатації	109
1.7 Висновки з аналітичного огляду літератури, формулювання протиріч та недосліджених частин проблеми.	115
Розділ 2 Теоретичне обґрунтування науково-технічної проблеми і методологія постановки дисертаційного дослідження	122
2.1 Архітектура та постановка дисертаційного дослідження	122
2.2 Характеристика елементів біологічного захисту як об'єктів проектування	126
2.3 Наукове підґрунтя, гіпотези, інформаційні ресурси для постановки та розв'язання задач конструювання і проектування елементів біологічного захисту	130
2.4 Методологічні основи розробки нових матеріалів і покриттів з комплексно-захисними властивостями	137
2.5 Висновки до розділу 2	152
Розділ 3 Фізико-хімічні процеси спікання порожніх скляних мікросфер з порошками алюмінію та структуроутворення метал-скляних електродугових покриттів на поверхні СтЗ	154
3.1 Дослідження хімічного складу, морфології, структури, процесів розм'якшення скляних порошків і мікросфер систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	154
3.1.1 Одержання скляних порошків і методи їх дослідження	154
3.1.2 Результати досліджень хімічного складу, морфології та структури скляних порошків	156
3.1.3 Результати досліджень структури порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	164
3.2 Установка для спікання, гарячого пресування та дослідження термдеформаційних процесів порошкових сумішей	173
3.3 Фізико-хімічні процеси спікання порожніх скляних мікросфер з порошком та пудрою алюмінію	180
3.3.1 Обґрунтування та вибір технологічних параметрів спікання порожніх скляних мікросфер з порошками алюмінію; одержання і методики дослідження експериментальних зразків	180

3.3.2 Вибір хімічного складу, виготовлення, дослідження структури та властивостей клейової композиції	184
3.3.3 Дослідження процесів усадки, фазо- і структуроутворення при спіканні порожніх скляних мікросфер з порошком та пудрою алюмінію	186
3.3.4 Результати порівняльних досліджень спікання порожніх скляних мікросфер з порошками інших металів	190
3.4 Фізико-хімічні процеси структуроутворення на поверхні Ст3 електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених скляними порошками та мікросферами	193
3.4.1 Підготовка і методики дослідження зразків	193
3.4.2 Вплив порошків стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ на адгезійні та когезійні процеси формування електродугових покриттів	195
3.4.3 Вплив структури скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ на фізико-хімічні процеси формування електродугових покриттів	202
3.4.4 Результати порівняльних досліджень напилення електродугових покриттів з керамічними мікросферами	208
3.5 Висновки до розділу 3	209
Розділ 4 Комплексно-захисні властивості спечених склоалюмінієвих матеріалів і метал-скляних електродугових покриттів	214
4.1 Вплив пористості і об'ємного вмісту скляних наповнювачів на ефективні механічні властивості метал-скляного захисного шару конструкцій	214
4.2 Розрахунково-експериментальні дослідження демпфувальних властивостей метал-скляних електродугових покриттів з урахуванням впливу порожніх скляних мікросфер	223
4.3 Теоретично-експериментальні дослідження теплофізичних властивостей метал-скляних матеріалів і покриттів	228
4.4 Постановка експериментальних досліджень рентгенозахисних властивостей матеріалів і покриттів	231

4.5 Узагальнена модель послаблення іонізуючих випромінювань елементарною коміркою	235
4.6 Вплив γ -випромінювань на структуру і властивості метал-скляних електродугових покриттів; дослідження їх екрануючої здатності	242
4.7 Термомеханічні процеси в опроміненому метал-скляному захисному шарі	252
4.7.1 Термомеханічна модель поведінки опроміненого захисного метал-скляного шару в умовах теплових ефектів	253
4.7.2 Модель поверхневого зміцнення метал-скляних електродугових покриттів дифузним потоком іонізуючих випромінювань	259
4.8 Експериментальні дослідження термостійкості опромінених метал-скляних електродугових покриттів	263
4.9 Термостійкість та горючість клейових з'єднань	266
4.10 Корозійна стійкість опромінених метал-скляних електродугових покриттів у розчинах кислот	268
4.11 Висновки до розділу 4	274
Розділ 5 Науково-методичні принципи оцінювання технічного стану суднових композитних конструкцій на етапах проектування, виготовлення та експлуатації	279
5.1 Задачі оцінювання технічного стану та багатокритеріальна оцінка якості композитних конструкцій	279
5.1.1 Систематизація технологічних дефектів за допомогою побудови причинно-наслідкових діаграм	280
5.1.2 Взаємозв'язок проектних і експлуатаційних факторів	286
5.2 Аналіз критеріїв пошкоджуваності та систематизація експлуатаційних дефектів матеріалів конструкцій	296
5.3 Інформаційна підтримка оцінювання технічного стану композитних конструкцій суден та плавучих споруд	301
5.3.1 Розробка моделі та структури спеціалізованої інформаційно-пошукової системи « <i>PROTECTIVE COATINGS DATA</i> »	301
5.3.2 Принципи формування та заповнення інформаційно-пошукової системи « <i>PROTECTIVE COATINGS DATA</i> »	304

5.3.3 Застосування інформаційно-пошукової системи « <i>PROTECTIVE COATINGS DATA</i> » на етапах проектування і технологічної підготовки конструкцій	308
5.3.4 Застосування інформаційно-пошукової системи « <i>PROTECTIVE COATINGS DATA</i> » для оцінювання експлуатаційних дефектів конструкцій	311
5.4 Алгоритм оцінювання технічного стану композитних конструкцій	314
5.5 Висновки до розділу 5	317
Розділ 6 Проектне обґрунтування та технологічні рекомендації щодо виготовлення модульного елемента біологічного захисту для суховантажного судна	319
6.1 Аналіз проектно-технологічних факторів з вибором матеріалів	319
6.2 Технологічні рекомендації щодо виготовлення та монтажу панелей модуля на судні	324
6.3 Вплив зниження масогабаритних показників модуля біологічного захисту на міцність і завантаженість судна	327
6.3.1 Вибір транспортного обладнання для перевезень рудних уранових концентратів	328
6.3.2 Визначення габаритних розмірів і координат центра тяги модуля біологічного захисту на початкових етапах проектного аналізу	330
6.4 Модель функціонування судна	333
6.5 Моделювання процесів руйнування панелей модуля біологічного захисту у пожежонебезпечних ситуаціях на судні	349
6.6. Висновки до розділу 6	354
Розділ 7 Проектне дослідження та вибір раціональної конструкції блоків біологічного захисту плавучих споруд за обмеженнями потужності остаточного тепловиділення радіоактивних вантажів	357
7.1 Постановка завдань проектного дослідження	358
7.2 Взаємозв'язок між енергетичними характеристиками радіоактивних вантажів і проектними параметрами блоку біологічного захисту плавучої споруди	360

7.3 Результати числового моделювання теплового стану вантажної зони	366
7.4 Визначення обмежень щодо остаточного тепловиділення радіоактивних вантажів. Доцільність зменшення товщини бетонного шару	375
7.5 Технологічні заходи щодо реалізації конструктивних змін блока біологічного захисту з урахуванням агрегатного стану радіоактивних вантажів	385
7.6 Технологічні рекомендації щодо виготовлення та ремонту деталей запірної арматури вантажних систем	393
7.7 Висновки до розділу 7	399
Розділ 8 Економічна ефективність, рекомендації та впровадження результатів розробок	402
8.1 Інноваційна привабливість та впровадження розробок	402
8.1.1 Загальна характеристика інноваційної привабливості дисертаційного дослідження	402
8.1.2 Вибір та аналіз критеріїв оцінювання інноваційного розвитку будівництва суден для радіоактивних вантажів	403
8.1.3 Впровадження результатів роботи у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова	411
8.1.4 Впровадження результатів роботи у проектні організації, науково-дослідні та виробничі установи	415
8.2 Техніко-економічні показники та технологічні рекомендації щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток, нанесення метал-скляних покриттів і ремонту деталей суднової запірної арматури	416
8.2.1 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток та клейової композиції для облицювання сталевих поверхонь	416
8.2.2 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо нанесення метал-скляних електродугових покриттів	421
8.2.3 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо виготовлення та ремонту деталей суднової запірної арматури	425

8.2.4 Технологічна собівартість і економічна ефективність від впровадження нових матеріалів і покриттів	431
8.3 Оптимальний вибір конструктивного рішення щодо біологічного захисту на основі критеріїв технологічності і економічної ефективності	433
8.4 Висновки до розділу 8	440
ВИСНОВКИ	443
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	449
ЧАСТИНА 2 (окремий том)	
<i>Додаток А</i> Нормативна документація	3
<i>Додаток Б</i> Постановка експериментальних досліджень	15
<i>Додаток В</i> Установка для термодетформаційних процесів формування матеріалів. Інструкція з експлуатації	27
<i>Додаток Г</i> Тексти комп'ютерних програм	37
<i>Додаток Д</i> Патенти і акти впровадження результатів дисертаційної роботи	73
<i>Додаток Е</i> Список публікацій здобувача за темою дисертації	117

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АЕС – атомна електростанція

БД – база даних

ВЯП – відпрацьоване ядерне паливо

ДТА – диференціальний термічний аналіз

ЕДН – електродугове напилення

ІПС – інформаційно-пошукова система

ККУ – кінетичні криві усадки

КМ – композиційні матеріали

МРСА – мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз

НПА – низька питома активність (вантажів)

НДС – напружено-деформований стан

НМБ – науко-метрична база

ОКР – області когерентного розсіювання

ОПРЗ – об'єкти з поверхневим радіоактивним забрудненням

ПСМ – порожні скляні мікросфери

ПТО – передрекristалізаційна термічна обробка

РАВ – радіоактивні вантажі

РВ – рентгенівське випромінювання

РЗКМ – радіаційно захисні композиційні матеріали

РМ – радіоактивні матеріали

РСА – рентгеноструктурний аналіз

ТКЛР – температурний коефіцієнт лінійного розширення

ТПК – транспортно-пакувальний комплект

ПОЗНАЧЕННЯ

A – активність РАВ

Q – потужність остаточного тепловиділення РАВ

I_0 – інтенсивність падаючого потоку

I – інтенсивність потоку на виході

D – поглинена доза випромінювань

E – енергія ізотопів

δ – товщина шару матеріалу або покриття

$\delta_{кр}$ – товщина шару половинного поглинання

$\delta_{Рb}$ – свинцевий еквівалент

μ – лінійний коефіцієнт послаблення випромінювань

$\mu_{мас}$ – масовий коефіцієнт послаблення випромінювань

α^* – ефективний ТКЛР;

G^* – ефективний модуль зсуву

ϑ_m, ϑ_s – об'ємний вміст металу і скла у складі композицій

η_o – частка пористості у металевій матриці

η_z – частка закритої пористості, яка знаходиться всередині мікросфер, тобто прирівнюється до об'ємного вмісту ПСМ у складі композицій

K'_m – об'ємний модуль пружності металевої матриці

K_c – об'ємний модуль пружності матеріалу скляних включень

K_m – умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці

K_s – умовний модуль об'ємного стискання скляної мікросфери

σ_t – тангенціальні напруження на поверхні поділу фаз у композиційних матеріалах і покриттях

$\sigma_t^{(0)}$ – тангенціальні напруження на поверхні виділеної комірки

P – тиск пресування

Ψ – коефіцієнт розсіювання енергії

U – поверхнева швидкість поширення корозії

ПОЯСНЕННЯ

<i>Термінологія</i>	
<i>Блок біологічного захисту</i> – елемент блочного типу, який являє собою велику монтажну одиницю із замкненими відсіками або приміщеннями та монтажним насиченням; у більшості випадків встановлюються на плавучих спорудах	<i>Концептуальні положення підвищення комплексного захисту конструкцій і елементів суден</i> – система положень, покладених в основу теорії захисту, які являють собою нові закономірності, уявлення та механізми, що забезпечують ефективний захист від шкідливої дії РАВ при їх транспортуванні і зберіганні на судах та плавучих спорудах
<i>Елемент біологічного захисту</i> – елемент судна або плавучої споруди модульної або блочної конструкції, який розташовано у вантажній зоні та відокремлює упаковані у контейнери або неупаковані РАВ від інших вантажів, обладнання та персоналу	<i>Науково-технічний рівень проектування</i> – нерегламентований показник кваліфікації інженерних кадрів, пов'язаний з постановкою та розв'язанням проектних завдань, який визначається скороченням часу на їх опрацювання за рахунок наданих готових оптимізаційних рішень, застосування нових інформаційних та проектних технологій
<i>Модуль біологічного захисту</i> – збірно-розбірний елемент судна, встановлюється у трюмі та складається з жорстко-закріплених панелей шаруватої конструкції	<i>Теорія захисту елементів суден</i> – теорія, яка на рівні закономірностей вивчає взаємодію матеріалів конструкцій зі шкідливим середовищем, зокрема радіоактивними речовинами
<i>Сталійний час</i> – (англ. Laytime) – термін (у торговельному мореплавстві), протягом якого здійснюється завантаження судна без додаткових платежів до суми фрахту.	<i>Тимчасове зберігання РАВ</i> – період часу зберігання радіоактивних відходів (до 100 років) перед переробкою або захороненням
<i>Технічний стан</i> – сукупність властивостей та інших ознак об'єкта, які змінюються протягом експлуатації та безпосередньо впливають на надійність, довготривалість та інші показники	<i>Тепловий стан</i> вантажної зони – поля розподілу температур і швидкостей повітря, визначені за результатами моделювання процесів теплообміну та застосовані для аналітичного оцінювання пожежонебезпечних ділянок на судні або плавучій споруді

<i>Характеристики радіоактивних вантажів</i>	
<i>Відбите випромінювання</i> – однократно або багаторазово обернено розсіяне випромінювання самого джерела, а також вторинне випромінювання того самого виду, що й випромінювання джерела, яке виникає у результаті взаємодії первинного випромінювання з середовищем	<i>Енергетичні характеристики РАВ</i> – температура, інтенсивність іонізуючих випромінювань, сумарна активність радіоактивних вантажів, їх остаточне тепловиділення
<i>Дифузне іонізуюче випромінювання</i> – випромінювання, що не має переважного напрямку розповсюдження	<i>Рівень випромінювання</i> – відповідна потужність дози, виражена у мілізівертах на годину
<i>Інтенсивність іонізуючого випромінювання</i> – кількість енергії випромінювання, яка проходить за 1 с через площадку 1 м ² , розташовану перпендикулярно до проходження променів	<i>Остаточне тепловиділення РАВ</i> – специфічна особливість радіоактивних речовин, яка є наслідком розпаду накопичених продуктів, що при переході у стабільний стан виділяють певну кількість тепла
<i>Матеріали і системи</i>	
<i>Структурні елементи</i> – геометричні складові структури композиційних матеріалів і покриттів: включення, ультра- і мікропори, зерна, кристаліти, блоки; <i>субструктурні елементи</i> – елементи структури матеріалу, лінійні розміри яких менші за роздільну здатність мікроскопа	<i>Синтактики</i> – композиційні матеріали, до складу яких входять порожні скляні мікросфери; <i>синтактичне піноскло</i> – композиційний матеріал, одержаний спіканням порожніх скляних мікросфер без додатків
<i>Скляний порошок системи Na₂O–CaO–SiO₂</i> – порошок, одержаний здрібненням бою кришталевого посуду, до складу якого входять оксиди К і Pb; перебуває переважно у рентгеноаморфному стані, з кристалічних модифікацій є характерними лінії NaO·2SiO ₂ ; у технологічних розділах вживається термін «порошок натрійсилікатного скла»	<i>Скляний порошок системи K₂O–PbO–SiO₂</i> – порошок, одержаний здрібненням бою рентгенозахисного оптичного скла, до складу якого також входять оксиди Na, Ca, Ti, Fe, Cr; перебуває переважно у рентгеноаморфному стані; у технологічних розділах вживається термін «порошок свинцевмісного скла»
<i>Порожні скляні мікросфери системи Na₂O–B₂O₃–SiO₂</i> – закриті тонкостінні сферичні оболонки, наповнені в середині SO ₃ , одержані шляхом грануляції у воду багатокомпонентної шихти, до складу якої також входять оксиди Ca і Zn; мають мікрогетерогенну будову; у технологічних розділах вживається термін «скляні мікросфери натрійсилікатного складу»	<i>ПСМ–Al-порошок</i> – композиційний матеріал, одержаний спіканням порожніх скляних мікросфер з порошком алюмінію; <i>ПСМ–Al-нудра</i> – композиційний матеріал, одержаний спіканням порожніх скляних мікросфер з порошком алюмінію

ВСТУП

Актуальність теми. Рішення проблеми транспортування і тимчасового зберігання радіоактивних вантажів (РАВ) у світовій практиці реалізується шляхом створення спеціалізованих суден, плавучих баз і сховищ. Підвищення їх техніко-економічних та експлуатаційних показників залежить від впровадження нових проектних підходів, що враховують енергетичні характеристики вантажів, включають у себе розвиток методів оцінювання технічного стану і ґрунтуються на теоретичних засадах підвищення захисту функціональних елементів від шкідливої дії РАВ, що не можливе без створення нових матеріалів та покриттів, хімічний склад, структура і властивості яких забезпечать певні механізми послаблення іонізуючих випромінювань та їх спроможність працювати в умовах хімічно активних речовин, підвищених температур і термоциклічних навантажень при зберіганні радіоактивних вантажів з остаточною тепловиділенням. Сучасний досвід поводження з радіоактивними речовинами ґрунтується на застосуванні для виготовлення екрануючих елементів матеріалів з ультра- та полідисперсною структурою, компонентами яких можуть бути речовини з різною поглинаючою здатністю, зокрема скло з металами, технологічні передумови з'єднання яких передбачають застосування високотемпературних технологій з ретельним підбором компонентів за функціональними властивостями, серед яких особлива увага надається дисперсним системам у вигляді скляних порошків і мікросфер.

Суть науково-технічної проблеми полягає у розробці принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом високотемпературних технологій поєднання скляних мікросфер і порошків з металами. В основу дисертаційного дослідження покладено **наукову гіпотезу** про підвищення ефективності біологічного захисту на судах і плавучих спорудах шляхом проектування багатошарових елементів, де

максимальна енергія іонізуючих і теплових випромінювань РАВ послаблюється захисним шаром, в основу формування якого покладений механізм багаторазового внутрішнього відбивання потоку у середовище поглинання через поєднання металу зі склом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках діючих загальноцільових програм: економічної програми розвитку кораблебудування на період до 2035 р. (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 06.05.2009 р.), програми 2007–2017 рр. поводження з радіоактивними відходами (Закон України від 17.09.2008 р. № 516-VI); у відповідності з Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 3715-VI від 08.09.2011 р. (редакція від 05.12.2012 р.), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011–2021 рр., п. 2 «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- та суднобудування, озброєння і військової техніки»; планами науково-дослідницьких робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) за держбюджетними темами: № 1555 «Дослідження впливу термодеоформаційних, електрофізичних та газодинамічних процесів на формування структури і властивостей порошкових матеріалів і напилених покриттів» (ДР № 0105Г001766) – виконавець; № 1674 «Теоретичні і технологічні основи створення комплексно-захисних матеріалів і покриттів для засобів зберігання та транспортування небезпечних речовин» (ДР № 0108U001169) – відповідальний виконавець; № 1852 «Наукові основи формування наноструктурних елементів у пластично деформованих металах та прогнозування фізико-механічних властивостей наноструктурних металокомпозитів» (ДР № 0112U000350) – виконавець; № 1988 «Наукові основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів із металів і сплавів формуванням наноструктурних елементів термічною обробкою та електроімпульсною дією» (ДР № 0115U00299) – виконавець; № 1991 «Розвиток проектів та програм

інтеграції української технічної освіти у світовий освітній процес» (ДР № 0115U000301) – виконавець.

Об’єкт досліджень – процеси підвищення комплексного захисту елементів суден для РАВ, вибору раціональних конструктивних рішень, теплообміну у вантажній зоні плавучих споруд, міцності та пошкоджуваності конструкцій; фізико-хімічні процеси створення нових метал-скляних матеріалів і покриттів, процеси спікання скляних мікросфер з порошками металів, кристалізації скляних порошків і мікросфер при спіканні та електродуговому напиленні, їх впливу на рентгенозахисні властивості та радіаційну стійкість матеріалів і покриттів, термомеханічні процеси у опромінених метал-скляних покриттях.

Предмет досліджень – закономірності впливу енергетичних характеристик РАВ на проектні параметри елементів суден та плавучих споруд, механізми послаблення іонізуючих випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів.

Мета роботи полягає у створенні наукових засад проектування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, які спрямовані на підвищення техніко-експлуатаційних показників та ґрунтуються на принципах послаблення випромінювань, теплової безпеки та теорії їх захисту з розробкою фізико-хімічних основ створення нових матеріалів і покриттів з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення. Для досягнення поставленої мети визначено наступні науково-технічні завдання:

1) проведення аналітичного огляду сучасного наукового досвіду з проблематики проектування і підвищення захисту елементів суден та плавучих споруд для радіоактивних вантажів; теоретичних і технологічних тенденцій створення поліфункціональних матеріалів для суднобудування на основі скла;

2) створення теоретичних засад підвищення комплексного захисту елементів суден від шкідливої дії РАВ з розробленням нових матеріалів і покриттів, структура та властивості яких забезпечать зниження інтенсивності

потоків γ - і рентгенівських випромінювань, міцність під дією теплових ефектів та надійну експлуатацію в умовах судна;

3) розроблення фізико-хімічних основ поєднання в одній композиції скляних і металевих компонентів методами спікання та електродугового напилення з встановленням закономірностей впливу аморфного і кристалічного стану скла на структуру та експлуатаційні властивості композиційних матеріалів і покриттів;

4) розроблення нових науково-методичних засад оцінювання технічного стану захисних суднових конструкцій, що ґрунтуються на принципах систематизації та оновлення інформації щодо пошкоджуваності матеріалів в умовах опромінення, термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ і взаємозв'язку проектних, технологічних та експлуатаційних факторів;

5) вирішення конструкторських завдань щодо удосконалення конструкції модуля біологічного захисту за допомогою розроблених матеріалів і покриттів із розв'язанням задач міцності в екстремальних умовах експлуатації;

6) розроблення нових теоретичних підходів до проектування модулів і блоків біологічного захисту з вибором конструктивно-компонувальних рішень на основі експлуатаційних критеріїв та обмежень за енергетичними характеристиками РАВ;

7) розроблення ремонтних заходів деталей запірної арматури вантажних систем плавучих споруд для рідких РАВ, технологічних рекомендацій щодо виготовлення конструкцій за участю нових матеріалів та покриттів з визначенням техніко-економічних показників і розв'язанням оптимізаційних задач за технологічними та вартісними критеріями;

8) визначення інноваційних перспектив розвитку проектів будування і модернізації суден, визначення економічної ефективності наукових розробок та їх апробація у проектних, виробничих і наукових організаціях та навчальному процесі у вищі.

Методи досліджень. Для вирішення завдань щодо конструювання та проектування блоків і модулів біологічного захисту використано методи:

оптимального проектування на основі моделей функціонування судна, балансу мас і балансу площ, проектування інтелектуальних систем для управління процесами завантаженості судна, скінчених об'ємів і комп'ютерної алгебри для числового моделювання процесів теплообміну та розв'язання задач міцності, системотехнічний підхід і принципи максимальної експлуатаційної ефективності судна. Для розробки науково-методичних засад оцінювання технічного стану використано методи системного аналізу, класичні технології проектування баз даних; інформацію щодо пошкоджуваності матеріалів одержано в результаті мікроструктурних досліджень, механічних, корозійних та термоциклічних випробувань за стандартними методиками; обробку експериментальних результатів здійснено з використанням методів математичної статистики. Закономірності структуроутворення матеріалів і покриттів виявлено за допомогою методів оптичної (мікроскопи ММР-2Р і БІОЛАМ-І) та електронної мікроскопії (РЭММА-102-02), рентгеноструктурного (ДРОН-3, ДРОН-4) і мікрорентгеноспектрального (РЭММА-102-02) аналізу, підґрунтям для чого є положення хімії твердого тіла та склоподібного стану, що також застосовано для досліджень дифузійних процесів на межі підкладка–покриття. Фізико-математичні моделі, що описують термомеханічні процеси при опроміненні, одержано розв'язанням задач мікромеханіки та термопружності.

Інформаційну базу досліджень становлять Регістр судноплавства України, норми МАГАТЕ, нормативні документи Міжнародних конвенцій, законодавча база України; наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених з конструювання, проектування і будування суден, розробки новітніх технологій захисту конструкцій за участю радіаційно стійких матеріалів, виготовлених на основі скла, технологій спікання скляних порошків, виготовлення скляних мікросфер; періодичні видання, інтернет-ресурси.

Обґрунтованість, достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректною постановкою завдань досліджень, застосуванням стандартних методів, математико-статистичною обробкою отриманих даних з прийнятою точністю; узгодженістю результатів

моделювання теплового стану у вантажній зоні з розв'язанням задач у спряженій і плоскій постановці та результатами числових експериментів когнітивного моделювання, збіганням результатів моделювання руйнування панелей модуля біологічного захисту при короткочасному температурному навантаженні з результатами досліджень термостійкості; порівняльними дослідженнями спікання скляних мікросфер крім порошку Al з іншими металевими порошками та застосуванням в технологіях електродугового напилення крім скляних, керамічних мікросфер; узгодженістю результатів досліджень експлуатаційних властивостей розроблених матеріалів і покриттів з їх відомими сучасними аналогами. Обґрунтованість наукових положень полягає у ретельному аналізі наукових праць у предметній області, збіганні отриманих результатів з роботами інших авторів.

Наукова новизна отриманих результатів.

за спеціальністю 05.08.03:

Вперше:

– науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід до проектування елементів плавучих споруд, який пов'язує енергетичні параметри радіоактивних вантажів з геометричними розмірними блоками, товщинами і теплопровідністю кожного з шарів біологічного захисту і дає змогу, отримуючи інформацію про розподіл температур та циркуляцію повітря, встановлювати проектні обмеження щодо потужності остаточного тепловиділення РАВ у межах 2...20 кВт та обирати оптимальні конструктивно-компонувальні рішення на основі обмежень за потужністю остаточного тепловиділення [7, 8];

– розроблено концептуальні положення підвищення комплексного захисту блоків і модулів, які полягають у створенні принципово нового за складом і властивостями метал-скляного захисного шару, який завдяки механізму багаторазового внутрішнього відбивання потоку у середовище поглинання відрізняється від сучасних аналогів структурною стабільністю і підвищеними на 30...40 % значеннями масового коефіцієнта послаблення рентгенівських випромінювань $\mu_{\text{мас}}$, поглинає 28...56 % енергії γ -випромінювань та захищає сталеві конструкції від корозійної дії хімічно

активних речовин при транспортуванні РАВ на спеціалізованих суднах і плавучих спорудах [1, 5, 9, 13, 26].

Удосконалено:

– та поглиблено систему показників якості композитних конструкцій на етапах виготовлення і експлуатації, взаємний вплив яких реалізований через причинно-наслідкові діаграми та когнітивні моделі, що розширює наукові уявлення про комплексну оцінку формування в динаміці техніко-експлуатаційних показників при проектуванні елементів біологічного захисту [15–18, 26];

– теоретичний підхід до проектування модулів біологічного захисту, який враховує конструктивні зміни шляхом комплексного захисту, його раціональне розташування на суховантажному судні разом з іншими вантажами і включає в себе розробку нової аналітичної моделі функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості та алгоритмізацію вантажних операцій за дотриманням умов міцності [3, 14, 20];

– принципи оптимального вибору раціонального конструктивного рішення для елементів біологічного захисту шляхом формування комплексного коефіцієнту технологічності, які ґрунтуються на порівнянні різних варіантів конструкцій з урахуванням нових матеріалів і технологій захисту, що є необхідним для розробки організаційно-технічних заходів та прогнозування динаміки формування факторів економічної ефективності [10].

Набули подальший розвиток:

– метод оцінювання технічного стану композитних конструкцій суден і плавучих споруд, науково-методичні принципи якого на відміну від існуючих ґрунтуються на систематизації інформації щодо появи та розповсюдження дефектів у матеріалах і покриттях в умовах опромінення, термоциклічного навантаження, впливу хімічно активних середовищ та реалізовані через розробку інформаційних і когнітивних моделей, побудову алгоритму та причинно-наслідкових діаграм, що встановлює взаємний зв'язок між проектними і технологічними факторами на етапах проектування, виготовлення та експлуатації елементів біологічного захисту [11, 12];

– наукові уявлення про механізми руйнування шаруватих суднових конструкцій під дією теплових ефектів, в основу чого покладено теоретично і експериментально підтверджену гіпотезу про руйнування конструкцій через пошкодження у захисному метал-скляному шарі, що дає змогу на мікро- та нанорівні прогнозувати граничні умови експлуатації в діапазоні температур 50...500 °С під час транспортування і зберігання РАВ з остаточним тепловиділенням, термоциклічних навантажень, виникненні на судні пожежонебезпечних ситуацій [1, 2, 6, 8].

за спеціальністю 05.17.11:

Вперше:

– теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість спікання порожніх скляних мікросфер (ПСМ) натрійборсилікатного складу з порошками алюмінію (у 50 % об'ємному співвідношенні) зі встановленням закономірностей, які ґрунтуються на ліквідаційних процесах з поліморфними перетвореннями у структурно неоднорідних стінках ПСМ під час гарячого пресування ($P = 0,7...1,2$ МПа) в діапазоні температур 500...800 °С, що надає нові фізико-хімічні уявлення про спікання скляних мікросфер з металами з апробацією результатів на порошках бронзи і бабіту [21, 25, 36, 38–40];

– виявлено закономірності структуроутворення та створено теоретичні передумови для технології формування рівномірного метал-скляного захисного шару із заданими фізико-механічними і захисними властивостями по поверхні сталі марки Ст3 шляхом електродугового напилення суцільнотягнутих дротів Св-АМг5 і Св-08Г2С, до складу яких вперше додано натрійборсилікатні порожні скляні мікросфери, а також порошки, одержані сухим розмелом бою стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, що поглиблює наукові уявлення про фізико-хімічні процеси утворення і накопичення склофази з формуванням міцного зв'язку на поверхні метал–скло [22, 25, 40, 41];

– науково обґрунтовано та встановлено вплив скляних мікросфер і порошків на ефект поверхневого зміцнення (у 2...2,5 рази) електродугових покриттів із Св-08Г2С і Св-АМг5, напилених на Ст3, в умовах γ -

випромінювань Co^{60} , модель якого враховує структурні особливості опромінених зон та гальмування скляними включеннями поверхневої пористості через утворення концентрації напружень на поверхні метал–скло, що дає змогу розв’язувати конструкторські задачі щодо прогнозування міцності при транспортуванні на судах радіоактивних вантажів [26, 27, 29].

Набули подальший розвиток наукові уявлення:

– про розроблення нових складів полі- та ультрадисперсних матеріалів і покриттів з переважним впливом на механізми послаблення γ - і рентгенівських випромінювань структурних елементів, а саме порожніх скляних мікросфер, суцільних скляних частинок за рахунок їх металізації під час введення до електродугових покриттів або спікання з порошками алюмінію та формування субструктурних елементів на поверхні поділу метал–скло, що дає змогу визначати необхідні товщини та прогнозувати екрануючу здатність при проектуванні елементів біологічного захисту на судах і плавучих спорудах [27, 29, 32, 34, 35];

– про термомеханічні процеси у опромінених покриттях, наповнених ПСМ, які описані через температурні деформації мікрооб’ємів метал-скляного захисного шару, модель яких враховує, на відміну від існуючих аналогів, вплив пористості (10...20 %) і дисперсності скляних мікросфер (20...100 мкм), що дає змогу встановити граничні умови його застосування в діапазоні температур 50...500 °C і покладено в основу теорії руйнування конструкцій та елементів суден [23, 26].

Удосконалено:

– аналітичний опис взаємозв’язку між структурою композицій зі скляними дисперсними включеннями та їх механічними властивостями, який для склоалюмінієвих спечених матеріалів і метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5 наведено через ефективні пружні модулі, що дає змогу прогнозувати ефективність експлуатації шаруватих судових конструкцій в умовах температурних навантажень і пожежонебезпечних ситуацій на судні [8, 24].

Значущість результатів роботи для науки полягає:

за спеціальністю 05.08.03 – у створенні нового наукового напрямку в теорії проектування елементів біологічного захисту суден та плавучих споруд, який ґрунтується на принципах комплексного захисту конструкцій від шкідливої дії радіоактивних вантажів і відведення тепла з найбільш розігрітих ділянок та містить знання про процеси розподілу температур і циркуляції повітря у вантажній зоні, поглинання енергії матеріалами конструкцій та їх знеміцнення, накопичення у них експлуатаційних дефектів;

за спеціальністю 05.17.11 – у розробленні наукових засад створення нових матеріалів і покриттів для захисту елементів суден від радіоактивних вантажів, які включають у себе нові наукові уявлення про фізико-хімічні процеси з'єднання скла з металами при спіканні та електродуговому напиленні, механізми послаблення випромінювань структурними елементами і про вплив скляних включень на розвиток термомеханічних та корозійних процесів з визначенням граничних умов їх експлуатації.

На захист виносяться основні наукові результати роботи – сукупність наукових засад, спрямованих на підвищення комплексного захисту елементів суден від шкідливої дії РАВ шляхом розроблення нових метал-скляних матеріалів і покриттів та їх реалізацією у створенні нових проектних підходів і науково-методичних принципів оцінювання технічного стану.

Практичне значення отриманих результатів полягає:

за спеціальністю 05.08.03 – у розробленні науково обґрунтованих проектних, технологічних, методичних рекомендацій щодо вибору раціональних конструкторських рішень, прогнозування умов теплової безпеки та умов руйнування конструкцій з узагальненням інформації щодо їх пошкоджуваності, виготовлення і ремонту деталей запірної арматури вантажних систем; аналітичній оцінці інноваційного розвитку проектування та будування суден для радіоактивних вантажів, розгорнутій характеристиці техніко-економічних показників;

за спеціальністю 05.17.11 – у розробленні принципово нових складів комплексно-захисних матеріалів і покриттів для суднобудування, науково

обґрунтованих практичних рекомендацій щодо одержання нових спечених склоалюмінієвих матеріалів та електродугових метал-скляних покриттів, формування за їх участю шаруватих конструкцій та елементів біологічного захисту з розробленням клейової композиції холодного твердіння; удосконалення дослідницько-експериментального обладнання для спікання.

Технічну новизну отриманих результатів підтверджено патентами України на винахід № 74476, № 95378, №111654; патентами на корисну модель № 90580, № 97311, № 99331. Результати роботи впроваджено у робочій процес Морського інженерного бюро (м. Одеса), Херсонського державного заводу «ПАЛАДА», ТОВ «Океан–Судноремонт» (м. Миколаїв), Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв) та у навчальний процес Національного університету імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), що підтверджено відповідними актами.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати роботи докладалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2010–2017 рр.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2014–2016 рр.); Міжнародній конференції «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 2016–2017 рр.); Міжнародній конференції «Композиционные материалы в промышленности» (м. Ялта, 2007–2010 рр.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Зварювання та споріднені технології» (м. Миколаїв, 2012 р., 2014 р.); Міжнародній конференції «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2016–2017 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Современные порты – проблемы и решения» (м. Одеса, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы развития транспортной логистики» (м. Одеса, 2012 р.); Міжнародній науково-

технічній конференції «Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика» (м. Миколаїв, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Управління проектами: стан та перспективи» (м. Миколаїв, 2010–2016 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (м. Одеса, 2013–2017 рр.).

Публікації. Результати роботи опубліковані в 38 статтях у наукових фахових виданнях України, періодичних виданнях іноземних держав та виданнях, що входять до наукометричних баз даних (НМБ), 3 патентах на винахід, 3 патентах на корисну модель, 34 тезах доповідей.

Особистий внесок дисертанта підтверджено самостійними публікаціями (19 без співавторів), в яких наведено основні наукові і прикладні результати роботи, 3 патентами на винахід (2 без співавторів) та 3 патентами на корисну модель (2 без співавторів). Всі теоретичні і практичні положення, висунуті на захист, розроблено та сформульовано автором особисто; при розробці інформаційних та когнітивних моделей враховано консультації фахівців кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем і управління проектами НУК; опромінення зразків виконано на базі ДП «Радма» Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського. Певний вклад здобувача у наукових роботах, виконаних у співавторстві, наведено у списку робіт до автореферату.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з двох частин. Основна частина (495 стор., 160 рисунків і 77 таблиці: з них ілюстрацій на окремих аркушах – 23 сторінок, таблиць – 32 сторінок) містить розгорнуту анотацію українською та англійською мовами, зміст, умовні скорочення та позначення, вступ, вісім розділів, загальні висновки, список літературних та інформаційних джерел (407 найменувань). Друга частина (додатки, 130 стор.) містить використану нормативну документацію, схеми та методики постановки експериментальних досліджень, інструкцію з експлуатації розробленої установки, тексти комп'ютерних програм, патенти і акти впровадження результатів роботи, список публікацій здобувача.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕМЕНТИ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ СУДЕН ТА ПЛАВУЧИХ СПОРУД ДЛЯ РАДІОАКТИВНИХ ВАНТАЖІВ: НАУКОВІ ПРОБЛЕМИ КОНСТРУЮВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСТУ ЗА УЧАСТЮ НЕМЕТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОЛІ- ТА УЛЬТРАДИСПЕРСНОЮ СТРУКТУРОЮ

1.1 Спеціалізовані судна та плавучі споруди, транспортне обладнання, нормативна база, класифікація, властивості, умови зберігання і перевезення радіоактивних вантажів

За даними ООН, щорічно в світі транспортується приблизно 10 млн упаковок з радіоактивними відходами [310]; проблема їх безпечного зберігання і перевезення у пункти подальшої переробки або захоронення вирішується на правовому рівні в рамках міжнародного співтовариства країн Євросоюзу та України. Сучасний досвід експлуатації об'єктів морської техніки, підводних робіт з підйому радіоактивних відходів з дна Світового океану (рис. 1.1) передбачає експлуатацію спеціалізованих суден, технічних та транспортних засобів як пунктів перевантаження і тимчасового зберігання [6, 26, 45, 56, 255].



Рисунок 1.1 – Захоронення РАВ на дні Світового океану [56]

Аналіз міжнародних статистичних даних показує, що в період з 1967 по 1982 рр. у північно-східну частину Атлантичного океану було скинуто 188188 контейнерів з радіоактивними відходами масою (брутто) 94603 т та активністю 1003689 Кі [46]. В основному це низькоактивні відходи, що складаються з лабораторного обладнання, скла, забруднених покриттів, спецодягу та біологічних останків, які упаковані у двохсотлітрові металеві барабани і залиті бетоном (рис. 1.2).

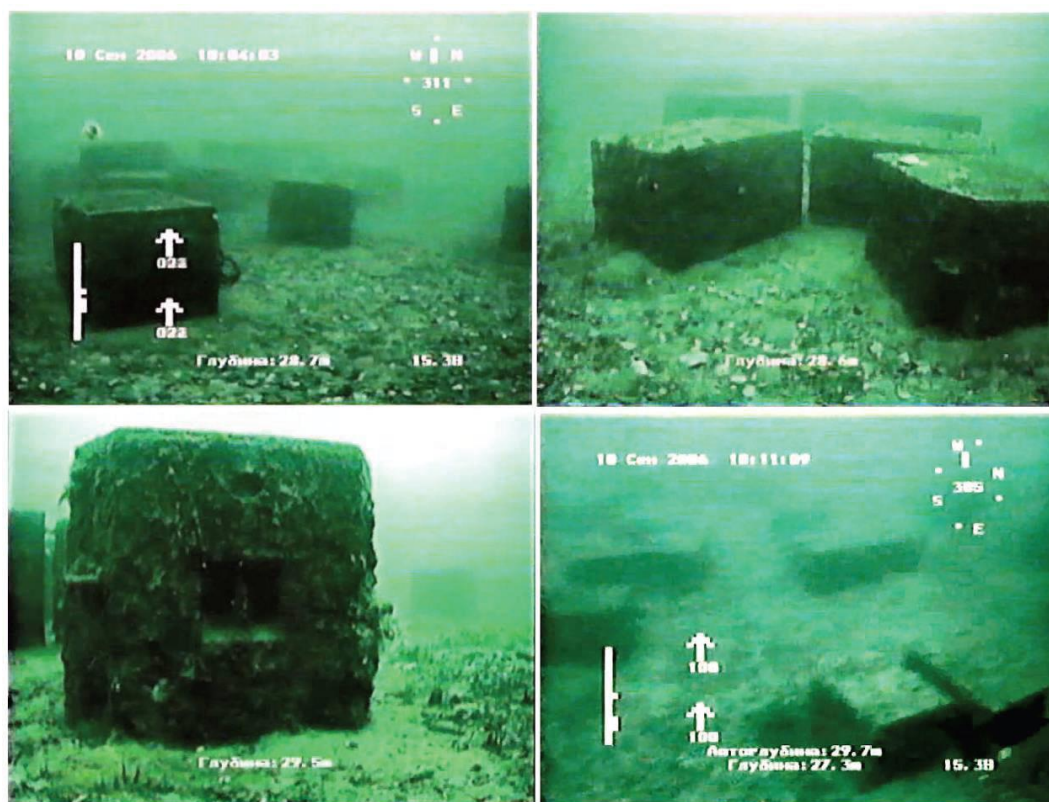


Рисунок 1.2 – Затоплені контейнери з твердими радіоактивними відходами [255]

Небезпека підйомно-розвідувальних робіт пов'язана з радіоактивним забрудненням та корозійними процесами, які пошкоджують герметичність сталевих конструкцій та заповнювачів (бетону, асфальту, фурфуролу). У багатьох випадках залишається невідомим хімічний склад радіоактивних відходів, це вимагає додаткового оснащення підводних апаратів додатковими капсулами для збору [15, 313, 344]. Джерелами можливого радіоактивного

забруднення морів та океанів також є атомні підводні човни, надводні судна з ядерною енергетичною установкою, реакторні блоки, які були вирізані з атомних підводних човнів і залишилися на плаву [339]. Це так звані «плавучі могили», на яких продовжують зберігатися продукти життєдіяльності атомного підводного флоту. Безпосередню загрозу для навколишнього середовища становлять плавучі атомні електростанції (АЕС) – нове джерело електричної і теплової енергії у важкодоступних районах; їх використання передбачається для опріснення морської води [15]. Будівництво подібних станцій планується у Росії, Китаї, Південній Кореї, Туреччині, Бангладеш. Для України застосування плавучих об'єктів зберігання РАВ (рис. 1.3) є новим науково-технічним напрямком.



а



б



в

Рисунок 1.3 – Плавучі споруди [194, 251]:

а – плавучі ємності для рідких РАВ; *б* – плавучі доки для суден атомного технологічного обслуговування; *в* – плавуча технічна база

У міжнародній практиці ці судна і плавучі споруди мають назву «суден атомного технологічного обслуговування» [10, 217]. До них відносяться плавучі технічні бази, призначені для виконання робіт з розвантаження всіх видів РАВ; технічні танкери для тимчасового зберігання та перевантаження рідких радіоактивних відходів; транспортні судна для прийому, переробки та видачі рідких і твердих радіоактивних відходів; плавучі ємності для транспортування та тимчасового зберігання малих обсягів рідких РАВ, контрольно-дозиметричні станції для моніторингу та контролю радіаційної обстановки та транспортування рідких і твердих радіоактивних відходів. Ефективність їх експлуатації у порівнянні з іншими видами транспорту обумовлюється економічними чинниками: витратами палива, найкращою пристосованістю до вантажних операцій, високою провозоспроможністю тощо. Призначення і технічні характеристики суден атомного технологічного обслуговування наведено у табл. 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1 – Експлуатаційне призначення суден атомного технологічного обслуговування [217]

Вид суден	Призначення	Характеристика
Плавучі ємності	Збирання, тимчасове зберігання і транспортування радіоактивних відходів	Несамостійні судна з кормовою надбудовою
Технічні танкери	Прийом рідких радіоактивних вантажів зі плавучих споруд, їх тимчасове зберігання та передача у берегові сховища	Самостійні або несамостійні судна з кормовою та носовою надбудовою
Плавучі технічні бази	Тимчасове зберігання усіх видів радіоактивних вантажів і відходів	Самостійні або несамостійні судна з кормовою та середньою надбудовою
Плавучі контрольно-дозиметричні станції	Дозиметричне контролювання, тимчасове зберігання РАВ	Несамостійні судна з надбудовою по всьому корпусу

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики і конструктивно-технологічні параметри суден атомного технологічного обслуговування [10, 217]

Технічні характеристики	Плавучі ємності	Технічні наливні танкери	Плавучі технічні бази	Плавучі контрольно-дозиметричні станції
Водотоннажність, т	132	2350 (повне) 1100 (порожнем)	3335	518
Довжина×ширина×висота корпусу, м	25×4,2×2,7	72,4×11,5×5,4	88×13,4×7,0	71×10,2×3,2
Матеріал корпусу і надбудов	Вуглецева сталь	Вуглецева сталь, всередині вантажних цистерн – нержавіюча	Вуглецева і низьколегована сталь	Вуглецева і низьколегована сталь
Система набору	Поперечна	Зовнішній борт – поперечна, у інших напрямках – поздовжня	Днище, другий борт і дно – поперечна, у інших напрямках – поздовжня	Зовнішній борт – поперечна, палуба, друге дно – поздовжня
Товщина, мм: борта і днища палуб другого дна переборок	6...9 5...6 6 6	9...12 8...10 10 6...8	10...15 8...10 10 8	10...13 8 10 6

При перевезенні водними шляхами радіоактивні вантажі визначаються як «радіоактивний матеріал», їх транспортування повинно здійснюватися з дотриманням вимог [70, 182, 209, 288] та наступних нормативних документів: Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі СОЛАС-74/88; Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден МАРПОЛ 73/78; Норм МАГАТЕ з безпеки для захисту людей та навколишнього середовища; Правила безпечного перевезення радіоактивних матеріалів; Міжнародного кодексу морського перевезення небезпечних вантажів; Правил морського перевезення небезпечних вантажів; Європейської угоди про

міжнародне перевезення небезпечних вантажів внутрішніми водними шляхами; Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів; Кодексу торгового мореплавання України; Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів»; Рекомендацій з безпечного транспортування небезпечних вантажів та пов'язаної з цим діяльністю в портах, 1995 р.; Рекомендацій ООН з перевезення небезпечних вантажів, типових правил (ST/SG/AC.10/1/Rev.10); Конвенції про цивільну відповідальність за шкоду, заподіяну при перевезенні небезпечних вантажів автомобільним, залізничним та внутрішнім водним транспортом; Правил безпеки при транспортуванні радіоактивних речовин; Норм радіоактивної безпеки (НРБ-69); Правил безпеки при транспортуванні радіоактивних матеріалів (НП-053-04); Міжнародного кодексу з морського транспортування плутонію, ВЯП та ВАО (INF Code); Основних норм безпеки BSS; Основних санітарних правил роботи з радіоактивними речовинами та іншими джерелами іонізуючих випромінювань (ОСП-72); ГОСТів: 19433-88, 14192-96, 31340-2007 (Додаток А).

Відповідно до загальноприйнятої класифікації [209] РАВ відносяться до вантажів 7-го класу небезпеки, який включає в себе наступні підкласи:

- 7.1 – радіоактивні речовини (ізотопи);
- 7.2 – радіоактивні речовини з низькою питомою активністю;
- 7.3 – радіоактивні речовини, що перевозяться за окремою угодою;
- 7.4 – радіоактивні речовини, які є винятком із Правил.

За Правилами морських перевезень небезпечних вантажів будь-яка речовина з питомою активністю понад 0,002 мКі/г має бути заявлена як радіоактивна. Крім того, клас радіоактивних матеріалів (РМ) поділяється на наступні категорії: РМ, що перевозяться за особливою угодою; подільні РМ; радіоактивні матеріали з низькою питомою активністю; пірофорні; окисні, отруйні, радіоактивні джерела випромінювання (ізотопи), корозійні РМ, а також радіоактивні матеріали, які є винятком із правил.

Розподіл радіоактивних відходів за рівнями активності залежно від джерел випромінювань [344] наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Питома активність радіоактивних відходів

Категорія відходів	Питома активність, кБк/кг		
	β -випромінюючі радіонукліди	α -випромінюючі радіонукліди (за винятком трансуранових)	Трансуранові радіонукліди
Низькоактивні	менше 103	менше 102	менше 10
Середньоактивні	від 103 до 107	від 102 до 106	від 101 до 105
Високоактивні	більше 107	більше 106	більше 105

Залежно від періоду піврозпаду радіонуклідів радіоактивні відходи поділяються на короткоживучі з періодом піврозпаду близько 30-ти років, довгоживучі (з періодом піврозпаду в кілька сотень років) і середньоживучі відходи [310, 344, 389]. До *високоактивних довгоживучих* відходів відносяться відпрацьоване паливо (якщо його переробка не передбачена) та деякі види високоактивних експлуатаційних відходів АЕС, які мають остаточне тепловиділення, високу радіотоксичність протягом декількох тисяч років та залишаються джерелами з високою інтенсивністю α -, β -, γ -випромінювань. До *середньоактивних* довгоживучих відходів відносяться фільтри, смоли, опади, частини обладнання з середньою активністю β -, γ -випромінювання, радіотоксичністю та тепловиділенням, проте значним α -випромінюванням.

Низькоактивні довгоживучі відходи включають у себе тверді речовини – метал, скло, спалене сміття, а також рідкі радіоактивні відходи, що утворюються від дезактивації обладнання; вони є джерелами з низькою β -, γ -активністю, характеризується незначним тепловиділенням та радіотоксичністю, проте мають високу інтенсивність α -випромінювань. *Середньоактивні* короткоживучі відходи являють собою концентрати, осадки, реактиви, залишки лабораторних продуктів та обладнання з середнім рівнем β -, γ -випромінювань, проте значною α -активністю. До *низькоактивних* короткоживучих відходів відноситься загальне сміття, відходи від дезактивації обладнання,

відпрацьований інструмент, який є джерелом з низькою інтенсивністю α -, β -, γ -випромінювань, радіотоксичністю та тепловиділенням.

В залежності від агрегатного стану радіоактивні відходи промислових підприємств упорядковуються у вигляді:

- *твердих радіоактивних відходів*, таких як забруднений радіонуклідами гумовий або бавовняний спецодяг та взуття, папір, текстиль, вата, обладнання (поділене на фрагменти), лабораторний посуд, захисні матеріали, будівельне сміття, біологічні останки, відпрацьовані джерела γ - та нейтронного випромінювання та інші відходи науково-дослідницьких центрів;
- *рідких радіоактивних відходів* у вигляді реакторних та стічних вод, емульсій, масел, накопичених на АЕС, оборонних, хімічних і гірничо-хімічних комбінатах [96], об'єктах підводної техніки [185], у медичних та дослідницьких установах [348], радіохімічних і біофізичних лабораторіях [384], рідини спецпризначення ВМФ, подальше застосування яких не передбачено [222]; вони збираються окрема та закачуються у спеціальні цистерни або басейни;
- *газоподібних радіоактивних відходів*, зокрема продуктів гірничодобувного виробництва, (у тому числі при видобутку уранових руд), які становлять собою незначну небезпеку випромінювання, проте для організму людини є більш небезпечнішими, ніж природний уран [91].

На даний час в Україні паралельно діють декілька класифікацій РАВ, в основу яких покладено розподілення РАВ за рівнем активності, тепловиділення, агрегатного стану тощо. В роботі [310] наведено схему класифікації радіоактивних відходів, яку розроблено за підтримкою Єврокомісії із залученням провідних фахівців у рамках проекту INSC U4.01/08-C «Удосконалення системи класифікації радіоактивних відходів в Україні» з метою їх захоронення. За цією класифікацією радіоактивні матеріали підрозділяються на наступні класи: нерадіоактивні відходи; природні радіоактивні матеріали; низькоактивні відходи; середньоактивні відходи; високоактивні відходи; відпрацьовані джерела іонізуючих випромінювань. Запропоновану схему спрямована на скорочення витрат за рахунок розподілу

радіоактивних відходів за оптимальними способами захоронення і типами сховищ (наземне, підземне); на даний час ця класифікація знаходиться у стані апробації та впровадження.

Відповідно до загальноприйнятої класифікації за ГОСТ 19433-88* і ГОСТ XXXX5-2006, до радіоактивних речовин належать речовини з питомою активністю понад 0,074 ГБк/г і будь-які вироби, що містять: радіоактивні матеріали природного або штучного походження з випромінюючою здатністю або до хімічного складу яких входять радіоактивні ізотопи; радіоактивні відходи, які мають бути вивезені з місць експлуатації з метою подальшого захоронення; відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) – тепловиділяючі елементи, що містять його залишки та безліч продуктів поділу (в основному ^{137}Cs і ^{90}Sr); широко використовуються у промисловості, сільському господарстві, медицині та науковій діяльності, є цінним ресурсом, у результаті переробки якого отримують свіже ядерне паливо та ізотопні джерела.

За статистикою [193] близько 8000 підприємств атомній промисловості, сільського господарства, медицині та науково-дослідницьких установ України використовують радіоактивні матеріали; з них приблизно 5500 продовжують генерувати радіоактивні відходи. Для їх транспортування у міжнародній практиці застосовуються судна з подвійними дном та бортом і розвинутим бортовим набором та переважно середнім розташуванням вантажної зони [72, 73, 244]. Для перевезення відпрацьованого ядерного палива передбачено експлуатацію суден категорій: INF-1 – для перевезення ВЯП з сумарною активністю $\Sigma A \leq 4000 \text{ ТБк}$ ($4 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$); INF-2 – для ВЯП або високоактивних РАВ з $\Sigma A \leq 2 \cdot 10^{18} \text{ Бк}$, а також плутонію з $\Sigma A \leq 2 \cdot 10^5 \text{ ТБк}$ ($2 \cdot 10^{17} \text{ Бк}$); INF-3 – для ВЯП, високоактивних відходів і плутонію без обмежень по максимальній сукупній радіоактивності.

Рідкі радіоактивні відходи характеризуються різноманіттям фізичного, хімічного та ізотопного складу [48, 249], перед захороненням їх піддають затвердінню в формі оксидів або скла. Для цього застосовуються методи кальцинації або прожарювання у форсунці, тиглі, в обертовій печі або у

киплячому шарі. Усереднений склад та активність рідких радіоактивних відходів наведено у табл. 1.4 [268].

Таблиця 1.4. – Усереднений склад рідких радіоактивних відходів [268]

Вид радіоактивних відходів	Компоненти , технологічні відходи	Радіонукліди		Сумарна активність	
		Бк/л	Кі/л	Бк/л	Кі/л
Низькоактивні	Sr-90	$1,1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^4 \dots$ $1,8 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-6} \dots$ $5 \cdot 10^{-5}$
	Cs-37	$1,5 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-6}$		
	Ce-44	$3,7 \cdot 10^4$	10^{-6}		
	Ru-106	–	10^{-6}		
Середньо- активні (лужні)	Sr-90	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^8$ $\dots$ $2 \cdot 10^{10}$	$0,01 \dots 0,$ 5
	Cs-37	$(0,37 \dots 1,48) \cdot 10^1$ 0	$0,1 \dots 0,$ 4		
	Ce-44	$3,7 \cdot 10^9$	–		
	Ru-106	$3,7 \cdot 10^4$	0,1		
Високоактивні (азотнокислі)	Sr-90	$(7,4 \dots 11,1) \cdot 10^{10}$	2...3	$(11 \dots$ $78) \cdot 10^{10}$	3...21
	Cs-37	$1,1 \cdot 10^{10}$	0,3		
	Ce-44	$2,8 \cdot 10^{11}$	7,5		
	Ru-106	$3,7 \cdot 10^{10}$	1,0		

Корозійна та окиснювальна здатність більшості рідких РАВ призводить до інтенсивного зношування деталей запірної арматури вантажних систем з серйозними аварійними наслідками. Проблема дезактивації присвячено роботи [74, 77, 84, 97], у яких висвітлюються технології обробки забруднених поверхонь технічних засобів спеціальними хімічно активними речовинами, більшість з яких містить розчини соляної, сірчаної та азотної кислот. Прийом, тимчасове зберігання та передача рідких РАВ для наступної переробки та кондиціонування здійснюється у танк-цистернах вкладеного типу (рис. 1.4), які

проектуються і виготовлюються разом з конструкцією біологічного захисту, рамою і необхідними для підйому та кріплення механізмами, здатними



витримувати вплив при русі транспортного засобу сил інерції завантаженої цистерни [51, 212].

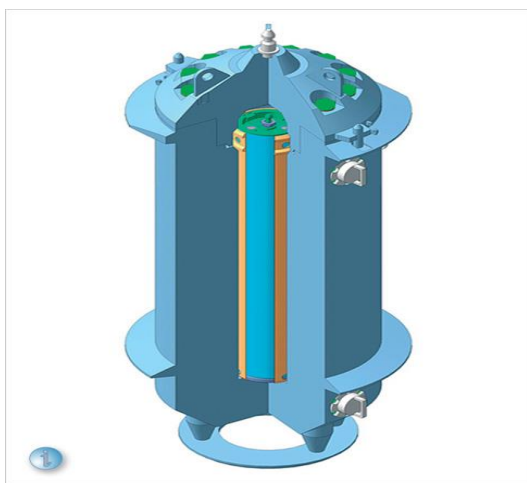
Рисунок 1.4 – Танк-цистерна типу ІМО-1 для рідких РАВ [51]

Контейнерне перевезення РАВ передбачає застосування більш дрібних одиниць транспортного устаткування – упаковок і тари; відповідно до ГОСТ 16327-88 їх головними характеристиками вважається матеріал і товщина радіаційного захисту, розміри гнізд для розміщення РАВ, допустиме завантаження по транспортній категорії, яке визначається у кожному окремому випадку Нормами радіаційної безпеки НРБ-76/78 та діючими Правилами безпеки при транспортуванні РАВ (ПБТРВ-73). Транспортна упаковка забезпечує захист вантажу під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт, при його перевезенні, зберіганні, а також безпеку навколишнього середовища. Згідно з ГОСТ 16327-88 конструкції упаковок повинні відповідати вимогам до промислових упаковок або упаковок типів А та В [209], які в залежності від властивостей радіаційного захисту поділяються на наступні види: І – з радіаційним захистом від γ -квантів та будь-яких інших випромінювань (крім нейтронного), джерелами яких є неподільні радіоактивні речовини та подільні речовини, що входять до складу радіоізотопних джерел випромінювання; ІІ – з радіаційним захистом від нейтронів та будь-яких інших випромінювань від неподільних радіоактивних речовин; ІІІ – з радіаційним захистом від α - та β -частинок від неподільних радіоактивних речовин, що входять до складу радіоізотопних джерел випромінювання.

До транспортного обладнання, призначеного для перевезення РАВ, висуваються особливі вимоги: транспортні пакувальні комплекти (ТПК) для ВЯП являють собою циліндр з габаритною довжиною близько 6 м, діаметром 2,4 м і масою вантажу близько 1 т (рис. 1.5). При попередніх випробуваннях вони зазнають механічних та ударних навантажень (зокрема скидання з висоти 1 м), проходять перевірку на герметичність при тиску водяного стовпчика 15 м та вогнестійкість при температурі 800 °С протягом 30 хв [72, 319]. Гранично-допустиме значення потужності дози випромінювання ТПК на відстані 1 м від поверхні є транспортним індексом, сумарна величина якого не повинна перевищувати 50 мбер/год. Для перевезення ТПК на повітряному та водному видах транспорту застосовуються спеціальні транспортні пакети (рис. 1.6) [52], за основу яких взято спеціалізований вантажний великотоннажний контейнер,

що задовольняє вимогам міжнародних стандартів ISO та конвенцій.

Рисунок 1.5 – Транспортно-пакувальний комплект ТПК-19 [52]



а



б

Рисунок 1.6 – Транспортний пакет (ТПК-19) для перевезення ВЯП [52]:

а – загальний вигляд; б – монтаж ТПК-19

Згідно з класифікацією контейнерів для небезпечних вантажів [287], транспортний пакет належить до класу 1С, має знімний дах та торцеві двері з відкидною балкою. Транспортні пакети з ВЯП розміщуються у вантажному трюмі суден, який у деяких випадках [244] може розділятися кофердамом з товщиною суцільних поперечних перегородок 10...12 мм. У разі заповнення його забортною водою він являє собою додатковий баластний танк і виконує функцію біологічного захисту.

Для перевезення та тимчасового зберігання твердих радіоактивних відходів на практиці застосовуються контейнери прямокутної форми об'ємом 1...4 м³; бочки – об'ємом 200 л і більше. Фрагменти обладнання масою до 5 т, зв'язані в пучки труби діаметром 100...200 мм і довжиною до 5,8 м розташовуються в неупакованому вигляді у спеціалізованих вантажних великотоннажних контейнерах (зокрема УКТН-2400 і КТБН-3000), що кріпляться відповідно до «Технічних умов кріплення вантажів в контейнерах» ЦМ-943 [322]. Рівень випромінювання на відстані 10 см від будь-якої точки зовнішньої поверхні неупакованого приладу або виробу не повинен перевищувати 0,1 мЗв/год. У процесі транспортування та короточасного зберігання на об'єктах морської техніки деякі радіоактивні вантажі (неупаковані залишки обладнання, рідкі радіоактивні відходи), мають реакційну здатність та під час активних корозійних процесів з навколишніми матеріалами та повітряним середовищем, являють собою екологічну небезпеку і можуть бути розглянуті як радіотоксичні, пожежонебезпечні, вибухонебезпечні та окиснювальні речовини, що вимагають ретельної ізоляції.

Транспортування радіоактивного матеріалу в обмежених кількостях, а також приладів, виробів, виготовлених з природного (у т.ч. збідненого) урану або природного торію, здійснюється у звільнених упаковках з відповідним маркуванням (наприклад, «РАДІОАКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ», «ЗВІЛЬНЕНА УПАКОВКА–ПРИЛАДИ»); перевезення «повним вантажем» або за дотриманням спеціальних умов відбувається за Правилами або особливим розпорядженням. Упаковка або транспортний пакет з РАВ можуть

перевозитися серед упакованого генерального вантажу без дотримання будь-яких особливих положень з укладання за умови, що середній тепловий потік біля поверхні упаковки не перевищує 15 Вт/м^2 , а безпосередньо навколишній вантаж не знаходиться у мішках або пакетах [209]; місця розташування упаковок з РАВ повинні бути позначені знаками радіаційної небезпеки. Умовами транзитного зберігання груп упаковок, транспортних пакетів, вантажних контейнерів з подільними радіоактивними матеріалами має передбачатися відокремлення відстанню не менше 6 м з сумарним індексом безпеки з критичності не більше 50 м. Згідно з Правилами МАГАТЕ укладання й розміщення РАВ всередині контейнерів має виключати можливість їх переміщення у горизонтальному і вертикальному напрямках як під час перевантаження у портах, так і при переході судна морем. Одним з конструктивних заходів захисту упаковок вантажів від механічних пошкоджень є застосування вкладених циліндричних або прямокутних контейнерів об'ємом $0,55 \dots 3,3 \text{ м}^3$, які мають завантажувальний а розвантажувальний люки, застроплюються через вушко (рис. 1.7) та кріпляться до внутрішньої поверхні цистерни або бака за допомогою розпірок [269].



Рисунок 1.7 – Застроплення полімерних контейнерів для радіоактивних вантажів [269]

Вкладені контейнери виробляються з резинокордних або полімерних матеріалів, що у свою чергу обмежує температурні умови їх експлуатації.

Природні радіоактивні матеріали містять високий відсоток довгоіснуючих радіонуклідів і характеризуються низьким рівнем активності [310]. Це рудні концентрати та руди гірських порід: граніту, урану, радону та ін. [20, 80]. Різновиди гранітних порід [91], що видобуваються на території України, за показниками сумарної питомої активності $A_{\text{еф}}$, яка виражена в Бк/кг,

поділяються на п'ять класів: перший клас – $A_{\text{еф}} < 370$ Бк/кг – застосовується для будівництва та оздоблювальних робіт усіх без обмежень об'єктів; другий – $A_{\text{еф}} < 740$ Бк/кг – у промисловому і дорожньому будівництві, всередині приміщень нежилых і громадських будівель; третій – $A_{\text{еф}} < 2800$ Бк/кг призначений для дорожнього будівництва поза населеними пунктами; четвертий і п'ятий – $A_{\text{еф}} < 3700$ Бк/кг – не використовуються будівельними організаціями. Радіаційний фон натурального каменю визначається на стадії затвердження запасів родовища і заноситься в його паспортні дані. Через відсутність внутрішнього ринку збуту з території України експортуються добути радіоактивні гафній і цирконій, які є перспективною сировиною для волоконної оптики. В процесі гірничодобувних робіт утворюються тверді, рідкі та газоподібні уранові відходи, які є набагато небезпечнішими для людини, ніж природний уран. Руда, що переробляється, у вигляді концентрату з формою порошку транспортується для подальшої обробки на галузеві підприємства. З розвіданих запасів уранової руди, необхідної для потреб атомної енергетики, Україна посідає перше місце в Європі і шосте у світі [189]. Концентрати уранових руд вважаються низькоактивним радіоактивним матеріалом з незначною небезпекою випромінювання [20, 91], вони не є токсичними, не запалюються і не можуть ініціювати ядерну реакцію. Транспортування уранових концентратів здійснюється в герметично закупорених сталевих бочках зі щільно прилеглими кришками, які надійно закріплюються у вантажних контейнерах.

В основу проектування суден і плавучих споруд, призначених для транспортування, перевантаження та тимчасового зберігання радіоактивних вантажів, покладено принципи безпечного поводження з радіоактивними речовинами [70, 182–184, 209], які крім особливостей діючої інфраструктури враховують питому активність радіоактивних вантажів, їх хімічний і радіонуклідний склад. Проектними заходами для запобігання потрапляння РАВ до відсіку, трюму або спеціально виділеної частини палуби судна передбачено посилення фундаментів, палуб, встановлення у вантажній зоні судна елементів

біологічного захисту, аналіз можливих аварійних ситуацій, їх впливу на навколишнє середовище, аналітичні розрахунки рівнів випромінювань тощо.

Екрануванню контейнерів і упаковок з твердих РАВ у вантажній зоні судна присвячено роботи [10, 217, 227, 244, 300]. Залежно від складу і природи радіоактивні вантажі продовжують випромінювати дифузійні потоки α -, β -, γ - і рентгенівського випромінювань, для чого на транспортному обладнанні передбачається використання захисних екранів. Так, α - і β -потоки, при взаємодії з середовищем, швидко втрачають енергію і поглинаються екраном з будь-яких матеріалів; γ - і рентгенівські промені повністю не поглинаються, а послаблюються в n кількість раз. Нейтронне випромінювання має більшу проникаючу здатність у порівнянні з γ -випромінюванням і вимагає спеціального захисту. Вважаючи, що більшість відпрацьованих речовин, елементів обладнання, зокрема радіоізотопних приладів є джерелами одночасно нейтронного і γ -випромінювання, то у першу чергу забезпечується захист від γ -променів. Для визначення рівнів випромінювань використовуються поняття та одиниці вимірювань, які не зустрічаються під час перевезення інших вантажів [157]. Насамперед, це: *доза випромінювання* (поглинена доза випромінювання) – $D = dE / dm$ – відношення середньої енергії dE , переданої речовині в елементарному об'ємі, до маси dm речовини в цьому об'ємі; *потужність* поглиненої дози випромінювання – $P = dD / dt$ – відношення приросту поглиненої дози dD за час dt до цього часу; *активність* радіоактивної речовини A – очікуване число елементарних радіоактивних розпадів за проміжок часу; *питома активність* – активність радіоактивних речовин, яка припадає на масу речовини; *об'ємна активність* – активність радіоактивних речовин, яка припадає на одиницю об'єму джерела. Одиницею СІ виміру поглинутої дози випромінювань [23] є *Грей* (Гр), до недавнього часу поширеною одиницею виміру дози був *рад*. Співвідношення між Гр, рад і еВ/г наступне: $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад} = 6,24 \cdot 10^{15} \text{ еВ/г}$; $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$. Одиницею вимірювання потужності поглиненої дози іонізуючого випромінювання є Гр/с. У системі СІ одиницею вираження активності РАВ є бекерель (БК) або кюрі

(Ки), відповідно питомої активності – Бк/г або Бк/л, а об'ємної активності – Бк/л або Ки/л. Значення питомої та об'ємної активності використовуються у тих випадках, коли радіоактивна речовина розподілена по об'єму джерела, наприклад для характеристик рідких РАВ. Одиницею вимірювання ефективної та еквівалентної доз випромінювань (у радіобіології) є зіверт (ЗВ): $1 \text{ ЗВ} = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Як біологічний еквівалент рентгена використовується бер: $100 \text{ бер} = 1 \text{ ЗВ}$. Ці показники застосовуються для визначення критеріїв оптимальності біологічного захисту як конструктивного рішення, передбаченого для додаткового захисту персоналу і обладнання на об'єктах радіаційної небезпеки.

1.2 Умови експлуатації та сучасні напрямки застосування неметалічних і ультрадисперсних металоматричних матеріалів для формування шаруватих захисних конструкцій суден

Блоки і модулі біологічного захисту виконують функцію екранів, для виготовлення яких, як правило, використовують радіаційно стійкі бетони, що пояснюється механізмами гідратації, під час яких цемент хімічно зв'язує частину води і стає водневмісним компонентом, забезпечуючи високий перетин захоплення нейтронів, характерний для гідридів [190, 246, 275, 276]. Радіаційні пошкодження композиційних бетонів пов'язано з розширенням та розтріскуванням гірських порід, що входять до складу заповнювача (магнетитових, гематитових, лімонітових залізних руд, бариту та ін.); теплові ефекти ($100\ldots 150^\circ\text{C}$) під час опромінення, призводять до втрати хімічно зв'язаної води і, як наслідок, втрати міцності. Сучасним вимогам експлуатації найбільшою мірою відповідають гідридвмісні ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{TiH}_{3,7}$, ZrH_2) композиційні матеріали [203, 357], які розроблено на базі Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. За критеріями температурної та радіаційної стійкості вони не поступаються відомим композиціям RX-277 (виробництва США), до хімічного складу яких входять

мас.: 3,37 %H, 1,56 % B, 58,85 %O, 0,59 % Na, 0,30 % Mg, 023,91 % Al, 2,13 % S, 0,19 % Ca, 0,19 % Fe).

У сучасній практиці модулі можуть бути зібрані із панелей, виготовлених зі сталевих листів, з'єднаних між собою за допомогою швелерів, простір між якими заповнений свинцевим дробом або гідридвмісним щебнем (рис. 1.8). Для виготовлення модулів також застосовуються бетонні панелі, облицьовані з двох боків листами плакованої або нержавіючої сталі, які виконують функції гідроізоляції та додатково захищають бетон від механічних і радіаційних ушкоджень [181, 186, 191]. За масогабаритними показниками вони являють собою збільшені монтажні одиниці, встановлення яких потребує посилення днища та розробки спеціальних кріплень, а процес виготовлення характеризується великою металоємністю з використанням дороговартісних сталей та технологій їх з'єднання.

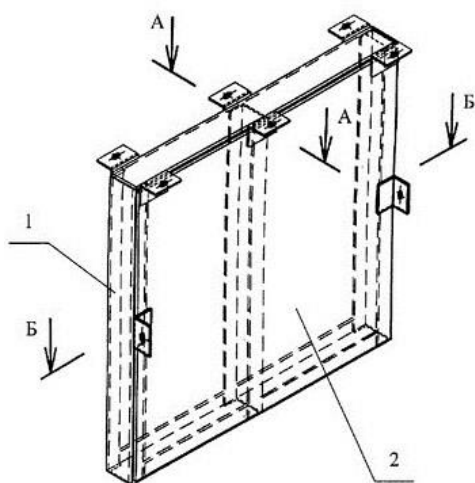


Рисунок 1.8 – Складена панель модуля біологічного захисту [229]:

1 – швелер, 2 – сталеві листи, простір 1–2, заповнений засипкою зі свинцевого дробу

Перспективи застосування композиційних бетонів у суднобудівних технологіях та питання проектування бетонних плавучих споруд розглянуті авторами робіт [250, 251, 266, 284, 285, 298]. Проте через підвищену термостійкість, низьке значення усадки, повзучість і термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), бетони як теплоізолятори ускладнюють відведення тепла з вантажної зони, що змушує споруджувати додатковий тепловий захист з жаромісних матеріалів, у т.ч. з плакованих та нержавіючих сталей [46, 50, 302, 314]. Під час тривалої експлуатації в умовах γ - та нейтронних випромінювань вони стають джерелом вторинного випромінювання та внаслідок структурних змін схильні до радіаційного

розпухання, окрихчування, повзучості [82, 150, 204, 246, 253, 254, 346]. Підвищення радіаційної стійкості сталей можливе в результаті проведення додаткової радіаційної обробки (опромінення ультрафіолетом і рентгенівськими променями, радіаційно-термічної обробки тощо) або шляхом легування, що сприятиме формуванню дисперсних оксидних або карбідних включень, які є місцями закріплення дислокацій та стоками для точкових дефектів [87, 254]. Ефективність застосування плакованих сталей у виготовленні конструкцій біологічного захисту пояснюється їх шаруватою структурою, проте через складну технологію (прокатка біметалевих зливків або пакетів біметалу) [302] вони мають високу вартість. Основний шар виготовляється зі сталей марок ВСт3, 10, 10К, 09Г2, 16ГС, 09Г2С, 10ХСНД, 12МХ, 12ХМ, 18Х2М1, плакований – зі сталей марок 08Х13, 08Х17Т, 15Х25Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т, 08Х22Н6Т, 06ХН28МДТ, ХН65МВ, ХН65МВУ, Н70МФВ-ВІ, НМЖМц28-2,5-1,5 [55, 216, 302]. Саме шарувата структура цих сталей сприяє трикратному поглинанню потоків випромінювань. Проте у результаті багаторазових теплових ефектів під час дифузного опромінення, у перехідному шарі (товщиною 10 мкм з пластинчатою морфологією) відбуваються структурні зміни, які призводять до розшарування. В табл. 1.4 наведені основні ознаки зміни структури при опроміненні конструкційних і захисних матеріалів. Рентгенівське та γ -випромінювання сильніше послаблюються матеріалами, які містять елементи з великими атомними масами, зокрема свинцем, вольфрамом, борованими сталями [60, 150, 205]. Відсутність високоенергетичних джерел наведеної радіації, які виникають при опроміненні, робить застосування свинцю незамінним, проте його використання в каркасних конструкціях обмежується через низькі механічні властивості, можливі хімічні реакції з дезактивуючими розчинами, високу токсичністю та отруйність [344]. Для формування конструкцій свинець застосовується у вигляді листів товщиною 0,5...3 мм, наклеєних на гнучкий пластик, або у вигляді засипки з свинцевого дробу.

Таблиця 1.4 –Зміна структури і властивостей матеріалів під дією іонізуючого випромінювання: [складено автором]

Матеріал	Застосування	Зміни в структурі	Зміни властивостей
Свинець	Облицювання сталевих та бетонних конструкцій	Радіаційне розпухання	Повзучість при температурі вище 260 °С, втрата форми виробу
Полімерні покриття	Захисні покриття конструкцій і цистерн підводних технічних засобів	Деструкція, зшивання, зміна хімічної ненасиченості	Радіаційне старіння, вимивання пігменту, окиснення, газовиділення, зниження хімічної стійкості
Бетон	Конструкції біологічного захисту	Втрата хімічно зв'язаної води	Зменшення щільності, втрата захисних властивостей при $t \geq 100 \dots 150$ °С
Цементні камні та кам'янолітні матеріали	Засипка між сталевими листами в шаруватих конструкціях	Істотних змін у фазовому складі та структурі не спостерігається	Міцнісні властивості знижуються на 10...15%, а потім відновлюються до вихідних значень
Природні матеріали (лімоніт, серпентиніт, залізобарієвий цементний камінь)		Втрата хімічно зв'язаної води при температурі вище 300 °С	Втрата захисних властивостей при температурі вище 300 °С
RX-277	Захисне облицювання конструкцій для зберігання ВЯП	Істотних змін у фазовому складі та структурі не спостерігається	Не встановлені
Скло	Оглядові вікна, ілюмінатори, наповнювачі для композиційних покриттів	Зміна фазового складу, радіоліз, розм'якшення, газовиділення	Люмінесценція, зміна забарвлення, діелектричних властивостей, ТКЛР, коефіцієнта теплопровідності
Сферопластик	Рентгенозахисні покриття, блоки плавучості для підводної техніки	Пластична плинність сполучника на межі наповнювач–матриця, деструкція	Усадка, втрата характеристик міцності, збільшення пористості, утворення нових пор

У природі відсутні елементи, які у рівній мірі ослабляють γ -кванти та нейтрони, тому значна частина завдань радіаційного захисту вирішується шляхом використання композиційних матеріалів з металевою та полімерною матрицями. Радіаційну стійкість мають полімерні покриття на основі поліорганосилоксанових, ненасичених полієфірних та феноло-формальдегідних смол, а також меламіно-формальдегідні, поліетиленові, полівінілхлоридні та фторопластові покриття [190, 211, 224, 246], проте їх застосування для облицювання резервуарів та іншого транспортного обладнання обмежене через розкладання у розчинах для дезактивації, куди входять розчини азотної, плавикової та сірчаної кислот [74, 297]. Опромінення полімерів супроводжується процесами зшивання (утворення поперечних міжмолекулярних зв'язків) та деструкції (розриви зв'язків у головному ланцюгу та бічних групах), зміною хімічної насиченості (зникнення та утворення подвійних зв'язків різного типу). Перспективні розробки радіаційно захисних композиційних матеріалів ґрунтуються на механізмах ослаблення γ - та рентгенівських випромінювань полі- та ультрадисперсними середовищами і наноструктурними елементами [21, 38, 60, 165, 211]. Пояснюється це тим, що у порівнянні з полікристалічними матеріалами когерентне розсіювання рентгенівського випромінювання на ультрадисперсних частинках призводить до збільшення оптичної довжини шляху фотонів і, як наслідок, до їх додаткового поглинання. Ультрадисперсні середовища є новим класом композиційних матеріалів з унікальними тепловими, механічними, міцнісними та рентгенозахисними властивостями. Завдяки розміру частинок (близько 0,1 мкм), вони можуть бути ефективним захистом від теплових нейтронів з довжиною хвиль $\approx 0,1$ нм [14].

В роботах [6–8] встановлено два ефекти взаємодії електромагнітних іонізуючих випромінювань з дисперсними середовищами, які виключають один одного: «с одной стороны, возможно аномальное пропускание квантов электромагнитного излучения сквозь ультрадисперсные среды, с другой стороны, – их аномальное поглощение» [7]. З боку позицій підвищення

радіаційного захисту інтерес становить ефект аномального поглинання іонізуючих випромінювань ультрадисперсними частинками: це явище отримало назву «розмірного» ефекту. Велику роль також відіграє структура границь і внутрішні напруження, що пов'язано з впливом сусідніх зерен, по границях яких накопичується значний обсяг радіаційних дефектів.

В роботах [6–8, 38, 60, 82, 87, 88, 200, 205, 346] показано перспективи застосування в атомній енергетиці композиційних матеріалів зі сталевою та алюмінієвою матрицями, що обумовлено порівняно малим поглинанням нейтронів; високий коефіцієнт теплопровідності сприятиме відведенню тепла від розігрітих ділянок. Технології одержання спечених алюмінієвих сплавів (САС, САП) ґрунтуються на перспективних методах порошкової металургії [49], де застосовуються порошок або пудра алюмінію. Проте наявність алюмінієвого компоненту знижує здатність відмиватися від радіоактивних забруднень, накопичення яких може призвести до зростання радіаційної небезпеки [177]. Крім порошкових та плівкових технологій формування наноструктурованих матеріалів і покриттів можливе шляхом інтенсивної пластичної деформації з наступною термічною обробкою (ТО), передрекristалізаційної термічної обробки (ПТО) холоднодеформованих компактних матеріалів та газотермічних покриттів [65–68]. На відміну від введення до складу покриттів нанокристаличних порошоків, що вимагає спеціальної трудомісткої підготовки та застосування складних технологій, термодетормацийні методи мають суттєві переваги, які пояснюються утворенням дрібних зародків у структурі напилених покриттів під час первинної рекristалізації деформованих дисперсних частинок.

Виготовлення шаруватих конструкцій з матеріалів з різною поглинаючою та відбиваючою здатністю сприятиме утворенню механізмів багаторазових втрат енергій випромінювань РАВ. Проте технології з'єднання різних за товщиною шарів повинні забезпечувати герметичність стику, інертність структури і властивостей. Крім радіаційної стійкості матеріали повинні мати достатньо низький модуль пружності, який сприяв би зменшенню напружень на

розтягування внаслідок нагрівання внутрішніх шарів конструкцій, високу теплопровідність для запобігання відведенню тепла від вантажної зони, мінімальні значення ТКЛР, що зменшило б температурний градієнт по товщині. Для виготовлення шаруватих конструкцій у суднобудуванні застосовують зварювальні технології, механічні кріплення та адгезійні клейові з'єднання [8, 97, 302]. Надійність конструкцій визначається міцністю зчеплення, незначною різницею в значеннях ТКЛР, ремонтною та експлуатаційною технологічністю. Застосування механічних кріплень порушує цілісність матеріалів конструкцій, знижуючи ступінь герметичності. При з'єднанні металів та неметалів за допомогою зварювання через різницю ТКЛР у конструкціях виникають залишкові температурні напруження, застосування технологій пайки обмежується масштабним фактором. Необхідну герметичність, корозійну та хімічну стійкість забезпечують адгезійні клейові з'єднання, які, незважаючи на порівняно з іншими методами меншу механічну міцність, характеризуються певною технологічністю та невеликою вартістю внаслідок відсутності енерговитрат. Але їх впровадження полімерних матеріалів у суднобудування повинно відповідати вимогам пожежної безпеки [152]. У роботах [8, 37, 272] визначено переваги епоксидних клеїв, здатних працювати в умовах випромінювання до 100 кГр, зокрема марок ЦМК [272], які відносяться до ремонтних композицій типу «холодного зварювання». Проте їх застосування в умовах суднобудівного виробництва обмежено через низьку температуру склування, тривалість твердіння, деструкційні процеси.

Зниження масогабаритних показників конструкцій, захист сталевих суднових цистерн від руйнівної дії іонізуючих випромінювань і корозійних процесів можливі за допомогою застосування композиційних покриттів, для їх формування можуть бути використані газотермічні методи нанесення, зокрема електродугове напилення [66]. Фундаментальні сучасні розробки і прикладні дослідження вітчизняних та зарубіжних учених спрямовані на створення покриттів з новими структурами, які забезпечували б підвищення фізико-механічних властивостей. Це наукові школи Інституту електрозварювання ім.

Е.О. Патона НАН України, Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут», Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Томського державного університету, Московського інституту сталей і сплавів тощо. Розвиток методів газотермічного напилення із застосуванням сучасного обладнання, нових технологій і додаткової термомеханічної обробки напилених покриттів створює науково-практичну базу для проведення подальших фундаментальних і прикладних досліджень щодо створення композиційних покриттів з новими властивостями.

1.3 Сучасний досвід застосування стеклов в технологіях ізолювання радіоактивних відходів. Радіаційні ефекти у стеклах

Розвиток методів поводження з радіоактивними речовинами пов'язано з поширенням застосування стеклов для створення екранів від іонізуючих випромінювань, сорбційних і радіаційно стійких матеріалів для радіохімічної промисловості, що пояснюється їх високою стійкістю до корозійних процесів та радіолізу [246]. За результатами аналізу науково-технічної літератури [30, 173, 199, 210, 219, 226, 260, 295] виділено наступні напрямки використання скла у технологіях ізолювання радіоактивних відходів:

- виготовлення скляних обкладинок, екранів, ілюмінаторів, тари для продукції радіохімічної промисловості;
- іммобілізація радіоактивних відходів – ґрунтується на здатності стеклов утримувати у своєму складі навіть усі елементи таблиці Менделєєва, для чого застосовуються сорбційні матеріали, які вилучають з водних розчинів актиноїди, що розташовуються у склоподібних матрицях у вигляді дисперсної фази, дрібних кристалічних або аморфних частинок;
- застосування порожніх скляних мікросфер (ПСМ) для виготовлення радіаційно захисних композиційних матеріалів (РЗКМ), зокрема

рентгенозахисних матеріалів і покриттів, які знайшли поширене використання у авіаційних і суднобудівних технологіях;

- переробка скляного бою та вторсировини для подальшої її застосування в технологіях нових матеріалів.

Перспективи застосування стекол для захисту від іонізуючих випромінювань розглянуто у роботах [13, 29, 30, 226]: системи $\text{CdO-PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-CdO-BaO-B}_2\text{O}_3$; $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CdO-B}_2\text{O}_3$; $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CdO-SiO}_2$; $\text{BaO-Cd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$; $\text{Li}_2\text{O-PbO-B}_2\text{O}_3$ – поглинають γ - і нейтронне випромінювання; системи $\text{PbO-TeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ – поглинають інші види випромінювань. Універсальними є силікатні, боросилікатні, фосфатні види стекол, що застосовуються для виготовлення лабораторного обладнання у радіохімічній промисловості та медицині. Стекла, які виконують функцію захисного матеріалу для відповідних металевих вузлів, повинні мати високу радіаційну стійкість (здатність витримувати тривалу експлуатацію в полях випромінювання без суттєвих змін властивостей і структури).

Для іммобілізації радіоактивних відходів застосовуються боросилікатні і алюмофосфатні стекла систем $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ та $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, які після з'єднання з радіоактивними відходами утворюють особливий вид скла – радіаційне скло, яке повинно перешкоджати переходу радіонуклідів до навколишнього середовища. Базовий склад боросилікатних стекол утворюють оксиди Si, B, Na. У процесі заклитування більшість радіонуклідів проникають у структуру стекол, беруть участь в утворенні решітки або розміщуються у неї всередині, що забезпечує низьку швидкість вилугування радіонуклідів. Одержані склокристалічні матеріали мають високу стійкість до β - і γ -випромінювань, проте через обмежену розчинність продуктів поділу та схильність до спонтанної кристалізації (девітріфікації) при підвищених температурах, мають погіршену хімічну стійкість. Сучасний досвід зведено до таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Сучасний досвід створення радіаційно захисних матеріалів на основі скла: [складено автором]

Проблематика досліджень	Наукові установи та навчальні заклади
Розробка нових рецептур стекол для захисту від іонізуючих випромінювань	Національний технічний університет «ХПІ» (м. Харків); Обнінський інститут атомної енергетики (НИЯУ МИФИ, РФ); Фізико-технічний інститут Уральського відділення РАВ (м. Іжевськ, РФ)
Створення сорбційних матеріалів для іммобілізації радіоактивних відходів	Національний технічний університет «ХПІ» (м. Харків); Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара (м. Дніпро) ФГУП «Радон» (Москва, РФ)
Переробка скляного бою для одержання РЗКМ	Національний технічний університет «ХПІ» (м. Харків); Львівський національний університет імені Івана Франка; Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова (м. Белгород, РФ)
Одержання та застосування порожніх скляних мікросфер	Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова (м. Белгород, РФ); Інститут теоретичної і прикладної механіки СОРАН (м. Новосибірськ, РФ); НВО «Стеклопластик» (Московська обл., РФ)
Функціональні композиційні матеріали на основі порожніх скляних мікросфер	ДП КБ «Южное» ім. М.К. Янгеля (м. Дніпро) НВО «Стеклопластик» (Московська обл., РФ); Інститут проблем хімічної фізики РАН (м. Черноголовка, РФ)

У вигляді порошків, гранул, волокон, нитковидних кристалів скло застосовується для отримання радіаційно стійких матеріалів і покриттів. Попит на дороговартісну дефіцитну сировину, зокрема на свинцевмісне скло, викликає розвиток технологій переробки скляного бою та відходів. Так, наприклад, скло телевізійних екранів містить у своєму складі не менше 30 мас. % PbO, скло конуса – 10,5 мас. % PbO та 2,2...2,5 мас. % BaO (ГОСТ 26799-85). Досвід застосування свинцевмісних стекол у технологіях виготовлення радіаційно стійких матеріалів описано у роботах [30, 226, 295]. Це стекла систем: PbO – TeO₂ – Bi₂O₃ – B₂O₃ – GeO₂ зі здатністю поглинати іонізуючи випромінювання та зберігати прозорість протягом всього терміну служби; CdO – PbO – Bi₂O₃ –

$\text{CdO} - \text{BaO} - \text{B}_2\text{O}_3$; $\text{BaO} - \text{Cd}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$; $\text{Li}_2\text{O} - \text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3$, які поглинають γ - та нейтронні випромінювання. Їх радіаційна стійкість визначається незначною взаємодією атомів хімічних елементів, які входять до складу, з випромінюваннями і слабо вираженими радіаційними дефектами: утворенням центрів пофарбування, люмінесценцією, окрихчуванням, зміною тепло- та електропровідністю тощо. Названі ознаки спостерігаються при дуже високих дозах поглинутої енергії ($D \gg 10^9$ рад), а під дією електромагнітного випромінювання і електронів з енергією до 1 MeV у стеклах слабо визначено ефект радіолізу та відбувається незворотного руйнування структури.

Проблемам радіаційних ефектів у стеклах, впливу на них методів обробки, присвячені роботи С. М. Бреховських, Л. М. Ланди, Ю. М. Вікторової, М. А. Чибисової, Л. Л. Брагіної, М. А. Четвірікова, О. С. Деркачової, де відмічена роль теплових процесів. Теорія зміни фазового складу силікатних стекол під дією опромінення [30] ґрунтується на концепції поліморфізму, а саме на перетворенні структури кристалічних модифікацій SiO_2 , які при достатньо високій дозі опромінювань переходять у т.з. «метамінктну фазу» – звичайний склоподібний стан, але його структура буде відповідати іншому температурному інтервалу склоутворення, ніж при охолодженні розплаву. Таким чином, теплові процеси і пов'язані з ними модифікаційні перетворення починаються вже на ранніх стадіях опромінення та у більшості випадків призводять до виникнення напружень та зміни ТКЛР. Джерелом утворення напружень можуть стати вторинні явища, пов'язані зі зміною фазового складу, структури і «теплової історії» матеріалу. В результаті радіаційної дії виникають мікро- та макротемпературні напруження на границі фаз, значення яких можуть перевищувати допустимі границі, при цьому зразки скляних матеріалів часто залишаються незруйнованими, що пояснюється можливістю релаксації напружень. Вплив елементів змінної валентності на радіаційно-стимульовані процеси у багатокомпонентних стеклах досліджено у роботах [13, 30], де визначено роль сенсibiliзуючих (протекторних) домішок, які змінюють ефективність утворення центрів пофарбування. Це європій, церій, тербій, марганець, срібло, мідь, титан, залізо, кобальт, нікель, хром, молібден,

вольфрам, ніобій, цирконій, які легко перезаряджаються під дією іонізуючих випромінювань та суттєво підвищують радіаційно-оптичну стійкість стекол. Проте, не зважаючи на досягнення у області радіаційної фізики та хімії твердого тіла, складні за хімічним складом дисперсні системи залишаються не вивченими.

1.4 Використання порожніх скляних мікросфер у технологіях виготовлення суднобудівних та рентгенозахисних матеріалів: досвід застосування, хімічний склад, фізико-хімічні основи одержання

Доцільність застосування порожніх скляних мікросфер у технологіях виготовлення рентгенозахисних матеріалів обумовлено їх розмірами, сумірними з довжиною пробігу електронів та відбивною здатністю. Являючи собою замкнені сферичні оболонки вони здатні гасити динамічні коливання та підвищують гідростатичну міцність на всебічне стискання, що робить їх незамінними для одержання синтактичних пінопластів – композиційних матеріалів з полімерною матрицею, які використовуються для виготовлення об'єктів плавучості та підводної техніки [358, 361, 371]. Порожні скляні мікросфери являють собою дрібнодисперсні легкоципучі порошки, що складаються із тонкостінних (0,5...2,0 мкм) скляних частинок сферичної форми діаметром 10...150 мкм [31, 32, 164,361]. Історію їх створення пов'язано з необхідністю зменшення втрати нафти та нафтопродуктів з поверхні відкритих сховищ, для чого спеціалістами фірми Schio (США) запропоновано технологію одержання порожніх мікрокульок, яка ґрунтується на здатності розчинів Na і K спінюватися при нагріванні з різким збільшенням об'єму. Як спінювачі застосовуються різні неорганічні або органічні речовини: карбонати, бікарбонати, сульфіти, органічні кислоти тощо. При високотемпературній обробці шихти, мікрочастинки одночасно зазнають оплавлення та наповнення певним газом: сірчанам ангідридом, воднем, гелієм, вибір якого безпосередньо залежить від призначення мікросфер. Поширене застосування мікросфер як мікробалонів для зберігання альтернативних видів палива є однією з головних

задач лазерного термоядерного синтезу. Фізико-хімічним проблемам одержання мікросфер, наповнених воднем і гелієм присвячено роботи Е.Ф. Медведєва, С.В. Довгушева, Р. Tsugawa [64, 181, 395]. Проте до цього виду мікросфер пред'являються жорсткі вимоги щодо проникності, розмірам, однорідності складу, наявності нейтроно- і рентгенопоглинаючих компонентів (рідкоземельних елементів і свинцю) та деяких функціональних домішок: Mg, Ca, Al, Ag. Виробниками порожніх скляних мікросфер є зарубіжні фірми «Dupont» і «Ceno Technologies» (США), «Fuyi», «Toshiba», «Carasu K.K.» і «Hata Hisao K.K.» (Японія), «Mineralien-Werke» і «Ilmenau» (Німеччина). Їх вартість і властивості безпосередньо залежать від сировини, на міжнародному ринку перевага надається натрійсилікатним системам. Потужне фізико-хімічне підґрунтя для виробництва ПСМ створено у АТ «НПО Стеклопластик» (РФ) – науковій установі, яку засновано у 1946 р. на базі науково-дослідної лабораторії скловолокна (ВНИИСВ) для потреб ракетно-космічного комплексу, атомної, судно- і авіабудівної промисловості. Хімічний склад мікросфер, які застосовуються у технологіях суднобудівних матеріалів, наведено у табл. 1.6. В основу їх створення покладено наукові розробки у області хімічної технології скла, фізичної хімії силікатів: А.А. Аппена, Ю.А. Гулояна, Д. С. Бартенєва, Г.В. Самсонова, Дж. Е. Шелби, М.М. Шульца, О.В. Мазуріна. Ключовим моментом будь-якого способу виготовлення порожніх скляних мікросфер є створення певних умов для розчинення газів в процесі виготовлення продукту і їх виділення в результаті термічної дисоціації при формуванні. Від вірного вибору таких умов залежать принципова можливість отримання ПСМ та їх фізико-механічні властивості. Проте для більшості технологій одержання композиційних матеріалів хімічний склад скла мікросфер не має значення, оскільки при змішуванні з полімерними зв'язуючими не відбувається хімічних взаємодій, а розробників цікавлять лише адгезійні процеси.

Таблиця 1.6 – Хімічний склад порожніх скляних мікросфер, мас. % [164]

Фірни- виробники	SiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	S	F	ZnO
«ЗМ Со» (США)	60...90	1...30	0...25	2...20	0...10	—	—	—	<0,5	0...5	—
	70...80	2...6	8...15	3...8	—	—	—	—	0,2...1,5	—	—
	72,2	—	8,8	14,2	—	1,2	3,3	0,2	—	—	—
«Saint-Cobain Vitragе» (Франція)	68	5,9	6,8	13,85	2,5	—	—	—		—	0,95
	55...88	5...15	0,1...3	—	—	3...8	—	—		0...5	1...5
	72	7	—	18,8	—	1	—	—		—	—
«Glaverbel» (Бельгія)	70	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—
	65,5	15	—	19,5	—	—	—	—	—	—	—
«Nippon Sheet Glass Co» (Японія)	68,4	10,3	—	19,4	—	—	—	—	0,82	—	0,94
«Tokai Kogyo Co» (Японія)	60...80	6...15	5...15	2...12,5	0...3	0...3	0...3	0...3	0,05...1	—	0...3
Новгородський завод скловолокна (РФ)	60...80	6...15	5...15	2...12,5	0...3	0...3	0...3	0...3	0,5...1	—	0...3
НПО «Склопластик» (РФ)	77,0	—	—	23,0	—	—	—	—	—	—	—
	69,0	7,5	6,0	13,5	—	—	—	—	0,5...1	2,0	2,0

На відбивній здатності скляних мікросфер ґрунтуються технології виготовлення виробів з надвідбивною оптичною здатністю: відбивних листів підсвічування для рідких кристалів, відбивних деталей дорожньої розмітки, а також гетерогенних матеріалів, які поєднують одночасно функції декількох покриттів вузькоспеціального призначення: антистатичних, демпфіруючих, радіопоглинаючих, рентгенозахисних тощо [219, 232, 234]. Саме такі дисперсні наповнювачі як порожні скляні мікросфери поглинають кванти високої енергії, що виникають при іонізуючих випромінювань, оскільки мають розміри, порівняні з довжиною пробігу електронів [219]. Проте не зважаючи на переваги, композиції на полімерній основі недовговічні, горючі, не здатні витримувати температури вище ніж 180...250 °С: під час експлуатації спостерігається плинність у міжфазній області полімер–наповнювач.

Для підвищення відбиваючої здатності порожні скляні мікросфери у процесі виготовлення піддаються металізації, що створює додатковий шар у структурно неоднорідному середовищі та підвищує їх електро- та теплопровідність. Ефект металізації мікросфер покладено в основу створення радіопоглинаючих матеріалів і покриттів. Існуючі технології [18, 293, 362, 402, 404] хімічної металізації передбачають нанесення за допомогою електрохімічних методів Ag, Ni, а також більш складних систем, зокрема Ni–P/Co–Fe–P, товщина металевого шару у більшості випадків складає 0,5...1 мкм. Завдяки складним фізико-хімічним процесам, які протікають при взаємодії електролітів та насичених металами парів з ультрапористою структурою кожною скляної частини, процес металізації вважається дуже дорогавартісним та енергоємним, характеризуються високим процентом бракованих мікросфер. Нанесення щільного шару металу забезпечує зростання їх відбивної для електромагнітних хвиль здатності, проте підвищення їх радіаційно захисних властивостей можливе шляхом введення компонента, максимально поглинаючого енергію рентгенівських випромінювань. Поєднання у одній композиції метала зі склом, тобто матеріалів з різною поглинаючою та відбивною здатністю, сприятиме створенню ефекту відбивання променів

іонізуючих випромінювань у середовище поглинання, що дасть змогу підвисити захист конструкцій і елементів суден від шкідливої дії радіоактивних вантажів.

1.5 Теоретичні та технологічні передумови з'єднання стекол з металами

Існуючий досвід одержання композиційних матеріалів і покриттів на основі неметалевих мікросфер ґрунтується на низькотемпературних технологіях приготування колоїдних розчинів, де металеві порошкоподібні компоненти використовуються як ультрадисперсні домішки, які додають вузькоспеціалізованих властивостей. В основному це алюмінієва пудра, яку застосовують для підвищення відбиваючої здатності і теплостійкості термозахисних фарб у трубопровідному транспорті [239]. Композиції одержують за допомогою кремнійорганічних, поліефір-епоксидних, акрилових суспензій, синтетичного латексу, які забезпечують однорідність складу, певну щільність і підвищення міцності зчеплення з поверхнею. Для попередження розшарування сумішей на різні за густиною фракції, ефективним є застосування поверхнево-активних речовин, які стабілізують суспензію. При формуванні композицій на основі епоксидних смол для їх затвердіння використовуються сполучники амінного типу. У тампонажних сумішах скляні мікросфери утворюють центри кристалізації, які прискорюють процеси структуроутворення.

Серед високотемпературних технологій одержання композиційних матеріалів на основі порожніх скляних мікросфер окремо слід виділити спікання натрійсилікатних і натрійборсилікатних ПСМ без зв'язуючих добавок в інтервалі їх склування (рис. 1.9, *а*), що забезпечує певну комірчасту структуру (рис. 1.9, *б*), завдяки чому матеріал (авторська назва «синтактичне піноскло») одночасно поєднує теплоізоляційні властивості та високу міцність на всебічне гідростатичне стискання, що робить його перспективним для облицювання

конструкцій танків суден для гарячих наливних вантажів і підводних технічних засобів для розвідувальних операцій морського шельфу [109].

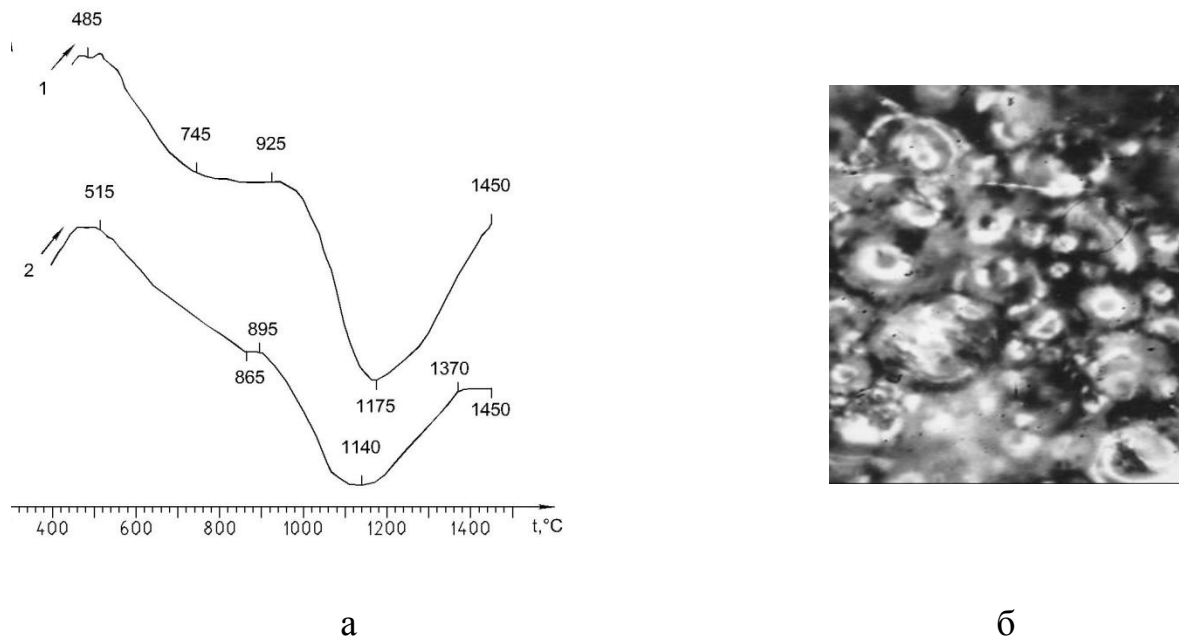


Рисунок 1.9 – Структурування «синтактичного піноскла» [109]:
а – ДТА-криві ПСМ: 1 – натрійборсилікатного складу (мас. %, SiO_2 – 69,0; B_2O_3 – 7,5; CaO – 6,0; Na_2O – 13,5; решта – домішки); 2 – натрійсилікатного складу (мас. %, SiO_2 – 77,0; Na_2O – 23,0); *б* – мікроструктура матеріалу, $\times 375$

Досвід застосування скляних порошків у технологіях одержання сучасних матеріалів плавучості висвітлено в роботі [301], де здрібнене тарне скло (ГОСТ 27172-2003, мас. %: SiO_2 – 72...75; Al_2O_3 – 2,20...3,75; CaO – 5,3...7,0; MgO – 3,0...4,5; Na_2O – 14...16; SO_3 – 0,2...0,5) спікається з газоутворювачем (кам'яновугільним пеком) при температурі 840...880 °C у окиснювальній атмосфері. В результаті утворюється пориста структура з комірками у формі пентадодекаедра (рис. 1.10), завдяки чому цей матеріал є незамінним для застосування у блоках підводних технічних засобів з глибиною занурювання до 2000 м.

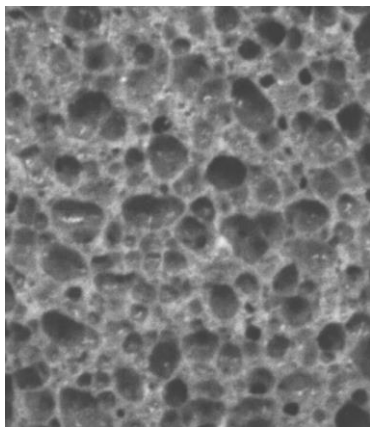


Рисунок 1.10 – Макроструктура (1:1)

піносклаз комірками
пентадодекаедра [301]

Не зважаючи на те, що в роботах [109, 301] розглянуто технологічні аспекти одержання матеріалів цільового призначення, у них не відображено структурні перетворення та фізико-хімічні процеси, які відбуваються при підйомі температури.

Теоретичні передумови поєднання у одній композиції металевих і скляних компонентів ґрунтуються на гіпотезі про мікронеоднорідну будову окисних стекол як простих, так і складних систем, висунуту Р.Л. Мюллером у роботі [198] та науковому досвіді, викладеному в роботах [19, 36, 146, 218, 263], які присвячено проблемам з'єднання скла з металами шляхом спікання та дифузійного зварювання. В основу теорії про мікронеоднорідну будову скла покладено докази щодо утворення в структурі мікрообластей розміром від 10 до 20 нм, які відрізняються хімічним станом або геометричним упорядкуванням у розташуванні частинок. На даний час не існує єдиного уявлення про фізико-хімічні процеси у з'єднанні металів зі склом, а сучасні розробки ґрунтуються на загальних положеннях наступних теорій:

- оксидної: між склом та оксидом металу утворюється перехідна структура, де іони з'єданого зі склом металу заміщуються іонами кремнію;
- дендритної: утворення з'єднання відбувається в результаті росту дендритів;

- адсорбційної: формування міцного зв'язку починається зі змочування та фізичної адсорбції з наступним утворенням у перехідному шарі нового хімічного сполучення.

При виборі металів для з'єднання зі стеклами необхідно враховувати наступні чинники [19, 102, 146]:

- температури плавлення компонентів: для з'єднання зі склом застосовуються метали з достатньо широким діапазоном плавлення: від 430 до 3370 К;
- теплопровідність і термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР): вважаючи, що ці показники для металів значно вище за неметалічні, при охолодженні вузлів та їх експлуатації в умовах термоциклічних навантажень можуть виникати термічні напруження, які у випадках перевищення міцності зчеплення деталей, можуть призвести до руйнування конструкцій або з'єднання. Часто через термічні напруження утворюються скриті дефекти, зокрема мікротріщини, внаслідок яких шаруваті конструкції або з'єднання втрачають герметичність та експлуатаційне призначення.

Існуючий досвід технологій паяння, зварювання, напилення (табл. 1.7) показав, що для з'єднання скла з металами найбільш передбачливими є Al, Ni, Cu, Nb, Ti, залізо та його сплави [19, 66–68, 102, 146]. Проте ці технології, як правило, використовуються для виготовлення електротехнічних та оптичних елементів, антифрикційних композиційних матеріалів і покриттів. У суднобудуванні їх застосування обмежено через масштабний фактор та технологічні складності, пов'язані зі спеціальним середовищем, необхідністю використання дифузних прокладок (алюмінієвих фольг, додаткової металізації скла напиленням), регулюванням необхідної в'язкості скла. Механізми взаємодії металів зі склом відрізняються від взаємодії металевих матеріалів і у значній мірі залежать від ступені їх окиснення.

Таблиця 1.7 – З'єднання стекл з металами: особливості технологій, фізико-хімічні процеси [складено автором]

Технологія	Вироби	Технологічні особливості	Фізико-хімічні процеси
Дифузійне зварювання кварцового скла через алюмінієву або мідну прокладки	Оптичні елементи	Попередня металізація кварцового скла вакуумним напиленням міді з наступним окисненням напиленого шару до закисі	Відбувається взаємодія металу з металізованим на склі шаром з одночасним зміцненням зчеплення напиленого шару з кварцовим склом
Впаювання металевих введів	Мініатюрні вводи у потужних транзисторах	Попереднє спресовування металевих деталей з порошками скла на зв'язці з наступним її випалюванням при $t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	Змочування скла металами за рахунок зменшення його в'язкості до $104\ldots 106\text{ Пз}$ шляхом впливу газового полум'я, електричного розряду, індукційних токів
Паяння скла з металами у відновлювальній атмосфері	Електротехнічні вироби: мініатюрні вводи та ніжки для транзисторів	Попереднє спресовування склопорошку ($d = 100\ldots 300\text{ мкм}$) зі сполучником (акрилові смоли, парафін, розчини нітроцелюлози) з наступним спіканням при $t = 600\ldots 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ у графітовому тиглі. Зчеплення скла з металами може бути збільшено за рахунок додавання фарбуючих його окислів.	Утворення на металі окисного шару ($\delta = 0,2\ldots 0,6\text{ мг/см}^2$), якій після паяння видаляється шляхом пропускання через піч атмосфери сухого водню або витравлюванням у теплій сірчаній кислоті (10%-ний розчин $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) з додаванням інгібіторів

Продовження таблиці 1.7

Технологія	Вироби	Технологічні особливості	Фізико-хімічні процеси
Спікання багатокomпонентних залізо-скляних порошкових композицій	Антифрикційні вироби, ковзаючи електро-контакти для електротранспорту	Пресування з пластифікатором багатокomпонентної порошкової шихти ($P = 400 \dots 500$ МПа) з наступним спіканням ($t = 800 \dots 1110$ °C у захисному середовищі	Насичення частинок скла іонами металу-основи в результаті активної взаємодії включень скла з частинками металевої фази з наступною ситалізацією
Електродугове напилення	Метал-скляні електродугові покриття (на основі Св-08Г2С і Св-АМг5) для підвищення зносостійкості суднових деталей і механізмів	Додавання в зону електродугового розряду здрібнених порошоків бою віконного скла (А-скла)	Скляні частинки через змочуваність розплавленим металом міцно закріплюються у сталеві матриці електродугового покриття

В основу фізико-хімічних процесів одержання міцного з'єднання *шляхом дифузійного зварювання* кварцового скла через алюмінієву або мідну прокладки [19,102] покладено оксидну теорію, згідно з якою отримати високоякісне з'єднання можна лише за умовами наявності на поверхні металу такого шару його оксиду, який має добре зчеплення з поверхнею металу. Так, на поверхні мідної прокладки перед зварюванням утворюють тонкий міцний шар CuO , а при паянні [146] зчеплення металу зі склом може бути збільшено в результаті додавання до скла фарбуючих його окислів. Вибір температурних параметрів ґрунтується на евтектичній теорії з'єднання [299], коли обрані матеріали зазнають нагрівання до евтектичної точки, при якій починаються процеси взаємодії металів, які входять до евтектичного сплаву. Так, температура дифузійного зварювання кварцового скла з алюмінієм [19] наближена до температури плавлення чистого Al (660°C), перевищує температуру евтектики (577°C) і складає 640°C . Саме проведення процесу при температурі, наближеної до евтектичної обумовлює високу інтенсивність дифузійних процесів і хімічних реакцій у зоні з'єднання. Проте на думку авторів роботи [19, 100] на даний час не існує жодної теорії, яка б дозволяла однозначно описати фізико-хімічні процеси при паянні стекл з різними металами. Слід відмітити, що через велику різницю у значеннях ТКЛР Al ($\alpha = 231 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) і скла ($\alpha = 5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) у з'єднаннях виникають температурні напруження, які можна зменшити в результаті їх релаксації у металі при повільному охолодженні. Це пояснюється тим, що завдяки низькій температурі рекристалізації алюміній має високу релаксаційну здатність при виникненні залишкових напружень.

Технологіям спікання багатокомпонентних порошкових композицій залізо–скло присвячені роботи [218, 305, 306], у яких застосовано метод холодного пресування з наступним спіканням у захисному середовищі. Це композиції з відносно пластичною металевою матрицею та рівномірно розташованими скляними включеннями підвищеної твердості. Для формування металевої матриці застосовуються порошкові суміші: карбонільного заліза

марки ВК-1 з додаванням графіту марки ГК-1 (7...32 % об'ємн.) [306]; суміш порошків заліза (1 % мас.), карбіду бора (2 % мас.), міді (5 % мас.) [218]. Цей саме вид порошку заліза (81...91 % мас.) з додаванням за масою 2...5 % порошку графіту та 2...4 % MoS_2 [305]. Як скляну складову застосовано порошок, одержаний здрібненням тарного або листового скла з середнім розміром 40...60 мкм, введення якого у масові кількості 5...10 % додає підвищення мікротвердості та зносостійкості матеріалів. При дослідженнях фізико-хімічних процесів структуроутворення нових композицій перевага авторів надається оксидній теорії [19], яка для даної групи спечених матеріалів реалізується через активну взаємодію включень скла з порошками металевої фази з наступним «синтезом гетерогенної структури» [218]. Під час спікання у всіх випадках відбувається ситалізація скла з утворенням на поверхні поділу метал–скло нового хімічного сполучення.

Авторами роботи [218] пропонується подвійне деформування порошкової суміші: спочатку холодне пресування під тиском 700 МПа зі спіканням при температурі 1200 °С в середовищі проточного водню, а потім для зниження пористості – гаряче (від 1050 °С) штампування на дугостаторному пресі. Одержані матеріали мають гетерофазну будову, яка складається з перлітної матриці та зосереджених у неї окремих скляних включень розміром 30...50 мкм неправильної форми, центральна зона яких у порівнянні з їх периферійною областю має більш темний колір, що пояснюється активним насиченням іонами металу через активну взаємодію між компонентами, зокрема вільного кремнезему скла з оксидами металів, яка викликає ситалізацію скла. Інша кількість склофази у вигляді тонкого прошарку розподіляється на міжзерених границях. Під час спікання в результаті взаємодії між оксидними фазами металевої складової та розплавом скла на границях некогерентного сполучення скла і перлітної матриці утворюється перехідний шар.

Технологія холодного деформування (пресування при $P = 400...500$ МПа) порошкової шихти з наступним спіканням при $t = 800...1060$ °С у середовищі водню, аргону, азоту [241] сприятиме створенню залізо-графітового каркасу

матеріалу, в порах якого знаходиться ситалізоване скло. Під час спікання частинки скла насичуються іонами металу–основи, при підвищенні температури скляна фаза стає менш в'язкою і проникає у мікропористість металу–основи.

Технологічні особливості, викладені в роботі [305] полягають у холодному пресуванні порошкової шихти з додаванням стеарату цинку ($C_{36}H_{70}O_4Zn$) з наступним спіканням у захисному середовищі ($t = 1100\text{ }^{\circ}C$, вакуум). Під час спікання скло зазнає часткового оплавлення з коагуляцією (до 100 мкм) частинок, які мали спільну границю поділу. На межі залізо–скло внаслідок ситалізації під час спікання утворюється перехідна зона, яка складається з ортосилікату заліза (II) Fe_3SiO_4 – фаяліту. Збільшення скла у складі композицій призводить до зниження мінісних характеристик, що пояснюється зменшенням площі металевих зав'язків та кутастою формою скляних частинок, які є концентраторами напружень. Знизити концентрацію напружень можливо в результаті застосування порошків округлої або сферичної форми, зокрема мікросфер. У науковій матеріалознавчій літературі відсутні відомості про фізико-хімічні процеси спікання неметалічних мікросфер з порошками металів. Окремі рецептури композицій наводяться у патентних джерелах інформації: це одержання демпфіруючих композицій на основі нікелю з додаванням до порошкової суміші вуглецевих або гліноземних (Al_2O_3) мікросфер [231] та виготовлення порошкових залізо-графітових матеріалів з додаванням до складу (0,5...5 % мас.) порожніх скляних мікросфер або їх відходів для підвищення зносостійкості потужнострумних тролейбусних електроконтактів [305]. У першому випадку [231] порошкова суміш із нікелю з мікросферами (6...25 % об'ємн.) пресується у холодному стані ($P = 35...55\text{ МПа}$) та потім спікається у середовищі водню в діапазоні температур 840...1150 $^{\circ}C$. Проте цей спосіб має певні технологічні обмеження за тиском пресування: застосування меншого за 35 МПа тиску призводить до руйнування заготівлі при випресуванні, підвищення значення за 55 МПа – до зниження демпфіруючої здатності матеріалу. У другому випадку [305]

натрійкальціймагнійсилікатні мікросфери дисперсністю 4...160 мкм або їх відходи вводяться до складу порошкової шихти, яка складається з порошку заліза марки ПЖР2, міді марки ПМС-1 та графіту, пресується при $P = 600$ МПа з наступним спіканням у середовищі водню при температурі 980 °С. Аналізуючи вищевикладене слід зазначити велику енергоємність розглянутих технологій спікання порошків металів зі стеклами [11, 218, 305, 306] та складність у пристосування обладнання для деформаційних процесів, що пов'язано зі значеннями тиску, високими температурами та необхідністю застосування спеціалізованого середовища.

Процес електродугового напилення ґрунтується на явищі плавлення металу високоамперною дугою з наступним диспергуванням розплаву струменем стиснутого газу та у порівнянні зі спіканням є більш енергоефективним. Розплавлений метал у вигляді дрібних крапель завдяки швидкому охолодженню на підкладці у більшості випадках утворює гартівні структури, що приводить до формуванню покриттів з більшою твердістю ніж у металу-основи. Додавання до складу електродугових покриттів неметалічних порошків (керамічних, полімерних, скляних) є достатньо новим науковим напрямком, який одержав розвиток у роботах [66–68, 147]. Завдяки модернізації ковпака розпилювальної головки електродугового апарату стало можливою подача неметалічних порошків у високотемпературну зону електродугового розряду. Дослідження апробовані на суцільнотягнутих дротах марок Св-0Г2С і Св-АМг5 діаметром 1,2 мм. Як неметалічні порошки ($d = 40...80$ мкм) використано П-ЭП-219, Al_2O_3 , ZrO_2 , бій тарного скла групи А. Підвищену твердість напилених покриттів автори пояснюють додатковим наклепом при їх співударі з матеріалом підкладки та сталеву матрицею, для подальшого зміцнення пропонується короткочасна (1...5 хв) передрекристалізаційна термічна обробка при температурі початку рекристалізації металевої матриці з наступним охолодженням на повітрі. За результатами випробувань на зносостійкість та міцність зчеплення авторами встановлено вплив вмісту А-скла, де оптимальне значення складає 8...14 % (рис. 1.11)

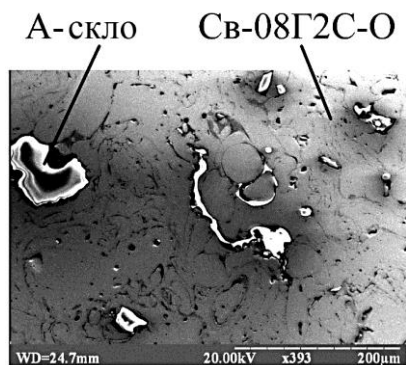


Рисунок 1.11 – Мікроструктура
електродугового покриття композиції
Св-08Г2С–А-скло [68]

Підвищення міцності зчеплення автор роботи [147] пов'язує з тим, що непроплавлені частинки А-скла, співударяючись з поверхнею підкладки, «додатково активують її за рахунок високої кінетичної енергії та кутастої форми, а співударяючись зі закріпленими пластичними металевими частинками, впроваджують їх у мікронерівності поверхні-основи і наступних шарів». Збільшення об'ємного вмісту скла (вище 14 %) призводить до зниження міцності зчеплення, що пояснюється зменшенням зони контактів металевих частинок з основою [68]. Введення скляних частинок неправильної форми створює додатковий наклеп при співударі скляних частинок з краплями розплавленого металу та матеріалом підкладки. Однак в роботах мало приділено уваги механізму формування покриттів з дослідженнями фізико-хімічних процесів, не розкритими залишаються питання структурних перетворень у склі через термічні навантаження, які не зважаючи на часові розрахункові значення у межах мілісекунд, зазнають дисперсні частинки, що має велике значення для формування службових властивостей та подальшого застосування металл-скляних покриттів. Розроблений спосіб обмежується точним введенням скляного наповнювача певної кількості через його втрату в процесі інжекційної подачі. В результаті комп'ютерного металографічного аналізу встановлена верхня границя об'ємного вмісту А-скла у складі металоскляного покриття – 19,5 %, проте автором не були використані інші методи досліджень, зокрема для визначення зміни розмірів та форми частинок після напилення.

Велика кількість наукових робіт, зокрема [38, 82, 204, 224] присвячена проблемам радіаційної пошкоджуваності компактних металів і утворенню радіаційних дефектів під час опромінення прямими і дифузними потоками. Проте радіаційна стійкість електродугових покриттів залишається недослідженою, а визначення впливу дисперсних скляних включень на процеси і механізми поглинання покриттями γ - та рентгенівських променів буде мати велике наукове значення для створення багатокомпонентних екранів і застосування в умовах судна.

Крім енергетичної дії дифузійні потоки здатні викликати багаторазові температурні навантаження, які можуть призвести до втрати механічних властивостей. Існуючі моделі [219, 283], які описують вплив рентгенівських випромінювань на характер руйнування наповнених порожніми мікросферами (вуглецевими, фенольними, скляними, металізованими тощо) полімерних композиційних матеріалів, призначені для прогнозування міцності літальних апаратів та в наслідок інших умов експлуатації, не можуть бути застосованими для прогнозування працездатності суднових конструкцій.

1.6 Проблемні питання проектування елементів біологічного захисту для суден та плавучих споруд

1.6.1 Сучасна практика проектування: головні завдання, наукові школи, провідні організації

Підвищення конкурентоспроможності суднобудівної продукції безпосередньо залежить від розвитку сучасних методів проектування. Для внутрішніх конструкцій суден і плавучих споруд, якими є елементи біологічного захисту, застосовуються блочні та модульні принципи проектування, які дозволяють розглядати їх як конструктивно й технологічно закінчені збиральні одиниці, що визначає можливості виготовлення на дільницях суднобудівного підприємства.

Теоретичні аспекти проектування модулів або блоків, які відокремлюють упаковані або неупаковані РАВ, взагалі ґрунтуються на універсальних моделях метода скінчених елементів, розглядаючи їх як об'єкт зі спрощеною геометрією

різного ступеня ідеалізації. Проте це не дає єдиного підходу до оптимізації конструкції складної конфігурації, особливо якщо їх експлуатація відбувається у нестаціонарних або екстремальних умовах, до яких можна віднести і умови транспортування та зберігання РАВ на судні або плавучому об'єкті. У наукових роботах, присвячених проблемам проектування елементів біологічного захисту, не надається уваги фізико-хімічним властивостям вантажів, особливостям вантажних операцій, механізмам взаємодії іонізуючих випромінювань з матеріалами конструкцій, змінам їх структури і властивостей під час експлуатації. Проектним і технологічним заходам щодо безпечного транспортування РАВ та їх надійного ізолювання на плавучих спорудах присвячено дослідження наукових та проектних центрів (табл. 1.8 та 1.9), крім яких практичний досвід мають великі зарубіжні компанії, зокрема «Fincantieri» (Італія); «Кожема/SGN» (Франція).

Таблиця 1.8 – Практика проектування: наукові школи [складено автором]

Тематика досліджень	Автори публікацій
Проектування суден та плавзасобів для транспортування небезпечних речовин	Г.В. Єгоров, В.В. Козляков, В.В. Зайцев, Ю.М. Коробанов [72, 73, 79, 99, 156]
Проектування підводних технічних засобів та пристроїв для підйому з дна речовин, які становлять екологічну загрозу	В.С. Блінцов, Б.А. Бугаєнко, А.Я. Казарєзов, А.Ф. Галь, С.М. Пишнев, Г. В. Бабкін [16, 26, 45, 99, 270]
Вирішення питань безпеки суден через впровадження конструктивних заходів та нових вимірювально-інформаційних систем моніторингу	Ю.Д. Жуков, А. Я. Казарєзов, В. І. Меньшиков, С.О. Буєв, А.Б. Власов [101, 184, 256]
Проектування плавучих композитних споруд	А. С. Рашковський, Н. Г. Слуцький [266, 284, 285]
Оцінка технічного стану конструкцій суден	В.В. Козляков, Г.В. Єгоров, В.М. Тряскін, В.А. Кулеш, О.М. Нікітін, М. Е. Францев [73, 156, 167, 207, 321, 336]
Рішення проблем відведення тепла при зберіганні радіоактивних відходів	С.В. Альохіна, Ю.М. Мацевітий, В.М. Голощапов [1–5, 271]
Вирішення сюрвейерських завдань та розміщення вантажів на судні	В.К. Козирєв, В.І. Снопков [157, 300]

Таблиця 1.9 – Практика проектування: провідні організації [складено автором]

Організації	Наукові напрямки в предметній галузі
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв, Україна)	Розробка нових методів проектування та будівництва суден для перевезення небезпечних вантажів, плавучих споруд та бурових установок, підводних апаратів з нейтралізації потенційно небезпечних об'єктів; перспективні розробки у сфері нових суднобудівних матеріалів та покриттів, технологій з'єднання та відновлення деталей
Морське інженерне бюро (м. Одеса, Україна)	Розробка проектів суден для небезпечних вантажів, зокрема ВЯП, розробка проектів модернізації
Одеський національний морський університет (м. Одеса, Україна)	Розробки у сфері інноваційних технологій перевезення небезпечних вантажів водним транспортом
ЦКБ «Ізумруд» (м. Херсон, Україна)	Проектування плавучих композитних доків та інших плавучих споруд
Херсонська державна морська академія (м. Херсон, Україна)	Розробка нових матеріалів та покриттів для суднобудівних технологій
ФГУП «ЦНДІ імені академіка А.Н. Крилова» (Балтсудопроект), м. Санкт-Петербург, РФ	Концептуальні розробки щодо проектування плавучих технічних засобів та морських платформ, терміналів, сховищ
Інститут проблем безпечного розвитку атомної енергетики РАН (м. Москва, РФ)	Науково-практичні розробки щодо виведення з експлуатації та утилізації радіаційно небезпечних плавучих об'єктів
Центральний науково-дослідницький та проектно-конструкторський інститут морського флоту (м. Санкт-Петербург, РФ)	Організація транспортного процесу, забезпечення технологічної безпеки вантажних операцій, конструктивних заходів надійності та захисту від корозії, технологій ремонту судових корпусних конструкцій із застосуванням композиційних матеріалів
ЦНДІ «Прометей» (м. Санкт-Петербург, РФ)	Розробка нових матеріалів для суднобудування, технологій їх виробництва, методів контролю
КБ «Вимпел» (м. Нижній Новгород, РФ)	Проектування та технічний супровід будівництва танкерів, плавучих технічних засобів для освоєння шельфу, суден атомного технологічного обслуговування
ЦКБ «Лазуріт» (м. Нижній Новгород, РФ)	Проектування надводних та підводних бурових комплексів, блочно-модульних і плавучих атомних електростанцій
ЗАТ «ЕКОМЕТ-С» (м. Сосновий Бор Ленінградська обл., РФ)	Питання поводження з твердими радіоактивними відходами, продуктами експлуатації підприємств ядерно-паливного та нафто-газового комплексу
ВАТ «Концерн Аспол-Балтік» (м. Санкт-Петербург, РФ)	Організація морських перевезень РАВ

Наукова діяльність цих організацій включає в себе перспективні розробки у сфері транспортних технологій, логістики, суднобудування, будівельного виробництва, судового машинобудування, матеріалознавства і пов'язана з вирішенням окремо взятих завдань, таких як проектування та переобладнання суден, проектування плавучих споруд, атомних електростанцій, бурових платформ, пакувальних комплектів і контейнерів для радіоактивних вантажів. При цьому жодне конструкторське завдання не вирішується без вибору матеріалів і методів підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Розвиток українського суднобудування підтримується в рамках загальнодержавної цільової програми економічного розвитку кораблебудування на період до 2035 р. (розпорядження Кабінету Міністрів від 06.05.2009 р.); розробка нових технологій перевезення, зберігання РАВ, а також удосконалення методів захисту транспортних та технічних засобів підтримується загальнодержавною цільовою програмою поводження з радіоактивними відходами (Закон України № 516-VI від 17.09.2008 р.).

1.6.2 Дослідження теплових процесів в задачах проектування і безпечного зберігання радіоактивних вантажів

Радіоактивні вантажі в залежності від радіонуклідного складу, рівня активності та агрегатного стану залишаються джерелом випромінювання з певною потужністю остаточного тепловиділення, що є наслідком процесів радіоактивного розпаду, продуктами якого є актиноїди речовин α -, β - і γ -випромінювань. Це ізотопи трансуранових елементів (крім ^{244}Pu) з активністю 150...200 Кі та тепловиділенням $Q \approx 1$ кВт, ізотопи Кюрія (^{244}Cm) з питомим тепловиділенням 1,2 Вт/см³; для їх зберігання використовуються капсули із пористої нержавіючої сталі циліндричної або сферичної форми. У міжнародній практиці класифікації РАВ [209, 310] критерієм рівня тепловиділення керуються при поділі на середньо- і високоактивні відходи: верхня межа визначається питомою потужністю тепловиділення $Q \approx 2$ кВт/м³.

Не меншу небезпеку становлять рідкі радіоактивні відходи [74, 77, 199, 201, 209, 222, 249], під час транспортування та зберігання яких відбуваються

екзотермічні реакції та саморозігрівання: середньоактивних відходів – до 160 °С, низькоактивних відходів – до 60 °С. Це β -активні розчини рідких радіоактивних відходів, що містять ізомери ^{137}Cs , ^{134}Cs , стічні води атомних реакторів і науково-дослідних лабораторій з високим вмістом довгоживучих радіонуклідів. Внаслідок екзотермічних реакцій у вантажній зоні судна або плавучої споруди формуються поля температур та швидкостей повітря, що призводить до пожежонебезпечних ситуацій, які також можуть бути спровоковані низкою техногенних факторів (самовільна ланцюгова реакція, самозаймання, окиснювальні процеси) та механічними ушкодженнями упаковок з РАВ.

Проблема теплової безпеки спеціалізованих суден та плавучих споруд у більшості наукових робіт [10, 72, 73, 260] розглядається з позицій проектування й експлуатації систем кондиціонування та пожежогасіння, оснащення додатковим електроустаткуванням і системами аварійного оповіщення.

Експериментальні засоби контролю теплового стану передбачають застосування вимірювальних приладів: тепловізорів, пірометрів, контактних термометрів, термоіндикаторних фарб [25]. Це дає змогу оперативно визначати найбільш теплонавантажені ділянки, отримувати інформацію щодо розподілу температурних полів шляхом формування часової послідовності термограм за результатами зйомки. Проте точність та адекватність одержаних результатів безпосередньо залежить від дистанції спостереження, температури навколишнього середовища та погодних умов. Враховуючи те, що вантажна зона плавучих споруд з РАВ з остаточним тепловиділенням є об'єктом безперервного спостереження, отримання інформації про розподіл температурних полів за допомогою прямих вимірювань ускладнено, дистанційне визначення температури в силу масштабних факторів дає велику похибку. У зв'язку з цим доцільним є застосування аналітичних методів, заснованих на розв'язанні спряжених задач теплообміну [271, 350, 355], які враховують енергетичні параметри РАВ: умови нормального транспортування ($t_{\text{вант}} = \text{const}$); короткочасне збільшення потужності тепловиділення

радіоактивних вантажів у процесі перевезення (зберігання), повільне зменшення їх потужності тепловиділення (в умовах тривалого зберігання). Розв'язання спряжених задач теплопереносу дозволяє одночасно визначати поля розподілу температур та швидкостей повітря, що обтікає розігрітий вантаж. Умови однозначності включають в себе геометричну інформацію про розглянуту систему, теплофізичні властивості об'єкта теплообміну (введення поняття еквівалентної теплопровідності багатокомпонентного об'єкта), початкові та граничні умови теплообміну, інформацію про внутрішні джерела теплоти. Трудомісткість розв'язання спряжених задач теплообміну вимагає застосування *CFD*-пакетів (*ANSYS*, *FLUENT*, *PHOENICS*, *STAR-CD* та ін.) [405]. Використовуючи методи розв'язання прямих та обернених задач можна вирішувати досить складні завдання, які виникають при проектуванні та експлуатації енергетичних об'єктів при менших у порівнянні з експериментальними дослідженнями фінансових витратах. Більшість наукових робіт [1–3, 5, 77, 271] описують процеси теплового стану та аспекти теплової безпеки для технічних засобів наземного зберігання ВЯП і підземного зберігання рідких радіоактивних відходів.

Математичну модель стаціонарного теплофізичного процесу [3] побудовано для корзини зберігання ВЯП як ізотропного твердого тіла зі спрощеною геометрією і питомою теплопровідністю. Розрахункова область являє собою циліндричний контейнер, розміщений у корзині і оточений по висоті паралелепіпедом, складеним із повітря. Модель включає у себе наступні рівняння, які наведено у вигляді часткових похідних:

- нерозривності, руху в'язкої рідини Нав'є-Стокса, енергії, теплопровідності, ідеального газу;
- оцінювання теплових потоків без урахування ступеня чорноти поверхні і кутового коефіцієнта випромінювання.

В роботі [1] авторами введено поняття «еквівалентної теплопровідності багатомісної герметичної корзини», де не враховано конструктивні особливості, а складну геометрію замінено суцільним об'ємом – одномірним

ізотропним тілом еквівалентної теплопровідності. Розв'язання зворотної спряженої задачі теплопереносу у квазістатичній постановці дає змогу визначати температурні поля в середині дослідного об'єкта.

У роботі [201] вивчення теплового режиму підземного сховища радіоактивних відходів зведено до розрахунків максимальної температури гірничого масиву і радіоактивних матеріалів. Для розрахунків температурних режимів сховищ застосовано методику, яка ґрунтується на чисельному розв'язуванні диференційних рівнянь нестационарної теплопровідності, покладених в основу математичної моделі теплообміну. Моделювання здійснюється для одиночного контейнера з певними геометричними параметрами і фізичними властивостями; граничні умови змінюються в залежності від теплового стану навколишнього середовища під тепловою дією системи контейнерів. Через складний характер теплопередачі за рахунок різних механізмів переносу тепла (теплопровідність, конвекція, теплові випромінювання) у тілі зі складною геометричною конфігурацією допускається заміна на тіла спрощеної конфігурації, тобто реальні гетерогенні структури контейнерів замінюються гомогенними зонами і у теплових розрахунках представлені через ефективні теплофізичні властивості таких зон. У постановочному плані задачі розрізняються граничними умовами з розташуванням у геометричній моделі систем охолодження і вентиляції (примусової, природньої тощо), що й визначає головним чином процеси теплообміну між радіоактивними речовинами і навколишнім середовищем. Це робить так званий «тепловий фактор» впливовим на вибір конструктивно-компонувальної схеми сховищ для радіоактивних відходів. Розв'язання зворотних спряжених задач оптимального проектування [271], які включають у себе задачі оптимізації поверхні обтікаємого твердого тіла, теж вказують на те, що зміна геометрії поверхні впливає на теплообмін. В результаті оптимізації можна отримати конструктивне рішення з необхідним станом експлуатації.

Наведена у роботі [1] математична модель теплофізичних процесів враховує вплив вітру, а саме його швидкість і азимут; в роботі [2] – ще й

погодні фактори, характерні для місця розташування майданчика наземного зберігання радіоактивних відходів. На підставі одержаних результатів розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення системи температурного контролю контейнерів з РАВ. Теплові задачі, сформульовані і розв'язані у роботі [201], розглядають температурні режими зберігання радіоактивних відходів у динаміці розподілу температурних полів у кришці та боковій стінці контейнеру в залежності від способу подачі охолоджуючого повітря. У випадку їх тривалого зберігання (50 років і більше) теплова задача розглядається за умовами зниження активності основних теплогенеруючих радіонуклідів у складі опроміненого палива, для чого за тепловий критерій прийнято сумарну потужність остаточного тепловиділення радіоактивних речовин у всіх контейнерах. У цих випадках метою розрахунків є визначення температури на поверхні сховища. Проте такі моделі не можуть бути використані для випадків транспортування РАВ на судні або їх короткочасного зберігання на плавучій споруді.

Використання розрахунково-експериментального підходу, як це показано у роботі [207], дає змогу отримувати кореляційні дані щодо допустимих температурних полів на зовнішній поверхні контейнерів з радіоактивними речовинами в залежності від руху вентиляційного повітря в середині контейнера з урахуванням його геометричних особливостей, проте система вимірювань температури вихідного повітря з окремих вентиляційних каналів дає значні розбіжності. Такий підхід не може бути застосованим для зберігання радіоактивних вантажів на об'єктах морської техніки в силу інших граничних умов. Враховуючи вищевикладене, необхідно зазначити, що:

- безпека транспортування та зберігання РАВ пов'язана з дослідженнями процесів теплообміну і потребує вирішення завдань відведення тепла з вантажної зони суден та плавучих споруд;
- «тепловий фактор» і конструктивно-компонувальні схеми технічних засобів для зберігання радіоактивних речовин з остаточним тепловиділенням є взаємно впливовими чинниками при проектуванні елементів біологічного захисту;

- через складність та погрішність прямих вимірювань і дистанційного визначення температур у вантажній зоні суден і плавучих споруд, застосування аналітичних методів, заснованих на розв'язанні прямих і обернених задач теплообміну, є більш переважним;
- існуючі підходи до розв'язання задач теплообміну та моделі теплового стану, розроблені для об'єктів наземного і підземного зберігання радіоактивних відходів, не можуть бути пристосованими для морської техніки, суден і плавучих споруд через інші граничні умови.

Для вирішення завдань, пов'язаних з проектуванням елементів біологічного захисту плавучих споруд, на яких зберігаються радіоактивні вантажі з остаточною тепловиділенням, уточнено наступні поняття:

- тепловий стан вантажної зони – поля розподілу температур і швидкостей повітря, визначені за результатами моделювання процесів теплообміну та застосовані для аналітичного оцінювання пожежонебезпечних ділянок на судні або плавучій споруді;
- тепла безпека – стан захищеності вантажної зони судна (плавучої споруди) від підвищених температур та утворення пожежонебезпечних ділянок.

1.6.3 Задачі міцності і радіаційної стійкості при проектуванні елементів біологічного захисту

Розрахунково-аналітичне обґрунтування параметрів біологічного захисту є необхідними умовами виконання проекту. Модульні та блочні елементи слід вважати укрупненими габаритними одиницями, для яких прийнято застосовувати принципи геометричного моделювання ситуації. Передусім це визначення координат центра ваги [58] з перевіркою умов загальної міцності (остійності та удиферентування). Питанням міцності композитних плавучих споруд присвячено роботи О.С. Рашковського, Л.І. Коростильова, М.Г. Слущкого [266, 284, 286], у яких досліджено напружено-деформований стан залізобетонних плит та надано практичні рекомендації щодо виконання перевірочних розрахунків міцності композитних плавучих доків у відповідності з вимогами нормативних документів. Алгоритмізація процесу досягається

шляхом застосування спеціалізованих програмних комплексів (зокрема *COSMOSFloWorks*, *ANSYSFlotran*), в основу яких покладено метод скінчених елементів і скінчених об'ємів [351, 405].

Вирішенню проблеми розробки елементів сховищ модульного типу присвячено роботи А.Ю. Андріанова, Є.О. Джура, Ю.О. Крикуна, В.А. Білоуса, С.Ю. Саєнка [8, 21, 193, 353], у яких запропоновано комплексний підхід щодо проведення дослідних, конструкторських робіт, який включає у себе:

- технічний підхід, в основу якого покладено досвід створення сховищ на базі елементів утилізованих ракетноносіїв та передових технологій ракетно-космічної галузі;
- обґрунтований вибір конструкційних і захисних матеріалів, розробку нових радіаційно захисних матеріалів з полі- та ультрадисперсною структурою з оптимізацією їх складу;
- виготовлення експериментального демонстраційного зразку модуля вертикальної конструкції.

Ці роботи висвітлюють проблему з позицій впровадження нових складів композиційних матеріалів, але не розглядають розрахункових методів зниження інтенсивності іонізуючих випромінювань, які повинні підтверджувати ефективність біологічного захисту. Більшість розрахункових методик ґрунтується на СанПин 26.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных электростанций», згідно з якими проектування стаціонарного біологічного захисту здійснюється за коефіцієнтом запасу по річній ефективній дозі, який рівний двом. Звичайні розрахунки містять визначення потужності експозиційної дози у місцях можливого знаходження персоналу. В роботі [353] запропоновано методику розрахунку «огибающего многократного рассеянного γ -излучения», для чого автори використовують систему комп'ютерних кодів *MicroShield* і *MikroSkyshine*, які дозволяють враховувати фактор накопичення γ -випромінювань у матеріалі стінки. Недоліком цієї методики є використання точкового джерела, що дає змогу оцінювати вклад розсіяного γ -випромінювання у потужність

експозиційної дози при зміні його розташування, що є актуальним саме для великих промислових об'єктів атомної енергетики. Для проектування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд такий підхід не може бути застосований через інші вимоги, які обмежено Правилами МАГАТЕ, ВОПОГ та ін. Враховуючи умови перевезення РАВ та їх тимчасового зберігання на об'єктах водного транспорту, інтенсивність джерел випромінювань є обмеженою характеристикою, яку наведено у вигляді транспортного індексу [300], тому задачі радіаційної безпеки повинні враховувати моделювання пожежонебезпечних ситуацій та розв'язанням задач міцності під впливом теплових ефектів.

Питанням руйнування композитних конструкцій в умовах теплових ефектів під час опромінення присвячено роботи О.В. Острика, О.О. Філіпенка [219, 283], для чого застосовано методи Монте-Карло і елементарної комірки, що ілюстративно демонструє процеси поглинання енергій планковського та монохроматичного випромінювання структурно неоднорідними шарами різного призначення (рентгенозахисного, демпфруючого, антистатичного тощо), виготовленими із гетерогенних матеріалів, наповнених мікросферами (скляними, металізованими, вуглецевими, фенольними). Термомеханічні процеси описуються через формування у захисному шарі ударної хвилі; як критерій розглядається ефективний коефіцієнт Грюнайзена γ_{ef} – термодинамічний параметр, який являє собою відношення теплового тиску в елементарній комірці до щільності теплової енергії. Проте розроблені розрахункові моделі вирішують питання міцності для літальних апаратів, за їх допомогою можна визначити параметри термомеханічної дії рентгенівських випромінювань, які виникають у атмосфері Землі. Тому через іншу специфіку експлуатації вони не можуть бути застосовані для прогнозування руйнування композитних суднових конструкцій в умовах транспортування або зберігання радіоактивних речовин.

Узагальнену оцінку питанням проектування і конструювання елементів суден можуть надати результати розв'язання задач дослідницького

проектування: аналіза, синтеза, функціонування, чому присвячено роботи, В.О. Некрасова, В.М. Тряскіна, В.І. Сутиріна, О. В. Бондаренка, Ю. М. Короля [27, 190, 205, 227, 308, 321]. Задачі аналізу розглядають характеристики об'єкта проектування при фіксованих значеннях проектних параметрів; задачі синтеза призначені для визначення значень проектних параметрів оптимізаційними методами; задачі функціонування описують поведінку об'єкта проектування на режимах, які визначені технічним завданням. У роботах [190, 205, 227] постановка та вирішення оптимізаційних задач щодо визначення головних елементів і характеристик суден розглянуто з позицій математичного моделювання функціонування судна в режимах послідовних і трампових рейсів, що дозволяє ще на початкових стадіях проектування задавати певні морехідні якості. Основні результати теоретичних досліджень, виконаних у роботі [214], дають змогу розглядати задачу синтеза статистичної моделі судна як об'єкта для управління його завантаженням з використанням інтелектуальних систем. Застосування саме системного підходу надає можливостей комплексно розглядати процеси проектування як пошук нетипових наукових напрямків з урахуванням нових перспектив будівництва і модернізації суден. В основу такого підходу покладено переорієнтування завдань проектування з «принципа мінімізації витрат на принцип максимізації продуктивного використання» [227].

1.6.4 Корозійні пошкодження цистерн для рідких радіоактивних вантажів, вихід з ладу запірної арматури та технологічні напрямки підвищення захисту

Рідкі радіоактивні вантажі, такі як реакторні та стічні води, мастила, емульсії, які накопичуються на атомних електростанціях, оборонних, хімічних та горно-хімічних комбінатах, об'єктах підводної техніки, в медичних та науково-дослідницьких закладах, відходи радіохімічних та біофізичних лабораторій, продукти забруднення (миючі засоби, морська вода, корозійні осадки апаратури вантажних систем), завантажуються у вкладені або у вбудовані циліндричні цистерни (танк-цистерни). Для їх виготовлення

застосовуються сталі звичайної якості марок Ст3, ВСт3кп2, ВСт3пс, ВСт3сп (ГОСТ 5521-93), які мають добру зварюваність і задовільні механічні властивості, а також низьколеговані сталі з високими технологічністю, міцністю і в'язкістю, низькою чутливістю до наклепу та старіння: це сталі марок 09Г2С (ГОСТ 5520-79), 10Г2С1Д, 10ХСНД (ГОСТ 5632-72) [302, 314].

Під впливом рідких РАВ, більшість яких мають складний хімічний склад (радіонукліди ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co ; нерадіоактивні солі з концентрацією до 32 г/л; технологічні розчини, які містять суміші радіоактивних ізотопів солей, різних елементів та кислот; нафтопродукти з концентрацією 70...90 мг/м³) та розчинів дезактивації, які містять розчини кислот [84, 199, 291], корпус цистерн зазнає активних корозійних пошкоджень з утворенням крихких тріщин та стає джерелом вторинного рентгенівського випромінювання [402]. Тому для їх виготовлення використовуються нержавіючі сталі аустенітного класу марок 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, хімічний склад яких регламентовано ГОСТ 5632-72, поставка – ГОСТ 7350-77. Саме ці сталі мають високу корозійну стійкість по відношенню до багатьох солей, та луг; азотної, холодної фосфорної, багатьох органічних кислот, проте є нестійкими до сірчаної, плавикової, гарячої фосфорної кислоти. З метою підвищення хімічної та корозійної стійкості іноді для виготовлення танк-цистерн використовуються плаковані конструкційні сталі за ГОСТ 10885-85, однак їх суттєвим недоліком є схильність до утворення тріщин, зниження міцності зварних швів, а також попадання хімічних вантажів під плакувальний шар. Таким чином, забезпечення корозійного захисту є важливим технологічним завданням, вирішення якого пов'язане з визначенням методу захисту, вибором матеріалів, дослідженнями їх пошкоджуваності, розробкою профілактичних заходів.

Сучасний досвід захисту від хімічної корозії суднових цистерн, виготовлених з вуглецевих та легованих сталей, включає в себе застосування технологій гумування [302], нанесення лакофарбових та епоксидних покриттів [272, 320], електродугової металізації [340, 356].

Технологія гумування полягає у захисті сталевих поверхонь цистерн, резервуарів термостійким каучуком, який за допомогою методів прокатування наноситься на розігріту до 40...50 °С сталеву поверхню. Нагрівання конструкцій здійснюється за допомогою установок індукційної дії, завдяки чому приповерхневий електропровідний шар зазнає рівномірного прогрівання; таке покриття здатне витримувати багаторазові деформації та не взаємодіє з агресивними середовищами. Складність та кривизна циліндричних поверхонь вимагає застосування рідких каучукових розчинів та ретельної підготовки якості поверхні за допомогою піскоструменної обробки. У порівнянні з технологіями гумування нанесення лакофарбових або епоксидних корозійностійких покриттів є більш спрощеною процедурою з використанням стандартного обладнання (фарбопультів, компресорів, pomp тощо), проте підготовка поверхні полягає не тільки у очищенні іржі, окалини, піскоструменній обробці внутрішньої поверхні цистерн, але включає в себе застосування мастик, емалей. Питанням функціональної придатності полімерних покриттів присвячено роботи [6, 37, 42, 94, 245, 272, 320]. Більшість епоксидних композицій, стійких до високих температур і хімічно агресивних середовищ, які входять до складу рідких РАВ, втрачають до 70 % маси і механічних властивості, зокрема адгезійної міцності. Найбільш перспективними вважаються епоксидні композиції на основі олігомерів (зокрема ЕД-20), які набувають важливих механічних властивостей в результаті перетворення на сітчастий полімер. Застосування електродугового напилення для протикорозійного захисту суднових цистерн є ще новим, недостатньо дослідженим напрямком; сучасний досвід викладено в роботах [54, 222, 297, 302]. Розробка і впровадження нових складів антикорозійних покриттів з вузькоспеціальними функціональними властивостями сприятиме розвитку технологій електродугового напилення у суднобудуванні та судноремонті.

Запірно-регулююча арматура є важливою частиною вантажної системи судна і являє собою пристрої для перекриття потоку наливних вантажів, регулювання тиску, температури та об'єму рідини [51]. Вантажні системи з

заглибною помпою (рис. 1.12) забезпечують на плавучих спорудах завантаження рідких РАВ у вертикальні цистерни. Тому деталі запірної арматури, такі як клапани, фланці, крани, крім гідравлічних ударів та інтенсивного зношення зазнають корозійних пошкоджень внаслідок експлуатації у хімічно активних середовищах, до складу яких входять сполуки солей важких металів, що призводить до виходу їх з ладу.

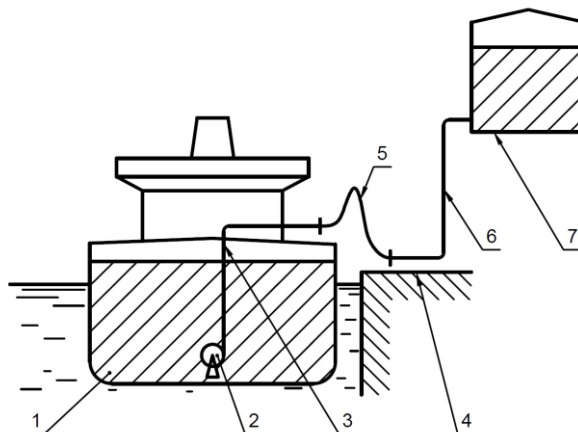


Рисунок 1.12 – Вантажна мережа із заглибною помпою [50]:

- 1 – вертикальна цистерна; 2 – заглибна помпа; 3 – суднова напірна магістраль;
4 – пірс терміналу; 5 – з'єднувальний шланг; 6 – берегова магістраль;
7 – берегова цистерна

Традиційно для їх виготовлення використовуються литі вироби з міді марок М1, М2, М3 (ГОСТ 859-2001), мідно-нікелевих сплавів типу МНЖ (ГОСТ 492-2006), бронзи марок БрАМц9-2, БрАЖ9-4, БрБ2 и др. (ГОСТ 18175-78) [98], застосування яких відповідає вимогам надійності, зносостійкості, корозійної стійкості. У звичайних умовах термін їх експлуатації складає 1,5...2 роки; застосування в умовах розчинів кислот, солей, корозійного осаду, миючих та дезактивуєчих засобів скорочує його навіть удвічі.

Ефективним методом відновлення зношених виробів із кольорових металів і сплавів вважається газотермічне, а саме плазмове напилення порошкоподібних матеріалів, економічна доцільність якого визначається екологічними та енергетичними чинниками. Перспективним технологічним

напрямком є напилення порошків бронзи, міді, бабіту, у тому числі марок ПТ-19М01, ПГ-АН10, ПГ-АН12 (ГОСТ 28377-89), переважно сферичної форми, одержаних методами розпилення розплавів (зокрема припою) стиснутим повітрям. Плазмове напилення, принцип якого полягає у подачі порошку у високотемпературний плазмовий струм з наступним зчепленням з поверхнею, є ефективним для великої партії деталей і здійснюється в умовах цеху. Через здороження сировини, енергоносіїв та амортизаційних витрат на відновлення деталей запірної арматури, відлитих з кольорових металів і сплавів, втрачає рентабельність. Використання сталевих виробів з напиленими мідними та бронзовими покриттями у складних хімічно активних умовах не можливо внаслідок інтенсивності корозійних процесів у пористій структурі, різниця у ТКЛР з матеріалом підкладки призводить до руйнування при термоциклічних навантаженнях. Необхідність збільшення товщини захисного шару на сталевій поверхні обумовлює доцільність експлуатації біметалевих виробів, для одержання яких використовуються технології гарячої прокатки, зварювання, методи порошкової металургії [96, 100, 263, 302]. Для ремонту одиночних деталей енергоефективним є спосіб електроконтактного припікання [44, 293], який полягає у нагріванні відновлюваного виробу та металевого порошку шляхом пропускання електричного струму, проте його застосування у масовому виробництві обмежується через складність обладнання і вимог, що пред'являються до дисперсності металевих порошків. Інтенсифікація фізико-хімічних процесів при напіканні порошкових покриттів здійснюється за допомогою спеціальних методів активації сталеві поверхні, а саме хімічної, температурної, силової [76]. Скорочення часу, кількісне обмеження хімічних активаторів, зниження температурних діапазонів досягаються шляхом застосування тиску пресування.

Заміна литих деталей з кольорових металів і сплавів на біметалічні сталеві вироби з поверхневим захисним шаром сприятиме зниженню техніко-економічних показників, проте перспективні технології відмовляються від дорогівартісних порошків, поставки якої залежать від виробництв,

розташованих на територіях інших країн, та ґрунтуються на використанні виробничих відходів у вигляді стружки [220, 259], яку за допомогою спеціальних технологій здрібнення переробляється у порошок. Оскільки одержані порошки мають несферичну форму та під час переробки зазнають наклепу, їх використання не є ефективним для газотермічного напилення, але підходить до виготовлення матеріалів термдеформаційними методами. На даний час у патентній та науковій літературі відсутні відомості про відновлення сталевих виробів шляхом напикання на зношену поверхню порошкових покриттів, для яких застосовано здрібнену стружку, що є ще новим недослідженим напрямком, який може знайти широке застосування при виготовленні та ремонті деталей запірної арматури суднових вантажних систем.

1.6.5 Методи, критерії та інформаційні ресурси оцінювання технічного стану суднових конструкцій на етапах проектування, технологічної підготовки і експлуатації

Оцінювання технічного стану конструкцій суден і транспортного обладнання є важливою задачею, яка вирішується ще на етапах проектування та гарантує надійність вантажних операцій з РАВ при їх перевезенні та зберіганні. Сучасний досвід та методичні основи забезпечення конструктивної безпеки морських суден викладено в роботах В.В. Козлякова, Г.В. Єгорова, В.М. Тряскіна, О.М. Нікітіна, В.А. Кулеша, М.А. Москаленка [73, 156, 167, 207, 196, 321] і ґрунтовані на збиранні та узагальненні інформації щодо динаміки пошкоджуваності конструкцій при тривалій експлуатації, прогнозування втомленої довговічності та остаточного ресурсу з розробкою алгоритмізації профілактичних і ремонтних заходів. Концептуальний підхід до їх розв'язання ґрунтується на гіпотезах неприпустимості ймовірності руйнування конструкцій, в основу яких покладено випадковий характер навантажень і пошкоджуваності матеріалів; теоретичні передумови – на теорії надійності із застосуванням статистичних методів для прогнозування їх безвідмовності. При цьому об'єкт досліджень – безпека судна розглядається як складна технічна система, для досліджень якої застосовано методи теорії систем, математичної статистики,

теорії ризика і теорії катастроф [73, 154, 261, 308]. Формалізована оцінка безпеки суден [73, 196, 206, 207, 321] ґрунтується на теорії ризиків і теорії катастроф та включає у себе збір даних, ідентифікацію небезпеки, вивчення варіантів контролю ризиків, моніторинг і визначення матеріальних витрат. З результатами багатофакторного аналізу здійснюється коректування критеріїв і надається оцінки ризику певних видів суден з розробкою нормативної документації та проектних, технологічних і експлуатаційних рекомендацій. Моделюванню відмов критичних елементів (складних інженерних систем, цистерн, валопроводів тощо) присвячено роботи [27, 218, 289], у яких шляхом розв'язання задач будівельної механіки і деталей машин [172, 304] одержується інформація щодо розподілу разового навантаження з накопиченням пошкоджень, яку виражено через кумулятивні моделі корозійного та механічного зношування, втомлених пошкоджень [52, 54, 99, 152, 241] або їх можливі комбінації зі швидкісними критеріями як найбільш інформативними параметрами. Для цього, як правило, застосовуються дискретні ланцюги Маркова, експериментально-розрахункові методики з визначенням геометричних факторів (розмір тріщин, корозійних осередків тощо), методи кореляційного аналізу. Часто застосовність вищеназваних моделей обмежується недостатністю для розрахунків вихідних даних, непередбаченими навантаженнями, відмовами внаслідок проектних помилок та іншими умовами, встановити які не можливо. Традиційно для розв'язання аналогічних завдань застосовуються методи системного аналізу, теорії ймовірності, математичної статистики, математичного програмування, скінчених елементів, подібності і розмірності [73, 99, 154, 261, 308]. Вирішенням питань безпеки через впровадження конструкторських заходів та нових вимірювально-інформаційних систем моніторингу присвячено роботи Ю.Д. Жукова, А.Я. Казарезова, В.І. Меньшикова, А.Б. Власова, С.О. Буєва [99, 184, 256]. Експериментальні методи досліджень містять проведення дороговартісних натурних випробувань на спеціально підготовлених моделях [240, 241, 245, 336, 337] та велику кількість металографічних досліджень зварних з'єднань,

сталевих поверхонь, лакофарбових покриттів з метою виявлення ознак деградації структури та властивостей. Для цього на практиці застосовано методи неруйнуючого контролю і випробування на зразках-свідках, а саме: хімічний, металографічний аналіз, механічні випробування [245]; вимірювання геометричних параметрів здійснюються за допомогою методів товщинометрії. Накопичені на однотипних суднах експериментальні дані підлягають статистичній обробці за допомогою сучасних версій систем комп'ютерної алгебри [154], новою тенденцією якої є робота з базами даних (БД), що містять переважно графічні об'єкти інформації: залежності розподілу зносів і напружень, фотографії корозійної та механічної пошкоджуваності. Отримані результати використовуються для розробки конструктивно-технологічних заходів щодо усунення дефектів на стадії проектних розробок. Проте використання існуючих програмних продуктів не забезпечує збір, обробку, зберігання та систематизацію даних про структурні й експлуатаційні характеристики використаних матеріалів.

У випадках використання композиційних матеріалів оцінювання технічного стану ґрунтується тільки на візуальному та зовнішньому огляді [240, 336, 337]; на відміну від сталевих у композитних конструкціях можуть розвиватися інші дефекти, визначення яких можливе виключно за допомогою проведення мікроструктурних досліджень, рентгеноструктурного аналізу, механічних випробувань. Широкий спектр матеріалів і покриттів, які застосовуються у суднобудівних технологіях, специфічні умови експлуатації значно ускладнюють оцінювання технічного стану конструкцій і вимагають проведення систематизації широкого спектра даних, вдосконалення методів і засобів діагностування, обробки та прогнозування результатів. Розв'язання цієї задачі можливе шляхом впровадження спеціалізованих інформаційно-пошукових систем (ІПС), що дозволяє забезпечити технічне спостереження за експлуатацією суднових конструкцій та узагальнити результати теоретичних і експериментальних досліджень, суттєво спростити збір та систематизацію інформації. Моделі і програми [167], які застосовуються на даний час,

прив'язані до конструкцій певних суден і не містять відомостей про властивості використаних матеріалів та їх пошкоджуваності у складних умовах. Методи оцінювання технічного стану конструкцій суден повинні ґрунтуватися на принципах доступності оновлення та систематизації інформації, можливості зіставлення результатів, використанні їх при обробці статистичними методами, зведення до мінімуму матеріальних витрат шляхом скорочення натурних випробувань.

Пристосування існуючих методів оцінювання технічного стану до конструкцій біологічного захисту ускладнено специфічними умовами експлуатації: крім радіаційних дефектів матеріали зазнають температурних навантажень і впливу хімічно активних середовищ, джерелом яких є більшість рідких радіоактивних відходів.

У науковій літературі останнього десятиріччя слабо відображаються нові методи оцінювання технічного стану. Шляхи їх розвитку стосовно захисних конструкцій вимагають нових наукових розробок, які повинні містити ґрунтовний аналіз технологічних і експлуатаційних дефектів зі складанням їх класифікації та систематизацією інформації за допомогою спеціалізованих інформаційних пошукових систем (ІПС), розробка і застосування яких спрямовані на вдосконалення методів роботи експерта, скорочення часу на обробку інформації, розробку моделей поведінки матеріалів в умовах експлуатації. Як правило, інформація, що поступає від розробників, наводиться у вигляді експериментальних робіт і не зібрана у єдиний інформаційний масив, який містить порівняльні відомості про структури, властивості і характер пошкоджуваності уже існуючих аналогів, що традиційно застосовуються у суднобудівних технологіях. Застосування ІПС дасть змогу підвищити ефективність збирання та обробки інформації, встановити взаємний зв'язок між задачами проектування і технічного нагляду за експлуатацією конструкцій суден. Існуючі електронні довідники, каталоги, документальні бази даних локалізовані у вузькопрофільних лабораторіях та наукових центрах з обмеженим доступом [151, 173]. Перш за все, це фактографічні ІПС, що містять

інформацію про властивості матеріалів у табличній формі, та документальні, які включають електронні копії статей, книг, патентів. Однією з тенденцій розвитку інформаційно-пошукових технологій є стирання границь між документальними та фактографічними базами даних: у традиційні документальні системи додають таблиці з графічною інформацією; фактографічні системи включають велику кількість текстової інформації та відповідні засоби контекстного пошуку, а також оснащуються контурами повнотекстових документів у форматах *pdf або *html [151].

Передумовами для подальших розробок є постійно зростаючий попит та розширення асортименту суднобудівних матеріалів для експлуатації у екстремальних умовах: опромінення, термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ тощо. За якісні критерії при оцінювання технічного стану конструкцій, виготовлених з них, приймаються ознаки деградації структури з документальними підтвердженнями у вигляді фотознімків їх мікро- та макроструктури та зміни функціональних властивостей.

Оцінювання технічного стану являє собою багатокритеріальну та динамічну задачу, формулювання і розв'язання якої відбувається одночасно за декількома аналітичними цільовими функціями з алгоритмичними і аналітичними обмеженнями. Моделюванню ситуації надається графічний вигляд, за допомогою якого встановлюється взаємний вплив факторів як у одномірному вигляді, так і у динаміці. Останнім часом для досліджень великих систем, які функціонують в умовах невизначеності, та управління у них розвитком ситуації набули актуальності когнітивні методи (аналізу та синтезу). Ефективність застосування когнітивного підходу до задач оцінювання безпеки авіаційних засобів розглянуто у роботі [195], для суднобудівних задач цей напрям є недостатньо дослідженим і новим.

Метою когнітивного аналізу є визначення механізмів функціонування системи, тобто механізмів явищ і процесів. Реалізація процедур когнітивного аналізу відбувається на підставі цілеспрямованого перебору за думкою експерта-спеціаліста у предметній області; за результатами будується об'єктно-

орієнтований граф – когнітивна карта, яка являє собою різноманітні комбінації елементарних і простих структур. Повний перебір всіх ймовірних комбінацій можливий тільки на елементарних структурах. В процесі досліджень простих структур казуальні зв'язки між факторами визначені на підставі матриці суміжності. Якщо зростання одного фактора приводить до зростання іншого фактора, то взаємний вплив вважається позитивним і позначається знаком «+», якщо зростання одного фактора призводить до зниження іншого, то взаємний вплив вважається негативним і позначається знаком «-». Реалізація побудованих моделей здійснюється за допомогою спеціалізованих систем програмних засобів. Дослідження складних структур вимагає вже експериментальних досліджень на натурних, але спрощених моделях, планування експерименту і експертний відбір реалістичних варіантів. Когнітивний синтез, включає у себе декомпозицію структур, розв'язання обернених задач за різними оптимізаційними критеріями та прийняття рішень. Незважаючи на те, що при побудові когнітивної моделі може бути використана неповна, нечітка та навіть суперечлива інформація, її застосування дає змогу суттєво підвищити повноту і точність досліджень і сприяє кількісному скороченню дороговартісних експериментальних робіт.

Методичне забезпечення управління якістю є комплексним системним підходом, що дає змогу приймати рішення в умовах неповноти та неточності інформації. Це методи різного рівня складності, до яких належать контрольні листки, гістограми, метод стратифікації, діаграми (зокрема причинно-наслідкові діаграми Ісікави і Парето, розкиду), контрольні карти процесів [252, 373]. Більш новітні методи включають в себе QFD-аналіз (QualityFunctionDeployment – метод розгортання функцій якості) та FMEA-аналіз (Failure modes and effects analysis – аналіз причини наслідків відмов). У багатьох випадках при вирішенні задач технологічного характеру для виконання аналізів ризиків як інструмент використовуються діаграми Каору Ісікави [279, 373], за допомогою яких можна структурувати проблему, проаналізувати та систематизувати фактори, які визначають виробничо-

технологічну групу дефектів конструкцій. Побудова діаграм Ісікави (т.з. «риб'яча кістка») є можливою як у ручному режимі, так і за допомогою спеціальних програмних засобів (зокрема «Konsi-Fishbone-Ishikava Diagram»). Завдання подальших досліджень пов'язані з побудовою причинно-наслідкових діаграм для оцінки технічного стану на етапі виготовлення елементів біологічного захисту із застосуванням розроблених композиційних матеріалів та покриттів з метою запобігання технологічних дефектів.

1.7 Висновки з аналітичного огляду літератури, формулювання протиріч та недосліджених частин проблеми

В результаті ознайомлення з сучасною практикою проектування, будівництва, модернізації та експлуатації суден і плавучих споруд, призначених для транспортування, перевантаження та короткочасного зберігання радіоактивних вантажів визначено, що:

1) їх конструктивними особливостями є елементи біологічного захисту модульного типу, які встановлюються у вантажній зоні і збираються з шаруватих панелей, для виготовлення яких у більшості випадків застосовуються радіаційно стійкі бетони, плаковані або нержавіючі сталі;

2) елементи біологічного захисту, які на плавучих спорудах відокремлюють упаковані РАВ з остаточною тепловиділенням, мають блочну стаціонарну конструкцію та являють собою складний об'єкт для досліджень, у якому головна роль відводиться процесам теплообміну між радіоактивними речовинами і навколишнім середовищем, що безпосередньо впливає на вибір конструктивно-компонувальних рішень та визначає умови теплової безпеки на плавучому об'єкті;

3) одним із перспективних шляхів підвищення техніко-експлуатаційних показників суден і плавучих споруд є розроблення і впровадження нових матеріалів і покриттів з комплексно-захисними властивостями, здатних послаблювати потоки іонізуючих випромінювань, джерелами яких залишаються

упаковані і неупаковані радіоактивні вантажі, а також працювати в умовах термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ та суднових вібрацій. Це дасть можливість підвисити захист елементів біологічного захисту від шкідливої дії РАВ, суттєво знизити їх масу, розширивши тим самим асортимент вантажів і підвищивши показники вантажообігу, що є актуальним для створення багатоцільових суден, а також для випадків обробки вантажів в залежності від їх енергетичних характеристик та агрегатного стану.

Ретельна проробка наукових праць [4, 10, 15, 16, 27, 46, 54, 55, 56, 69, 72, 73, 79, 97, 99, 149, 157, 162, 172, 190, 194, 196, 205–207, 217, 222, 227–230, 239–242, 244, 245, 250, 251, 255, 260–262, 266, 268–270, 280, 284, 285, 291, 300–303, 304, 308, 314, 319–322, 336, 337, 341, 400] виявила *наступні проблемні питання*:

- при проектуванні плавучих баз і сховищ не враховуються енергетичні характеристики, зокрема остаточне тепловиділення РАВ, характер розподілу полів температур та потоків повітря з визначенням застійних зон, що утворюють пожежонебезпечну ситуацію. Існуючі аналітичні методи, які ґрунтуються на вирішенні спряжених та зворотних задач теплообміну, сформульовані та розв'язані для технічних засобів наземного та підземного зберігання радіоактивних відходів, і через інші умови та механізми переносу тепла, не можуть бути застосовані для плавучих об'єктів;
- не зважаючи на розвиток тенденцій роботи з базами даних, які містять графічні об'єкти інформації (фотографії, графіки, таблиці тощо), застосовані методи оцінювання технічного стану не мають вигляд комплексного аналітичного прогнозу життєдіяльності конструкцій на етапах проектування і виготовлення, а їх моделі і програми зосереджені у вузькопрофільних лабораторіях і центрах;
- існуючі методи проектування конструкцій включають у себе розв'язання задач синтезу та аналізу і не враховують механізмів взаємодії іонізуючих випромінювань (джерелами яких залишаються РАВ) з матеріалами

конструкцій, що призводить до суттєвого підвищення товщин біологічного захисту і як наслідок, масогабаритних показників елементів суден;

- традиційно застосовані бетонні конструкції з облицюванням з нержавіючої або плакованої сталі мають певні технологічні недоліки і експлуатаційні дефекти, що вимагає розроблення конструктивних рішень з використанням нових комплексно-захисних матеріалів, здатних працювати в умовах теплових та іонізуючих випромінювань, термічних навантажень і вібрацій;
- корозійні процеси, пов'язані зі зберіганням рідких РАВ та дезактивацією, викликають пошкодження суднових цистерн і деталей запірної арматури вантажних систем, що вимагає нових методів і складів для їх ремонту та відновлення;
- недостатньо повно розкрито процеси руйнування конструкцій в умовах термоциклічних навантажень та теплових ефектів, які відбуваються під час опромінювання матеріалів.

В основу розроблення теорії підвищення захисту елементів суден і плавучих споруд від радіаційного, теплового, корозійного впливу радіоактивних вантажів покладено наукову проблему з фізико-хімічних питань створення нових матеріалів і покриттів, хімічний склад структура яких забезпечить певні механізми послаблення випромінювань від радіоактивних вантажів, міцність конструкцій в умовах теплових ефектів, здатність гасити коливання, корозійну і хімічну стійкість та сприятиме відведенню тепла від розігрітих ділянок.

Аналіз проблематики впровадження сучасних неметалічних матеріалів [152, 166, 216, 250, 282, 284, 297, 302, 314, 320, 358] у суднобудівні технології показав, що:

- перевагами полімерних композицій на основі поліорганосилоксанових, ненасичених поліефірних і феноло-формальдегідних смол та меламіно-формальдегідних, поліетиленових, полівінілхлоридних та фторопластових покриттів є низка щільність, технологічність і радіаційна стійкість, проте їх

застосування обмежено через розкладання у розчинах для дезактивації, куди входять розчини азотної, плавикової та сірчаної кислот;

- серед полімерних композицій найбільш перспективними є синтактичні пінопласти, зокрема сферопластики, пошарове нанесення яких забезпечує формування захисних покриттів з різним градієнтом властивостей (теплоізоляційних, демпфірувальних, рентгенозахисних тощо), проте в умовах теплових ефектів існує висока ймовірність їх руйнування внаслідок деструкційних процесів або пластичної плинності полімерної матриці на поверхні поділу з наповнювачем;
- підвищення техніко-експлуатаційних показників біологічного захисту можливо шляхом створення багаторазового послаблення потоку іонізуючих випромінювань за допомогою матеріалів з різною поглинаючою та відбивною здатністю, зокрема поєднання скла з металами;
- надійність конструкцій визначається міцністю зчеплення шарів з різних матеріалів, незначною різницею в значеннях ТКЛР, ремонтною та експлуатаційною технологічністю, для чого доцільно застосовувати адгезійні клейові з'єднання та технології газотермічного напилення.

Вивчення наукових праць вітчизняних і зарубіжних праць [13, 30, 84, 181, 199, 210, 211, 226, 260, 273, 278, 280, 281, 291, 295], у яких відображено сучасний досвід застосування стекол в технологіях ізолювання радіоактивних відходів і створення радіаційно стійких матеріалів показало, що:

- розвиток методів поводження з радіоактивними речовинами пов'язано з поширенням застосування стекол систем $\text{BaO}-\text{Cd}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; $\text{Li}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{PbO}-\text{TeO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{GeO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ для створення екранів від іонізуючих випромінювань, сорбційних і радіаційно стійких матеріалів радіохімічної промисловості;
- для іммобілізації радіоактивних відходів застосовуються натрієборосилікатні і алюмофосфатні стекла систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ та $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, які після з'єднання з радіоактивними відходами

утворюють особливий вид скла – радіаційне скло, яке повинно перешкоджати переходу радіонуклідів до навколишнього середовища;

- обмеженість стекол для виготовлення захисних обкладинок у технічні засоби пов'язано з радіаційними ефектами – фізико-хімічними процесами, основаними на тепловій природі радіаційного впливу, які призводять до змін у структурі, зокрема поліморфних перетворень та фізико-механічних властивостей з утворенням температурних мікронапружень;
- перевага надається полі- та ультрадисперсним композиціям, для створення яких перспективною сировиною є скляні порошки та мікросфери; попит на дороговартісну дефіцитну сировину, зокрема на свинцевмісне скло, викликає розвиток технологій переробки скляного бою та відходів;
- застосування металізованих мікросфер сприятиме підвищенню їх теплопровідності та утворенню ефекту відбивання потоків у середовище поглинання, проте їх одержання є дороговартісним процесом, ускладненим великою кількістю бракування.

Аналіз теоретичних і технологічних передумови з'єднання скла з металами шляхом дифузійного зварювання, паяння, спікання, електродугового напилення [11, 19, 36, 68, 100, 146, 147, 218, 263, 299, 306, 333] показав, що :

- для створення нерознімних з'єднань зі стеклами переважно обирати алюміній, мідь, залізо та його сплави, нікель, титан, ніобій, а при виборі компонентів слід надавати увагу їх температурі плавлення, коефіцієнтам теплопровідності та ТКЛР, різниця у яких може викликати мікротріщини та руйнування через термічні напруження на границі метал–скло, зниження яких можливо в результаті застосування порошків сферичної форми;
- на даний час не існує єдиного уявлення про фізико-хімічні процеси з'єднання скла з металами, а сучасні розробки ґрунтуються на оксидній, дендритній і адсорбційній теоріях, в основу яких покладено гіпотезу про мікронеоднорідну будову окисних стекол як простих, так і складних систем;
- сучасний досвід спікання скляних порошків з порошками металів обмежується застосуванням порошків заліза для виготовлення антифрикційних

виробів, що характеризується високою енергоємністю, складністю пристосування обладнання для технологічних процесів і необхідністю використання спеціалізованих середовищ. Спінання порошкових пресовок в діапазоні температур 800...1600 °C у водні, аргоні, азоті сприятиме ситалізації скла з утворенням перехідної зони з ортосилікату заліза (II) Fe_3SiO_4 – фаяліту;

- показано перспективи застосування технологій спінання скляних порошків і мікросфер для виготовлення матеріалів плавучості з теплоізоляційними властивостями;
- додавання скляних порошків під час напилення електродугових покриттів підвищує їх зносостійкість і корозійну стійкість і є новим перспективним напрямком для відновлення деталей у суднобудівному машинобудуванні.

Проте недостатньо дослідженими залишаються питання:

- впливу високотемпературних технологій композиційних матеріалів і покриттів, таких як спінання і електродугове напилення на структурний стан дисперсних скляних наповнювачів;
- впливу скла на радіаційну стійкість електродугових покриттів;
- дослідження термомеханічних процесів при опроміненні скловмісних структурно неоднорідних матеріалів і покриттів;
- у наукових працях, присвячених спінанню скляних порошків [36, 218, 306, 307], не розглядається можливість спінання порожніх скляних мікросфер з порошками металів.

На підставі вищевикладених висновків та аналізу проблемних питань виявлено наукове *протиріччя*, яке полягає у відсутності взаємозв'язку між теоретичними принципами проектування елементів біологічного захисту суден (плавучих споруд) та технологічними передумовами підвищення їх комплексного захисту від РАВ за участю сучасних багатофункціональних матеріалів, в основу створення і експлуатації яких повинні бути покладено нові наукові знання та уявлення про фізико-хімічні процеси з'єднання скла з металами, про вплив скляних порошків і мікросфер на механізми послаблення іонізуючих випромінювань і розвиток термомеханічних і корозійних процесів

при експлуатації. Сформульоване протиріччя покладено в основу *ідеї дисертаційного дослідження*, яка полягає у створенні принципово нового наукового підходу до проектування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд для РАВ на основі принципів теплової безпеки та теорії захисту конструкцій з розробкою фізико-хімічних основ створення нових метал-скляних матеріалів і покриттів методами спікання і електродугового наплення, що спрямовано на підвищення техніко-експлуатаційних показників об'єктів водного транспорту і розвиток методів оцінювання технічного стану композиційних конструкцій.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ І МЕТОДОЛОГІЯ ПОСТАНОВКИ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Архітектура та постановка дисертаційного дослідження

Архітектуру дисертаційного дослідження представлено у графічній інтерпретації (рис. 2.1) розв'язання міждисциплінарних прикладних науково-технічних завдань (рис. 2.2). Це технологічні завдання підвищення комплексного захисту елементів суден, завдання оцінювання їх технічного стану та конструкторські і проектні завдання, які включають у себе проведення фундаментальних і прикладних досліджень з постановкою фізичних і числових експериментів, виготовленням зразків науково-методичної продукції, розробленням нових інформаційних систем, розв'язанням задач теплообміну та мікромеханіки.

Мета розділу – теоретичне обґрунтування науково-технічної проблеми дисертаційного дослідження та розробка методологічних аспектів постановки наукових робіт, які включають у себе формулювання наукових гіпотез, вибір теоретичних, експериментальних та розрахунково-експериментальних методів досліджень з наступною реалізацією їх у вигляді науково-методичної бази.

Об'єкт досліджень – процеси деталізації наукового дослідження на основі єдиного підходу до вирішення проектних і технологічних завдань.

Предмет досліджень – теоретичні і методичні засади для розробки підходів до проектування і захисту елементів суден шляхом створення нових композицій з переважним впливом скляної складової на експлуатаційні властивості.



Рисунок 2.1 – Архітектура дисертаційного дослідження

Реалізацію теоретичних і експериментальних досліджень передбачено у вигляді:

- теоретичних і технологічних основ створення нових метал-скляних матеріалів і покриттів з комплексно-захисними властивостями;
- експериментальних зразків спечених матеріалів, електродугових покриттів, лабораторного обладнання, методик досліджень;
- постановки фізичних експериментів на лабораторних джерелах енергій іонізуючого випромінювання та обладнанні з механічних випробувань та визначення фізико-механічних властивостей;
- нової комп'ютерної програми задля вирішення оптимізаційних задач з розміщення елементів біологічного захисту у трюмі суховантажного судна та нової інформаційно-пошукової системи щодо систематизації даних з технологічних чинників та пошкоджуваності суднобудівних матеріалів під час експлуатації в умовах радіоактивних вантажів;
- когнітивних моделей створення нових скловмісних радіаційно стійких матеріалів і покриттів та їх подальшої експлуатації у складі шаруватих конструкцій елементів біологічного захисту;
- постановки та розв'язання спряжених задач теплообміну з числовими експериментами щодо моделювання розподілу полів температур та швидкостей повітря у вантажній зоні плавучих споруд при зберіганні на них радіоактивних речовин з остаточним тепловиділенням;
- постановки числових експериментів щодо моделювання процесів руйнування модульних елементів біологічного захисту у пожежонебезпечних ситуаціях на судні;
- технологічних рекомендацій щодо корозійного захисту за допомогою нових метал-скляних матеріалів і покриттів вантажних цистерн для рідких РАВ та заходів щодо ремонту деталей запірної арматури;
- технологічних рекомендацій з виготовлення та монтажу елементів біологічного захисту на судні та плавучих спорудах;
- результатів впровадження дисертаційних розробок.

Мета роботи: створення наукових засад проектування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, які спрямовані на підвищення техніко-експлуатаційних показників та ґрунтуються на принципах послаблення випромінювань, теплової безпеки та теорії їх захисту з розробкою фізико-хімічних основ створення нових матеріалів і покриттів з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення

Аналітичний огляд сучасного наукового досвіду з проблематики проектування і підвищення захисту елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів; теоретичних і технологічних тенденцій створення поліфункціональних матеріалів для суднобудування на основі скла

Розроблення нових науково-методичних засад оцінювання технічного стану захисних суднових конструкцій, що ґрунтуються на принципах систематизації та оновлення інформації щодо пошкоджуваності матеріалів в умовах опромінення, термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ та взаємозв'язку проектних, технологічних і експлуатаційних факторів

Створення теоретичних засад підвищення комплексного захисту елементів суден від шкідливої дії РАВ з розробленням нових матеріалів і покриттів, структура і властивості яких забезпечать зниження інтенсивності потоків γ - і рентгенівських випромінювань, міцність під дією теплових ефектів та надійну експлуатацію в умовах судна

Вирішення конструкторських завдань щодо удосконалення конструкції модуля біологічного захисту за допомогою розроблених матеріалів і покриттів з розв'язанням задач міцності в екстремальних умовах експлуатації

Розроблення фізико-хімічних основ поєднання у одній композиції скляних і металевих компонентів методами спікання та електродугового напилення з встановленням закономірностей впливу аморфного та кристалічного стану скла на структуру і експлуатаційні властивості композиційних матеріалів і покриттів

Розроблення нових теоретичних підходів до проектування модулів і блоків біологічного захисту з вибором конструктивно-компонувальних рішень на основі експлуатаційних критеріїв та обмежень за енергетичними характеристиками РАВ

Розроблення ремонтних заходів деталей запірної арматури вантажних систем плавучих споруд для рідких РАВ, технологічних рекомендацій щодо виготовлення конструкцій за участю нових матеріалів і покриттів з визначенням техніко-економічних показників та розв'язанням оптимізаційних задач за технологічними та вартісними критеріями

Визначення інноваційних перспектив розвитку проектів будування та модернізації суден, економічної ефективності наукових розробок та їх апробація у проектних, виробничих та наукових організаціях та навчальному процесі у вищі

Рисунок 2.2 – Мета і завдання дисертаційного дослідження

Інформаційну базу досліджень становлять Регістр судноплавства України, норми МАГАТЕ, нормативні документи Міжнародних конвенцій, законодавча база України; наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених з конструювання, проектування і будування суден [27, 72, 73, 79, 97, 157, 190, 194, 207, 227, 250, 266]. Проектні дослідження виконано за допомогою методів скінчених об'ємів та скінчених елементів, числового моделювання процесів теплообміну та короткочасних температурних навантажень з використанням *CFD*-пакету *Flowision*; наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених в області технології тугоплавких неметалічних матеріалів [86, 89, 96, 318, 330], радіаційних ефектів у стеклах [13, 23, 30, 150, 199, 204, 211, 246], хімії твердого тіла та склоподібного стану [11–13, 28, 29, 53, 59, 62, 83, 89, 155, 171, 181, 198, 226, 292, 303, 318, 330, 347, 369, 390], мікромеханіки композитів [34, 74, 163, 219, 386], технології суднобудівних матеріалів [152, 166, 216, 250, 282, 284, 297, 302, 314, 320, 358].

2.2 Характеристика елементів біологічного захисту як об'єктів проектування

Елемент біологічного захисту – елемент судна або плавучої споруди модульної або блочної конструкції, який розташований у вантажній зоні та відокремлює упаковані у контейнери (або іншу тару) або неупаковані РАВ (фрагменти обладнання, зв'язані у пучки труби, радіоактивний металобрухт) від інших вантажів, обладнання та персоналу.

Модуль біологічного захисту – збірно-розбірний елемент судна, встановлюється у трюмі (рис. 2.3) та складається з жорстко-закріплених панелей (див. рис. 6.3) шаруватої конструкції.

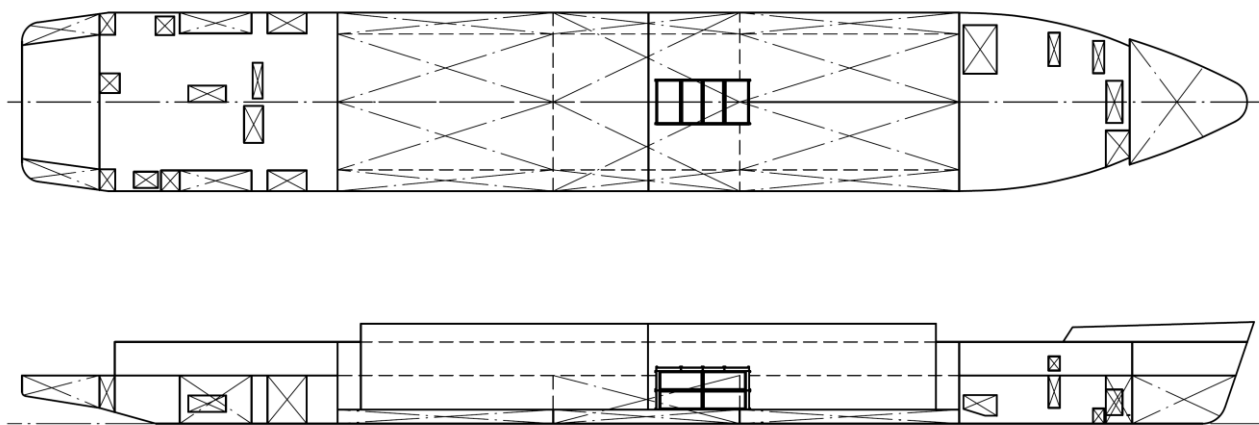


Рисунок 2.3 – Розташування елементу біологічного захисту на схемі відсіків переобладнаного суховантажного судна [72]

Сучасною практикою [72, 73, 244] передбачено модернізацію окремих елементів, що розглядається як вагома альтернатива будівництву нових суден: це дасть змогу шляхом впровадження нових проектних рішень та технологій з використанням нових матеріалів підвищити техніко-експлуатаційні показники, екологічні і економічні фактори до новітнього рівня. Передусім це масогабаритні показники і пов'язані з ними матеріальні витрати та собівартість; максимальна пристосованість до вантажних операцій та розширення асортименту вантажів і кількісних показників вантажообігу. На відміну від існуючих завдань проектування, розв'язання яких зведено до визначення габаритних розмірів та міцності, доцільним є врахування впливу зовнішніх ситуацій (зокрема пошкодження упаковок з РАВ, самозаймання вантажу) на цілісність панелей, обмежуючих вантажну зону судна та їх функціональне призначення.

Блок біологічного захисту – елемент блочного типу, який являє собою велику монтажну одиницю (рис. 2.4) із замкненими відсіками або приміщеннями та монтажним насиченням. Встановлюються, як правило, на плавучих спорудах (технічних базах, складах, суднах-дезактиваторах, дозиметричних станціях) або ємності для збору рідких радіоактивних вантажів.

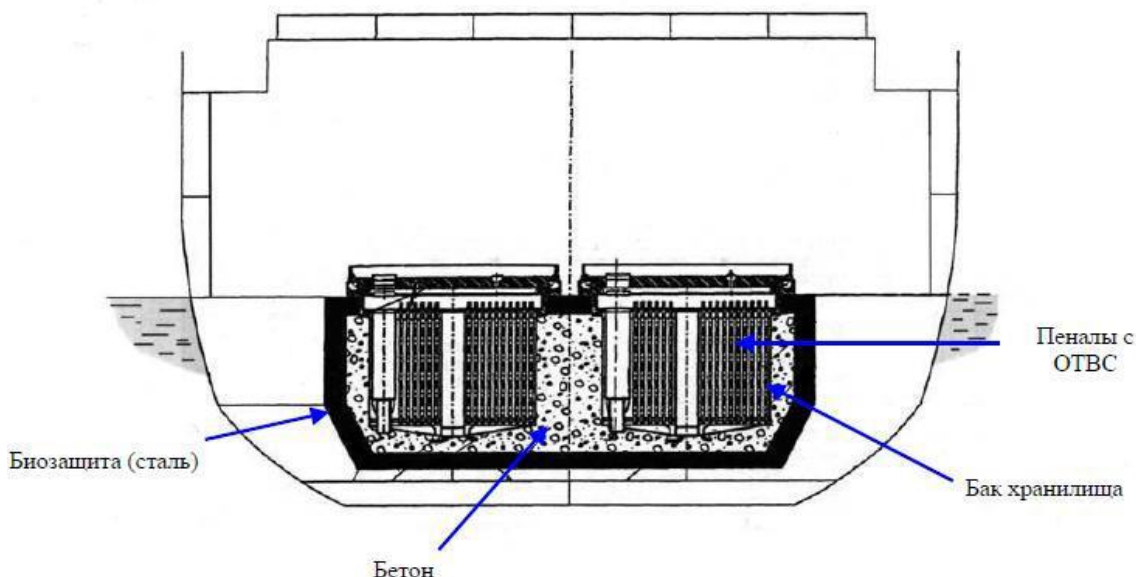


Рисунок 2.4 – Блок біологічного захисту судна атомно-технологічного флоту [10, 255]

Історія побудови суден атомного технологічного обслуговування виникла ще у 60-ти роки минулого століття у зв'язку з необхідністю перезарядки ядерного палива на атомних криголамах. Подальший розвиток енергетики сприяв поширенню їх функціонального призначення задля перевантаження та короткочасного зберігання відсортованих радіоактивних відходів АЕС, списаного обладнання галузевих лабораторій, технічних рідин з метою їх подальшої переробки або захоронення. Нові проекти (зокрема проект 23140 [251]) являють собою несамохідні однопалубні судна з подвійними бортами і подвійним дном, облаштовані системами барботажу, спецвентиляції, дренажу, дезактивації, подачі повітря, електропостачання з аварійним дизель-генератором. Корпус судна має суцільнозварну конструкцію з прямими обводами; вантажні циліндричні цистерни можуть бути виконаними вкладеними (автономними, оболонка яких не входить до складу корпусних конструкцій і не приймає участі у забезпеченні міцності корпусу) і мати як горизонтальне, так і вертикальне розташування. Горизонтальні вкладені цистерни, як правило, застосовуються для рідких радіоактивних вантажів, що полегшує їх завантаження з обох бортів плавучої споруди.

Тверді РАВ за допомогою кранового обладнання завантажуються у вертикальні сталеві баки, також переважно циліндричної форми. Сучасні вимоги, пов'язані з вантажообігом і відокремленістю підприємств, на яких накопичуються радіоактивні відходи, потребують необхідності будування універсальних плавучих споруд, максимально пристосованих до різних видів вантажів (твердих, рідких, з остаточною тепловиділенням тощо). Особливу групу РАВ являють собою радіоактивні відходи з остаточною тепловиділенням (§ 1.7), зберігання яких пов'язано із застосуванням наглядових заходів, таких як дозиметричні вимірювання, контроль температур та концентрацій шкідливих елементів у повітрі службових приміщень, з проведенням гідробіонічних і гідрохімічних досліджень, контролем за тепловими процесами, які разом з аналізом і обробкою даних складають систему моніторингу плавучої споруди. Отримання інформації щодо розподілу температур без проведення дороговартісних вимірювань дасть змогу підвищити рівень проектування, обираючи найбільш раціональні конструктивно-компонувальні рішення, варіюючи при цьому товщинами матеріалів з урахуванням необхідної міцності в умовах теплових ефектів.

Вантажна зона, де розміщуються цистерни або баки з РАВ відокремлюються біологічним захистом, який для випадків зберігання високоактивних РАВ має вигляд заливки з радіаційно стійкого бетону, обмеженого корпусом із плакованої сталі, як то виконано на плавбазах типу «ПМ» «Лепсе», «Лотта» [10, 149, 221, 255] та інших проектах. Конструктивні особливості біологічного захисту є такими, що його не можливо розділити на окремі фрагменти, тобто дослідний об'єкт вважається блоком. Через те, що більшість плавучих баз побудовано та переобладнано під плавучі технічні споруди у 60-70 роки минулого століття і є морально застарілими, проблема оновлення флоту повинна вирішуватися шляхом створення нових проектів, які відповідатимуть сучасним вимогам зберігання та транспортування РАВ, максимальною пристосованістю до їх енергетичних характеристик і агрегатного стану.

Головними проектними обмеженнями блоків та модулів біологічного захисту є масогабаритні показники, які визначають тиск на дно судна або плавучої споруди. При модернізації та удосконаленні конструкції за мету слід ставити зниження маси блоків та модулів, проте на етапах проектування необхідно виконувати перевірочні розрахунки загальної, а у окремих випадках й місцевої міцності. Крім того, перспективним напрямком при розробці проектів є створення багатоцільових суден, експлуатація яких забезпечить одночасне транспортування декількох вантажів.

2.3 Наукове підґрунтя, гіпотези, інформаційні ресурси для постановки та розв'язання задач конструювання і проектування елементів біологічного захисту

Сучасна практика [27, 162, 205] вибору раціональних конструктивних рішень при проектуванні суден, елементів та конструкцій ґрунтується на розв'язанні оптимізаційних і міцнісних задач та розробці технологічних рекомендацій з визначенням матеріальних витрат. Для цього застосовуються моделі економічної ефективності з вартістю життєвого циклу судна як ресурсного показника; міцності з розробкою ефективних практичних рекомендацій щодо виготовлення і монтажу модулів на судні з використанням перспективних матеріалів; оптимального проектування сталевих конструкцій за комплексними показниками.

Вирішення *технологічного завдання* (рис. 2.5) досягається шляхом розроблення наукових засад створення нових матеріалів і покриттів, здатних послаблювати іонізуючи випромінювання від РАВ, працювати в умовах термічних навантажень, корозійного впливу хімічно небезпечних речовин та судових вібрацій і є вагомим науковим підґрунтям для розв'язання

конструкторських та проектних завдань, поставлених вже з використанням розроблених матеріалів. Для формування метал-скляних матеріалів і покриттів використано методи спікання (гарячого пресування) та електродугового напilenня.



Рисунок 2.5 – Алгоритм вирішення технологічного завдання

Необхідними умовами вирішення питань, пов'язаних з подальшою експлуатацією елементів біологічного захисту, є *розв'язання задач прогнозування міцності* конструкцій в умовах теплових ефектів і термічних навантажень, в результаті яких необхідно визначити механізми руйнування шаруватих конструкцій з метою встановлення граничних умов експлуатації.

Завдання оцінювання технічного стану передбачає виявлення погіршення властивостей і деградації структури матеріалів внаслідок експлуатації шляхом порівняння існуючих даних з еталонними з метою прогнозування проектної, технологічної і експлуатаційної ситуації та управління процесом підвищення техніко-економічних показників.

Конструкторське завдання дисертаційного дослідження полягає в удосконаленні модульної конструкції біологічного захисту шляхом раціональної заміни матеріалів; разом з розв'язанням аналітичних задач функціонування судна та управління процесами завантаженості складатиме теоретичний підхід до їх проектування. Очікуваний техніко-економічний ефект полягає у зниженні маси модуля та можливості за рахунок цього розширення асортименту вантажів, що транспортуються під час одного рейсу.

В основу нового теоретичного підходу до *проектування блоків* біологічного захисту плавучих споруд покладено *проектне дослідження* – дослідження, яке містить аналіз даних розрахунково-графічної моделі з висновками та пропозиціями щодо подальших розробок, граничних умов, обмежень, де на кожному з етапів одержується нова інформація та вноситься корегування, які визначають перспективні напрямки постановки експериментальних робіт та є технічними рекомендаціями.

Метою проектного дослідження є вибір раціонального *конструктивно-компонувального рішення*, тобто визначення необхідних габаритних розмірів блока, включаючи товщини конструкцій і захисних шарів, які сприятимуть

зниженню масогабаритних показників та водночас забезпечують дотримання умов зберігання вантажів в залежності від їх енергетичних характеристик.

Завдання розроблення ремонтних заходів деталей запірної арматури вантажних систем плавучих споруд для РАВ є складовою технологічної частини, передбаченої проектом блоку біологічного захисту, що спрямовано на вирішення технічних проблем обслуговування плавучих споруд у випадках зберігання на них рідких речовин, які пов'язано з виходом з ладу фланців, кранів, клапанів тощо і передбачає розроблення нових складів і способів нанесення їх на поверхні.

Завдання економічної ефективності та інноваційного розвитку полягають у виборі та аналізі критеріїв щодо впровадження вирішених проектних, конструкторських та інформаційних завдань у навчальний процес вищу, а також проектні, науково-дослідні та виробничі установи; визначенні техніко-економічних показників та розробленні технологічних рекомендацій щодо формування шаруватих конструкцій за участю метал-скляних матеріалів і покриттів; оптимальному виборі конструктивного рішення щодо біологічного захисту на основні критеріїв технологічності і економічної ефективності. Це потребує застосування поряд з методиками техніко-економічних розрахунків методів оцінки ефективності управління інноваційною діяльністю підприємств та системотехнічного підходу.

Наукові гіпотези, покладені в основу визначених науково-технічних завдань дисертаційного дослідження, сформульовано у табл. 2.1.

Методичне забезпечення поставлених проектних, конструкторських і технологічних завдань наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Наукові гіпотези, покладені в основу принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд [складено автором]

Об'єкт досліджень	Гіпотези наукових досліджень	Застосовність до результатів досліджень
Проектування модуля біологічного захисту	Максимальне послаблення іонізуючих випромінювань від РАВ забезпечується метал-скляним захисним шаром	Результати досліджень рентгенозахисних властивостей, радіаційної стійкості і екрануючої здатності платин Ст3; результати корозійної стійкості опромінених зразків у хімічно активних речовинах
Проектування блоків біологічного захисту плавучих споруд для РАВ з остаточним тепловиділенням	Існування взаємозв'язку між енергетичними характеристиками РАВ, геометричними параметрами блоку біологічного захисту та розподілу теплових потоків у вантажній зоні плавучих споруд	Постановка і розв'язання у спряженій і плоскій постановках задач про тепловий стан вантажної зони плавучої споруди
Теорія руйнування шаруватих конструкцій елементів біологічного захисту	Гіпотеза про руйнування конструкцій через пошкодження у захисному метал-скляному шарі внаслідок теплових ефектів від РАВ	Удосконалення термомеханічної моделі поведінки опроміненого захисного метал-скляного шару в умовах теплових ефектів. Моделювання процесів руйнування шаруватих конструкцій у пожежонебезпечних ситуаціях на судні з постановкою числових експериментів
Оцінювання технічного стану композитних суднових конструкцій	Гіпотеза про можливість управління процесом підвищення техніко-економічних показників конструкцій через застосування методів системного аналізу з реалізацією технологічних і експериментальних даних з механічних випробувань та структурних досліджень матеріалів	Розроблення когнітивних моделей з постановкою числових експериментів, побудова причинно-наслідкових діаграм, створення нової інформаційно-пошукової системи

Таблиця 2.2 – Методичне забезпечення вирішення проектних, конструкторських, технологічних завдань та завдань оцінювання технічного стану елементів суден і плавучих споруд

Проектні, конструкторські та технологічні завдання	Методи досліджень	Теоретичні та експериментальні методики
Проектне дослідження блоку біологічного захисту плавучих споруд для РАВ з остаточним тепловиділенням	Методи скінчених елементів [371], числового моделювання процесів теплообміну [1–3, 271], методи управління проектами [285].	Постановка та розв’язання спряжених і плоских задач теплообміну та теплопровідності [170, 202].
Розробка моделі функціонування судна	Методи балансу мас і балансу площ [74]; метод системного аналізу [175]; теорія управління і проектування інформаційних систем [35, 197]; принципи максимальної експлуатаційної ефективності судна [190, 205, 227].	Методики розрахунку міцності судна [172]. Розв’язання класичної задачі про ранець на основі генетичного алгоритму [406].
Проектування модуля біологічного захисту суден для РАВ без остаточного тепловиділення	Методи наближених розрахунків транспортних суден [58]; оптимізації протирадіаційного захисту промислового обладнання і установок [353]; оптимального проектування на основі моделей функціонування суден [190, 205, 227]; проектування інтелектуальних систем для управління процесами завантаженості суден [214]; головні положення вантажознавства [157, 299]; методи комп’ютерної алгебри [154].	Методики визначення координат центра ваги [4, 74]; теоретично-розрахункові методики визначення товщини біологічного захисту [30, 95, 157]; методики визначення метацентричної висоти та остійності суден [172]; методики оптимізації завантаженості суден [58]; методики проектування функціональних систем безпеки мореплавства [175, 185, 197]
Прогнозування міцності конструкцій в умовах теплових ефектів і термічних навантажень	Методи скінчених елементів [371] та числового моделювання [405].	Експериментальні методики дослідження термостійкості [186]; випробувань на горючість [152, 320]. Розв’язання задач термопружності [317], мікромеханіки [34, 129].

продовження таблиці 2.2

Проектні, конструкторські та технологічні завдання	Методи досліджень	Теоретичні та експериментальні методики
Розробка технологій корозійного захисту суднових цистерн та ремонтних заходів деталей запірної арматури	Метод електродугового напилення [66], гарячого пресування [49; методи оптичної мікроскопії і рентгеноструктурного аналізу [186].	Методики корозійних випробувань [42], методики оптичної металографії [9] і рентгеноструктурного аналізу [186].
Розробка технологічних рекомендацій виготовлення модуля	Фізико-хімічні основи напилення електродугових покриттів [66-68]; теорії з'єднання скла з металами [19, 146], формування клейових нерознімних з'єднань [37, 81, 272]. Технологічні основи монтажу суднового обладнання [43, 51].	Металографічні методики і методики механічних випробувань [186], випробувань на горючість [152, 320]; застосування нормативної документації; економічний, маркетинговий і екологічний аналіз [20, 91, 153]; аналіз енергозберігаючих технологій [76, 176, 312, 325, 356].
Задачі оцінювання технічного стану суднових композитних конструкцій	Методи системного аналізу [35, 175], систематизації інформації [151, 265], комп'ютерної алгебри [154] дослідження матеріалів [186].	Методи когнітивного моделювання [46, 68, 168]; побудови причинно-наслідкових діаграм [252, 313]; інформаційні технології з використанням СУБД MySQL [100, 197, 365].
Дослідження інноваційної привабливості розробки та вирішення задач оптимізації конструктивних рішень	Методи оцінки ефективності управління інноваційною діяльністю підприємств [331, 342]; методи системотехнічного підходу [225].	Методики техніко-економічних розрахунків [26]; планування і організації інноваційної діяльності [153].

2.4 Методологічні основи розробки нових матеріалів і покриттів з комплексно-захисними властивостями

В роботі використано когнітивний підхід [47], якій дає змогу розглянути процес створення нових композицій як цілісну та єдину систему, окремо аналізуючи кожну її складову. Досвід застосування когнітивного підходу в задачах розробки радіаційно стійких композитів детально розглянуто авторами робіт [47, 275], де процес їх проектування починається з аналізу умов експлуатації та вибору відповідних критеріїв оцінювання. За цією аналогією складено модель задачі (рис. 2.6) створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою.



Рисунок 2.6 – Модель задачі створення нових матеріалів і покриттів для формування елементів біологічного захисту [складено автором]

Поставлена задача враховує усі фізико-хімічні та термомеханічні процеси, що відбуваються при поглинанні енергії теплових і іонізуючих випромінювань, зміну механічних властивостей, фазові перетворення, хімічне руйнування тощо. На підставі моделі взаємний вплив внутрішніх (хімічний склад, параметри структури, функціональні властивості) і зовнішніх факторів (енергетичні та температурні параметри радіоактивних вантажів, корозійний вплив тощо) слабоструктурованої системи реалізовано у вигляді матриці суміжності (табл. 2.3), на основі якої складено об'єктно орієнтований граф – когнітивну карту (рис. 2.7).

Таблиця 2.3 – Матриця системної взаємодії параметрів проектування нових композицій

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
X ₁	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
X ₂	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
X ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
X ₄	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
X ₅	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
X ₆	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
X ₇	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
X ₈	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
X ₉	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
X ₁₀	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
X ₁₁	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
X ₁₂	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
X ₁₃	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
X ₁₄	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
X ₁₅	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
X ₁₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
X ₁₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Вершини графа об'єднано у наступні групи:

- *цільові* – вихідні фактори моделі – показники, яких необхідно досягти при проектуванні композицій з новими властивостями: X₃ – надійність роботи конструкції, X₅ – поглинена матеріалом енергія іонізуючих випромінювань, X₆ – поглинена матеріалом кількість тепла, X₁₄ – технологічність, X₁₆ – економічність, X₁₇ – ефективність;

- *управляючі* – вхідні фактори моделі, за рахунок яких досягається необхідний результат проектування: X_2 – сумарна активність випромінювання, X_4 – товщина шару захисного матеріалу або покриття, X_{11} – хімічний склад матеріалів, X_{12} – кількість дисперсного скляного наповнювача у складі композицій, X_{13} – пористість матеріалів;
- *фактори-індикатори* – показники, що пояснюють і відображають розвиток процесів: X_1 – вид радіоактивного вантажу, X_7 – розмірна стабільність матеріалів та покриттів, X_8 – структурна стабільність матеріалів і покриттів, X_9 – стабільність міцносних властивостей, X_{10} – стабільність теплофізичних властивостей.

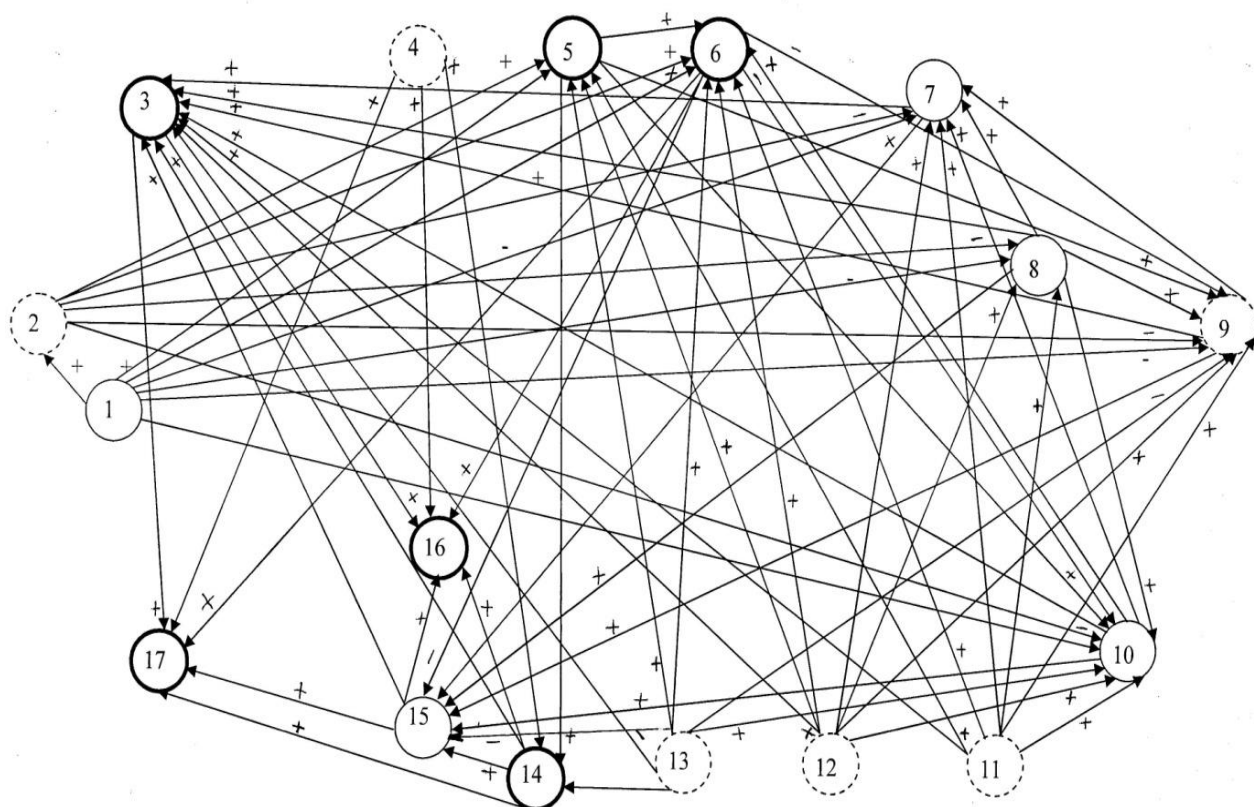


Рисунок 2.7 – Когнітивна модель створення радіаційно стійких матеріалів:

○ – цільові фактори: $X_3, X_5, X_6, X_{14}, X_{16}, X_{17}$; ○ – управляючі фактори: $X_2, X_4, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{13}$; ○ – фактори-індикатори: X_1, X_7, X_8, X_{10}

Складений граф можна вважати когнітивною моделлю, де декомпозицію системи у рамках прийнятої ієрархії зведено до формування окремих наукових і

технічних завдань, а саме вибору та дослідження дисперсних скляних наповнювачів, розробки необхідного устаткування, експериментальних робіт щодо одержання експериментальних зразків, досліджень їх структури і властивостей за допомогою сучасних методів. Реалізація моделі потребує постановки вузькоспеціальних теоретичних і експериментальних досліджень замість розв'язування за кожним з критеріїв прямих і обернених задач, як того вимагають загальні принципи когнітивного моделювання.

Результати когнітивного моделювання полягають у складанні ієрархічних структур критеріїв якості [47] та характеристик самого композита (його структури, вмісту скляного наповнювача тощо), що є підґрунтям для всього комплексу проведення фундаментальних і прикладних досліджень. В основу вирішення науково-технічної проблеми розроблення теоретичних і технологічних засад створення за допомогою високотемпературних технологій нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою, у якій поєднано скляні і металеві компоненти, покладено відомі наукові гіпотези (табл. 2.4) і теоретичні роботи в області:

- фізики спікання переважно аморфних скляних порошків з порошками металів – Р. З. Власюка, І. Д. Радомисльського, А. Н. Степанчука [36, 305];
- фізико-хімічних основ напилення електродугових покриттів з додаванням дисперсних скляних наповнювачів – О. М. Дубового, А. А. Карпеченка [68, 147, 238] та теорії термічної обробки дисперсних металів і напилених покриттів – І.І. Новікова, О. М. Дубового, А. А. Карпеченка, Н. Ю. Лебедевої [67, 96, 208];
- основи теорії з'єднання скла та кераміки з металами шляхом дифузійного зварювання – Н. Ф. Казаков, В. О. Бачіна, Е. С. Каракозова, В. О. Преснова [19, 100, 146, 236] та теорії поверхні поділу у метал–скло – А. Меткалфа, Л. Л. Брагіної [29, 159];
- теорії мікромеханіки композиційних матеріалів (стосовно полімерних зі скляними включеннями різної форми) – Г. А. Ваніна, П. Г. Кржечковського [34, 166] та теорії пружності та пружнопластичних деформацій оболонок – С. П. Тимошенка, Дж. Гуд'єра, Л. Д. Ландау, В. І. Корольова, А. С. Вольміра [41, 163, 317, 386].

Таблиця 2.4 – Наукові гіпотези, покладені в основу створення нових комплексно-захисних матеріалів і покриттів

Об'єкт досліджень	Гіпотези наукових досліджень	Застосовність до результатів досліджень
Процеси впливу γ -випромінювань на структуру і властивості метал-скляних композицій	Уявлення про поліморфні перетворення у стеклах під дією опромінення та високих температур [29]. Гіпотеза про поверхневе зміцнення металів під дією підвищених температур і іонізуючих випромінювань [253, 254].	Модель поверхневого зміцнення метал-скляних електродугових покриттів дифузним потоком γ -випромінювань. Граничні умови експлуатації метал-скляного захисного шару в умовах теплових ефектів під час опромінення.
Процеси структуроутворення метал-скляних матеріалів і покриттів	Гіпотеза про мікронеоднорідну будову окисних стекол [198].	Закономірності структуроутворення метал-скляних матеріалів і покриттів. Результати рентгеноструктурного аналізу і мікрорентгеноспектрального аналізу.
	Гіпотеза про зародження нової фази навколо включень у структурі матеріалів при термічній обробці внаслідок великої різниці значень ТКЛР наповнювача і матриці [208].	Ефект підвищення мікротвердості електродугових покриттів. Результати рентгеноструктурних досліджень.
Процеси формування комплексно-захисних властивостей на мікро- і нанорівні	Гіпотези про аномальне послаблення іонізуючих випромінювань ультрадисперсними середовищами [14, 165] і додаткове поглинання енергії наноструктурними елементами [60].	Результати експериментальних досліджень рентгенозахисних властивостей метал-скляних матеріалів і покриттів. Узагальнена модель послаблення іонізуючих випромінювань елементарною коміркою метал-скляного захисного шару.
Теорія руйнування метал-скляного шару	Гіпотеза щодо утворення субзерен у місцях найбільшої концентрації напружень [82, 87, 253] та руйнування захисного шару на поверхні поділу метал–скло.	Результати розрахунків температурних напружень у структурі метал-скляних матеріалів і покриттів.

На підставі детальної проробки технологічних питань, пов'язаних з проектними завданнями конструкцій суден, область наукових досліджень роботи охоплює два принципово різних напрямки формування шаруватих конструкцій: перший полягає у застосуванні технологій спікання порожніх скляних мікросфер з порошками металів (а саме алюмінію та алюмінієвою пудрою) для виготовлення виробів у вигляді плиток, які за допомогою клейових композицій можуть кріпитися до сталевій поверхні; другий напрямок – це формування на сталевій поверхні захисного шару методом електродугового напилення з додаванням до складу композицій дисперсних скляних наповнювачів. Виходячи з вищевикладеного, для постановки наукових досліджень у першу чергу необхідно визначитись з хімічним складом скляних порошоків і мікросфер, від яких безпосередньо залежать функціональні властивості майбутніх композицій. Науковим підґрунтям для вибору складу є наукові роботи вітчизняних і зарубіжних вчених [210, 211, 199, 260], у яких висвітлено досвід застосування скла у галузі атомної енергетики, радіохімічній промисловості та технологій одержання скломатричних композицій для іммобілізації радіоактивних відходів. У більшості випадків це стекла багатокомпонентних систем з високим вмістом SiO_2 , серед яких окремо виділяють натрійборосилікатні та свинцевосилікатні стекла. Розглянемо особливості обраних систем.

Система $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Мінералоподібна структура натрійборосилікатних стекол [171] є важливим фактором, сприятливим до синтезу РРВ з утворенням склокристалічної структури. Потрійну систему $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, яка є технологічною основою для більшості стекол технічного призначення з високою хімічною інертністю, міцністю та термостійкістю, достатньо досліджено у роботах [29, 318, 359]. Введення до двокомпонентних боркремнеземістих стекол оксиду натрію сприятиме утворенню тетраедричних натрієборатних комплексів та приводить до посилення фазового розподілу; незмішуваність у системі пов'язана з несумісністю кремнієкисневих тетраедрів з боркисневими трекутниками. Структура мікропористих стекол системи $\text{Na}_2\text{O}-$

$B_2O_3-SiO_2$ з молярним співвідношенням Na_2O/B_2O_3 не більш ніж $1/3$ за думкою І.В. Гребенщикова і С.П. Жданова [12, 59, 359] може розглядатися як двофазна, а стекла через нестійкість областей B_2O_3 і Na_2O можуть вважатися натрійсилікатними. Проте у області певних концентрацій неоднорідність у системі визначає ліквідаційні процеси, які становлять важливі наукове і практичне значення для розробки нових технологій багатофункціональних композицій з високодисперсних наповнювачів, особливо структурно неоднорідних, якими є порожні скляні мікросфери. Тому у роботі обрано ПСМ натрійборсилікатного складу, які набули поширеного використання у суднобудівних технологіях теплоізоляційних матеріалів підвищеної плавучості [121, 358].

Система $Na_2O-CaO-SiO_2$ описує склад та структуру більшості видів посудного скла. Окись свинцю сприяє підвищенню його густини, поліпшенню оптичних властивостей, зокрема прозорості. Проте виробництво свинцевмісних стекол пов'язано з певними труднощами, серед яких висока токсичність і дефіцитність сировини. Згідно з сучасними стандартами, позначеними у Директиві Європейського Союзу за № 64/493/ЄС, вироби, які мають менше 10 % оксидів, вважаються кришталевим склом: до 24 % PbO – мало-свинцевим кришталем (кристаліном); від 24 до 30 % PbO – кришталем (Lead Crystal); більш 30 % PbO – елітним кришталем (Full Lead Crystal). За діючими на території України стандартами хімічний склад посудного кришталю регламентовано ГОСТ 24315-80 «Посуда и декоративные изделия из стекла». Більша частина скляного посуду виробляється з натрійкальційсилікатного скла, проте на відміну від тарного через специфічні вимоги до якості та різноманітні процеси формування воно насичене іншими хімічними елементами [226]. За технологією виробництва скломаса проходить стадії силікатоутворення ($t = 800...900\text{ }^{\circ}\text{C}$), склоутворення ($t = 1150...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), дегазації та гомогенізації ($t = 1400...1500\text{ }^{\circ}\text{C}$), студку скломаси ($t = 1200...1010\text{ }^{\circ}\text{C}$) – підготовчий етап до

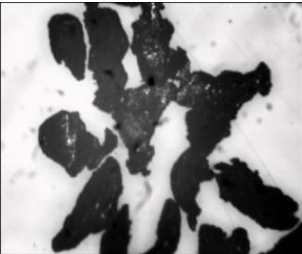
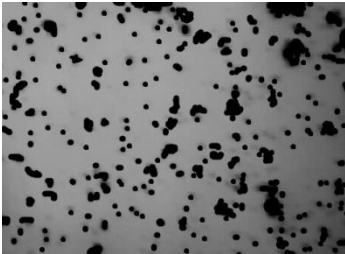
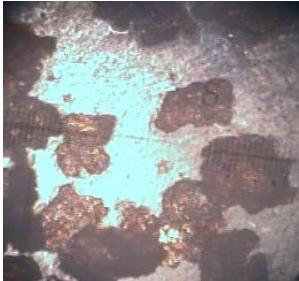
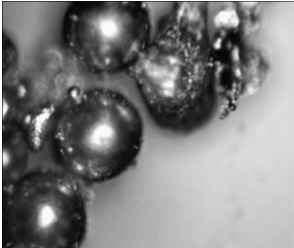
виробітки. Відформовані вироби, (бокали, фужери та ін.), обробляються вогнем і зазнають термічної обробки при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ з наступним охолодженням стиснутим повітрям, що приводить до утворення рівномірно розподілених залишкових напружень, які у 5...8 разів підвищують ударну міцність скла, та у 2-3 рази – його термостійкість. Таким чином, кришталеве скло має однорідну структуру, яка описується потрійною системою $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ [318]. У межах концентрації ($\text{SiO}_2 \approx 70\text{ \% мас.}$) структура посудного і декоративного скла (ГОСТ 24315-80) у відпалювальному стані до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ складається з $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$, що наближує його до скла обраних мікросфер та дозволяє найменувати як «натрійсилікатне скло». У сучасній літературі у повній мірі викладено технологічні напрямки одержання скляних виробів як загального, так і вузькоспеціального призначення, висвітлено фізико-хімічні процеси, що відбуваються на кожній зі стадій їх виробництва, проте відсутні відомості про технології переробки битого кришталевого скла, не описується вплив температурних чинників на процеси структуроутворення композиційних матеріалів за їх використанням.

Система $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$. Свинцево-силікатні стекла відносяться до групи оксидних стекол, оптичні і електричні властивості яких залежать не тільки від складу, а й від структури, яка визначається умовами одержання. На відміну від лужних і лужно-земельних металів Pb виконує у структурі стекол подвійну функцію: модифікатора (для стекол з вмістом $\text{PbO} < 50\text{ \% мол.}$) з хімічним станом PbO та сіткоутворювача (для стекол з вмістом $\text{PbO} > 50\text{ \% мол.}$) з хімічним станом PbO_2 [53]. Класичний склад кришталевих стекол містить 17...34 % PbO , збільшення якого до 86 % підвищує здатність поглинати іонізуючи випромінювання, проте знижує температуру плавлення, в'язкість і хімічну стійкість, погіршує механічні властивості, зменшує схильність до кристалізації, підвищує показники заломлення та агресивність розплаву [62].

Для введення PbO до шихти використовується свинцевий сурик – токсична речовина, яка відноситься до I-го класу небезпеки, що значно обмежує обсяги варіння свинцевмісних стекол. Крім цього, висока летючість PbO , його схильність до відновлення та осадження у розплавах сприяє розвитку технологій переробки, до яких відносяться одержання порошків та волокон з вузькоспеціальними властивостями [296]. Таким чином, утилізації зазнають стекла кінескопів, екранів телевізорів, комп'ютерних моніторів, приладів неруйнуючого контролю, у тому числі й стекла променевих трубок та рентгенівського обладнання. Вимогам підвищеної хімічної стійкості відповідають стекла марок крон-флінт (КФ, ГОСТ 9541-75), що пояснюється наявністю у їх складі двох лужних оксидів. Більшість свинцевмісних стекол за своїм складом відносяться до систем $K_2O-PbO-SiO_2$ [278, 390], проте через введення домішок або дифузійні процеси під час застосування можуть мати більш складний хімічний склад, що потребує додаткових досліджень у певних випадках. У системі $PbO-SiO_2$ внаслідок двовалентності Pb відсутня область розшарування з боку, збагаченого SiO_2 ; максимальну кількість кремнезему містить метасилікат $PbO \cdot SiO_2$, який є стабільним до температури $764^\circ C$.

Вибір металевих порошків для спікання зі скляними мікросферами ґрунтується на принципах надання композиційним матеріалам вузько спеціальних для суднобудування службових властивостей. Виходячи з вимог корозійної стійкості, радіаційної стійкості для досліджень обрано порошки алюмінію марки ПА-4 (ГОСТ 6058-73) і пудри алюмінію марки АПС-1А (ГОСТ 5494-95). Порівняльні дослідження фізико-хімічних процесів проведено на порошках бронзи марки Пр-Бр-АМц9-2 (ГОСТ 28377-89) і бабіту марки Пр-Б-83 (ТУ 14-22-91-95), які також використано для розроблення технологічних заходів з ремонту запірної арматури (див. розділ 7). Їх хімічний склад, властивості і мікрофотографії наведено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Склад і властивості металевих порошків

Порошок	Склад, мас. %	Характеристики	
ПА-4 (ГОСТ 6058-73)  ×100	Al – 98,8 Fe – 0,35 Si – 0,4 Cu – 0,02	Дисперсність, мкм	60...80
		Форма частинок	округла
		Насипна щільність, кг/м ³	1000
АПС-1А (ГОСТ 10096-76)  ×125	Al – 99,8 Fe – 0,2	Дисперсність, мкм	6...10
		Форма частинок	луската
		Насипна щільність, кг/м ³	800
Пр-Бр-АМц9-2 (ГОСТ 28377-89)  × 90	Al – 8...10 % Mn – 1,5...2,5%, інше – Cu домішки – до 1,7 %	Дисперсність, мкм	40...80
		Форма частинок	0,8
		Насипна щільність, кг/м ³	3900
Пр-Б-83 (ТУ 14-22-91-95)  × 150	Sn – 10...12 %, Cu – 5,5...6,5 %, інше – Sb, домішки до 0,56 %	Дисперсність, мкм	30...60
		Форма частинок	1,0
		Насипна щільність, кг/м ³	3600

Перевагами технологій електродугового напилення перед іншими методами формування захисних покриттів на металах є простота,

технологічність, відсутність обмежень за габаритами та конфігурацією виробів, високі продуктивність і коефіцієнт використання матеріалу, можливість виконувати роботи на ділянках відкритого та закритого типів, зокрема монтажних майданчиках, що дозволяє рекомендувати цей метод для застосування при будівництві та ремонті суден. Враховуючи сучасний досвід створення захисних газотермічних покриттів [67, 68] для формування нових метал-скляних композицій в роботі обрано суцільнотягнуті зварювальні дроти марок Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75) і Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), застосування яких дасть змогу підвищити корозійну стійкість конструкцій, набуті рентгенозахисних властивостей та не призводить до відшарування напилених покриттів в умовах теплоперепадів через значну різницю у значеннях ТКЛР зі склом та підкладкою.

Як дисперсні наповнювачі композицій пропонується застосувати стекла систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, досвід застосування яких пов'язано з іммобілізацією радіоактивних відходів, радіохімічним виробництвом та виготовленням рентгенівського обладнання [178, 199, 210, 226, 296]. Розвиток сучасних технологій спрямовано на відмовлення від дороговартісної та дефіцитної сировини, поставки якої залежать від виробництв, розташованих на територіях інших країн. Тому у роботі як альтернативу порожнім скляним мікросферам розглянуто можливість застосування для композиційних електродугових покриттів скляних порошків, одержаних шляхом сухого розмелу бою скла. Новим напрямком для досліджень є введення до складу електродугових покриттів порожніх скляних мікросфер, що на думку автора роботи дасть змогу знизити їх щільність, підвищити хімічну стійкість та рентгенозахисні властивості.

Формулювання завдань досліджень, пов'язаних з розробкою теоретичних і технологічних передумов створення нових спечених склоалюмінієвих матеріалів і електродугових метал-скляних покриттів, теоретичні передумови і застосовані методи досліджень, наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Постановка завдань, теоретичні передумови та методи досліджень

Дослідницькі завдання	Теоретичні передумови	Методи досліджень
Вибір складу матеріалів і покриттів	Наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених в області розробки неметалічних матеріалів для суднобудування, радіаційно захисних композицій [191, 204, 245, 250, 314, 358].	Аналіз діаграм стану силікатних систем [318]. Методи експертних оцінок [195].
Одержання партії експериментальних зразків	Фізико-хімічні основи напилення електродугових покриттів [54, 67, 68], теорії з'єднання скла з металами [19, 100, 146], спікання аморфних порошків [12, 198, 226, 303, 305], поверхні поділу у композиційних матеріалах [159], формування клейових нерознімних з'єднань [8, 245, 272].	Методи електродугового напилення композиційних покриттів [356]. Методи спікання порошкових сумішей і гарячого пресування [49]. Метод холодного твердіння полімерних композицій [94].
Дослідження структури та фізико-механічних властивостей експериментальних зразків	Фізико-хімічні уявлення про процеси розм'якшення стекол [11, 12, 59], структуру кремнезема [89] і силікатних розплавів [11], кристалізації у силікатній фазі при спіканні метал-скляних композицій [36], про взаємодію силанових апретів з пористою структурою стекол [83, 292], про структуру і властивості композиційних матеріалів [86, 159].	Методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізу, комп'ютерної металографії [22, 186, 188]. Методи механічних випробувань [186].

Продовження таблиці 2.6

Дослідницькі завдання	Теоретичні передумови	Методи досліджень
Дослідження впливу особливостей структури на експлуатаційні властивості матеріалів і покриттів	Фундаментальні уявлення про радіаційну стійкість матеріалів [398, 402]. Теорія поглинання енергії сферичними включенням [247], поверхнею поділу фаз і наноструктурними елементами [305]. Фізико-хімічні процеси руйнування стекол у хімічно активних середовищах [59], теорія руйнування металів у корозійних середовищах [54].	Методики корозійних випробувань у хімічно активних середовищах [42]. Пристосування експериментальних методик досліджень [29, 274, 352] Метод вільних затухаючих коливань консольно-закріплених зразків [248].
Моделювання структури і комплексно-захисних властивостей	Теоретичні основи радіаційного матеріалознавства [13, 38] і радіаційної хімії [246], основні положення мікромеханіки структурно неоднорідних матеріалів [34]. Теорія пружно-пластичної деформації оболонок [41, 163], ослаблення іонізуючих випромінювань ультрадисперним середовищем та наноструктурними елементами [14, 21, 38].	Теорія прийняття рішень [47, 168, 368]. Методики когнітивного моделювання радіаційно стійких матеріалів [47, 168]. Формування субструктурних елементів методами передрекристалізаційної обробки [65–68]; метод елементарної комірки структурно-неоднорідного матеріалу зі скляним включенням [219].
Розробка технологічних процесів формування захисного шару на підкладці конструкцій	Фізико-хімічні основи напилення електродугових покриттів і підготовки поверхні [147]; теорія фізико-хімічного та механічного зв'язку на поверхні поділу покриття – сталева підкладка [176]; теоретичні уявлення про процес склеювання [96, 272].	Методи рентгеноструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізу [22]. Методики визначення адгезійної та когезійної міцності [63, 175]. Методи побудови причинно-наслідкових діаграм [252].

Продовження таблиці 2.6

Дослідницькі завдання	Теоретичні передумови	Методи досліджень
Дослідження комплексно-захисних властивостей розроблених матеріалів і покриттів	Фундаментальні уявлення про радіаційну стійкість матеріалів [398, 402]. Теорія напруженого стану у двошарових пластинах [386]. Теоретичні основи інженерної акустики [85]. Теорія руйнування металів у корозійних середовищах [54].	Пристосування експериментальних методик досліджень [29, 274, 352], методи механічних випробувань [186]; метод динамічного калориметра [213]; експериментальні методики досліджень термостійкості і термостабільності; комп'ютерне моделювання [386, 391, 405]; вирішення задач термопружності [317]; методи оптичної металографії [9]; метод вільних затухаючих коливань консольно-закріплених зразків [248]; методики корозійних випробувань у хімічно активних середовищах [42], випробувань на горючість [152, 320].
Розрахунок техніко-економічних показників та розробка рекомендацій з нанесення та експлуатації	Наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених в області розробки енергозберігаючих технологій формування скловмісних матеріалів [211, 305], напилених композиційних покриттів [68, 176], одержання скляних порошків шляхом переробки скляного бою та виготовлення з нових композиційних матеріалів [57, 60, 210, 295].	Методи системного аналізу [35, 195]. Розрахункові інженерно-економічні методи [26, 153]; системотехнічний підхід [166, 225]. Методи розробки інноваційних проектів, економічного, маркетингового і екологічного аналізу виконаних розробок [4, 97, 331, 342].

Продовження таблиці 2.6

Дослідницькі завдання	Теоретичні передумови	Методи досліджень
Розрахунок та оптимізація товщини шару захисного покриття	Теоретичні передумови створення максимального захисту конструкцій суден від дії шкідливих речовин шляхом нанесення на нього шару з мінімальною щільністю [194].	Метод «калібрування» еквівалентної дози опромінення для певних матеріалів [67, 290]. Розрахунково-експериментальні методи визначення шару половинного поглинання рентгенівських випромінювань [30, 157]
Розрахунок температурних напружень при експлуатації в умовах теплових ефектів	Аналітичний опис механічних властивостей композитів [34, 388]; модельні уявлення про структуру композитів [370]. Фізичні уявлення про термомеханічні процеси у матеріалах, наповнених мікросферами, в умовах рентгенівських випромінювань [219, 283].	Метод елементарної комірки структурно-неоднорідного матеріалу зі скляним включенням [219]; метод скінчених елементів [351, 405], розв'язання задач термопружності [371], мікромеханіки композитів [34, 129]

2.5 Висновки до розділу 2

1. Архітектура дисертаційного дослідження визначає головні теоретичні і методичні засади для розробки підходів до проектування та захисту елементів суден і плавучих споруд шляхом створення нових композиційних матеріалів та покриттів з переважним впливом на структуру і експлуатаційні властивості скляної складової.

2. Охарактеризовано елементи біологічного захисту: модулів, які встановлюються на суховантажних суднах, та блоків – для плавучих споруд, на яких зберігаються радіоактивні відходи у рідкому та твердому агрегатному станах. Сформульовано проектні, конструкторські та технологічні завдання, для чого обрано методичне забезпечення з теоретичними і експериментальними методиками.

3. В основу теорії захисту елементів суден і плавучих споруд від шкідливої дії радіоактивних вантажів покладено розроблення фізико-хімічних основ створення нових матеріалів та покриттів шляхом поєднання у одній композиції скляних і металевих компонентів методами спікання та електродугового напилення, для чого сформульовано наукові гіпотези, визначено теоретичні передумови та обрано методики досліджень.

4. Розроблено когнітивну модель – об'єктно-орієнтований граф, через який у графічному вигляді встановлено взаємний зв'язок між показниками експлуатації (цільовими факторами), структурними характеристиками композицій (хімічним складом, кількістю у ньому дисперсного скляного наповнювача, пористістю) як управляючими факторами, факторами-індикаторами, які пояснюють і відображають розвиток процесів (стабільність структури, міцносних і теплофізичних властивостей).

5. Обґрунтовано вибір базових систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ для подальших досліджень щодо створення принципово нових за складом і структурою спечених матеріалів і електродугових покриттів.

Виходячи з вимог до радіаційної та корозійної стійкості матеріалів біологічного захисту при їх експлуатації в умовах судна для спікання зі скляними мікросферами обрано алюмінієві порошки марок ПА-4 і АПС-1А, для електродугового напилення – суцільнотягнуті дроти марок Св-08Г2С і Св-АМг5.

Наукова значущість розділу полягає у встановленні за допомогою розробленої когнітивної моделі зв'язку між структурними характеристиками, властивостями нових матеріалів і покриттів та експлуатаційними вимогами до них у складі елементів біологічного захисту; формулюванні наукових гіпотез при постановці досліджень.

Практична значущість розділу полягає у виборі складів для одержання спечених матеріалів і електродугових покриттів, методів та методик теоретичних і експериментальних досліджень з розроблення нових матеріалів і покриттів, визначення їх властивостей, а також визначення науково-методичного забезпечення для вирішення проектних, конструкторських і технологічних завдань, пов'язаних з елементами біологічного захисту суден і плавучих споруд.

Результати розділу наведено у роботах [108, 130, 144, 324, 326, 328].

РОЗДІЛ 3

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ СПІКАННЯ ПОРОЖНІХ СКЛЯНИХ МІКРОСФЕР З ПОРОШКАМИ АЛЮМІНІЮ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МЕТАЛ-СКЛЯНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНІ СТЗ

Мета розділу – дослідити фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час спікання порожніх скляних мікросфер з порошком та пудрою алюмінію та встановити вплив додавання скляних порошоків і мікросфер до складу електродугових покриттів з Св-08Г2С і Св-АМг5 при їх напиленні на сталеву підкладку.

Об'єкт досліджень – процеси розм'якшення і поліморфних перетворень у порошках і мікросферах стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; накопичення склофази, усадочні процеси, взаємодії метал-скло з утворенням нових фаз на поверхні поділу під час спікання та електродугового напилення.

Предмет досліджень – закономірності впливу структурного стану дисперсних скляних наповнювачів на формування структури метал-скляних матеріалів і покриттів під час спікання і електродугового напилення.

3.1 Дослідження хімічного складу, морфології, структури, процесів розм'якшення скляних порошоків і мікросфер систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

3.1.1 Одержання скляних порошоків і методи їх дослідження

Одержання скляних порошоків шляхом переробки бою є економічно вигідним рішенням, яке дає змогу не тільки утилізувати лабораторні, виробничі та побутові відходи, але й надати композиційним матеріалам і покриттям нових функціональних властивостей. Сучасний досвід застосування в технологіях електродугового напилення скляних порошоків

висвітлено в роботах [68, 147], де метою їх введення є підвищення зносостійкості покриттів. При постановці експериментальних робіт автор використовує порошки, одержані здрібненням віконного скла (групи А). Через температурні поля, які формуються у зоні електродугового розряду [334] до скла пред'являються вимоги високої термостійкості, проте процеси його розм'якшення не досліджувались.

За вихідну сировину порошоків-напонувачів для композиційних покриттів з комплексно-захисними властивостями в роботі обрано білий кришталевий посуд виробництва Білорусь (ГОСТ 24315-80, мас. %: SiO_2 –70,0; NaO_3 –20,0; CaO –8,0; B_2O_3 –2,0) та випадково зруйноване скло дифрактометра (ГОСТ 9541-75, мас. %: SiO_2 –55...57,33; K_2O_3 –1,34...11,0; PbO –33...40). Для розробки технологічних рекомендацій необхідно визначити розбіг з ГОСТом за хімічними елементами та встановити вплив на нього умов експлуатації, так званої «історії». Для цього застосовано мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз (МРСА) [186] з використанням електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА-102-02. Зйомку спектрограм здійснено з вирізаних фрагментів, на які для утворення електричного контакту з використанням установки ВУП5 (Вакуумний універсальний пост) нанесено тонкий (≈ 1 -2 мкм) шар алюмінієвого покриття.

Бите скло за допомогою дробарки попередньо здрібнювалось до розміру 10 мм, а потім у кульовому млині барабанного типу (Додаток Б, рис. Б.1) зазнавало сухого розмелу. Як молотильні тіла застосовано керамічні кульки, частота обертання ротора – 800 об/хв; час розмелу склав 20 хв на кожні 100 г скла. Спосіб сухого розмелу обрано виходячи з його технологічних можливостей одержувати частинки скла із середнім розміром 40...70 мкм несферичної форми, що сприятиме додатковому наклепу сталевій підкладки при електродуговому напиленні покриттів. Гранулометричний склад, форму та стан поверхні отриманих порошоків досліджено методами оптичної і комп'ютерної металографії [9, 179] з використанням мікроскопів БИОЛАМ-И і ММР-2Р. Результати наведено у

вигляді мікрофотографій та гістограм розподілу за розміром та фактором форми, для чого було використано програмний комплекс МЕГРАН [188], розроблений на кафедрі матеріалознавства і технології металів НУК, який пропонує автоматизацію вирішування задач, пов'язаних з фільтрацією зображень, виконанням розрахунків для визначення розмірів, форми, периметра та площі мікроскопічних об'єктів з побудовою гістограм їх розподілу. Структуру порошків вивчено шляхом фазового рентгеноструктурного аналізу (РСА) та зіставлення одержаних результатів з діаграмами стану систем: $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ [318]. Фазовий РСА порошків виконано на установці ДРОН-4 у випромінюванні заліза $\text{Fe}_{\text{K}\alpha=0,193728}$ ($U = 25$ кВт, $I = 28$ мА), для чого підготовлено дослідні зразки циліндричної форми ($h = 1,5$ мм, $d = 18$ мм), які далі для вивчення температурного впливу на структуру зазнавали нагрівання зі швидкістю підйому температури $40^\circ\text{C}/\text{хв}$ до 600°C у лабораторній печі СНОЛ-1,6.2.08/9-М1 з окисною атмосферою, для чого застосовано графітовий контейнер.

Мікротвердість виміряно на приладі ПМТ-3 (навантаження на індентор – 200 г) за ГОСТ 9450-76 на спеціально підготовлених мікрошліфах, для чого скляні порошки змішувались з епоксидною смолою і після твердіння заполіровано за стандартною методикою.

Обробка одержаних експериментальних даних здійснювалась за допомогою відомих методів математичної статистики [215].

3.1.2 Результати досліджень хімічного складу, морфології та структури скляних порошків

3.1.2.1 Дослідження порошку, одержаного зі скла кришталевого посуду

Результати МРСА наведено у вигляді спектрограм з елементним складом (рис. 3.1). Поряд зі спектрами Si, Na, Ca, що належать системі $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, на спектрограмі виявлено спектри K і Pb, які відносять дослідне скло до калієво-свинцевого кришталю [183], але за їх концентрацією це є малосвинцевий кришталь. Наявність спектрів Al є результатом металізації скла при пробопідготовці.

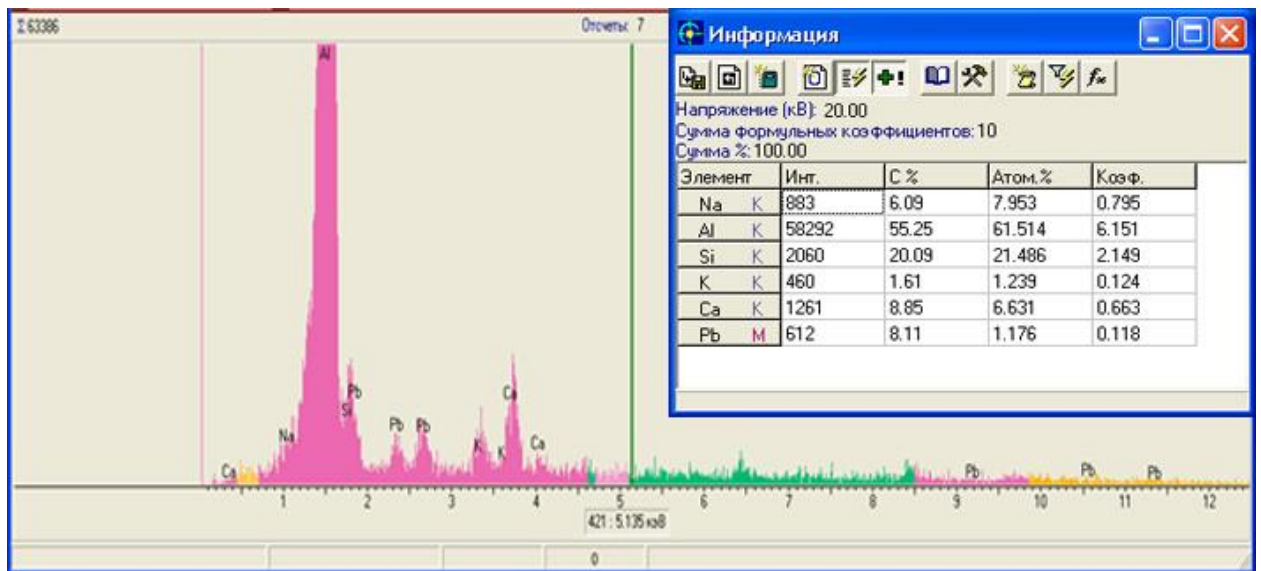
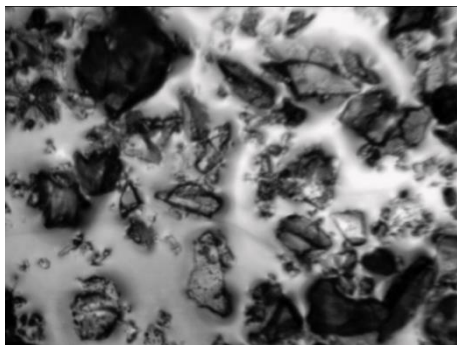


Рисунок 3.1 – Результати МРСА зразків посудного кришталевого скла

Результати досліджень фізико-механічних, зокрема морфологічних характеристик одержаного порошку (рис. 3.2), показали, що це є порошок середньої тонкості ($d_{cp} = 45$ мкм) губчастої форми.



а

Дисперсність	10...85 мкм
Середній розмір частинок	45 мкм
Середній фактор форми	0,5
Насипна щільність	290 кг/м ³
Щільність скла частинок	2500 кг/м ³
Мікротвердість	1,4 ГПа

б

Рисунок 3.2 – Результати досліджень скляного порошку, одержаного зі скла кришталевого посуду:

а – оптична мікрофотографія, $\times 350$; б – властивості порошку (скріншот з програмної обробки результатів)

Розподіл частинок фракції за розміром та формою у графічному вигляді наведено на рис. 3.3.

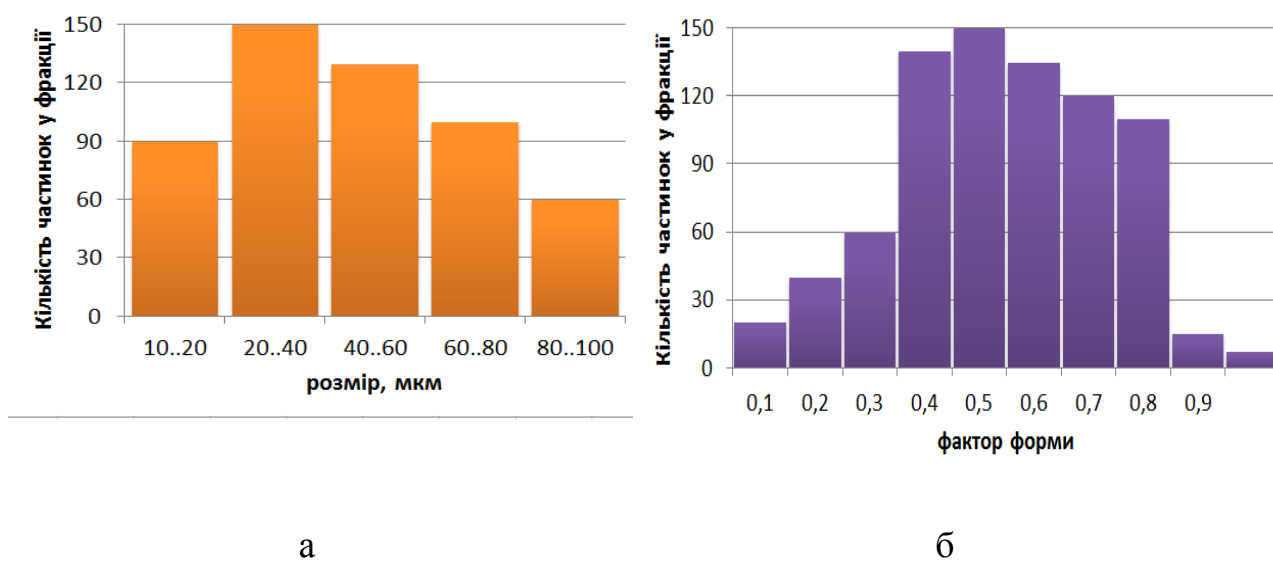
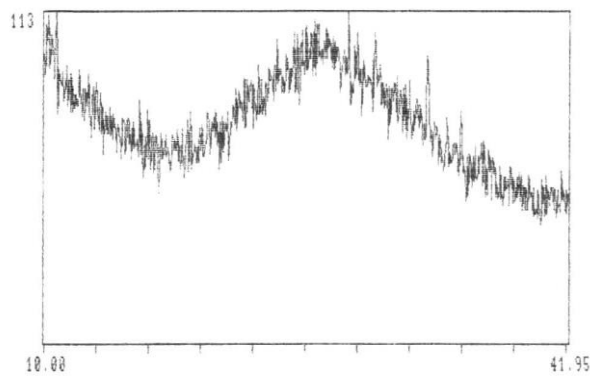


Рисунок 3.3 – Гістограми розподілу частинок порошку, одержаного зі скла кришталевого посуду:

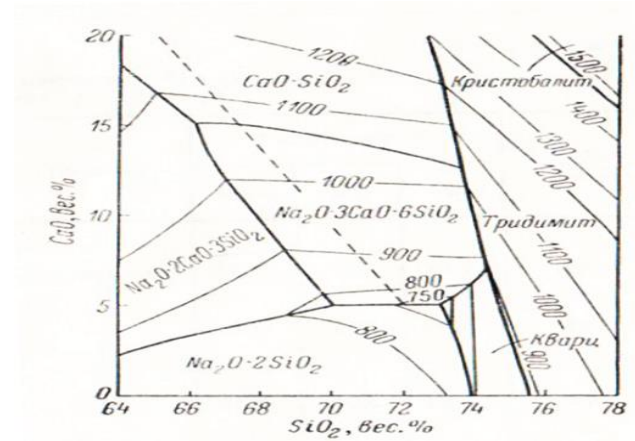
а – за розміром; *б* – за фактором форми

Результати РСА (рис. 3.4, а) показали загальну рентгеноаморфність дослідного порошку, проте на дифрактограмах спостерігаються лінії, які вказують на наявність кристалічної модифікації $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ у межах певної концентрації SiO_2 за діаграмою стану $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ (рис. 3.4, б), що дозволяє називати одержаний порошок як «порошок натрійсилікатного скла».

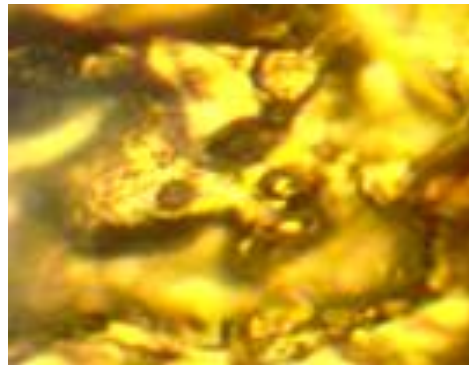
Мікроструктурні дослідження порошку після термічного оброблення у температурному інтервалі розм'якшення – 500...600 °С [62, 226] показали, що нагрівання до температури 600 °С призводить до оплавлення частинок з утворенням на їх поверхні склоподібної оболонки (рис. 3.4 в), проте порошкове навішення не перетворюється на спечений агломерат; на одержаних дифрактограмах фазових перетворень не зафіксовано.



а



б



в

Рисунок 3.4 – Результати досліджень впливу температури на структуру порошків кристалового скла: *а* – фрагмент дифрактограми; *б* – діаграма стану частини потрійної системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ (за Моресем) [318]; *в* – оптична мікрофотографія ($\times 500$) термообробленого порошку ($t = 600\text{ }^\circ\text{C}$)

Враховуючи фізико-хімічні процеси, що відбуваються при варінні кристалового скла [62, 226] та формуванні виробів, результати мікрозондового рентгеноспектрального аналізу, зіставлення результатів РСА з діаграмами стану силікатних систем [318] можна зробити висновок про однорідну структуру одержаних скляних порошків. Результати досліджень їх морфологічних характеристик, структури і процесів розм'якшення дозволяють рекомендувати їх для подальшого застосування у технологіях електродугового напилення.

3.1.2.2 Дослідження порошку, одержаного з рентгенозахисного оптичного скла

Для проведення експериментальних досліджень використано прозорий лист світло-жовтого кольору – рентгенозахисне скло дифрактометра, випадково зруйнованого після тривалої експлуатації. За результатами МРСА (рис. 3.5) дослідне скло являє собою багатокомпонентну систему, хімічний склад, структуру і властивості якої неможливо описати за допомогою однієї діаграми стану.

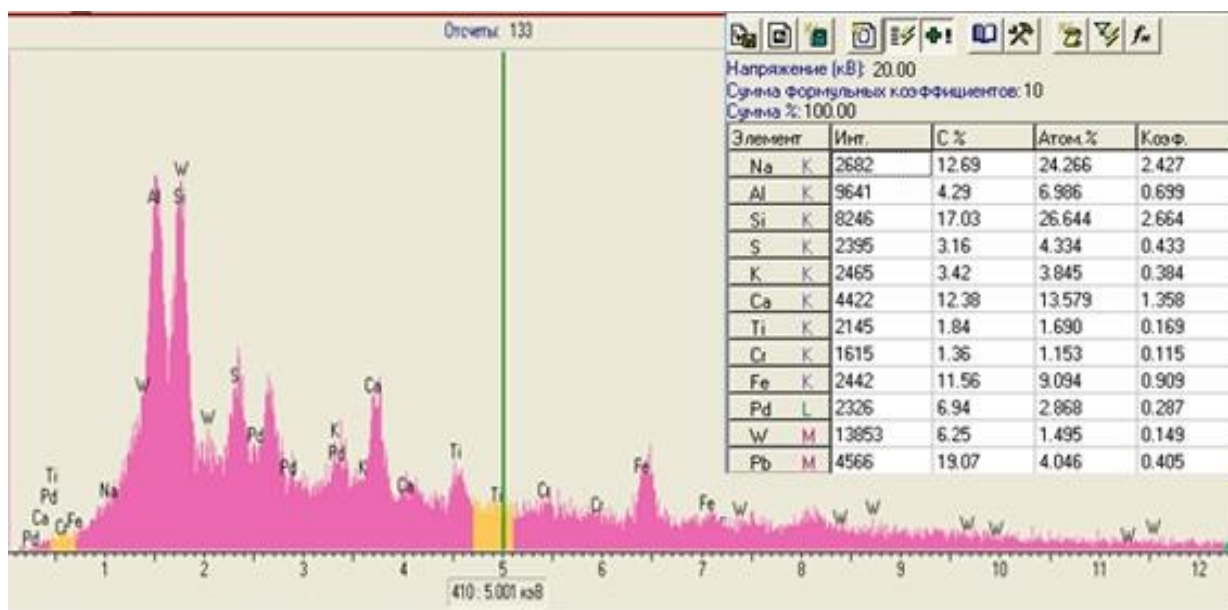
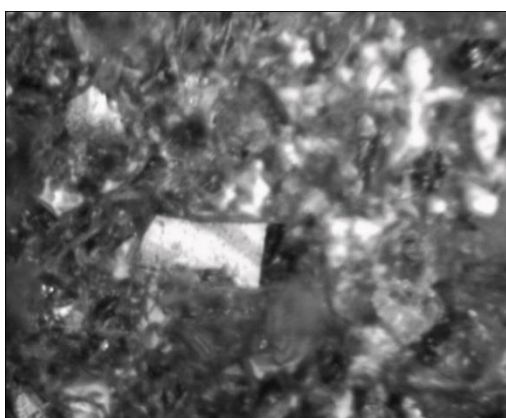


Рисунок 3.5 – Результати МРСА зразків рентгенозахисного оптичного скла

Наявність спектрів K, Si і Pb відносить його до стекол системи $K_2O-PbO-SiO_2$, представником якої може бути рентгенозахисне оптичне скло марки крон-флинт ТФ10, яке за даними БД MDL SciGlass-7.0 Institute of Theoretical Chemistry (Shrewsbury MA, 2005) містить мас. %: SiO_2 – 55...57,33; K_2O_3 – 1,34...11,0; PbO – 33...40. Технологія його одержання [59] включає у себе введення до складу близько 40 % склобою того ж самого складу, що й скло, та просвітлювальних речовин, наприклад, сірчанокислового натрію (про що свідчить наявність спектрів Na). Варка відбувається у скловарних печах при температурі 1500 °С; для запобігання розтріскування під час охолодження заготовка зазнає відпалювання у електропечах при температурі 500 °С з повільним охолодженням (навіть протягом 6...8 днів). Заключною обробкою є полірування з нанесенням тонких прозорих плівок

для покращення спеціальних, зокрема оптичних властивостей. Наявність інших спектрів (W, Al, Ti, Fe, Cr, Pd) пояснюється так званою «історією» дослідного скла, яка пов'язана з процесом дифузійного насичення під час тривалої експлуатації та додаткової обробки. Так, наявність спектрів W – це наслідок шліфування та полірування, Al – металізації для поліпшення контакту з мікрозондом для МРСА. Крім базових компонентів (CaO, Na₂O, K₂O) додатково до складу оптичних склофрит вводяться забарвлювачі, які сприяють підвищеному поглинанню ультрафіолету в області спектра: це пояснює наявність спектрів Ti, Fe, Cr. Наявність спектрів Pd обумовлена тривалою експлуатацією в електроконтактних вузлах, дією температур та рентгенівського випромінювання.

Результати мікроструктурних досліджень та статистичної обробки цифрових мікрофотографій (рис. 3.6) одержаних порошків показали, що це є частинки середньої тонкості ($d_{\text{ср}} = 50$ мкм) губчастої форми.



а

Дисперсність	15...90 мкм
Середній розмір частинок	50 мкм
Середній фактор форми	0,6
Насипна щільність	250 кг/м ³
Щільність скла частинок	2700 кг/м ³
Мікротвердість	1,3 ГПа

б

Рисунок 3.6 – Результати досліджень скляного порошку, одержаного із рентгенозахисного оптичного скла:

а – оптична мікрофотографія, $\times 350$; б – властивості порошку (скріншот з програмної обробки результатів)

Розподіл частинок фракції за розміром та формою у графічному вигляді наведено на рис. 3.7.

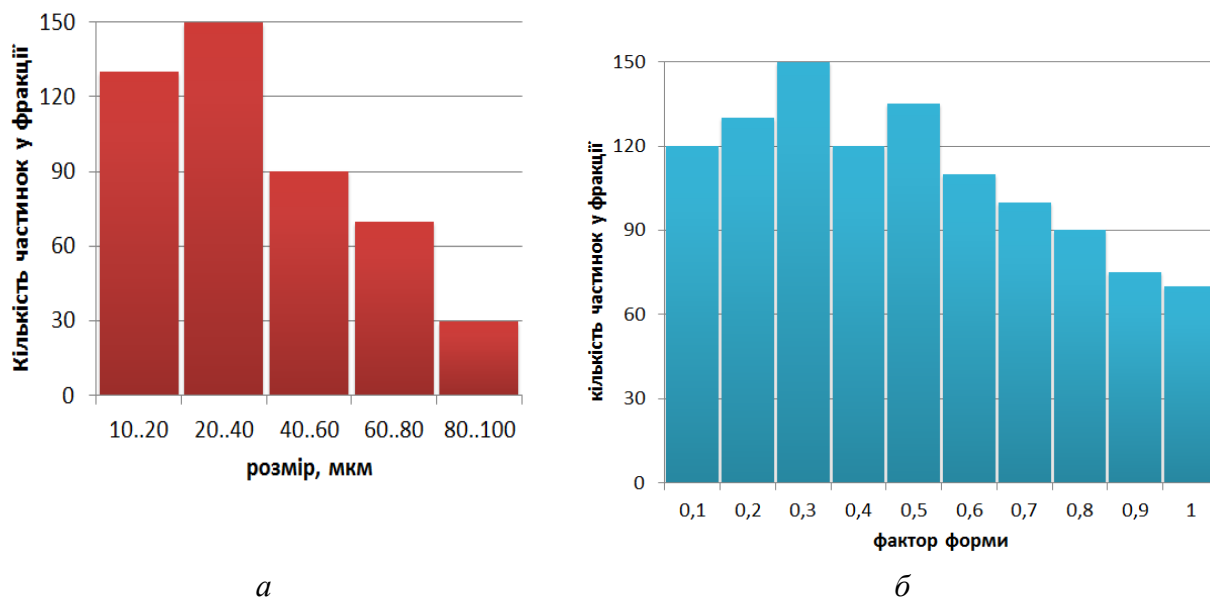
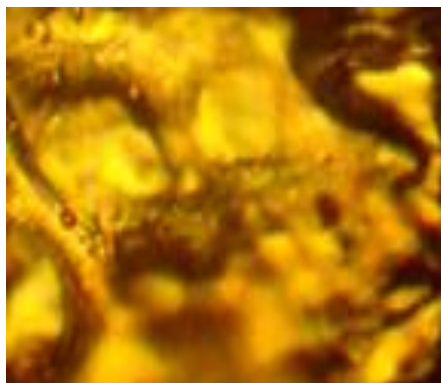
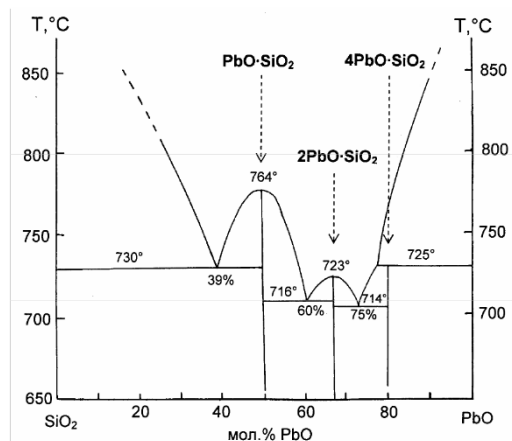


Рисунок 3.7 – Гістограми розподілу частинок порошку, одержаного із рентгенозахисного оптичного скла:
a – за розміром; *б* – за фактором форми

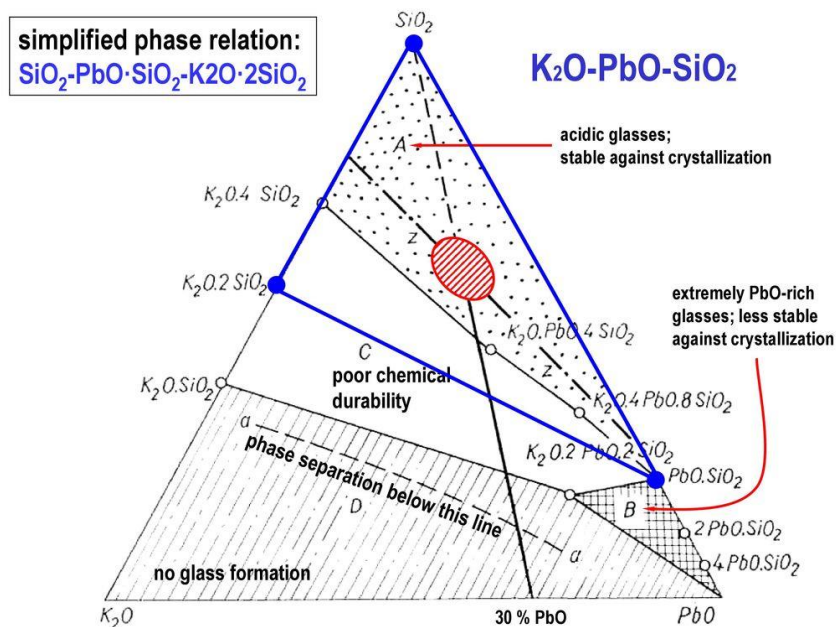
На рис. 3.8 а наведено мікрофотографію дослідного порошку після термічної обробки при температурі 600 °С, з якої видно, що частинки зазнають поверхневого оплавлення з утворенням міжчасткових прошарків. Результати фазового РСА показали рентгеноаморфність дослідних порошків без наявності певних кристалічних модифікацій. За аналізом діаграми стану PbO-SiO_2 (рис. 3.8, б), яка є базовою для більшості свинцево-силікатних стекол, зокрема оптичних кронів, у області певних концентрацій PbO і SiO_2 дослідне скло має однорідну структуру. Температурний інтервал розм'якшення для більшості стекол цієї системи складає 430...550 °С; мікрорентгеноспектральні дослідження показали стабільність хімічного складу термооброблених у окисному середовищі порошків стекол, чого не спостерігається при нагріванні у атмосфері водню [53].



a



б



в

Рисунок 3.8 – Результати досліджень розм'якшення порошків свинцево-силікатного скла: *a* – оптична мікрофотографія ($\times 500$) термообробленого при $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ порошку; *б* – діаграма стану PbO-SiO_2 [12]; *в* – діаграма стану $\text{K}_2\text{O-PbO-SiO}_2$ [369]

У відповідності з більш складною системою $\text{K}_2\text{O-PbO-SiO}_2$, уявлення про яку було складено у науковій праці [372], а далі розвинуто у роботах [369, 390] вище температури $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ починаються кристалізаційні процеси з утворенням складних модифікацій $\text{K}_2\text{O}\cdot 2\text{PbO}\cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}\cdot 4\text{PbO}\cdot 8\text{SiO}_2$,

$2\text{K}_2\text{O}\cdot\text{PbO}\cdot 3\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{PbO}\cdot 4\text{SiO}_2$. Враховуючи складний хімічний склад дослідного свинцевосилікатного скла, технологію його варіння, формування, умови додаткової обробки та експлуатації; зіставлення мікроскопічних досліджень, результатів МРСА з діаграмами стану, слід зазначити, що одержані скляні порошки (у подальшому – свинцево-силікатні) є однорідними за своєю структурою, але являють собою багатокомпонентну систему.

Результати досліджень розширюють наукові уявлення про стан і структуру скляних дисперсних систем і далі беруться до уваги при поясненні фізико-хімічних процесів структуроутворення нових метал-скляних електродугових покриттів.

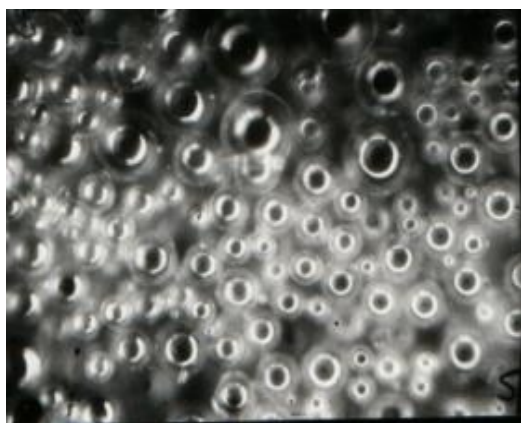
3.1.3 Результати досліджень структури порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Дослідження проведено на виборці з партії порожніх скляних мікросфер марок МСО-, МС-ВП виробництва ОАО «НПО «Стеклопластик»» (РФ), які мають поширене застосування для виготовлення елементів плавучості морських глибоководних апаратів на різні глибини занурювання, теплоізоляційних та вогнетривких фарб, мастик, шпаклевок у суднобудівних технологіях, полегшених бетонів для бурових свердловин тощо.

Морфологію ПСМ досліджено за допомогою методів оптичної та електронної мікроскопії [9, 44, 401]; середній розмір у виборці визначено за статистичною обробкою цифрових мікрофотографій, зроблених на оптичному мікроскопі ММР-2Р з використанням комп'ютерної металографії [188]. Електронно-мікроскопічні знімки зроблено за допомогою растрового електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА 102-02 з роздільною здатністю 5 нм, для створення електричного контакту навішення мікросфер у вигляді однорідної суспензії у етиловому спирті нанесено на алюмінієву фольгу. Фазовий склад мікросфер визначено методом рентгенівської дифракції на установці УРС-50И, для чого застосовано попередньо термооброблені при температурах 100, 745°C зразки. Ідентифікацію

кристалічних фаз проведено порівнянням міжплощинних відстаней та інтенсивностей максимумів на дифрактограмах зразка з даними картотеки ASTM (Published by the American Society for testing materials) [396].

Порожні скляні мікросфери (рис. 3.9) фракції 20...100 мкм являють собою закриті оболонки з ідеальною сферичністю (фактор форми прирівнюється до одиниці) з середнім розміром 40 мкм і товщиною стінки 1 мкм. Технологія їх одержання включає в себе приготування шихти, варіння скла при температурі 1300 °С, грануляцію розплаву у воду, здрібнення та просівання гранулята крізь сито з наступною подачею до полум'я газоповітряного пальника з температурою 1150 °С, поверхневу обробку сформованих ПСМ силановим апретом [31, 32].



а

Характеристики	
Дисперсність	20...100 мкм
Середній розмір частинок	40 мкм
Середній фактор форми	1
Насипна щільність	190 кг/м ³
Щільність скла частинок	2270 кг/м ³

б

Рисунок 3.9 – Результати досліджень порожніх скляних мікросфер:

а – оптична мікрофотографія, $\times 350$; б – властивості порошку

(скріншот з програмної обробки результатів)

Теоретичні і експериментальні дослідження містять: визначення впливу силанового апрету [31, 32, 305] на розм'якшення скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (мас. %: SiO_2 – 69,0; Na_2O_3 – 13,5; CaO – 6,0; B_2O_3 – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0) при нагріванні, аналіз їх структури у відповідності з діаграмами стану [11, 17] та за результатами фазового РСА термооброблених ПСМ, порівняння одержаних даних з базовим варіантом, за який обрано мікросфери системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (МСО-, мас., %: SiO_2 – 77,0; Na_2O_3 – 23,0).

3.1.3.1 Дослідження впливу силанового апрету на розм'якшення мікросфер при нагріванні

Гама-амінотриетоксисилан $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ марки АГМ-9 (ТУ 6-02-724-77) являє собою прозору рідину світло-солом'яного кольору з густиною 1062 кг/м^3 ; молярною вагою – 179,29; коефіцієнтом заломлення при 25°C $n_d^{25} = 1,420$; $t_{\text{пл}} = 70^\circ\text{C}$; $t_{\text{розпаду}} = 217^\circ\text{C}$, $t_{\text{кип}} = 194^\circ\text{C}$ [94]. Силани апретів, що нанесені на поверхні, збагачені SiO_2 , з'єднуються з силанольними групами поверхні водневими зв'язками. Після нанесення апрету скломатеріали піддаються сушці і конденсації при $t = 100 \pm 5^\circ\text{C}$, що створює сприятливі умови для хімічному зв'язку з утворенням силоксанів, які через кисневий місток замикаються на поверхні скла з ОН-групою. Силоксанові зв'язки між апретом і поверхнею скла є стійкими до дії повітря або водяної пари, слабо піддаються гідролізації у киплячій воді [293]. У науковій літературі [83, 309] властивості апретів розглядаються стосовно скловолокон, призначених для армування полімерних матеріалів: формування міжфазного шару з полімерним зв'язуючим досягається через взаємодію з вуглеводневим радикалом органосиланового апрету, що підвищує адгезію, наприклад, при виготовленні склопластиків. Однак вплив температурної обробки на структуру апретованих ПСМ досліджено недостатньо. Нанесення апретів на поверхню порожніх скляних мікросфер (0,3 %) згладжує дефекти, зменшує шорсткість, підвищує гідролітичну стійкість і гідростатичну міцність [31, 32]. Товщина плівки силанового апрету, нанесеного на дисперсні наповнювачі, складає 10...30 нм [309], тому дослідження її впливу на термодформаційну поведінку ПСМ за допомогою аналітичних методів є достатньо складним. Для цього в роботі застосовується розроблена установка (див. § 3.2): навішення мікросфер масою 2,0 г засипалося у графітову прес-форму ($d = 22 \text{ мм}$, $h = 47 \text{ мм}$) разом з якою піддавалося нагріванню до 800°C . Для найбільш точного контролю температури всередину навішення ПСМ вставлена термопара градування ХА (ДСТУ 2837-94), яку виведено крізь отвір у технологічній кришці.

Прикладання через пуансон мінімального зусилля 0,1 МПа дає змогу контролювати усадку як один з наочних показників початку температурної деформації скляної сферичної оболонки. Дослідження показали, що усадочні процеси при нагріванні апретованих мікросфер починаються при температурі 490...500 °С. Початок деформаційних процесів неапретованих ПСМ такого ж самого складу (дослідна партія зразків, виготовлена на ЗАО НПП «Аквасит», РФ) у середньому на 50 °С вище температури розм'якшення апретованих мікросфер і складає 550 °С. Таким чином, протягом нагрівання спочатку розм'якшується шар апрету, а скляна оболонка залишається сферичної форми.

3.1.3.2 Результати рентгеноструктурного аналізу

На рис. 3.10 наведено дифрактограму відпалених у графітовому тиглі мікросфер ($t = 100$ °С, $\tau = 30$ хв, окисне середовище), у табл. 3.1 – значення подвійного кута відбивання та інтенсивності рентгенівського променя.

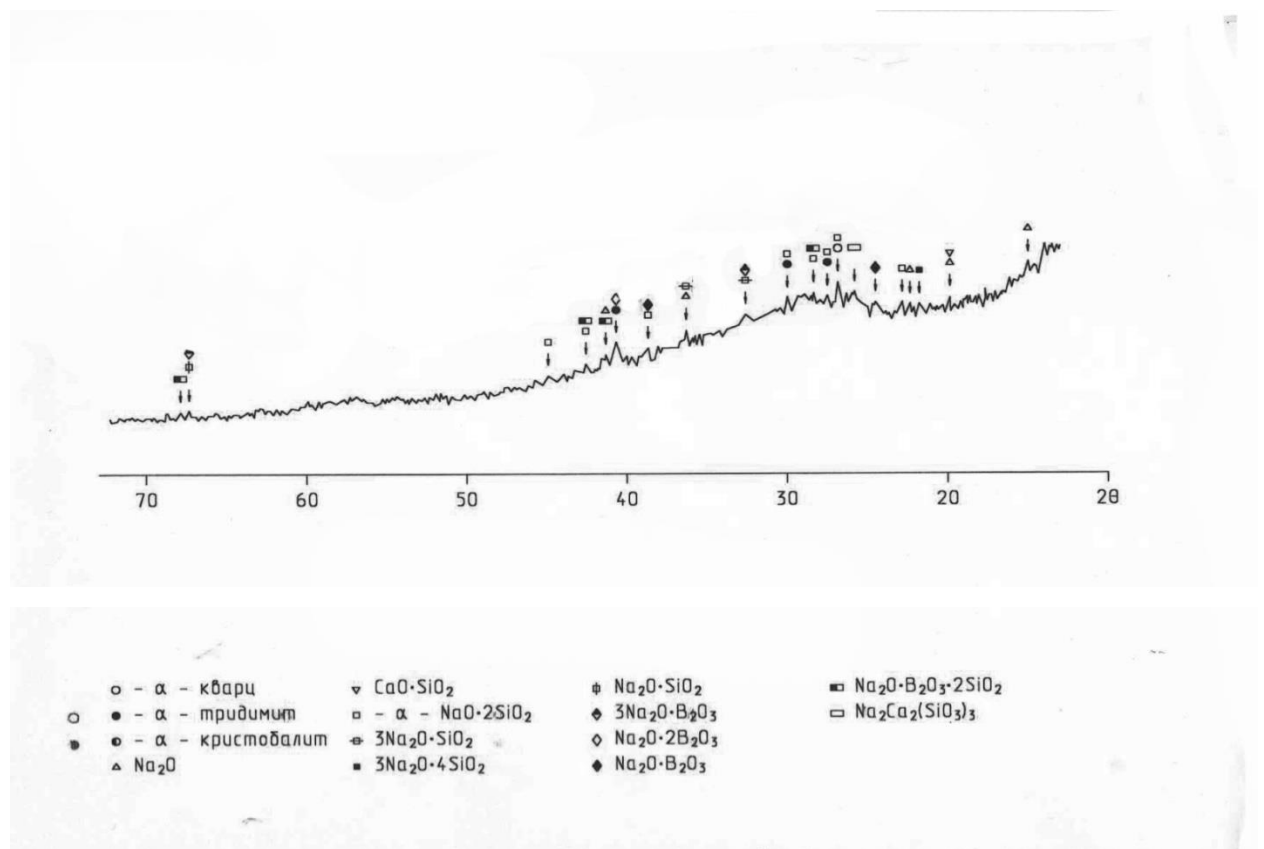


Рисунок 3.10 – Дифрактограма порожніх скляних мікросфер

Наведена дифракційна картина показує, що дослідні мікросфери характеризуються склоподібним станом, проте містять декілька кристалічних фаз, стехіометричний склад яких визначається хімічним складом мікрокристалічних областей, які є у даному аморфному матеріалі.

Таблиця 3.1 – Фазовий склад скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Кут відбивання 2θ	Міжплощинна відстань $d, \text{\AA}$	Інтенсивність I мм	Фазовий склад
14,50	7,68	4	Na_2O
15,70	7,09	4	—
19,50	5,72	3	$\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
21,44	5,21	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$
22,12	5,05	4	Na_2O
22,58	4,95	2,5	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
24,24	4,61	4	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
25,58	4,38	3,5	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)_3$
26,60	4,21	7	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, α -кварц
27,30	4,10	3,5	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, α -тридиміт
28,12	3,99	2	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
29,84	3,76	5	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, α -тридиміт
32,30	3,48	3	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$; $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
36,30	3,11	2	Na_2O , $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
38,56	2,93	4	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
40,50	2,83	8	$\text{Na}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$, α -тридиміт
41,24	2,75	4	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, Na_2O
42,46	2,68	2	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
45,36	2,51	3	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
67,66	1,74	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
68,16	1,73	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
77,60	1,55	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
79,54	1,51	2	α -тридиміт
81,30	1,49	3	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
91,40	1,35	3	α -кварц, Na_2O

Згідно з одержаними даними ПСМ системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ також як і натрійсилікатні мікросфери (табл. 3.2) містять три поліморфні модифікації кремнезему: α -кварцу, α -тридиміту і α -крystalіту.

Таблиця 3.2 – Фазовий склад скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$

Кут відбивання 2 θ	Міжплощинна відстань d , Å	Інтенсивність I мм	Фазовий склад
15,76	7,06	4,5	—
17,24	6,46	3	—
22,68	4,93	2	α - $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 8\text{SiO}_2$
25,80	4,34	4,5	α -тридиміт
26,50	4,23	2,5	α -кварц
28,14	3,98	4,0	α - $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
29,64	3,79	4,5	α - $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$, α -тридиміт
30,21	3,72	4,0	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$
37,0	3,05	2,0	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
38,06	2,97	1,5	α -тридиміт
40,26	2,81	2,0	α -тридиміт
41,0	2,76	3,5	Na_2O
50,44	2,27	2,5	α -кварц, Na_2O
51,8	2,22	2,0	α -кварц
57,24	2,02	8,0	α -кристобаліт, Na_2O
72,7	1,63	2,0	α -тридиміт

Крім кристалічних модифікацій SiO_2 за результатами PCA також виявлено лінії проміжних фаз системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (зокрема $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$; $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) та лінії, які належать до оксиду Na_2O , наявність яких можна пояснити залишками вихідного матеріалу, який не прореагував, або тим, що оксид Na_2O утворився внаслідок нестабільності ортосилікату Na_2SiO_4 при підвищених температурах і розпаді його на $\text{Na}_6\text{SiO}_2\text{O}_7$ ($3\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$) і Na_2O .

Хімічний склад натрійборсилікатних мікросфер є більш складним: крім поліморфних модифікацій SiO_2 , з'єднань системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ і оксиду Na_2O , на дифрактограмах спостерігаються лінії боратів $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$; $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$; $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ і воластоніту $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [161]. Поряд з фазами, стабільними у певному концентраційному інтервалі на рівноважній діаграмі стану $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, у дослідних ПСМ спостерігається виділення інших фаз, що належать до даної системи, але існуючих поза межами досліджуваної області концентрацій. Наявність з'єднання $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)_3$ підтверджує той факт, що

всередині дослідних ПСМ знаходиться SO_3 , введений через сірчано-кислий натрій, що враховується при дослідженні механізмів взаємодії іонізуючих випромінювань зі структурними елементами одержаних композицій (розділ 4). За одержаними результатами можна зробити висновок про мікрогетерогенну будову дослідних ПСМ, пояснення якому слідує з хімічної неоднорідності скла: на схильність до ліквідації вказують діаграми стану $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$. Перехід до аморфного стану діаграми не показують, проте дозволяють оцінити схильність до склоутворення переважно в областях системи з мінімальною температурою ліквідусу. В процесі синтезу головні окисли SiO_2 і B_2O_3 повністю зміщуються, в результаті грануляції у воду утворюються мікрокристалічні області, які містять фази різної природи (кремнеземи, окисли, силікати, борати, борсилікати), що є наслідком протікання ліквідаційних процесів у дослідних зразках. Наявність у скломасі сірчаного ангідриду не тільки приводить до спінювання скла, зменшуючи щільність, але й знижує температуру склування. Часткова заміна кисню на фтор, який відрізняється високою електронегативністю і низькою поляризованістю, сприяє формуванню в процесі синтезу властивостей, пов'язаних з високою іонною провідністю, широким інтервалом спектральної прозорості (160...5000 нм) і підвищеною хімічною стійкістю до реагентів, що містять фтор [155]. Таким чином, за результатами аналізу діаграм стану та РСА можна зробити висновок про структурну неоднорідність дослідних ПСМ. У процесі досліджень висунуто припущення, що зовнішня поверхня мікросфери (рис. 3.11) збагачена оксидами лужних металів, а внутрішня – фазами кремнезему.

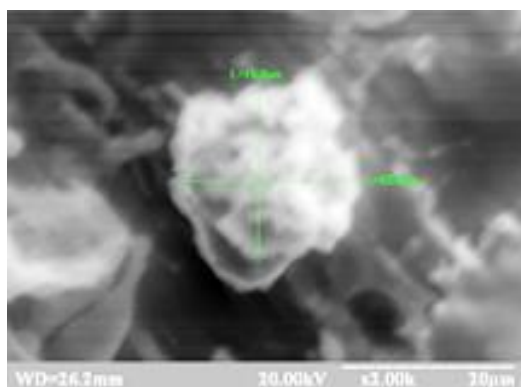


Рисунок 3.11 – Електронно-мікроскопічний знімок поверхні порожньої скляної мікросфери

3.1.3.3 Дослідження впливу температури на структуру порожніх скляних мікросфер

Термічне оброблення ПСМ здійснювалось без ізотермічної витримки та проводилось у лабораторній печі з окисною атмосферою СНОЛ–1,6.2.08/9-М1, для чого застосовано графітовий контейнер, у який встановлено термопару градування ХА (швидкість підйому температури – 20 °С/хв). За результатами РСА (рис. 3.12, табл. 3.3) встановлено, що зі збільшенням температури до 745 °С фазових перетворень у дослідних натрійборсилікатних мікросферах, також як і ПСМ системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ не відбувається.

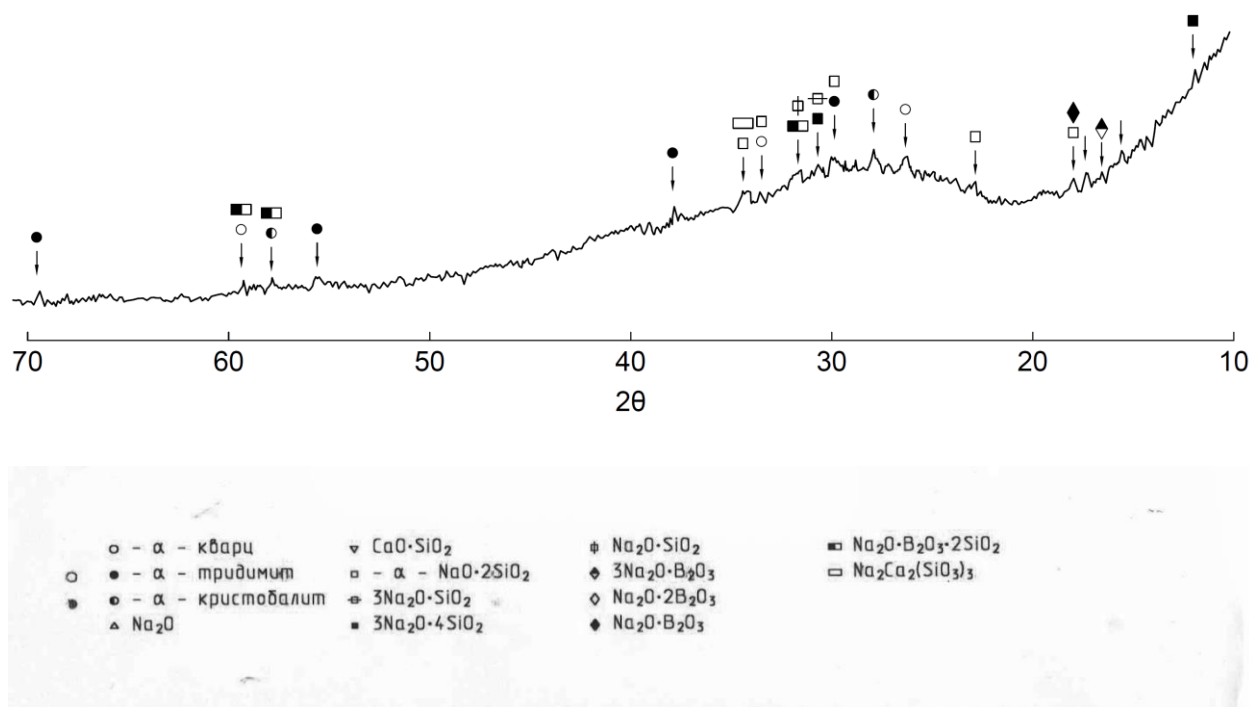


Рисунок 3.12 – Дифрактограма порожніх скляних мікросфер, системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, відпалених при $t = 745\text{ }^\circ\text{C}$

Індивідуальні лінії α -кварцу зареєстровані тільки у вихідних ПСМ (рис. 3.10), а у термічно оброблених зразках (рис. 3.12) вони збігаються з дифракційними піками інших фаз; з модифікацій кремнезему на дифрактограмах переважають лінії α -тридиміту. Проте при підвищенні температури зникають лінії боратів натрію, знижується інтенсивність ліній

інших кристалічних фаз, тобто відбувається перехід до склоподібного стану. Наявність аморфної складової SiO_2 у кремнеземистих породах створює передумови для протікання процесів силікато- і склоутворення при температурах, які наближаються до рівноважних [89].

Таблиця 3.3 – Фазовий склад скляних мікросфер системи

$\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, відпалених при $t = 745^\circ\text{C}$

Кут відбивання 2θ	Міжплощинна відстань $d, \text{\AA}$	Інтенсивність I мм	Фазовий склад
12,64	8,80	3,5	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$; Na_2O
14,26	7,80	3,5	Na_2O
15,70	7,09	3,5	–
16,24	6,86	4	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
17,60	6,63	3	–
20,50	5,44	3	Na_2O
23,40	4,78	2,5	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
25,08	4,46	3	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)_3$
26,64	4,20	3,5	$\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
31,26	3,60	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$; $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
33,0	3,41	2,5	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; $3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
34,12	3,30	3,5	$\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SiO}_3)_3$; $\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
34,84	3,24	4	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
35,28	3,20	3	α -тридиміт
40,4	2,81	3,5	α -тридиміт; $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$
42,28	2,69	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; $\alpha\text{-Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$
44,10	2,58	3	Na_2O ; $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
48,0	2,38	2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
48,86	2,34	2	Na_2O
51,0	2,25	2,5	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$
56,0	2,06	2	α -тридиміт
58,56	1,98	3	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$; $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Встановлені закономірності структурного стану порожніх скляних мікросфер є основоположними для структуроутворення спечених метал-скляних матеріалів і електродугових покриттів.

3.2 Установка для спікання, гарячого пресування та дослідження термодетформаційних процесів порошкових сумішей

Метод гарячого пресування є різновидом спікання та являє собою один з перспективних для формування порошкових заготовок і виробів, який дає змогу під дією температури та прикладених зусиль реалізувати процес термічної консолідації порошкових компонентів в одному технологічному циклі. Існуючі конкурентоспроможні технології, зокрема електроіскрове спікання (SPS-технології) [257, 372], є розвинутими модифікованими напрямками гарячого пресування, основані на пропусканні електричного струму через прес-форму і заготовку, забезпечують швидкий попередній нагрів та короткочасний технологічний цикл, однак обмежуються діапазонами електропровідності порошків. У ряді випадків (спікання крихких порошків, тепло- та електроізоляторів, формування аморфних структур, пресування гетерофазних сумішей) єдиним методом одержання композицій є застосування гарячого пресування з механічним способом прикладання тиску; це забезпечує рівноважний розподіл структури і властивостей по об'єму та висоті пресовки [312]. Технології, основані на гарячому пресуванні, застосовують для формування багатошарових нерознімних з'єднань, біметалів [367, 401], проте їх реалізація вимагає необхідності розробки експериментального обладнання, де на конструктивному рівні вдосконалено вимірювання температури, тиску, контролюються усадочні процеси [307, 354]. Принцип вимірювання величин усадки за допомогою індикатора часового типу реалізовано у конструкції установки [109]. Через відсутність демонстрації процесів формування матеріалу та можливості змінювати швидкість підйому температури і тиск на різних стадіях одного технологічного циклу, її застосування у експериментальних дослідженнях обмежено. У зв'язку з цим проведено модернізацію конструкції, в результаті чого стає можливим виконувати спікання металевих та неметалевих порошків, а також їх сумішей як з використанням тиску, так і у вільному

стані, виконувати допресовку шарів при виготовленні композицій і формування порошкових покриттів на поверхні виробів. В основу конструювання покладено експериментальні роботи, пов'язані з дослідженнями рівномірності температурного поля у робочому просторі печі, обробкою результатів вимірювань усадочних процесів, виготовленням оснащення, виконанням серії тестів. Виготовлений новий експериментальний зразок (рис. 3.13) складається з шахтної лабораторної печі вертикального завантаження з номінальною температурою 900 °С та окисною атмосферою, механічного пресуючого пристрою та блока управління.

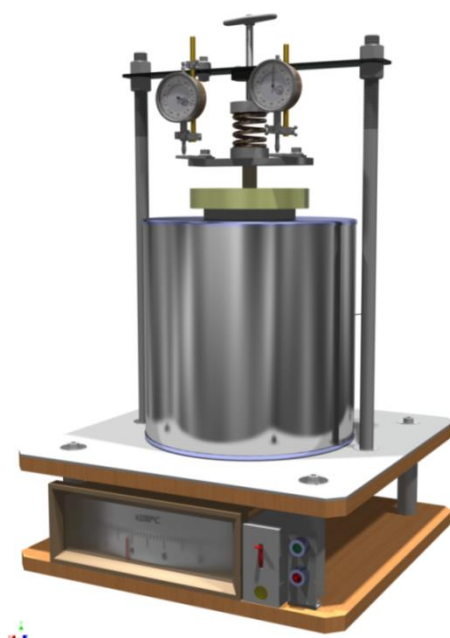


Рисунок 3.13 – Експериментальна установка

Відмінності нового зразка полягають у наступному: теплову ізоляцію корпусу печі виготовлено у вигляді трубчастого циліндра зі спеченої кераміки; ніхромову електричну спіраль розташовано у внутрішньому корпусі печі, що полегшує виконання ремонтних робіт та виключає введення температурних поправочних коефіцієнтів; кришка печі має знімну конструкцію: для проведення експериментальних досліджень замість неї встановлюється термостійке скло, скрізь яке можна спостерігати за процесом спікання; до механічного пресуючого пристрою додаються лінійка або

індикатор для контролю стискання пружини; до складу комплектуючих установки графітові та сталеві прес-форми різних розмірів і таровані на різні зусилля пружини; вбудовано блок управління. Новизну конструкції підтверджено патентом на корисну модель [235]; деталізовану схему установки наведено на рис. 3.14

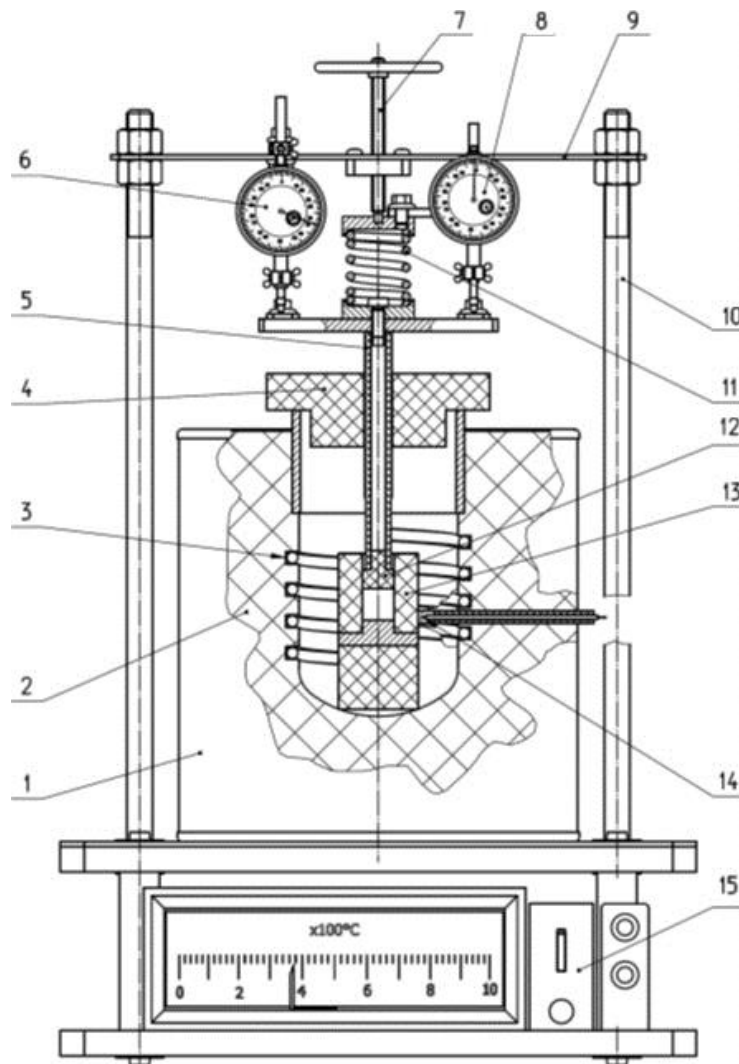


Рисунок 3.14 – Деталізована схема установки: 1 – корпус печі; 2 – теплова ізоляція; 3 – ніхромова електрична спіраль; 4 – кришка печі; 5 – шток; 6 – індикатор переміщення пуансона; 7 – навантажувальний гвинт; 8 – індикатор стискання пружини; 9 – траверза; 10 – силова штанга; 11 – пружина; 12 – пуансон прес-форми; 13 – прес-форма; 14 – перетворювач термоелектричний; 15 – блок управління

У робочому просторі печі розміщується прес-форма 13 з пуансоном 12, через який до формувальної суміші прикладається тиск. Механічний пресуючий пристрій складається з траверси 9, яка кріпиться на силових штангах 10. В отворі траверси розташований навантажувальний гвинт 7, за допомогою якого задається тиск пресування. Задане зусилля передається через пристрій з силовою пружиною 11 на шток 5 і пуансон прес-форми 12. Величина стискання пружини контролюється за допомогою спеціальної лінійки (рис. 3.15), що дає змогу підтримувати певну величину тиску або змінювати його протягом всього процесу спікання. Замість лінійки можна використовувати індикатор часового типу.



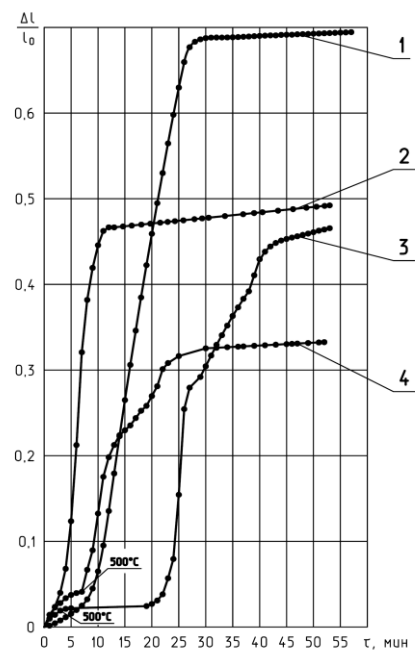
Рисунок 3.15 – Етапи прикладання тиску пресування

Силовa пружина стискається на певну величину, яка відповідає тарованому значенню навантаження. До складу комплектуючих входять пружини, таровані за допомогою машин МИП-10 і МИП-100 на різні зусилля до 60 кг. Якщо в процесі спікання відбуваються усадочні процеси або процеси зростання об'єму пресовки, то для досліджень використовується індикатор переміщення пуансона (рис. 3.16, а), його показання фіксують швидкість вимірювання усадки протягом кожної хвилини. Обов'язковою умовою є вимірювання величини засипки l_0 до прикладання тиску, які

заносяться до електронного протоколу, а оброблені результати наводяться у вигляді кінетичних кривих усадки (ККУ) $\Delta l/l_0 = f(\tau)$ як відношення величини деформації за кожен хвилину до вихідної висоти засипки порошку. Для прикладу на рис. 3.16, б наведено кінетичні криві усадки процесу гарячого пресування з наступною ізотермічною витримкою при температурі 600 °С формувальних сумішей, які складаються з ПСМ і порошоків бронзи, бабіту, алюмінію. За результатами їх аналізу можна визначати температуру початку розм'якшення найбільш легкоплавкого компонента у складі формувальної суміші, що збігається з температурою початку усадки. Побудова ККУ у логарифмічних координатах дозволить визначати температурно-часовий інтервал, у якому відбувається інтенсивне структуроутворення; закінчення усадки свідчить про завершення процесу формування матеріалу.



а



б

Рисунок 3.16 – Дослідження усадочних процесів спікання порожніх скляних мікросфер з прикладанням тиску: а – положення індикатора; б – ККУ процесу гарячого пресування формувальної суміші ПСМ з порошками металів (50 % об'ємн., $P = 0,7$ МПа): 1 – бабіту ПР-Б83; 2 – алюмінію ПА-2; 3 – алюмінієвої пудри АСД-1А; 4 – бронзи ПР-Бр-АМц9-2

Спостереження за усадочними процесами дає можливість зупинити спікання у певний час з метою отримання необхідної структури та властивостей або попередити викривлення геометричних розмірів і різнотовщинності виробів. Для запобігання явищу пружної післядії тиск пресування рекомендується знімати після повного остигання робочого простору печі. При проведенні дослідницьких робіт важливу роль мають технологічні заходи щодо вимірювання температури. Для її автоматичної підтримки з точністю ± 2 °C служить блок управління, який складається з мілівольтметра регулюючого типу, тиристора, вимикача і двох сигнальних ламп, які оповіщають про процеси підйому (червона лампа) та підтримки температури (синя лампа). На відміну від аналога блок управління вбудований в установку (рис. 3.14, 3.16). Для безпосереднього вимірювання температури у робочому просторі використовується перетворювач термоелектричний (термопара) градуювання ХА (ДСТУ 2837-94, ГОСТ 3044-94), з'єднаний з мілівольтметром Ш4501. У печі як нагрівальний елемент застосовано ніхромовий дріт марки Х20Н80, розташований у гвинтових канавках керамічного внутрішнього циліндра.

Для виконання дослідницьких робіт можна використовувати технологічну кришку з отвором для додаткової контрольної термопари; в основному отворі розміщується термометр скляний ртутний (ГОСТ 13646-68), призначений для точних вимірювань температури в діапазоні від 0 до 500 °C. Термометр поміщається безпосередньо у прес-форму (без пуансона) з формувальною сумішшю і дозволяє встановити різницю у показниках з приладом Ш4501, яка обумовлена її теплопровідністю і товщиною стінки прес-форми. Процес деформування і спікання порошків здійснюється у прес-формах, виготовлених з нержавіючої сталі марки Х18Х9Т (ГОСТ 5632-72) і термічно необробленого графіту марки МПГ-6 (ТУ 48-4807-29700).

Одержання зразків (рис. 3.14) здійснюється наступним чином: порошок або формувальна суміш засипається у прес-форму 13 і закривається пуансоном 12. У випадках спікання під тиском за допомогою

навантажувального гвинта 7 задається тиск пресування: силова пружина стискається на певну величину, яка відповідає тарованому значенню і контролюється за допомогою спеціальної лінійки або індикатора часового типу 6. За допомогою блока управління задаються обрані температурні режими. У випадку застосування технології гарячого пресування спочатку задається режим проміжного прогрівання, який полягає у витримці формувальної суміші протягом певного часу під тиском, після чого задаються режими ізотермічної витримки. Час проміжного прогрівання розраховується, виходячи з розмірів майбутнього виробу, теплопровідності матеріалів прес-форми і формувальної суміші. У разі вільного спікання (без прикладання тиску), задаються виключно температурні режими.

Для нанесення порошкових покриттів на поверхню сталевих деталей також використовується прес-форма 13 (рис. 3.14). Процес включає в себе підготовку поверхні виробу (очищення від окалини, лудіння) і приготування формувальної суміші порошків, до якої через шток 5 і пуансон 12 передається тиск, що утворюється навантажувальним гвинтом 8. Тиск пресування може прикладатися до формувальної суміші як у холодному стані, так і до розігрітої до певної температури та зберігатися протягом всього процесу формування матеріалу. Більш детально спосіб нанесення покриттів викладений у роботі [136] і в описанні до патенту на корисну модель [234]. Використовуючи комплекти сталевих прес-форм і тарованих на різні зусилля силових пружин, можна здійснювати холодну і гарячу деформацію металевих порошків (наприклад, марки ПК10Х18Н15) з метою надання вузькоспеціалізованих властивостей композиційним матеріалам і покриттям, зокрема метал-полімерним. Реалізація конструкції установки на промисловому рівні пов'язана з виконанням розрахунків та моделюванням енергетичних параметрів, впровадженням нових методів термоконтролю та

цифрової обробки результатів усадочних процесів з метою подальшого занесення до бази даних.

Інструкцію з експлуатації установки наведено у Додатку В.

3.3 Фізико-хімічні процеси спікання порожніх скляних мікросфер з порошком та пудрою алюмінію

3.3.1 Обґрунтування та вибір технологічних параметрів спікання порожніх скляних мікросфер з порошками алюмінію; одержання і методики дослідження експериментальних зразків

Спосіб виготовлення експериментальних зразків полягає у нагріванні формувальної суміші ПСМ з порошком або пудрою Al до певної температури, витримці при ній та наступному ізотермічному спіканні під тиском. Для проведення експериментальних досліджень застосовано розроблену установку (рис. 3.13, 3.14). За технологічну мету обрано одержання щільно спеченого композиту з рівномірно розташованими скляними включеннями – порожніми скляними мікросферами за умовами зберігання ними своєї сферичної форми. Тому головні технологічні фактори слід поділити на температурні, пов'язані з температурними режимами проміжного прогрівання і ізотермічної витримки, та деформаційними параметрами, такими як величина тиску пресування, особливості його прикладання та зняття. Поряд з цим суттєву увагу необхідно надати допоміжним технологічним чинникам, якими є швидкість підйому температури, матеріал прес-форми, тривалість проміжного прогрівання формувальної суміші, час ізотермічної витримки.

Науковим підґрунтям для розробки технологічної схеми (рис. 3.17) одержання зразків нових склоалюмінієвих матеріалів є доробок автора дисертаційного дослідження в області спікання порожніх скляних мікросфер без зв'язуючих додатків, викладений у кандидатській роботі [109]. В основу вибору об'ємного вмісту порошків у складі композицій покладено відомості

про відкриту пористість (25...50 %), яку утворено при компактному упакованні ПСМ діаметром 20...100 мкм. Враховуючи приблизно однакову насипну щільність ПСМ і порошку Al (табл. 2.5) та ґрунтуючись на закономірностях рідкофазного спікання [49] багатокомпонентних сумішей в роботі прийнято рішення застосовувати однаково рівні частки компонентів – по 50 % об'ємн.

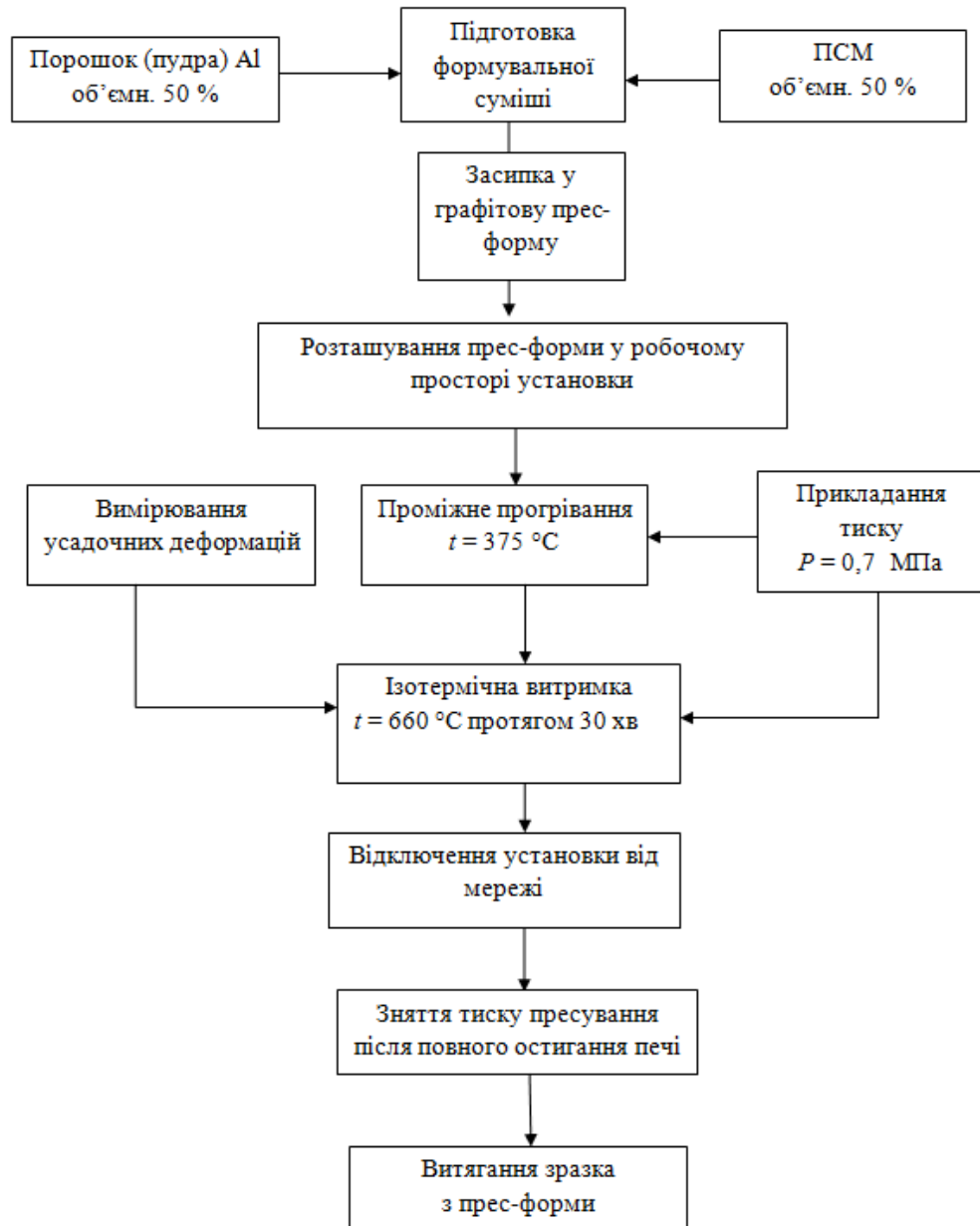


Рисунок 3.17 – Технологічна схема отримання зразків
склоалюмінієвих матеріалів

Вибір атмосфери спікання ґрунтується на сучасному досвіді термічного з'єднання металів зі склом та керамікою [19], де для формування зразків використано графітову прес-форму з термічно необробленого графіту. Авторами було встановлено, що дрібнозернистий графітовий пил є активним відновником кремнезему, який сприяє прискоренню утворення центрів кристалізації SiO_2 ; при температурі вище ніж $300\text{ }^\circ\text{C}$ графіт окислюється та вступає в реакцію з повітрям, що знаходиться у порах формувальної суміші, що сприятиме спіканню у атмосфері CO . Тому в роботі для виготовлення прес-форми обрано графіт марки МПГ-6 (ТУ 48-4807-29700), що на думку авторів роботи [312] зменшує зовнішнє тертя формувальної суміші, забезпечуючи тим самим її рівномірний розподіл по об'єму.

Температурні режими гарячого пресування обрані виходячи з аналізу діаграми стану Al-Fe-Si [96]: при підвищенні температури в ультрадисперсних системах зростає ймовірність формування евтектичних систем метал–оксид, метал–домішки зі зниженою температурою плавлення. У системах Al-Si евтектичне перетворення починається при $t=577\text{ }^\circ\text{C}$ [163], при нагріванні до температури $650\ldots 670\text{ }^\circ\text{C}$ скляні мікросфери зберігають свою форму сферичною.

Вибір тиску пресування теж ґрунтується на умовах зберігання форми ПСМ, що є можливим у діапазоні $0,2\ldots 1,2\text{ МПа}$ з оптимальним значенням $0,7\text{ МПа}$ [109]. Прикладений на етапі проміжного прогрівання тиск пресування зберігається до закінчення процесу отримання матеріалу та для запобігання явища пружної післядії знімається після повного остигання робочого простору.

Температура проміжного прогрівання, при якій до формувальної суміші прикладається тиск, обрана як $T=0,5\ldots 0,7T_{\text{із.випр}}$ [49] і складає $375\text{ }^\circ\text{C}$. При нагріванні до цієї температури відбуваються процеси розкладання гідроксидів, які входять до складу окисної плівки алюмінієвих порошків ($t_{\text{розкл}} < 300\text{ }^\circ\text{C}$); наявність стеарину на частинках пудри виконує роль

пластифікатора. Прикладання на цьому етапі тиску пресування активує процеси дегазації [86]. Час проміжного прогрівання розраховується, виходячи з геометричних розмірів зразка. За температуру ізотермічної витримки обрано температуру плавлення алюмінію 660°C, при якій зразки витримувались протягом 30 хв до закінчення усадочних процесів.

Швидкість підйому температури складає 20 °C/хв і є оптимальною характеристикою робочого простору печі експериментальної установки, перевищення якої призводить до неспекливості або розтріскування зразків.

Методи досліджень одержаних зразків. Мікроскопічні дослідження проведені на оптичному мікроскопі ММР-2Р; рентгеноструктурний аналіз склоалюмінієвих зразків виконаний на дифрактометрі ДРОН-4 у випромінюванні $Fe_{K\alpha}$ 0,193728 ($U = 25$ кВт, $I = 28$ мА). Кристалічні фази ідентифіковані за картотекою ASTM (American Society for Testing and Materials), аналіз кристалічних модифікацій SiO_2 і боратів здійснено за допомогою діаграми стану силікатних систем [318] та довідникових даних [161]. Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР) визначено за методикою Селякова–Шеррера [61]. Пористість зразків визначено за результатами гідростатичного зважування по ГОСТ 25281-82, розмір пор – методами комп'ютерної металографії [188]. Мікротвердість Al (ГОСТ 9450-76) виміряно за допомогою мікротвердоміра ПМТЗ з навантаженням на індентор – 20 г. Для досліджень підготовлені спеціальні мікрошліфи: на поверхню зразків склоалюмінієвих матеріалів нанесено полімерну плівку на основі ЕД-20 (ГОСТ 10589-84), через яку зразки далі піддавались шліфуванню. Статистичну обробку експериментальних результатів здійснено методом апроксимації [215].

Модернізація пресуючого пристрою та застосування прес-форм прямокутної форми дозволить одержувати вироби у вигляді плиток до 500 мм з товщиною не менше ніж 10 мм. Для їх кріплення в роботі пропонується клейову композицію.

3.3.2 Вибір хімічного складу, виготовлення, дослідження структури та властивостей клейової композиції

Виготовлення шаруватих композитних суднових конструкцій пов'язано з утворенням міцного з'єднання різних за складом та властивостями шарів. Забезпечення герметичності стику є важливою технологічною задачею, від якої залежить надійність подальшої експлуатації. Створенню нероз'ємного клейового з'єднання присвячено роботи [6, 37, 272], в яких визначаються переваги епоксидних клеїв, здатних працювати в умовах випромінювання до 100 кГр. Через низьку температуру склування, тривалість твердіння, деструкційні процеси, застосування цих клеїв в умовах суднобудівного виробництва обмежене. Крім того, впровадження полімерних матеріалів у суднобудування повинно відповідати вимогам пожежної безпеки [152]. Наведені в роботі [296] результати показують перспективу використання епоксидно-діанових смол, а саме ЕД-20, для виготовлення компаундів, які застосовуються в процесах тривалого зберігання радіоактивних відходів. Додавання вузькоспеціальних властивостей полімерним композиціям можливе шляхом введення до складу наповнювачів, зокрема порожніх скляних мікросфер [387]. У роботі [358] використання епоксидних композицій на основі ЕД-20 і ПСМ розглядається для виготовлення блоків плавучості підводних технічних засобів. Проте доцільність застосування аналогічних композицій для формування конструкцій біологічного захисту суден ще не визначена та потребує проведення подальших досліджень.

Для формування клейової композиції в роботі обрано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 2093-92) з температурою склування 50 ± 1 °С та динамічною в'язкістю при температурі 25 °С $\eta = 12 \dots 25$ Па·с. Як затверджувач (10 % об'ємн.) обрано амінометилфенол УП-583Д (ТУ 6-05-241-331-82). З метою зниження щільності та коефіцієнту теплопровідності до складу введено 40...60 % (об'ємн.) ПСМ марки МС-А9 (ТУ 6-48-108-94), об'ємний вміст яких обрано виходячи з рекомендацій [34], які забезпечують ефективне використання композицій в умовах вібрацій. Зразки клейової

композиції виготовлено шляхом послідовного змішування протягом 20...30 хв епоксидної смоли ЕД-20 в об'ємній кількості 40...60 %, затверджувача УП-583Д (10 % об'ємн.) та ПСМ (40...60 % об'ємн.). Змішування компонентів відбувалося у змішувачі за допомогою лопатей, дозування наповнювача здійснювалося об'ємним способом. У порівнянні з іншими аналогами на основі ЕД20–ПСМ обраний спосіб та підібрана концентрація компонентів дозволяють варіювати в'язкістю в діапазоні 16,0...8,5 Па·с і формувати композицію холодного твердіння, що є дуже важливим для технологій суднобудування.

Мікроструктурні дослідження за допомогою методів оптичної мікроскопії (мікроскоп БИОЛАМ-И) показали, що структура клейової композиції складається з безпористої полімерної матриці, в якій рівномірно розташовані порожні скляні мікросфери з середнім розміром 40 мкм (рис. 3.18).

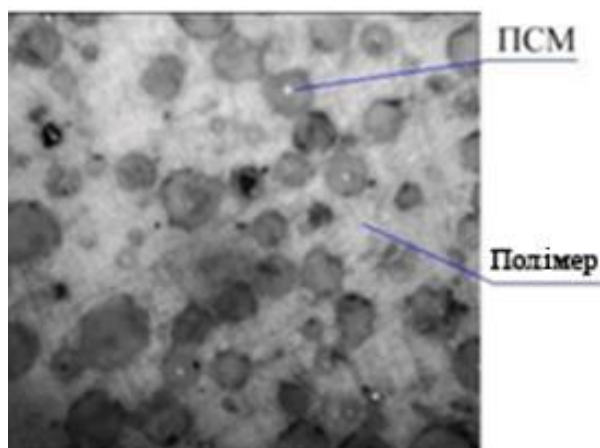


Рисунок 3.18 – Мікроструктура ($\times 350$) клейової композиції ЕД-20–ПСМ (50 % об'ємн.)

За допомогою клейової композиції з'єднано два різномірних матеріали: пластинку Ст3 розміром 140×100×3,5 мм і плитку склоалюмінієвого матеріалу товщиною 10 мм, отриманого за розробленою технологічною схемою (рис. 3.17). Властивості клейової композиції досліджено на зразках, сформованих без підкладки та наведені у табл. 3.4. Їх щільність зразків

визначено гідростатичним зважуванням (ГОСТ 25281-82), коефіцієнт теплопровідності – за допомогою вимірювача теплопровідності ИТ-Л-400. Міцність зчеплення визначено експериментально за ГОСТ 14760-69* на зразках Ст3–клейова композиція склоалюмінієвий матеріал–клейова композиція; для випробувань застосовано розривну машину ИР 5057-50, швидкість навантаження – 2,5 мм/хв.

Таблиця 3.4 – Властивості клейової композиції ЕД-20–ПСМ

Властивості	Об’ємне наповнення мікросферами композиції ЕД-20–ПСМ, %
	40...60%
Щільність, кг/м ³	700...600
Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	0,70...0,55
ТКЛР α^* , К ⁻¹	$(1,45...2,2) \cdot 10^{-5}$
$t_{\text{термодеф}}$, °С	280
Міцність зчеплення $\sigma_{\text{відр}}$, МПа:	
Ст3	9,5...8,0
склоалюмінієві плитки	13,0...11,0

Визначено, що міцність зчеплення зі склоалюмінієвими зразками приблизно на 30 % перевищує $\sigma_{\text{відр}}$ зі Ст3, що пояснюється більш шорсткою поверхнею гарячепресованого матеріалу.

3.3.3 Дослідження процесів усадки, фазо- і структуроутворення при спіканні порожніх скляних мікросфер з порошком та пудрою алюмінію

Фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час спікання склоалюмінієвої формувальної суміші, ґрунтуються на плавленні порошків Al і структурній неоднорідності ПСМ. Температурний інтервал низькотемпературного окиснення ультрадисперсних порошків Al (480...540 °С) збігається з температурою розм’якшення ПСМ (490 °С) та температурою початку усадочних процесів (рис. 3.19). На наведених кінетичних кривих усадки очевидний вплив дисперсності частинок Al на інтенсивність процесу спікання. При нагріванні ПСМ спочатку відбувається розм’якшення аморфної фази, яка складає більшість; підвищення

температури інтенсифікує дифузійні процеси і сприятиме вирівнюванню хімічного складу. Рідка фаза збільшується при розплавленні порошкового алюмінію, який завдяки капілярному ефекту та зовнішньому тиску заповнює ультрамікропори, які утворюються у стінці мікросфери після вигорання силанового апрету. Процес рідкофазного спікання є найбільш інтенсивним у діапазоні температур 500...600 °С, про що свідчить максимальна швидкість усадки, яка досягає 3,5...4 мм/хв.

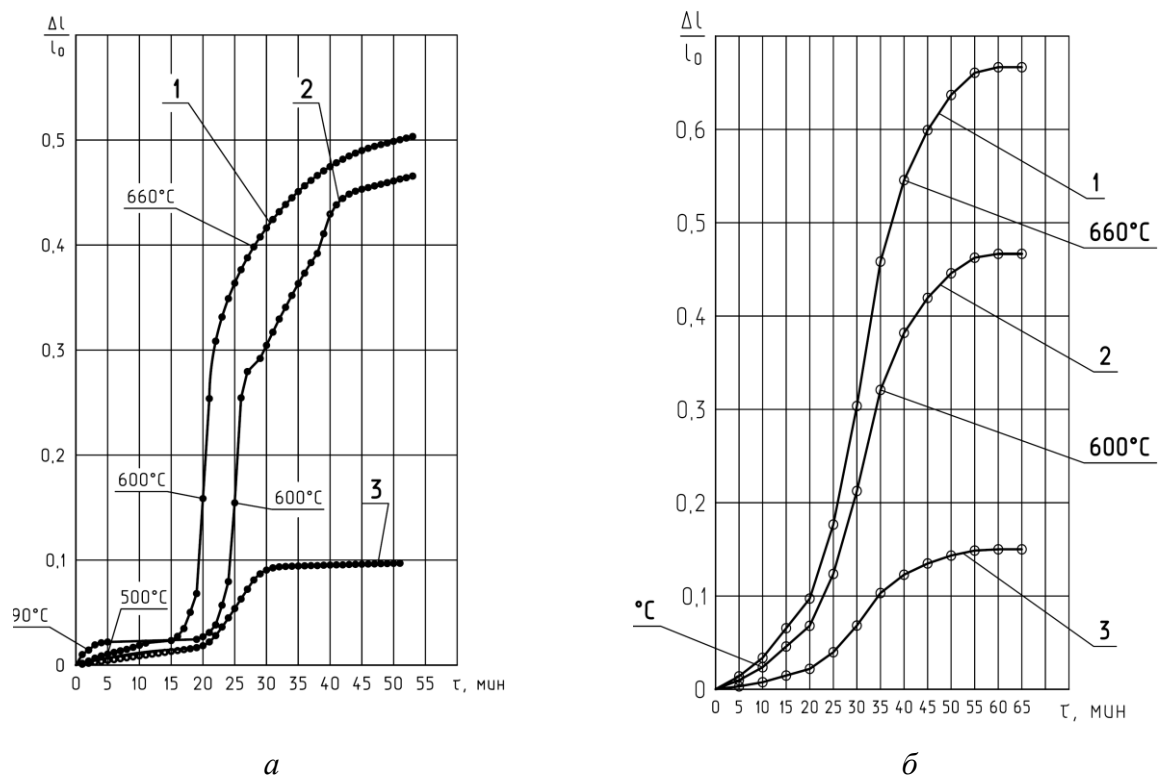


Рисунок 3.19 – Кінетичні криві усадки при спіканні ($P = 0,7$ МПа) з ізотермічною витримкою за температурами: 1 – 660 °С; 2 – 600 °С; 3 – 550 °С формувальної суміші: а – ПСМ–АІ-порошок; б – ПСМ – АІ-пудра

При виході на режим ізотермічної витримки в діапазоні температур 600...700 °С розплавлений алюміній розтікається по поверхні мікросфери і заповнює пори, які утворюються при підготовці формувальної суміші. Про закінчення процесу можна судити по припиненню усадки: після виходу на режим ізотермічної витримки швидкість якої сповільнюється і складає 0,1...0,5 мм/хв. При обраних температурі та тиску порожні скляні мікросфери зберігають свою сферичну форму, залишаються

рентгеноаморфними і не вступають у взаємодію з алюмінієм, про що свідчать лінії чистого алюмінію на дифрактограмах зразків (рис. 3.20, 3.21).

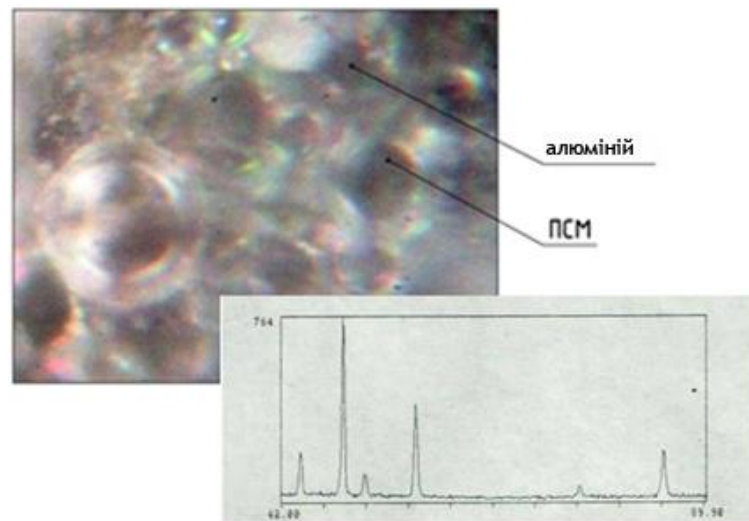


Рисунок 3.20 – Мікроструктура ($\times 500$) і фрагмент дифрактограми склоалюмінієвого матеріалу композиції ПСМ– Al-порошок (щільність 1200 кг/м^3 , пористість 10 %)

Угол отражения 2θ	Межплоскостное расстояние d , нм	Интенсивность, мм	Интенсивность, %
15,524	7,167	34,4	11
44,089	2,579	67,1	22
48,897	2,339	300,1	100
51,408	2,232	41,5	14
57,112	2,025	166,4	55
75,653	1,578	23,4	8
85,146	1,431	103,6	35

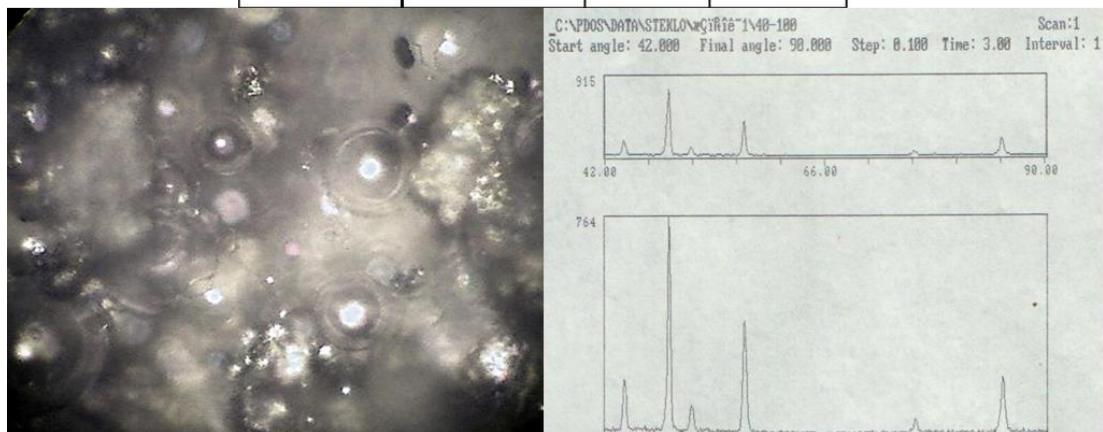
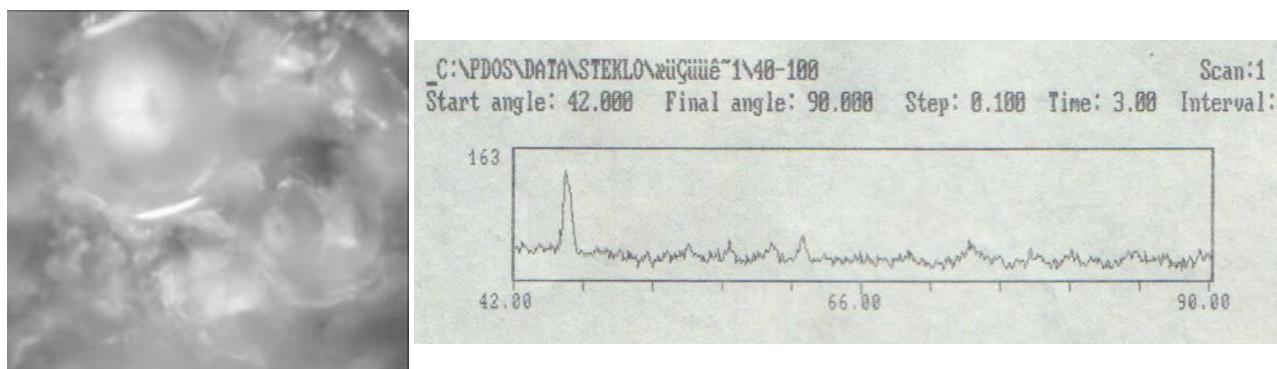


Рисунок 3.21 – Мікроструктура ($\times 350$) і результати РСА склоалюмінієвого матеріалу композиції ПСМ– Al-пудра (щільність 1000 кг/м^3 , пористість 6 %) (скріншот російською мовою)

Мікроструктурні дослідження довели, що зона контакту алюміній–скло має чітку поверхню поділу, тобто стінку ПСМ товщиною 1 мм. Щільність отриманих зразків складає $1000...1250 \text{ кг/м}^3$, пористість – $7...12 \%$, розмір пор – $5...8 \text{ мкм}$, середня мікротвердість алюмінієвої матриці $H_{\mu 20} = 400 \text{ МПа}$.

Унаслідок нерівномірного розподілу компонентів у складі формувальної суміші і перегрупування частинок протягом рідкофазного спікання в структурі утворюються ділянки спечених між собою мікросфер різного діаметра (рис. 3.22), на яких через наявність у складі ПСМ оксидів лужних металів виділяється незначна кількість α -тридиміту.



а

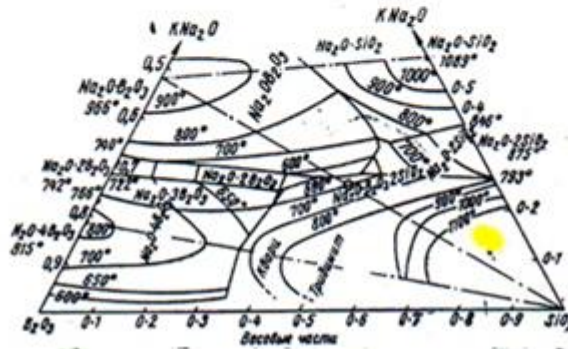
б

Рисунок 3.22 – Області спечених мікросфер у структурі склоалюмінієвих матеріалів: а – мікрофотографія ($\times 800$), б – фрагмент дифрактограми

Таким чином, під час гарячого пресування за механізмом «контактного плавлення» внаслідок структурної неоднорідності стінки формуються локальні субмікрокристалічні області з розміром ОКР до 90 нм, що необхідно враховувати при прогнозуванні напружено-деформованого стану. Результати РСА узгоджуються з діаграмою стану $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [318] (рис. 3.23) і дослідженнями впливу температури на структуру скляних мікросфер ПСМ (п. 3.1.3).

ПСМ (вихідні)			
SiO ₂ – 69,0; B ₂ O ₃ – 7,5; CaO – 6,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; ZnO – 2,0; F – 2,0.			
Фаза	2θ	d, нм	I, мм
α-Na ₂ O·2SiO ₂ , α-кварц	26,60	4,21	3,5
Na ₂ O ₃ ·2B ₂ O ₃ , α-тридиміт	40,50	2,83	7
α-кварц, Na ₂ O	91,4	1,35	3

В області спечених ПСМ			
SiO ₂ – 69,0; B ₂ O ₃ – 7,5; CaO – 6,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; ZnO – 2,0; F – 2,0.			
Фаза	2θ	d, нм	I, мм
α-тридиміт	35,28	3,20	3
α-тридиміт Na ₂ O·2B ₂ O ₃	40,4	2,81	3,5
α-тридиміт	56,0	2,06	2



Поля стійкості фаз та ізотерми у системі Na₂O–B₂O₃–SiO₂ [318]

Рисунок 3.23 – Структурно-фазовий стан в області спечених мікросфер

3.3.4 Результати порівняльних досліджень спікання порожніх скляних мікросфер з порошками інших металів

Порівняльний аналіз структурних змін та процесів розм'якшення, які відбуваються у порожніх скляних під час їх спікання з порошками металів, виконано на прикладі спікання з іншими металевими порошками: порошками бронзи марки Пр-Бр-АМц9-2 (ГОСТ 28377-89) і бабіту марки Пр-Б-83 (ТУ 14-22-91-95), які обрано виходячи з вимог корозійної стійкості та зносостійкості; їх хімічний склад і властивості яких наведено у табл. 2.5. Виходячи з аналізу діаграм стану Cu–Al–Mn і Sn–Sb [97] обрано температурні умови спікання: формувальна суміш ПСМ з порошками бронзи зазнавала нагрівання до температури 800 °С (рис. 3.24, а), з порошком бабіту – до температури 600 °С (рис. 3.24, б). У експериментальних роботах також було застосовано неапретовані мікросфери натрійборсилікатного складу (криві 2) та мікросфери натрійсилікатного складу марки МСО-А9 (ТУ

6-48-108-94) з температурним інтервалом розм'якшення 515...865 °C (криві 3).

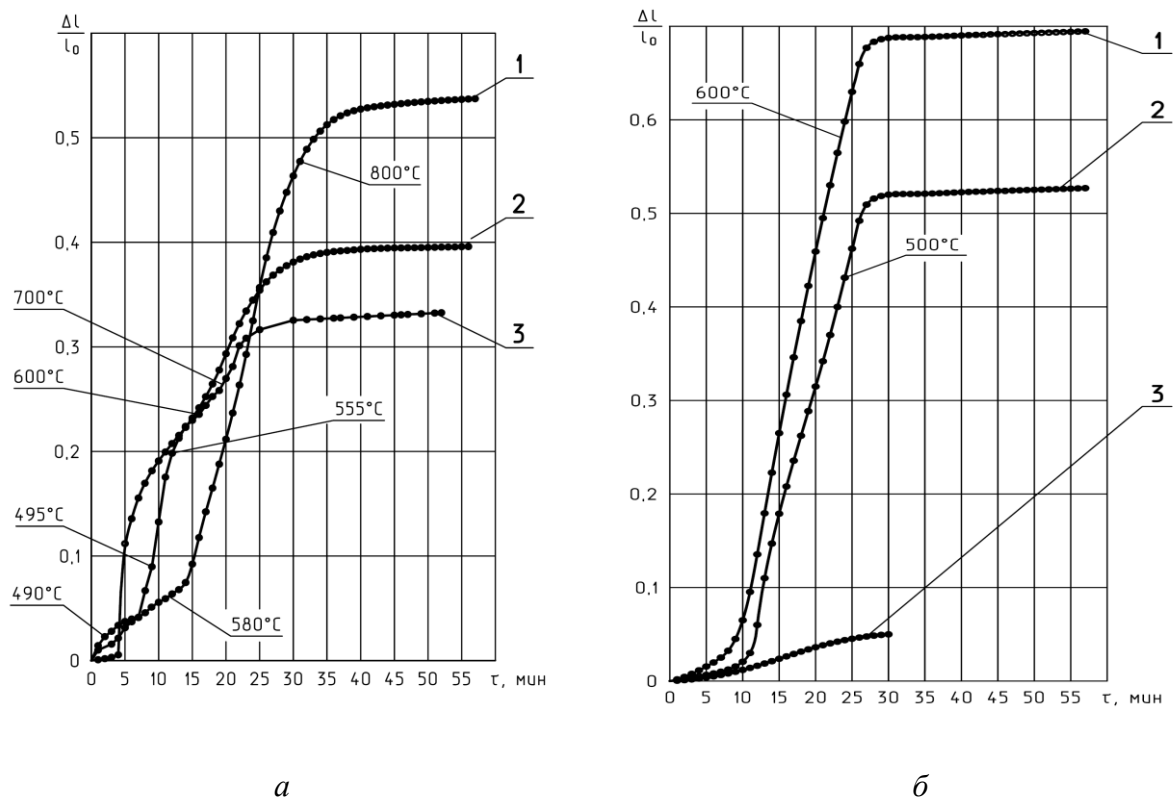
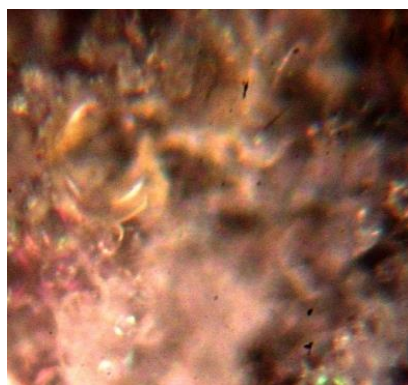


Рисунок 3.24 – Кінетичні криві усадки при спіканні ПСМ з порошками:
 а – бронзи; б – бабіту: 1 – апреговані мікросфери натрійборсилікатного складу;
 2 – неапреговані мікросфери натрійборсилікатного складу; 3 – мікросфери натрійсилікатного складу

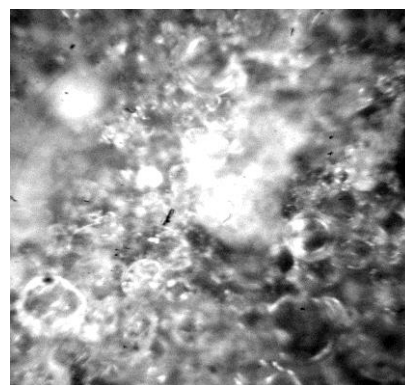
Порівнюючи на прикладі кожного з порошків металів різні склади порожніх скляних мікросфер, слід зазначити, що на відміну від ПСМ натрійсилікатного складу (криві 3) процес спікання натрійборсилікатних мікросфер (криві 1 і 2) є більш інтенсивним, що пояснюється багатокомпонентним хімічним складом, зокрема наявністю окислів B_2O_3 .

При формуванні композиції «скло–бронза» (рис. 3.25, а) найбільш легкоплавким компонентом є скляні мікросфери, які при нагріванні до температури 800 °C переходять у склоподібний стан, втрачаючи сферичну

форму, в той час коли порошок бронзи у відповідності з діаграмою стану Cu–Al–Mn залишається твердим. На всіх дифрактограмах, знятих на установці ДРОН-4-07 у випромінюванні $\text{Fe}\alpha$, видні пики Cu і Al, виділення яких безпосередньо пов'язано з хімічним складом порошку бронзи Пр-Бр-АМц9-2, та піки α -кристобаліту, інтенсивність яких нижче за вихідний стан. Композиційний матеріал формується за механізмом «контактного плавлення» [49] та характеризується низькою щільністю ($\rho = 3580 \text{ кг/м}^3$) та високою пористістю ($\approx 20 \%$), що не дозволяє рекомендувати його для подальшого використання без додаткового просочення, наприклад, рідким склом, що удвічі збільшить його вагові показники та тим самим обмежить застосування в умовах судна.



а



б

Рис. 3.25 – Мікроструктури ($\times 250$) спечених матеріалів:

а – склобронзового; б – склобабітового

В композиції «скло – бабіт» (рис. 3.25, б) найбільш легкоплавким компонентом є бабіт з температурою плавлення 360°C і, як можна побачити з діаграми стану Sn–Sb, при досягненні температури 600°C порошок повністю перетворюється на рідину, яка змочує сферичні скляні частинки. Оскільки спікання компонентів відбувається під тиском, структура матеріалу являє собою каркас зі спечених між собою мікросфер, у точках контакту яких виділяються лінії α -кристобаліту, пори між якими заповнено розплавом бабіту, для якого є характерним наявність ліній Sn. Щільність сформованої

композиції складає 2380 кг/м^3 , відкрита пористість – 12 %. Корозійні випробування у натуральному морському середовищі показали можливість його застосування у суднобудівних технологіях.

Таким чином слід відмітити, що спікання порожніх скляних мікросфер з порошками кольорових металів, а саме бронзою, бабітом, алюмінієм, відбувається за механізмом рідкофазного спікання («контактне плавлення»), під час якого відбуваються усадочні процеси. Найбільш інтенсивним слід вважати процес спікання з апретованими мікросферами.

3.4 Фізико-хімічні процеси структуроутворення на поверхні Ст3 електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених скляними порошками та мікросферами

3.4.1 Підготовка і методики дослідження зразків

Сутність електродугового напилення полягає у безперервній подачі через канали розпилювача суцільнотягнутих дротів (табл. 3.5), між кінцями яких збуджується електрична дуга, що плавить їх; далі розплавлений метал підхvacується струменем стисненого газу, який витікає із сопла електрометалізатора, і переноситься ним на підкладку – сталь звичайної якості марки Ст3 (ГОСТ 380–94), що широко застосовується у суднобудуванні та для виготовлення транспортного обладнання з РАВ [38].

Таблиця 3.5 – Хімічний склад суцільнотягнутих зварювальних дротів і матеріалу підкладки

Марка матеріалу	Хімічний склад, мас. %:
Св-АМг5, ГОСТ 7871-75	Mg – 5,0; Fe – до 0,4; Cr – 0,12 ; Mn – 0,15; Si – до 0,25; решта – Al
Св-08Г2С, ГОСТ 2246-70	C – 0,05...0,11; Si – 0,70...0,95; Mn – 1,80...2,0; Cr – до 0,20; Ni –до 0,25; S – до 0,025; P – до 0,03
Ст3, ГОСТ 380–94	C – 0,14...0,22; Mn – 0,30...0,60; Si –не більше 0,05

Покриття нанесене з одного боку на пластини розміром $140 \times 100 \times 3,5$ мм, поверхня яких зазнала попередньої струменево-абразивної обробки на установці «Ремдеталь» моделі 026-7 за наступними режимами: тиск стиснутого повітря – $0,4 \dots 0,6$ МПа; діаметр сопла – 10 мм; відстань до поверхні зразка – 10 мм; кут нахилу сопла до поверхні – 90° . Як абразив використаний електрокорунд марки 7Б зі шліфувальним номером 125 (ОСТ 5.9957-85); контроль якості підготовки поверхні виконано візуально.

Для напилення покриттів застосовано установку КДМ-2, у комплект до якої входить модернізований автором роботи [147] електродуговий апарат ЕМ-14М з центральною сопловою системою подачі стисненого повітря та джерело живлення «Тимез-500». Варіювання технологічними режимами (сила струму дуги – $80 \dots 140$ мА; напруга на дузі – $25 \dots 28$ В; тиск повітря – $0,4 \dots 0,6$ МПа; діаметр основного сопла – 6 мм; додаткового – 8 мм; дистанція напилення – $90 \dots 100$ мм) дозволяє отримувати покриття з об'ємним вмістом скла $(10 \dots 35) \pm 7\%$; товщина напиленого шару складає від 0,5 до 2 мм. Проте суттєвим недоліком електродугового напилення композиційних покриттів є неможливість точного контролювання об'ємного вмісту скляного наповнювача, якого згідно з когнітивною моделлю (див. рис. 2.7) повинно бути якомога більше.

Мікрорельєф поверхні покриттів досліджено методами електронної мікроскопії та МРСА за допомогою мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА-102-02. Результати наведено у вигляді спектрограм, знятих: зі скляних дисперсних включень та зворотної поверхні покриттів, відокремлених від підкладки Ст3; електронно-мікроскопічних знімків поверхні і поперечних нетравлених мікрошліфів покриттів товщиною 2 мм, підготовлених за загальноприйнятою методикою [44], на яких також за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 виміряно мікротвердість (ГОСТ 9450-76) металевої матриці і скляних включень з навантаженнями на індентор відповідно 20 і 200 г. Об'єм скляних включень у складі метал-скляних покриттів визначено методом точкового аналізу [294], перевага якого полягає у можливості

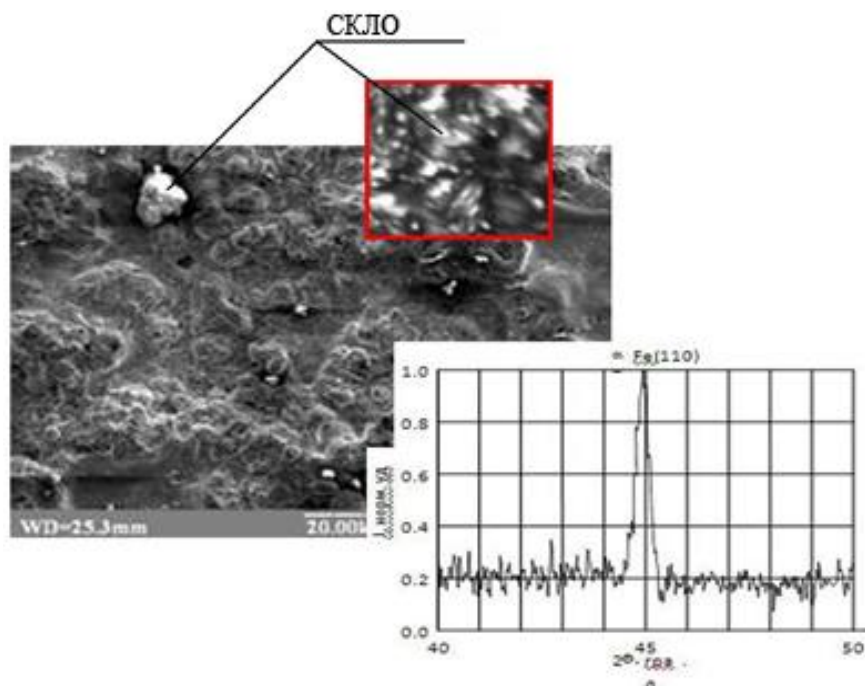
обробки зроблених за допомогою оптичних мікроскопів (зокрема ММР-2Р та БІОЛАМ-И) цифрових мікрофотографій, на яких частка безладно наведених точок прирівнюється до об'ємного вмісту (або частини площі) дослідної фази. У зв'язку з тим, що площа поперечних мікрошліфів на підкладці з товщиною шару покриття у 0,5...2 мм є відносно малою у порівнянні з поверхнею всього зразка довжиною 140 мм та під час процесу шліфування відбувається викрошування скляних включень, в роботі досліджено топографію поверхні. Одержані результати опосередковано підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями на установці ДРОН-3 у випромінюваннях міді $\text{Cu}_{\text{K}\alpha=1,54178}$ і молібдена $\text{Mo}_{\text{K}\alpha=0,170696}$ з ідентифікацією фаз за допомогою таблиць ASTM [396]. Зйомку дифрактограм здійснено зі зразків покриттів товщиною 1 мм, відокремлених від підкладки; субструктурні елементи у покриттях визначено за розмірами областей ОКР [61]. За критерій при визначенні об'ємного вмісту скляних наповнювачів прийнято кількість аморфної складової, за еталон – дифрактограми електродугових покриттів із Св-08Г2С та Св-АМг5. Результати РСА зіставлено з діаграмами стану Al–Fe–Si [17, 96], $\text{Na}_2\text{O–SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O–B}_2\text{O}_3\text{–SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O–CaO–SiO}_2$ [318]. Щільність покриттів визначено гідростатичним зважуванням (ГОСТ 25281-82) зразків без підкладки, за результатами якого також розраховано пористість. Міцність зчеплення покриттів з підкладкою визначено шляхом рівномірного поздовжнього розтягування пластини [175], де величина адгезії ($\sigma_{\text{відр}}$) характеризується силою, віднесеною до одиниці площі контакту, для чого використано розривну машину ИР 5057-50; швидкість навантаження – 2,5 мм/хв.

3.4.2 Вплив порошків стекол систем $\text{Na}_2\text{O–CaO–SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O–PbO–SiO}_2$ на адгезійні та когезійні процеси формування електродугових покриттів

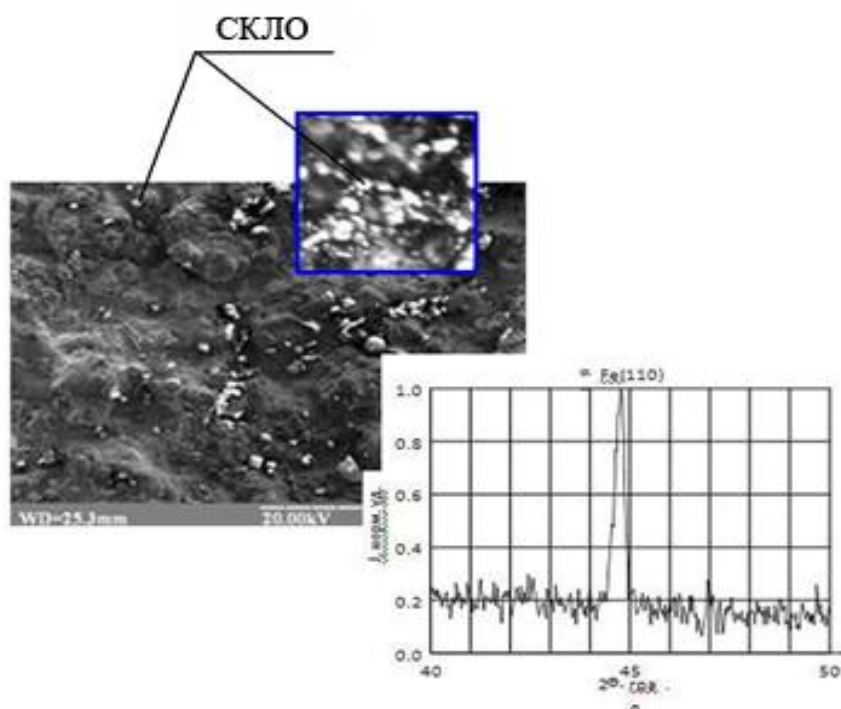
Головними критеріями функціональної придатності композиційних покриттів вважаються їх адгезійна (міцність зчеплення покриття з підкладкою) та когезійна (міцність зчеплення частинок між собою) міцність

[175], що визначається їх структурою і фазовим складом. Для вирішення цього питання в роботі застосовано комплексний підхід, який включає в себе структурні дослідження за електронно-мікроскопічними знімками з чіткими зображеннями скляних частинок; зіставлення результатів з оптичними мікрофотографіями та дифрактограмами, знятими з напилених поверхней; аналіз спектрограм, знятих зі зворотної поверхні відірваних покриттів та експериментальних даних щодо міцності зчеплення покриттів з підкладкою; зіставлення інформації з результатами розрахунків адгезійної та когезійної міцності.

За результатами РСА (рис. 3.26) встановлено, що потрапляючи у зону електродугового розряду та під час обволікання рідким розплавленим металом порошки стекло залишаються рентгеноаморфними, проте зазнають часткового оплавлення; на поверхні поділу метал–скло нові фази не утворюються. Це пояснюється тим, що порошок одержано здрібненням скляних виробів, які у процесі виготовлення пройшли стадії гомогенізації і термічної обробки, що виключає їх структурну неоднорідність. Ущільненню покриття і підвищенню його міцності зчеплення сприяє утворення і накопичення склофази: при напиленні частинки поверхнево оплавляються (рис. 3.27.), вільний Si шляхом дифузії переходить до сталевій підкладки, про що свідчить зменшення його концентрації на зворотній поверхні покриття. При додаванні до складу покриттів скляних частинок скла $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ інтенсивність спектрів Fe зменшується ($\text{Fe} \approx 90,56 \%$), проте на рис. 3.27 можна побачити накладені на спектри Fe лінії Mn, вміст якого ($\text{Mn} \approx 2,48 \%$) дещо перевищує концентрацію у Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70), що обумовлює формування адгезійної міцності за рахунок дифузійних процесів з підкладкою СтЗ (ГОСТ 380-94, ГОСТ 5521-93). Це пояснює підвищену міцність зчеплення $\sigma_{\text{відр}}$ саме цих покриттів (табл. 3.6) у порівнянні з покриттями з іншими наповнювачами.



Щільність – 7025 кг/м^3 , пористість – 20 %, об'ємний вміст скла – $25 \pm 7 \%$
а



Щільність – 6065 кг/м^3 ; пористість – 22 %, об'ємний вміст скла – $25 \pm 7 \%$
б

Рисунок 3.26 – Мікроструктура (електронно-мікроскопічний знімок, $\times 120$; оптична мікрофотографія, $\times 350$) і фрагмент дифрактограми покриття на основі Св-08Г2С, наповненого порошком скла: а – системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$;
б – $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$

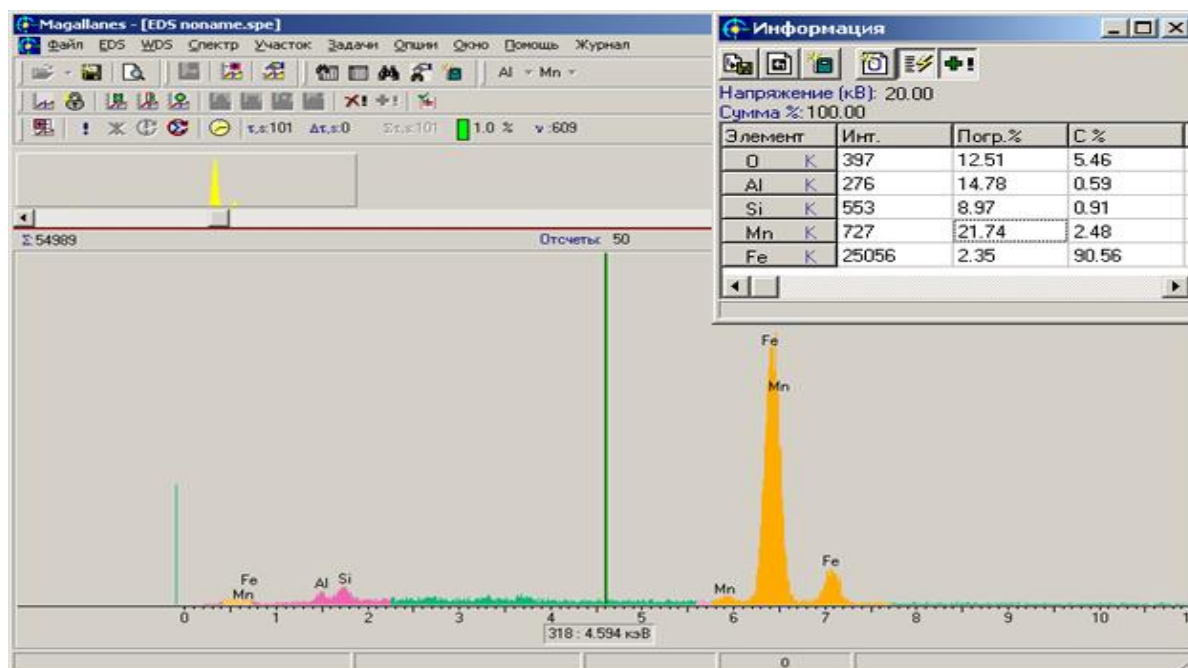


Рисунок 3.27 – Результати МРСА зворотної поверхні покриття на основі Св-08Г2С, наповненого порошком скла системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$

Таблица 3.6 – Концентрація елементів і міцність зчеплення покриттів на основі Св-08Г2С з підкладкою Ст3

Скляний наповнювач	Концентрація елементів у покриттях, мас. %					$\sigma_{\text{відр}}$ МПа
	Fe	Mn	Si	Al	O	
Скло системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$	90,56	2,48	0,91	0,59	5,46	27,0
Скло системи $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$	94,36	2,37	1,91	1,36	—	15,1
ПСМ системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	92,99	—	1,16	0,43	5,42	20,2

На спектрограмі (рис. 3.28), знятій зі зворотної поверхні покриття з Св-08Г2С, наповненим порошком скла системи $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ крім спектрів, наявність яких узгоджується з діаграмою стану Al-Fe-Si [17], можна побачити спектри Pb, які відображають достатню кількість оксидів свинцю та свідчать про їх неповну розчинність у SiO_2 .

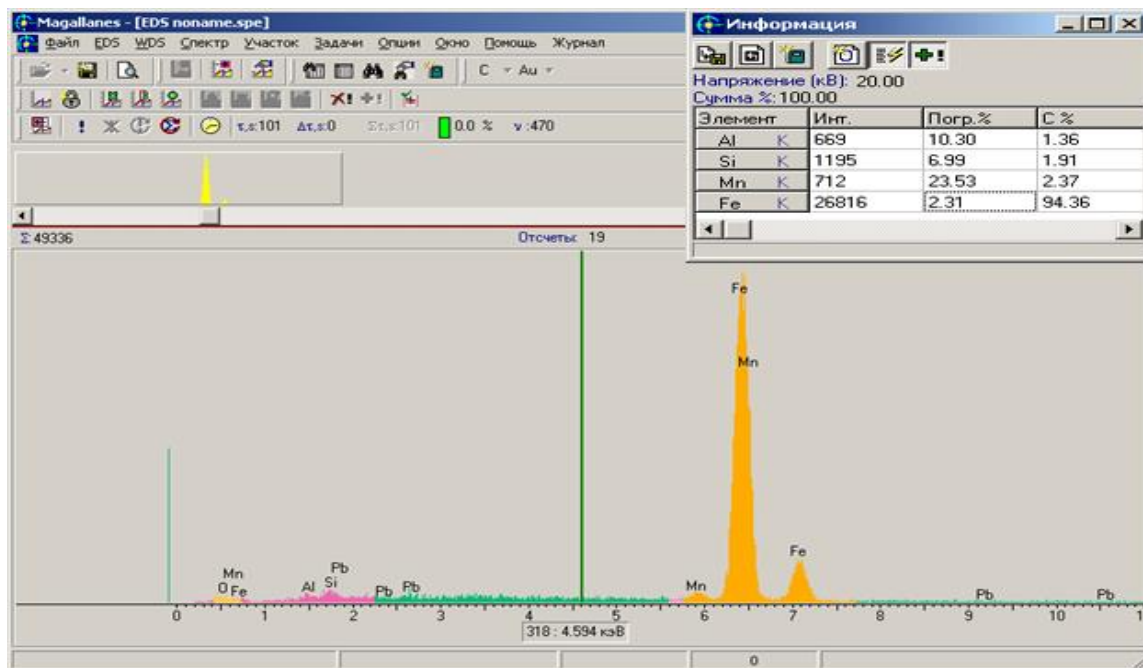
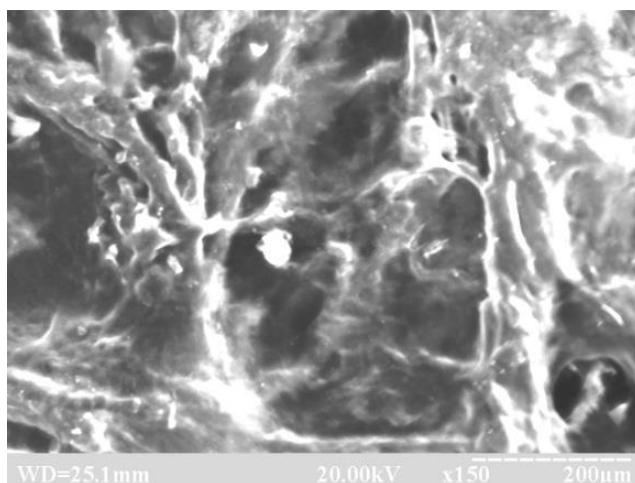


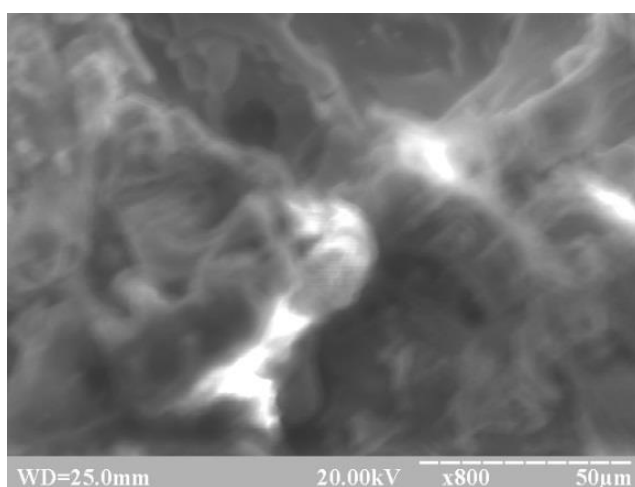
Рисунок 3.28 – Результати МРСА зворотної поверхні покриття на основі Св-08Г2С, наповненого порошком скла системи $K_2O-PbO-SiO_2$

Згідно з діаграмою стану $PbO-SiO_2$ скляні частинки, температура яких вище температури $720\text{ }^{\circ}\text{C}$, набувають евтектичного стану. Про їх достатньо високий вміст (на рівні $30\pm 7\%$ об'ємн.) у складі електродугових покриттів свідчить рівномірний розподіл Pb з невисокою інтенсивністю спектрів і наявність на дифрактограмі (рис. 3.26) однієї кристалічної фази – $\alpha\text{-Fe}(110)$.

При формуванні електродугових покриттів на основі Св-АМг5 суцільні скляні частинки внаслідок більш низьких температур плавлення Al зазнають менших температурних навантажень і поверхневого оплавлення (рис. 3.29) і у порівнянні з покриттями на основі Св-08Г2С мають більш низьку міцність зчеплення ($\sigma_{\text{відр}} = 15\ldots 21\text{ МПа}$).



a



б

Рисунок 3.29 – Електронно-мікроскопічний знімок поверхні покриття на основі Св-АМг5, наповненого порошком скла:

a – $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$; *б* – $\text{K}_2-\text{PbO}-\text{SiO}_2$

Когезійну (нормальні напруження) та адгезійну (тангенціальні напруження) міцність покриттів визначено за розрахунково-експериментальною методикою, описаною у роботах [63, 286] через формули (3.1) і (3.4), для чого пластинки Ст 3 розміром $140 \times 100 \times 3,5$ мм з нанесеним з одного боку метал-скляним покриттям ($\delta = 2$ мм) зазнавали розриву на розривній машині ИР 5057-50 зі швидкістю 2,5 мм/хв.

$$\sigma_n = \frac{2\varepsilon_o}{hk^2} \cdot \frac{G_o/H \cdot G_n/H}{G_o/H + G_n/H} \left(1 + \frac{chkz}{chkl} \right), \quad (3.1)$$

де ε_o – модуль зсуву матеріалу основи (тобто сталевій пластини); h – товщина покриття; H – товщина покриття та основи; G_o, G_n – модуль зсуву відповідно основи і покриття; k – коефіцієнт, який корелює значення модулів пружності і зсуву матеріалів основи і покриття:

$$k^2 = 2tl \left(\frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_o F_o} \right) \quad (3.2); \quad l = \frac{G_o / H \cdot G_n / h}{G_o / H + G_n / h} \quad (3.3),$$

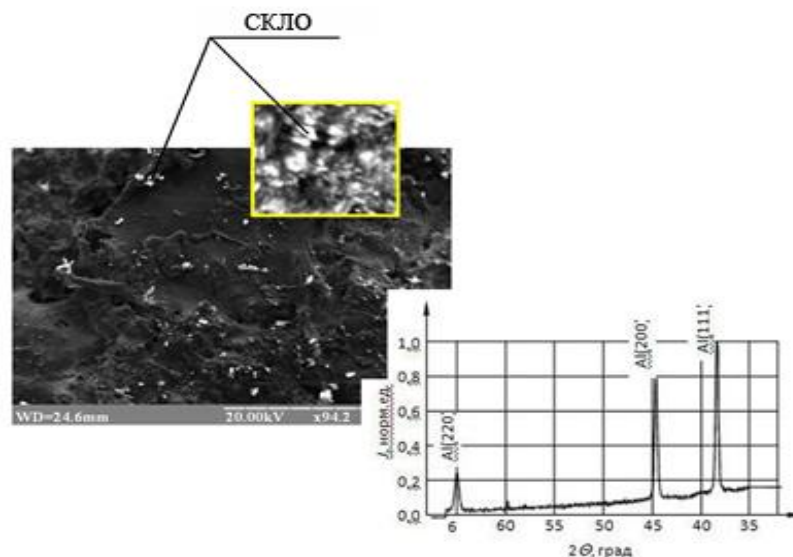
де F_o, F_n – площа поперечного перетину основи і покриття; z – координата ділянки руйнування покриття; c – піддатливість поперечного перетину, яку виражено як $c = \frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_o F_o}$ [63].

$$\tau = \frac{\varepsilon_o k}{t \left(1 / E_n F_n + 2 / E_o F_o \right)} thkl, \quad (3.4)$$

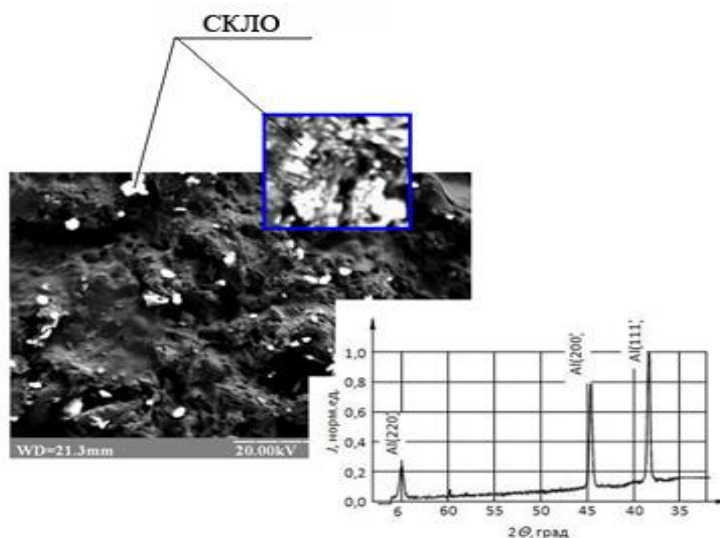
де t – ширина пластини з покриттям.

Результати розрахунків показали, що когезійна міцність метал-скляних покриттів σ_n складає 24...28 МПа, що приблизно прирівнюється до адгезійної міцності: $\tau = 20...25$ МПа.

За результатами МРСА встановлено, що елементний склад скла у порівнянні з вихідним станом (рис. 3.1, 3.5) не змінено. Мікротвердість $H_{\mu 200}$ скляних включень у складі покриттів становить 1400...1420 МПа для порошків натрійсилікатного скла і 1350...1370 МПа – для порошків свинцевосилікатного скла. Результати РСА (рис. 3.30) показали наявність на дифрактограмах піків Al(220), Al(111) без утворення нових фаз на поверхні поділу алюміній–скло. Проте міцний когезійний зв'язок пояснюється добрим змочуванням скла алюмінієм, який після попадання у зону дуги перебуває у краплеподібному стані. Тобто кожна скляна частинка знаходиться під плівкою алюмінію, про що свідчить максимальна інтенсивність його спектрів при МРСА скла.



Щільність – 1770 кг/м^3 , пористість – 20 %, об'ємний вміст скла – $25 \pm 7 \%$
а



Щільність – 1860 кг/м^3 , пористість – 18%, об'ємний вміст скла – $30 \pm 7\%$
б

Рисунок 3.30 – Мікроструктура (електронно-мікроскопічний знімок, $\times 90$; оптична мікрофотографія, $\times 350$) і фрагмент дифрактограми покриття на основі Св-АМг5, наповненого порошком скла систем:

а – $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$; б – $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$

3.4.3 Вплив структури скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ на фізико-хімічні процеси формування електродугових покриттів

На відміну від існуючого досвіду додавання до складу електродугових покриттів суцільних скляних, керамічних, полімерних дисперсних частинок

[147], введення порожніх мікросфер є новим, ще не дослідженим науковим напрямком. У порівнянні із суцільними частинками, одержаними сухим розмелом скляного бою, порожні скляні мікросфери характеризуються меншою ($\approx$ на 80 %) насипною щільністю та, як показали проведені дослідження, мають мікрокристалічну будову, що робить їх структуру чутливою до температурних чинників. Так, температура дуги залежить від газового середовища та режимів напilenня, хімічного складу електродного дроту; визначити її традиційними контактними або оптичними методами дуже складно. За результатами досліджень [28] середня поверхнева температура частинок при напilenні суцільнотягнутого дроту Св-08Г2С складає близько 2000 °С, на думку автора роботи [356], температура у зоні дуги електродугового розряду на 200...300 °С перевищує $T_{пл}$ зварювального дроту. Тому, при додаванні ПСМ існує ймовірність їх руйнування через термічний вплив та витрати через низьку щільність, що призведе до формування покриттів з неконтрольованою концентрацією склофаз.

Проведені експериментальні роботи довели про можливість формування електродугових покриттів, наповнених порожніми скляними мікросферами. Як показали дослідження, виконані за допомогою електронної мікроскопії, при напilenні покриттів з Св-АМг5 мікросфери зберігають форму сферичною (рис. 3.31). На відміну від гарячепресованих склоалюмінієвих матеріалів, у структурі покриттів не спостерігається з'єднаних між собою ПСМ, що виразно видно з мікрофотографії (рис. 3.28), де за допомогою цифрової обробки поверхні визначено розподіл скляної складової по перетину.

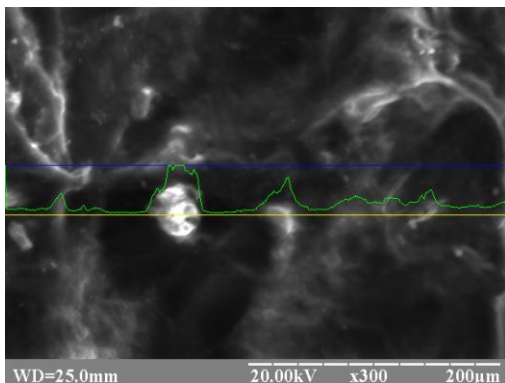
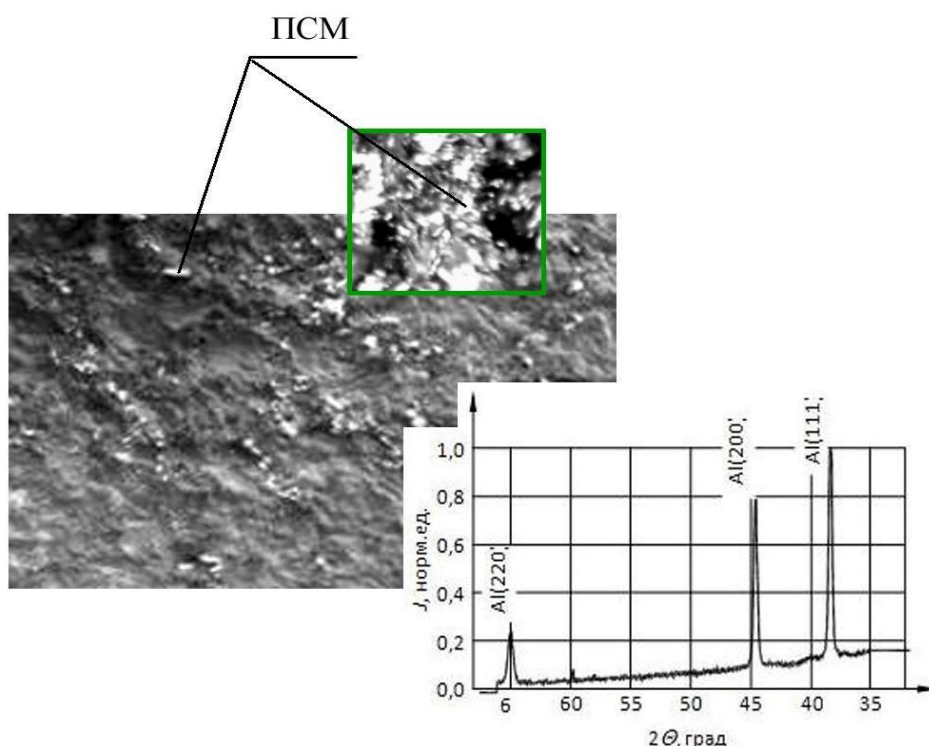


Рисунок 3.31 – Електронно-мікроскопічний знімок поверхні покриття композиції Св-АМг5–ПСМ (струм зонда $7,5 \cdot 10^{-14}$ А)

Вважаючи короткочасність перебування ПСМ у зоні дуги вигоряє тільки силановий апрет, мікросфери не зазнають змін елементного складу і структури; на поверхні поділу метал–скло не утворюється нових фаз, про що свідчать результати РСА, зокрема виділення піків чистого Al, і рентгеноаморфність ПСМ (рис. 3.32). При електродуговому напиленні покриттів на основі Св-08Г2С формуються більш високі поля температур, які призводять до вигорання силанового апрету, проте порожні скляні мікросфери зберігають свою форму сферичною (рис. 3.33), що підтверджує теоретичні розрахунки автора роботи [147] щодо короткочасності знаходження скляних частинок у зоні дуги.



Щільність – 1480 кг/м^3 , пористість – 22 %, об'ємний вміст ПСМ – $35 \pm 7\%$

Рисунок 3.32 – Мікроструктура електродугового покриття композиції Св-АМг5–ПСМ (електронно-мікроскопічний знімок, $\times 90$; оптична мікрофотографія, $\times 350$) і фрагмент дифрактограми

Внаслідок ліквідаційних процесів у стінках мікросфер на поверхні поділу сталева матриця–ПСМ утворюється нова ультрадисперсна фаза Fe_5Si_3 з розміром ОКР 87 нм (рис. 3.34, а).

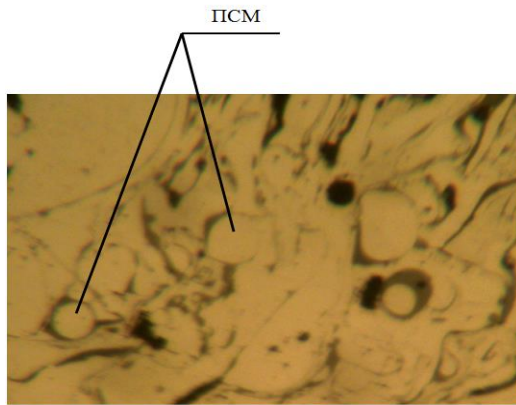
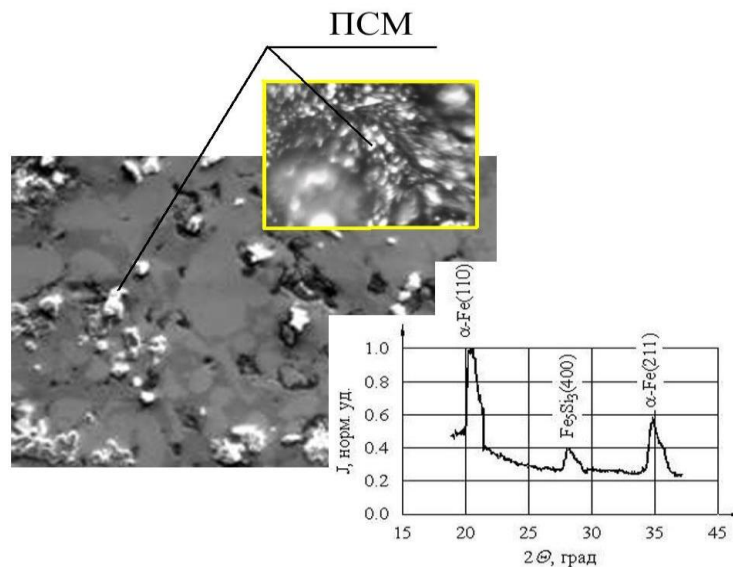
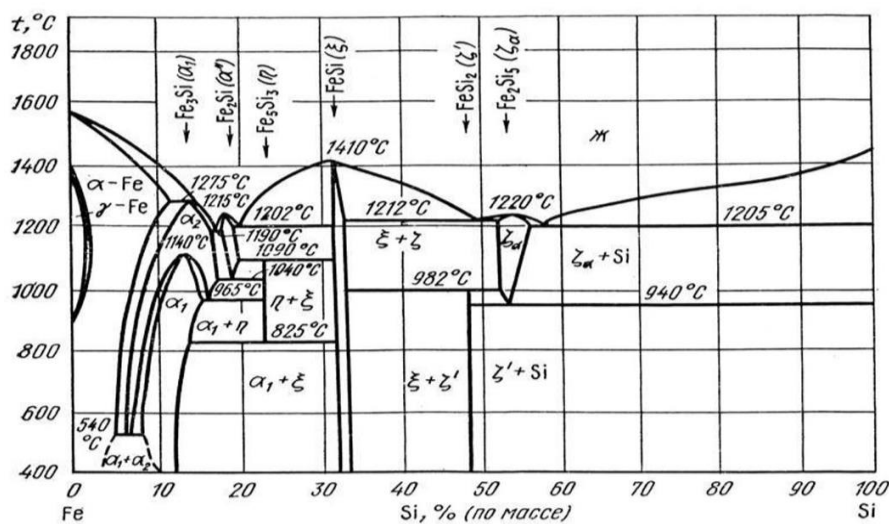


Рисунок 3.33 – Мікроструктура (оптична мікрофотографія $\times 350$) поперечного шліфа електродугового покриття композиції Св-08Г2С–ПСМ



Щільність – 5715 кг/м^3 , пористість – 19 %, об'ємний вміст ПСМ – $35 \pm 7\%$

а



б

Рисунок 3.34 – Мікроструктура електродугового покриття композиції Св-08Г2С–ПСМ у відповідності до діаграми стану Fe–Si: а – електронно-мікроскопічний знімок ($\times 120$); оптична мікрофотографія ($\times 350$) і фрагмент дифрактограми; б – діаграма стану Fe–Si [17]

Таке з'єднання утворюється у відповідності до діаграми стану Fe–Si [17] по перитектичній реакції при температурі 1090 °C та є стійким до 825 °C, це дає інформацію про формування температурних полів на поверхні скляних частинок при напиленні метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С. При напиленні скляні частинки зазнають часткового оплавлення через термічну дію під час обволікання рідким розплавленим металом, залишаючись рентгеноаморфними. Проте неапретовані мікросфери після попадання у зону дуги втрачають свою сферичну форму, перетворюючись на суцільні частинки, втрачаючи такі функціональні властивості як щільність, демпфірувальну здатність, низьку теплопровідність тощо. На рис. 3.35 наведено рентгенівський енергодисперсійний спектр, отриманий зі зворотної поверхні покриття після його відриву від підкладки Ст3, де зафіксовано велику кількість Fe ($\approx 92,9\%$), а також спектри Si, Al і Fe, O, які вказують на формування оксидів, що може знижувати адгезійну міцність у порівнянні з покриттями, наповненими суцільними частинками стекол (табл. 3.6).

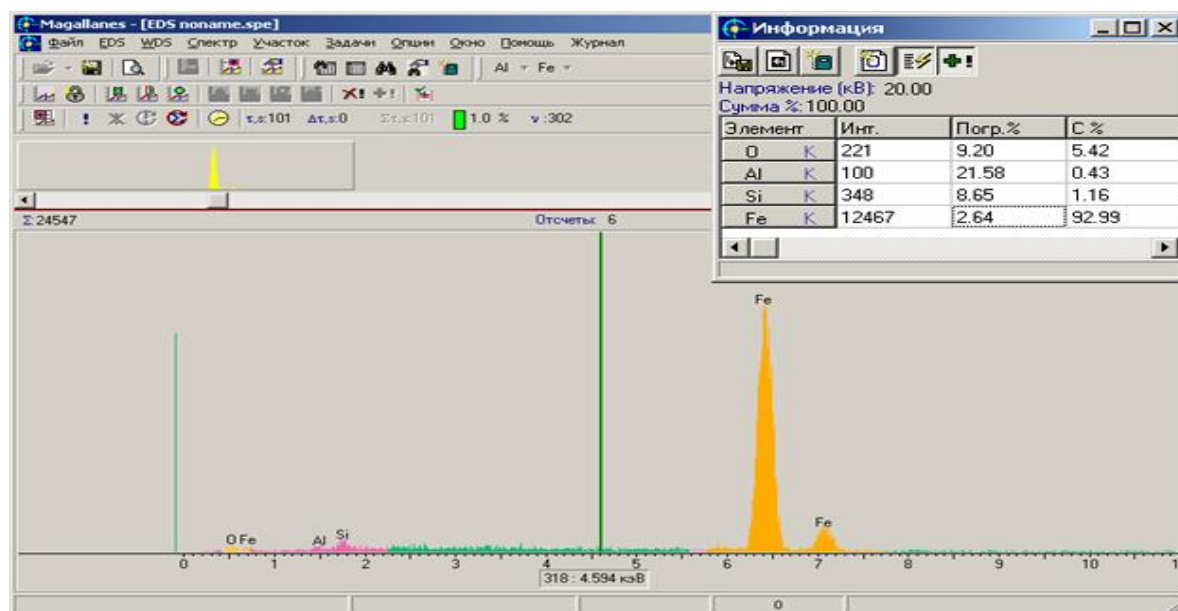


Рисунок 3.35 – Результати МРСА зворотної поверхні покриття на основі Св-08Г2С, наповненого ПСМ системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Після напилення мікротвердість сталеві матриці композиції Св-08Г2С становить $H_{\mu 20} = 1330$ МПа, а ненаповненого електродугового покриття із

суцільнотягнутого дроту Св-08Г2С – 1280 МПа, що виключає явище додаткового наклепу, яке сприятиме підвищенню міцності зчеплення покриттів з підкладкою, як це спостерігається у роботі [147] при застосуванні склопорошків групи А. За досвідом авторів робіт [65, 243] підвищенню мікротвердості металевої матриці сприятиме передрекristалізаційна термічна обробка (ПТО) при температурі початку рекristалізації, короткочасній витримці та охолодженні на повітрі.

Експериментальні роботи з ПТО проведено у лабораторній електропечі марки СНОЛ-1.6.2.08/9-М1, після чого мікротвердість матриці у композиції Св-08Г2С–ПСМ підвищилась на 25 % і склала 1660 МПа, що пояснюється формуванням субмікрокристалічної структури у сталевій матриці і на поверхні поділу фаз метал–скло. За результатами РСА (рис. 3.36) визначено, що розмір ОКР сталеві матриці зменшується зі 111 нм до 97 нм; в області кутів $2\theta = 28^\circ$ силіцид заліза Fe_5Si_3 з розміром ОКР 87 нм перетворюється на Fe_5Si з розміром ОКР 75 нм, що узгоджується з гіпотезою щодо зародження нової фази при термічній обробці внаслідок формування напружень навколо включень через різницю у ТКЛР матриці і включень [208].

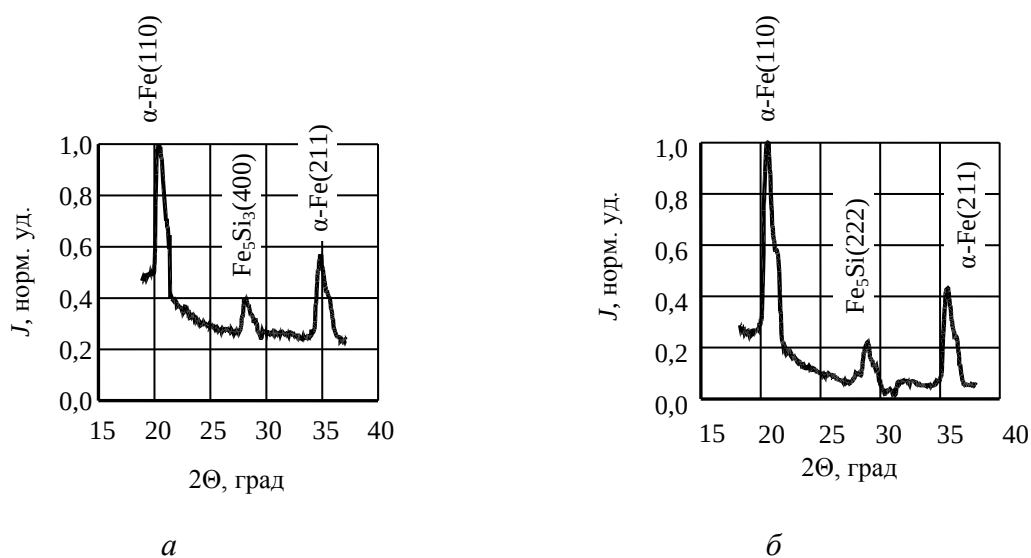


Рисунок 3.36 – Фрагмент дифрактограми електродугового покриття

композиції Св-08Г2С–ПСМ ($35 \pm 7\%$ об'ємн.):

а – до ПТО; б – після ПТО ($t = 500^\circ\text{C}$; $\tau = 10$ хв)

Формування субструктурних елементів на поверхні поділу метал–скло сприяє додатковому поглинанню енергії випромінювань, що експериментально підтверджено у розділі 4, проте пов'язано з технологічними труднощами через масштабний фактор конструкцій суден.

3.4.4 Результати порівняльних досліджень напилення електродугових покриттів з керамічними мікросферами

Гіпотезу про мікрогетерогенну будову порожніх скляних мікросфер підтверджено результатами теоретичних і експериментальних досліджень введення до складу електродугових покриттів з Св-08Г2С алюмосилікатних мікросфер (АСМП) марки МПк 200-400 (ТУ 5717-001-11842486-2006) з наступним хімічним складом, мас. %: SiO_2 – 74,9%; Al_2O_3 – 13,9%; K_2O – 2,8%; Na_2O – 1,9%; Fe_2O_3 – 0,9%; CaO – 1,2%; FeO – 0,6%; TiO_2 – 0,2%. У порівнянні зі скляними керамічні мікросфери мають більш високу теплостійкість та в процесі виробництва після флотації зазнають термічного оброблення при температурі 1600 °С, що у свою чергу виключає термічні навантаження під час напилення.

Результати РСА показали їх загальну рентгеноаморфність з наявністю кристалічних модифікацій (близько 40 %) γ - Al_2O_3 , α -кристобаліту, α і β -кварцу, що відповідає діаграмам стану K_2O – SiO_2 і Al_2O_3 – SiO_2 [318], мікрорентгеноспектральний аналіз підтвердив наявність у хімічному складі мікросфер спектрів Si, Al, Na, Fe.

Мікроструктура електродугових покриттів на основі Св-08Г2С (рис. 3.37) складається з пористої металевої матриці і керамічних сферичних частинок, які, як показали результати МРСА, під час напилення не змінюють свого хімічного складу.

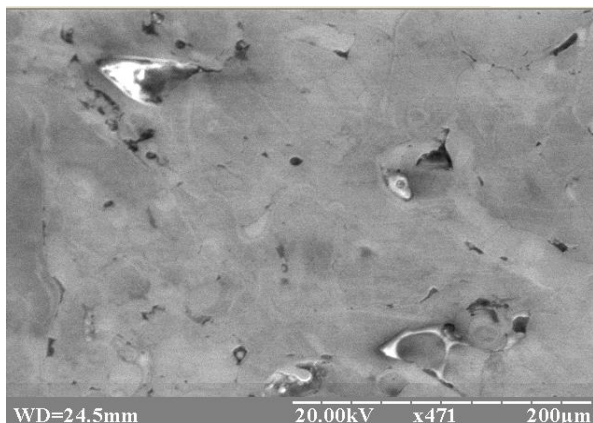


Рисунок 3.37 – Електронно-мікроскопічний знімок поверхні покриття композиції Св-08Г2С–АСПМ (10±7 % об'ємн.)

Завдяки особливим технологічним умовам одержання алюмосилікатних мікросфер з мінеральних частинок [65] та їх високу у порівнянні зі скляними мікросферами температуру плавлення (1250...1300 °С), АСПМ при електродуговому напиленні залишаються тугоплавкими сполуками. Це призводить до низької міцності зчеплення напилених покриттів з підкладкою (≈ 12 МПа), що обмежує області їх застосування, особливо в умовах судна. Крім того, технологічні труднощі пов'язані з низьким коефіцієнтом використання керамічних мікросфер, де втрати складають більше 50 % та відсутністю можливості гарантувати певне наповнення композицій.

3.5 Висновки до розділу 3

В основу вирішення науково-технічної проблеми щодо розроблення теоретичних засад створення нових комплексно-захисних композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання у їх складі скляних і металевих компонентів методами спікання та електродугового напилення покладено нові закономірності, досліджено фізико-хімічні процеси та отримано наступні практичні результати.

1. Для формування нових метал-скляних композицій з полі- та ультрадисперсною структурою одержано сухим розмелом бою кришталевого посуду та рентгенозахисного оптичного скла порошки середньої тонкості

($d = 10 \dots 90$ мкм) губчастої форми, які за результатами МРСА відносяться до стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$. Експериментально встановлено, що відпалювання при температурі 600°C у окисному середовищі сприятиме утворенню на їх поверхні склоподібної оболонки без агломерації та фазових перетворень.

2. Досліджено морфологію, структуру та процеси розм'якшення порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$: встановлено, що наявність на поверхні ПСМ силанового апрету підвищує температуру початку розм'якшення на 50°C , згладжує мікродефекти поверхні і попереджує температурні деформації сферичних оболонок; комплексні результати РСА разом з діаграмами стану показали загальну рентгеноаморфність, на фоні якої спостерігаються мікрокристалічні області, що свідчить про їх мікрогетерогенну будову. Порівняння зі структурою скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ вказує на більш складний фазовий склад натрійборсилікатних мікросфер, в стінках яких крім поліморфних модифікацій кремнезему (α -кварцу, α -тридиміту, α -кристобаліту) містяться інші фази: окисли, силікати, борати, боросилікати. Встановлено, що при підвищенні температури до 745°C дослідні мікросфери набувають склоподібного стану без структурно-фазових змін.

3. Удосконалено конструкцію і виготовлено лабораторний зразок експериментальної установки для спікання і гарячого пресування металевих і неметалевих порошків (а також їх сумішей), яка складається з шахтної печі з номінальною температурою 900°C та окисною атмосферою і відрізняється від існуючих аналогів механічним пресуючим пристроєм з індикатором переміщення пуансону прес-форми для досліджень термодформаційних процесів.

4. Досліджено фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час спікання порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ з порошком (пудрою) алюмінію та ґрунтуються на структурній неоднорідності ПСМ:

- при підвищенні температури більше ніж 500 °С після вигорання силанового апрету $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ у стінці мікросфери утворюються ультра- та мікропори, які завдяки капілярному ефекту та зовнішньому тиску заповнюються рідким алюмінієм;
- через нерівномірний розподіл компонентів у складі формувальної суміші та перегрупування частинок протягом рідкофазного спікання в структурі утворюються ділянки спечених між собою ПСМ різного діаметра, на яких внаслідок ліквідаційних процесів, розм'якшення аморфної складової та утворенням α -тридиміту формуються локальні субмікрокристалічні області з розміром ОКР до 90 нм;
- встановлені закономірності підтверджено теоретичними і експериментальними дослідженнями щодо процесів спікання порожніх скляних мікросфер з порошками інших сплавів: бронзи марки Пр-Бр-АМц9-2 і бабіту марки Пр-Б-83, які так само як і спікання з порошком та пудрою Al відбувається за механізмом рідкофазного спікання («контактне плавлення») та супроводжується усадочними процесами.

5. Розроблено спосіб отримання склоалюмінієвих композиційних матеріалів, який полягає у гарячому пресуванні ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа) при температурі 375...490 °С формувальної суміші, яка складається з порошку або пудри алюмінію (50 % об'ємн.) з порожніми скляними мікросферами дисперсністю 20...100 мкм з наступною ізотермічною витримкою в діапазоні температур 600...700 °С. Розроблений спосіб дає змогу виготовляти плити розміром до 500 мм і товщиною $\delta \geq 10$ мм для облицювання сталевих поверхні суднових багат шарових конструкцій біологічного захисту.

6. Для кріплення склоалюмінієвих плиток до сталевих поверхні конструкцій біологічного захисту експериментально підібрано склад, виготовлено зразки, досліджено структуру та властивості клейової композиції холодного затвердіння на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 (затверджувач – амінометилфенола марки УП-586Д) з додаванням

ПСМ (≈ 50 % об'ємн.), яка забезпечує міцність зчеплення з Ст3 на рівні 8...9,5 МПа, зі зразками склоалюмінієвих матеріалів – 11,0...13,0 МПа.

7. Досліджено процеси структуроутворення щодо формування міцного адгезійного і когезійного зав'язків при введенні до складу електродугових покриттів скляних порошків і мікросфер, які показали, що:

- формування по сталевій поверхні рівномірного метал-скляного шару із заданими фізико-механічними властивостями в умовах судна можливо методом електродугового напилення (режими: сила струму – 80...140 мА; напруга – 25...28 В; тиск повітря – 0,4...0,6 МПа; дистанція напилення – 90...100 мм, матеріал підкладки – Ст3) з використанням суцільнотягнутих дротів марок Св-АМГ5 і Св-08Г2С з додаванням (до 35 ± 7 % об'ємн.) до складу композицій наступних видів дисперсних наповнювачів: порошків стеклов систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$; скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, що забезпечить ефект підвищення радіаційно захисних властивостей через застосування компонентів з різною поглинаючою та відбивною здатністю;
- при напиленні мікросфери, потрапляючи у зону електродугового розряду і перемішуючись з краплями розплавленого металу, зазнають короточасних температурних навантажень, які призводять до вигорання силанового апрету, і внаслідок ліквідаційних процесів, що відбуваються у стінках мікросфер, у покриттях на основі Св-08Г2С утворюється нова ультрадисперсна фаза Fe_5Si_3 з розміром ОКР 87 нм, яка через передрекристалізаційну термічну обробку ($t = 500^\circ\text{C}$, $\tau = 5...10$ хв) перетворюється на Fe_5Si з розміром ОКР 75 нм;
- гіпотезу про мікрогетерогенну будову порожніх скляних мікросфер експериментально підтверджено результатами порівняльних досліджень щодо введення до складу електродугового покриття алюмосилікатних керамічних мікросфер, які при напиленні залишаючись тугоплавкими сполуками не утворюють склофази, що призводить до низької міцності зчеплення напилених покриттів з підкладкою (≈ 12 МПа);

- утворення і накопичення склофази сприяє підвищенню міцності зчеплення та ущільненню покриття, вільний Si шляхом дифузії переходить до сталевій підкладки, про що свідчить зменшення його концентрації на зворотній поверхні покриття;
- формування метал-скляних електродугових покриттів, наповнених порошками стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$, на відміну від композицій зі скляними мікросферами системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, не пов'язано з ліквідаційними процесами у порошках, які являють собою здрібнений бій структурно-однорідних скляних виробів; при напиленні вони зазнають часткового оплавлення через термічну дію під час обволікання рідким розплавленим металом, залишаючись рентгеноаморфними; на поверхні поділу метал–скло нових фаз не утворюється.

Наукова значущість розділу полягає у встановлених нових закономірностях, які є науковим підґрунтям можливості поєднання у одній композиції металевих і скляних компонентів, розширюють фізико-хімічні уявлення про вплив високотемпературних технологій, зокрема спікання та електродугового напилення, на структурні зміни скляних мікросфер і порошків; про визначення температурних полів на поверхні ПСМ при їх попаданні у зону електродугового розряду та формування міцного зв'язку на поверхні поділу скло–метал.

Практична значущість розділу полягає у виборі складу і способі формування захисного шару; конструкторській розробці експериментальної установки, технології виготовлення склоалюмінієвих матеріалів методом спікання, що дає змогу виготовляти вироби у вигляді плиток, розробці клейової композиції холодного твердіння для облицювання сталевих поверхонь конструкцій і елементів суден.

Результати досліджень наведені у роботах [102, 103, 110, 111, 123, 130, 141–143, 233, 235, 237, 243, 324, 333].

РОЗДІЛ 4

КОМПЛЕКСНО-ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЕЧЕНИХ СКЛОАЛЮМІНІЄВИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТАЛ-СКЛЯНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

Мета розділу – встановити вплив структури метал-скляних матеріалів і покриттів на їх комплексно-захисні властивості (механічні, демпфірувальні, теплофізичні, здатність послаблювати γ - і рентгенівські випромінювання, працювати при підвищених температурах і у хімічно активних середовищах); дослідити термомеханічні процеси, визначити граничні умови експлуатації.

Об'єкт досліджень – процеси послаблення γ - і рентгенівських випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів; термомеханічні процеси у опроміненому метал-скляному захисному шарі, нанесеному на Ст3.

Предмет досліджень – закономірності впливу скляних дисперсних включень у структурі матеріалів і покриттів на механічні властивості, теплопровідність, радіаційну та корозійну пошкоджувальність та механізми руйнування в умовах теплових ефектів при опроміненні.

4.1 Вплив пористості і об'ємного вмісту скляних наповнювачів на ефективні механічні властивості метал-скляного захисного шару конструкцій

У процесі експлуатації в умовах суднових вібрацій, температурних навантажень, можливих механічних пошкоджень у багатошаровій конструкції формується складний напружений стан, де на процеси руйнування впливають структурні особливості метал-скляного захисного шару (зокрема об'ємний вміст і форма скляних включень, поверхня поділу фаз, пористість тощо). Через структурну неоднорідність розроблених метал-скляних матеріалів і покриттів стається неможливість застосування прямих експериментальних методів для

визначення температурних деформацій мікрооб'ємів. В роботах [34, 388] механічні властивості композитів представлені як аналітичний опис, складений на основі теорії ефективних пружних модулів, що визначають взаємний зв'язок між структурою та властивостями, як це наведено у роботі [343], де ефективні константи пружності знаходяться на прикладі простіших моделей. Аналітичні залежності також наведено у класичних роботах мікромеханіки і радіаційного матеріалознавства [35, 370, 388, 402], проте вони не дають змогу описувати мікросувні деформації на поверхні поділу фаз в умовах дії іонізуючих випромінювань і термоциклічних навантажень. Найбільш наближеними розрахунковими аналогами є методики [164, 166, 388], розроблені для прогнозування показників міцності полімерних синтактиків. Для прогнозування граничних умов експлуатації захисних конструкцій в роботі обрано наступні ефективні механічні характеристики метал-скляного захисного шару:

- ефективний ТКЛР α^* – визначає напружено-деформований стан конструкцій в умовах короткочасних температурних навантажень, залежить від об'ємного вмісту скляних включень і пористості матеріалів та покриттів;
- умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці K_m – характеризує здатність пористої матриці чинити опір всебічному стисканню, формує градієнт властивостей і температурні напруження на поверхні поділу метал–скло в умовах теплових ефектів;
- умовний модуль об'ємного стискання скляної сфери (включення) K_s – важлива характеристика для гідростатичних умов експлуатації, характеризує локалізацію деформації матриці навколо скляної частинки;
- ефективний модуль зсуву G^* – характеризує опірність матеріалів і покриттів до зсувних деформацій.

В основу прогнозування ефективних механічних характеристик покладено модель елементарної комірки (рис. 4.1) метал-скляних композицій, наповнених ПСМ та суцільними скляними частинками.

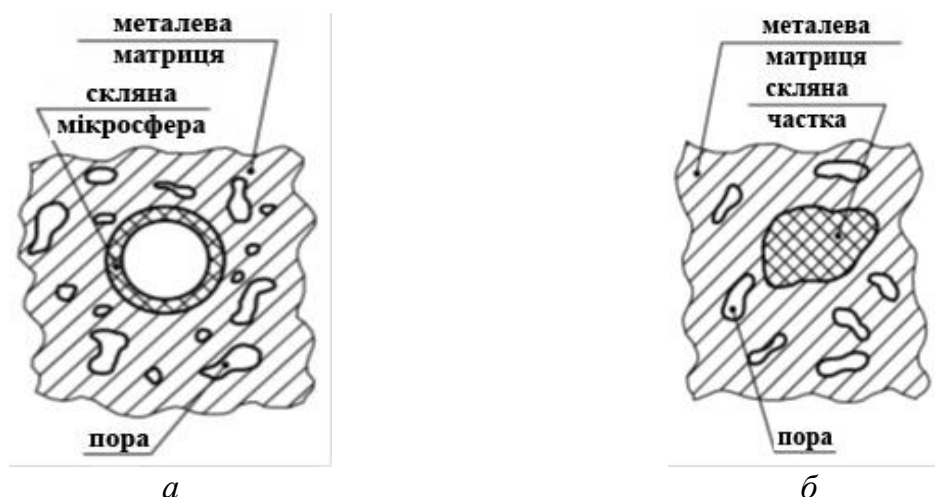


Рисунок 4.1 – Модель елементарної комірки метал-скляних композицій,
наповнених: *а* – порожніми скляними мікросферами;
б – суцільними скляними частинками

Введено наступні позначення:

α^* – ефективний термічний коефіцієнт лінійного розширення метал-скляного матеріалу або покриття;

ρ_m, ρ_c – густина матеріалу матриці та скла;

ρ_s – уявна густина мікросфер;

E_m, E_{cm} – модулі пружності матеріалу матриці і скла;

ν_m, ν_c – коефіцієнти Пуасона металевої матриці і скла;

α_m, α_s – ТКЛР матеріалів матриці і скла у компактному вигляді;

ϑ_m, ϑ_s – об'ємний вміст металу і скла у складі композицій;

η_o – частка пористості у металевій матриці;

η_z – частка закритої пористості, яка знаходиться всередині мікросфер, тобто прирівнюється до об'ємного вмісту ПСМ у складі композицій;

K'_m, K_c – об'ємні модулі пружності матеріалів металевої матриці і скляної мікросфери;

K_m, K_s – умовні модулі об'ємного стискання металевої матриці і скляної сфери;

G^* – ефективний модуль зсуву композицій.

Ефективний ТКЛР для метал-скляної композиції в залежності від об'ємного наповнення ПСМ можна визначити за допомогою методики [166], замінюючи міцнісні характеристики полімерної матриці на властивості металевої:

$$\alpha^* = \frac{(\alpha_s - \alpha_m) \cdot \mathcal{G}_s (1 + \rho)}{\frac{K_m}{K_s} (1 - \mathcal{G}_s) + \rho + \mathcal{G}_s} + \alpha_m. \quad (4.1)$$

Умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці для безпористих матеріалів і покриттів може бути виражений як

$$K_m = \frac{K'_m \cdot \mathcal{G}_m}{1 + \rho(1 - \mathcal{G}_m)} \quad (4.2), \quad \text{де } K'_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (4.3).$$

Умовний модуль пружності K_s об'ємного стискання порожньої сфери з урахуванням щільності композицій при різному наповненні ПСМ виражений як

$$K_s = \frac{K_{cm} \cdot \psi}{1 + \rho(1 - \psi)} \quad (4.4), \quad \text{де } \psi = \frac{\rho_s}{\rho_c} \quad (4.5)$$

з урахуванням того, що в результаті збільшення у складі композицій порожніх скляних мікросфер щільність матеріалів і покриттів знижується. Об'ємний модуль пружності матеріалу ПСМ розраховується як [163]

$$K_c = \frac{E_{cm}}{3(1 - 2\nu_c)} \quad (4.6).$$

Розраховані за формулами (4.1) і (4.2) значення α^* і K_m характеризують міцнісні властивості композицій з безпористою матрицею. Умовний модуль пружності об'ємного стискання мікросфери K_s за формулою (4.4) не враховує пористості, яка знаходиться всередині ПСМ.

Для визначення K_c і K'_m застосовано аналітичний опис об'ємного модуля пружності (4.7) та (4.8), запропонований автором роботи [223] для пористих скляних композитів, що показує на практиці задовільну узгодженість розрахунків з експериментальними даними:

$$K_c = \frac{E_{cm}}{\left(\frac{\rho_c (0,0026\rho_c + \rho)}{\rho^2} + 0,0016 \frac{\eta_z \pi (\rho_c - \rho) (1 + \nu_c) (2\nu_c^2 + \nu_c + 5)}{\rho_c \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_c}{\rho_c - \rho}} - 1 \right)^3} \left(1 + 10 \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_c}{\rho_c - \rho}} - 1 \right)^2 \right)^2 \right)} \quad (4.7),$$

$$K'_m = \frac{E_m}{\left(\frac{\rho_m (0,0026\rho_m + \rho)}{\rho^2} + 0,0016 \frac{\eta_o \pi (\rho_m - \rho) (1 + \nu_m) (2\nu_m^2 + \nu_m + 5)}{\rho_m \left(\sqrt[3]{\frac{\rho_m}{\rho_m - \rho}} - 1 \right)^3} \left(1 + 10 \sqrt[3]{\frac{\rho_m}{\rho_m - \rho}} - 1 \right)^2 \right)}^2 \quad (4.8).$$

Частку закритої всередині мікросфер пористості η_z прирівняно до об'ємного їх вмісту у складі композицій, пористість металевої матриці η_o визначено експериментально.

Мікросув на поверхні поділу метал–скло визначається на рівні оцінки Хашина–Штрикмана через ефективний модуль зсуву

$$G^* = \frac{3}{4} \frac{K_m}{\rho} \quad (4.9).$$

Таким чином, розрахунок ефективних механічних характеристик метал-скляних матеріалів і покриттів, наповнених ПСМ, зводиться до наступного алгоритму, який полягає у визначенні:

- об'ємного модуля пружності скляних мікросфер K_c за формулою (4.7);
- умовного модуля об'ємного стискання порожньої сфери K_s (4.4);
- об'ємного модуля пружності металевої матриці K'_m (4.8) з урахуванням пористості;
- умовного модуля об'ємного стискання K_m металевої матриці (4.2);
- ефективного ТКЛР α^* (4.1);
- ефективного модуля зсуву композиції G^* (4.9).

Більшість розрахункових методик визначення фізичних і функціональних властивостей композитів включає в себе припущення про максимальну

наближеність форми дисперсних включень до сферичної [34]. Для прогнозування ефективних механічних характеристик метал-скляних електродугових покриттів, наповнених суцільними скляними частинками, можна пристосувати наведений вище алгоритм, де у формулі (4.5) прирівняти ρ_s до ρ_c .

Вихідні розрахункові дані наведені у табл. 4.1; узагальнені результати визначення ефективних механічних властивостей метал-скляних матеріалів і покриттів – у табл. 4.2; у розрахунках використано реальні значення щільності і пористості (10...20 %) композицій при об'ємному наповненні скляними частинками 10...50 %.

Таблиця 4.1 – Вихідні розрахункові дані

Характеристика	Скло	Алюміній	Сталь
ТКЛР, K^{-1}			
ПСМ	$8,55 \cdot 10^{-6}$	$22,58 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
натрійсилікатне	$8,55 \cdot 10^{-6}$		
свинцевмісне	$11,5 \cdot 10^{-6}$		
Модуль пружності, E , ГПа	72,6	70,5	200
Коефіцієнт Пуасона, ν	0,21	0,345	0,25
Щільність компактного матеріалу, kg/m^3			
ПСМ	2300	2700	6400
натрійсилікатне	2500		
свинцевмісне	2700		

Таблиця 4.2 – Розрахункові значення ефективних механічних характеристик метал-скляних матеріалів і покриттів

Метал-скляні композиції	K_s , ГПа	K_m , ГПа	$\alpha^* \times 10^6$, K^{-1}	G^* , МПа
ПСМ– Al-порошок (10...50 % об'ємн.)	30,0...34,0	37,45...41,25	1,4...7,05	15,25...15,74
ПСМ– Al-пудра (10...50% об'ємн.)	31,45...34,5	38,15...41,5	1,43...6,4	16,1...16,5
Св-АМГ-5–ПСМ (10...40 % об'ємн.)	31,66...37,3	39,65...44,12	1,45...8,78	17,05...19,00
Св-08Г2С–ПСМ (10...40 % об'ємн.)	32,0...37,0	130,0...173,5	0,7...4,0	15,5...21,75
Св-АМГ5–натрійсилікатне скло (10...40 % об'ємн.)	41,72	40,0...41,15	1,4...5,6	17,5...18,0
Св-АМГ5–свинцевмісне скло (10...40 % об'ємн.)	41,72	40,25...45,65	1,1...4,43	17,65...18,5
Св-08Г2С–натрійсилікатне скло (10...40 % об'ємн.)	41,72	120,0...155,0	0,55...2,7	12,8...16,7
Св-08Г2С–свинцевмісне скло (10...40 % об'ємн.)	41,72	120...172	0,45...2,4	12,82...21,30

Вплив об'ємного наповнення мікросферами. Розрахункові результати показали, що збільшення об'ємного вмісту ПСМ з 10 до 50 % навіть у 4 рази підвищує ефективний ТКЛР, що наближує здатність метал-скляних композицій до термічного розширення сталевих облицювання конструкцій, сприяючи тим самим зниженню деформацій на поверхні поділу сталь–захисний шар. При об'ємному збільшенні ПСМ від 10 до 50 % зростає умовний модуль об'ємного стискування порожньої сфери K_s : для склоалюмінієвих композицій $\Delta K_s \approx 12$ %,

для покриттів на основі Св-08Г2С K_s приблизно збільшується на 35 %, що пояснюється зростанням стискаючих напружень на поверхні поділу метал–скло при більш високих значеннях модуля пружності для сталеві матриці, що в процесі дії багаторазових термічних навантажень може призвести до викришування скляних включень. Ефективний модуль зсуву G^* , який характеризує здатність метал-скляних матеріалів і покриттів чинити опір деформаціям зсуву на поверхні поділу фаз, при зростанні об'ємного вмісту ПСМ у складі композиції знаходиться у межах 15...25 МПа, що значно нижче за модулі зсуву компактних матеріалів металевої матриці і скла. Результати розрахунків опосередковано підтверджуються теоретичними роботами [33, 343, 351]. Вплив об'ємного наповнення суцільними скляними частинками на ефективні механічні характеристики метал-скляних електродугових покриттів аналогічний наповненню ПСМ.

Вплив матриці. Умовний модуль об'ємного стискання K_m електродугових покриттів на основі Св-08Г2С утричі перевищує K_m покриттів на основі Св-АМг5 і гарячепресованих склоалюмінієвих КМ, проте значення ефективного ТКЛР α^* сталевих композицій у 2 рази нижче. В обох випадках спостерігається тенденція до підвищення значень ефективних механічних характеристик метал-скляних електродугових покриттів при збільшенні об'ємного вмісту скляних порошків у складі композицій. Умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці електродугових покриттів на основі Св-08Г2С, наповнених ПСМ, утричі перевищує K_m склоалюмінієвих композицій, у порівнянні з якими сталеві покриття мають більш низький ефективний ТКЛР: при об'ємному наповненні 10 % α^* складає $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при збільшенні ПСМ до 40 % $\alpha^* = 3,18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Вплив пористості. Встановлено, що зі збільшенням скляних наповнювачів зменшується теоретичне значення умовного модуля пружності об'ємного стискання металевої матриці $\bar{K}_m$ на 35 %, при цьому у 5 разів зростає α^* метал-скляних композицій і на 40 % знижується значення модулю зсуву G^* . На рис. 4.2 у графічному вигляді зображено характер послаблення відносного

модуля об'ємного стискання металевої матриці – відношення K_m , який враховує експериментально одержані значення пористості, до теоретичного значення $\bar{K}_m$ розрахованого за формулою (4.3); пунктирними лініями позначено розрахункові границі для композицій з різними скляними наповнювачами.

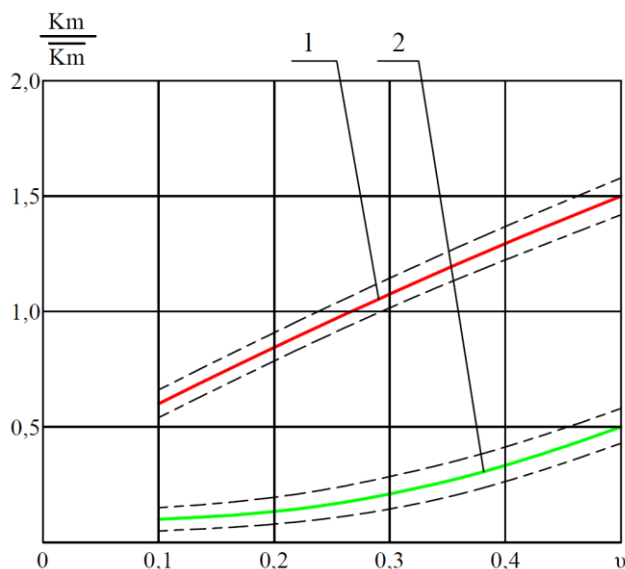


Рисунок 4.2 – Залежність відносного модуля об'ємного стискання металевої матриці $K_m/\bar{K}_m$ (K_m – для пористого матеріалу; $\bar{K}_m$ – для безпористого матеріалу) від об'ємного вмісту скляних включень: 1 – для групи метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С (пористість 10...20 %); 2 – для склоалюмінієвих спечених матеріалів та електродугових покриттів на основі Св-АМГ5 (пористість 10...25 %)

Послаблення ефективних механічних характеристик для безпористої матриці при збільшенні вмісту скляного наповнювача (10...50 % об'ємн.) безпосередньо пов'язано з утворенням додаткових мікронапружень. З наведених графічних залежностей слідує, що наявність пористості навіть удвічі послаблює умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці K_m та порожньої сфери ($K_s/\bar{K}_s = 0,7...0,9$). Умовний модуль об'ємного стискання суцільної скляної частинки K'_s за умовами наближення її форми до сферичної несуттєво відрізняється від K_s порожньої сфери.

Одержані результати дають змогу прогнозувати механічні характеристики метал-скляних композицій з урахуванням їх структурних особливостей без проведення складних експериментальних робіт, надалі застосовуються для прогнозування і працездатності в умовах вібрацій та при моделюванні термомеханічних процесів в опроміненому метал-скляному шарі конструкцій і елементів суден.

4.2 Розрахунково-експериментальні дослідження демпфірувальних властивостей метал-скляних електродугових покриттів з урахуванням впливу порожніх скляних мікросфер

Важливим аспектом процесу проектування суднових конструкцій вважається визначення можливості їх експлуатації в умовах вібрацій [69, 85], джерелами яких є працююче обладнання (головні двигуни, дизель-генератори, гребні гвинти, насоси, системи кондиціонування, радіонавігаційне обладнання), жорстко-з'єднані механізми. Для виготовлення опор, станин, амортизаторів та ін. використовуються марганцево-мідні, нікель-титанові, магнієві сплави, біметалеві з'єднання, перевагами яких є висока технологічність і незалежність ефектів демпфірування від частоти коливань. Зменшити вплив динамічних навантажень можливо шляхом зміни хімічного складу конструкційних матеріалів, термічної обробки, нанесення на їх поверхню спеціальних вібропоглинаючих покриттів [340, 407]. Останній напрямок широко застосовують у суднобудівних технологіях завдяки його результативності. Для визначення ефективності покриттів на практиці використовуються розрахункові та експериментальні методики [33, 85, 186, 248], де кожен із критеріїв характеризує певний показник працездатності роботи конструкцій в умовах вібрацій.

Демпфірувальні властивості метал-скляних електродугових покриттів досліджено на моделі двошарових зразків (рис. 4.3), де як критерій обрано

коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$, який можна визначити за формулою (4.10) [33]

$$\eta_{\text{вібр}} = \frac{\eta(f)}{1 + [\alpha_2 \beta_2 (\alpha_2^2 + 12\alpha_{21}^2)]^{-1}}, \quad (4.10)$$

де $\eta(f)$ – коефіцієнт зсувних втрат матеріалу покриття, прийнятий у розрахунках як $(2...4) \cdot 10^{-3}$; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$ – відношення товщини шару покриття до товщини сталевого листа (прийнято: $h_2 = 2$ мм; $h_1 = 10$ мм); $\beta_2 = \frac{E_2}{E_1}$ – відношення модулів поздовжньої пружності, де $E_2 = 3G^*(f)$ і залежить від об'ємного вмісту скляних наповнювачів у складі покриттів (табл. 4.2); G^* – модуль зсуву покриття, МПа; $\alpha_{21} = \frac{h_{21}}{h_1}$, де h_{21} – відстань між центральними площинами (рис. 4.3), становить 6 мм.

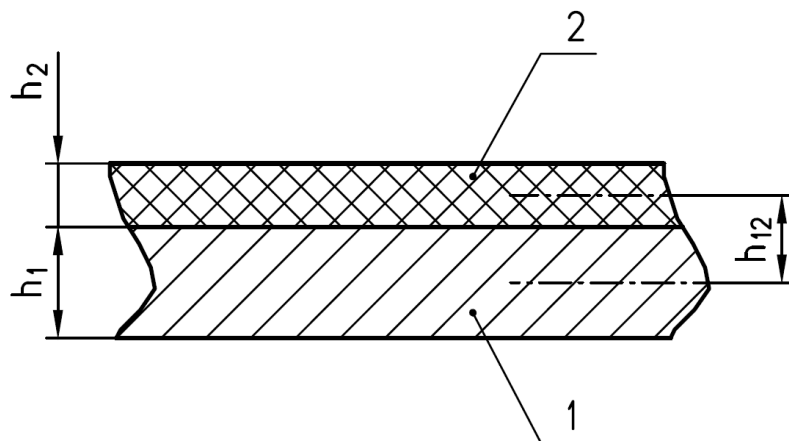


Рисунок 4.3 – Двошарова модель зразків для досліджень демпфірувальних властивостей:

1 – сталевий лист; 2 – шар метал-скляного покриття

Виконані розрахунки (табл. 4.3) показали, що пластина СтЗ–метал-скляне покриття при обраному співвідношенні товщин має достатньо високий

коефіцієнт вібраційних втрат: 0,35...0,6. Збільшення у складі електродугових покриттів скляних наповнювачів призводить до зниження $\eta_{\text{вібр}}$ на 5...15 %.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти вібраційних втрат двошарових пластин
СтЗ–покриття

Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$	Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$	Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$
Покриття Св-АМг5–ПСМ		Покриття Св-АМг5–натрійсилікатне скло		Покриття Св-АМг5–свинцевмісне скло	
10	0,5	10	0,43	10	0,4
40	0,46	40	0,41	40	0,39
Покриття Св-08Г2С–ПСМ		Покриття Св-08Г2С–натрійсилікатне скло		Покриття Св-08Г2С–свинцевмісне скло	
10	0,49	10	0,59	10	0,59
40	0,35	40	0,45	40	0,35

Одержані дані носять усереднений характер; для визначення ефективності покриття у розрахунках необхідно брати до уваги частотну залежність в'язкопружних параметрів композиції. Постановка відповідних експериментальних досліджень пов'язана з використанням складних і дороговартісних методів, таких як механічна спектроскопія [186] та резонансні методи, які ґрунтуються на збудженні коливань з використанням електромагнітних перетворювачів з широким діапазоном частот [85]. Найбільш простим і надійним є метод вільних поперечних затухаючих коливань консольно-закріплених зразків [248]. Отримана інформація надається у вигляді осцилограм, за якими розраховується логарифмічний декремент δ (безрозмірна фізична величина, обернена числу коливань, після закінчення яких амплітуда зменшується за експоненціальним законом) і коефіцієнт розсіювання енергії $\Psi=2\delta$ (відношення розсіяної енергії за цикл установлених коливань до амплітудного значення потенційної енергії пружного середовища). Демпфувальні властивості матеріалів визначаються їх здатністю поглинати

механічну енергію коливань, перетворюючи її на теплову, яка потім розсіюється.

Коефіцієнт розсіювання енергії визначається розсіюванням пружних хвиль на сферичних включеннях, яку на думку автора роботи [247] можна дослідити на низьких частотах динамічних коливань, для чого поставлено серію експериментів у частотному діапазоні 10...40 Гц. Схему експериментальної установки [349] наведено у Додатку Б (рис. Б. 5), як еталонні зразки застосовано пластини із вуглецевої сталі Ст3 і сплаву АМг5 розміром 140×10×1,5 мм (Додаток Б, рис. Б.6): результати, одержані при частоті коливань 40 Гц збігаються з довідниковими даними [248]. Мета постановки досліджень – встановити ефект від нанесених метал-скляних покриттів ($\delta = 0,5$) мм на демпфірувальні властивості сталевих пластин, для чого застосовано покриття на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнені порожніми скляними мікросферами. Підставою для цього є наукові роботи в області руйнування композитів в умовах гідростатичних і динамічних навантажень, зокрема [247, 282, 283, 358]. Експериментальні роботи включали у себе дослідження впливу ПТО ($t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1,5\text{...}10\text{ хв}$) протягом 1,5...10 хв, на коефіцієнт розсіювання енергії Ψ пластин з покриттями. Одержані результати зведено до табл. 4.4 і наведено у вигляді графічних залежностей (рис. 4.4).

Таблиця 4.4 – Демпфірувальні характеристики зразків

Зразок	δ , %	Ψ , %
<i>Еталонні зразки</i>		
Ст3 без покриття	1,80	3,60
АМг	0,87	1,74
<i>Ст3 з покриттями</i>		
Св-08Г2С	1,40	2,80
Св-АМг5	5,42	10,84
Св-08Г2С–ПСМ (15 % об'ємн.)	9,23	18,46
Св-АМг5–ПСМ	6,16	12,32
<i>Ст3 з покриттями після ПТО ($t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1,5\text{ хв}$)</i>		
Св-08Г2С	4,95	9,90
Св-08Г2С–ПСМ (15 % об'ємн.)	22,24	44,48

Для якісної оцінки одержаних результатів у табл. 4.4 наведено порівняння з еталонними зразками та покриттями із Св-08Г2С і Св-АМг5, напиленими без наповнювача. З одержаних результатів видно, що нанесення наповнених ПСМ електродугових покриттів на пластинку Ст3 значно перевищує її демпфірувальні властивості, що пов'язано з наявністю поверхні поділу між основою та покриттям, де відбувається додаткове розсіювання енергії. Для електродугових покриттів на основі Св-АМг5 ефект впливу введених до складу мікросфер менш очевидний: коефіцієнт розсіювання енергії для пластин з наповненими покриттями збільшується у середньому на 12 %. Демпфірувальні характеристики покриттів із Св-АМг5 і композиції Св-АМг5–ПСМ вищі, ніж у литих сплавів типу АМг5, що є дуже важливим для експлуатації конструкцій в умовах суднових вібрацій.

Графічні залежності (рис. 4.4) побудовано для покриттів з різним об'ємним наповненням порожніми скляними мікросферами і наглядно демонструють позитивний вплив ПТО на коефіцієнт розсіювання енергії.

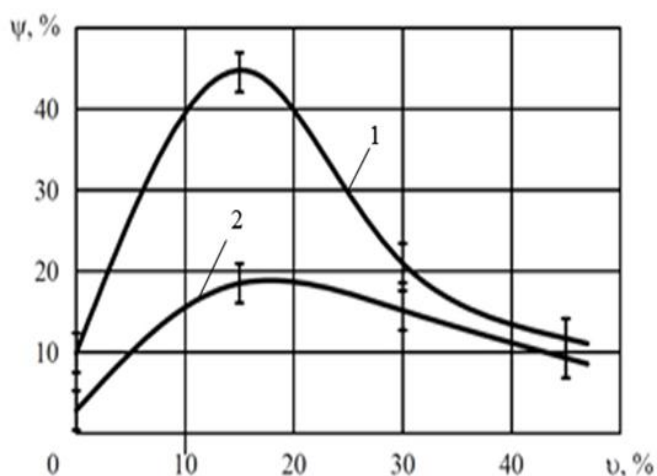


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта розсіювання енергії від об'ємного вмісту мікросфер у складі покриттів Св-08Г2С:
1 – після ПТО; 2 – до ПТО

Таким чином, експериментально встановлено, що введення до складу електродугового покриття Св-08Г2С порожніх скляних мікросфер сприятиме суттєвому зростанню їх демпфірувальної здатності. Максимальне зростання (більш ніж у 6 разів) коефіцієнта розсіювання енергії спостерігається для зразків з об'ємним наповненням ПСМ 15 %. Формування субмікрокристалічної структури під час ПТО сприятиме підвищенню демпфірувальної здатності

покриттів на основі Св-08Г2С навіть удвічі, проте цей спосіб термічної обробки [65] є малоефективним для електродугових покриттів на основі Св-АМг5 (Ψ підвищується лише на 2%) і через короткочасність технологічного процесу обмежений для великогабаритних деталей.

Одержані результати показали можливість експлуатації розроблених метал-скляних покриттів в умовах судових вібрацій (крім машинного відділення), що дозволяє рекомендувати розроблені метал-скляні електродугові покриття для подальшої експлуатації в умовах судна.

4.3 Теоретично-експериментальні дослідження теплофізичних властивостей метал-скляних матеріалів і покриттів

Теплофізичні властивості (коефіцієнти тепло- і температуропровідності) визначають доцільність застосування метал-скляних матеріалів і покриттів в умовах підвищених температур, термічних навантажень та теплових ефектів під час взаємодії з потоками випромінювань. При їх дослідженні необхідно враховувати хімічний склад компонентів, об'ємний вміст і форму скляних включень. В теоретичні постановці задача, як правило, зводиться до визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності, який можна розрахувати за формулою Максвелла для бінарного композиту [203]

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2\vartheta_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + \vartheta_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \right) \quad (4.11),$$

де $\lambda_{\text{эф}}$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності композиційної системи; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності матриці, тобто металевого компонента (без урахування пористості); λ_2 – коефіцієнт теплопровідності скляних включень; ϑ_1 , ϑ_2 – відповідно об'ємна частка матриці і скляних включень.

Розраховані значення у графічному вигляді наведено на рис. 4.5, де пунктирними лініями показано діапазони $\lambda_{\text{эф}}$ для покриттів, наповнених суцільними скляними частинками. Одержані результати наглядно свідчать про

зниження теплопровідності зі збільшенням об'ємного вмісту скляних включень у складі композицій, проте не враховують пористості зразків.

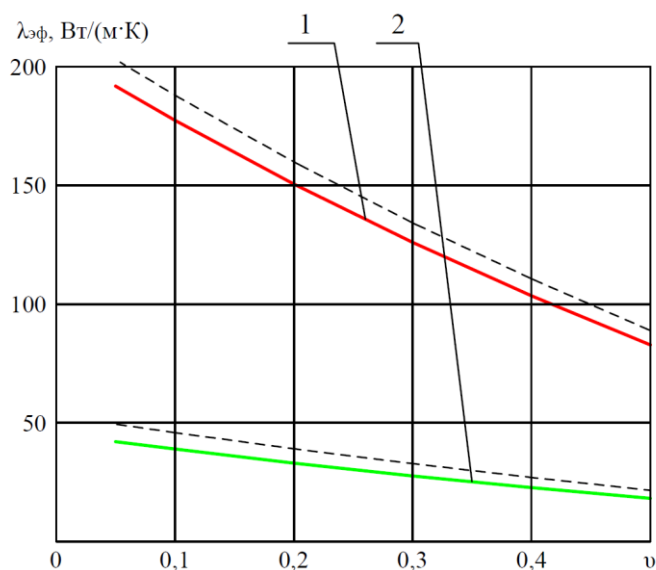


Рисунок 4.5 – Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності від об'ємного вмісту скляних включень для композицій:
1 – алюміній-ПСМ;
2 – сталь-ПСМ

Експериментальне визначення коефіцієнтів теплопровідності метал-скляних матеріалів і покриттів здійснювалось з використанням вимірювача теплопровідності ИТ- λ -400, в основу принципу дії якого покладено метод динамічного калориметра [213], тепла схема постановки експерименту наведена у Додатку Б (рис. Б.7, Б.8). Для поліпшення контакту дослідні зразки діаметром 15 мм і висотою 0,5...2 мм розташовувались зверху еталонних зразків із оптичного скла марки ТФ1 (ГОСТ13659-68) висотою 5 мм; об'ємний вміст скла у складі склоалюмінієвих матеріалів становить 50 %, у електродугових покриттях – 35 ± 7 %. За допомогою установки можна проводити дослідження у діапазоні температур від -100 °С до 400 °С у режимі монотонного нагрівання. Задачу експерименту зведено до вимірювання перепаду температур на тепломірі Π_T та зразку Π_0 ; алгоритм дослідження наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Алгоритм експериментального визначення коефіцієнту теплопровідності

Показники	Формули для розрахунку
Середня температура зразка $\bar{t}$, °C	$\bar{t} = t_c + 0,5A_t \cdot \Pi_O$, де t_c – температура вимірювання; A_t – чутливість термопар хромель-алюмель; Π_O – перепад температури на зразку (вимірюється у мкВ)
Поправка σ_c , яка враховує теплоємність	$\sigma_c = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)}$, де C_o – повна теплоємність зразку; C_c – повна теплоємність стрижня
Визначення теплового опору зразків, P_0 , м ² ·К/Вт	$P_0 = \frac{V_o \cdot S(1 + \sigma_c)}{V_T \cdot K_T} - P_K$, де V_o – перепад температури на зразку; S – площа поперечного перетину зразку; V_T – перепад температури на пластині; K_T – теплопровідність пластини; P_K – поправка, яка враховує тепловий опір контакту
Визначення коефіцієнта теплопровідності зразків, λ Вт/(м·К)	$P_0 = \frac{h}{\lambda}$, де h – висота зразків
Визначення коефіцієнту температуропровідності, a , м ² /с	$\lambda = a \cdot c \cdot \rho$, де λ – коефіцієнт теплопровідності; ρ – щільність матеріалу; c – теплоємність зразку, визначається як $C = C_K(1 - \Pi)$, де C_K – питома теплоємність компактного матеріалу; Π – пористість композиційного матеріалу або покриття

Протоколи вимірювань та результати проміжних розрахунків містяться у звітах науково-дослідницьких робіт НУК за держбюджетними темами № 1555 «Дослідження впливу термодформаційних, електрофізичних та газодинамічних процесів на формування структури і властивостей порошкових матеріалів і напилених покриттів» (ДР № 0105Г001766); № 1674 «Теоретичні і технологічні основи створення комплексно-захисних матеріалів і покриттів для засобів зберігання та транспортування небезпечних речовин» (ДР № 0108U001169).

Результати експериментальних досліджень зведено до табл. 4.6. Зіставлення розрахункових (рис. 4.5) і експериментальних (табл. 4.6) даних

показало достатній рівень збігу. Серед розглянутих композицій найбільшу теплопровідність мають склоалюмінієві матеріали, для яких $\lambda = 80 \dots 85 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, для метал-скляних електродугових покриттів коефіцієнт теплопровідності наближається до значення λ нержавіючої сталі.

Таблиця 4.6 – Значення коефіцієнтів теплопровідності матеріалів і покриттів

Матеріал (покриття)	Щільність ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт температуропровідності a , м ² /с
ПСМ– Al-пудра	1100	82,82	$98,5 \cdot 10^{-6}$
ПСМ–Al-порошок	1200	85,30	$92,4 \cdot 10^{-6}$
Св-АМг5–ПСМ	1480	61,5	$44,09 \cdot 10^{-6}$
Св-АМг5–натрійсилікатне скло	1770	68,30	$40,8 \cdot 10^{-6}$
Св-АМг5–свинцевмісне скло	1860	70,0	$39,65 \cdot 10^{-6}$
Св-08Г2С–ПСМ	5800	18,18	$6,5 \cdot 10^{-6}$
Св-08Г2С–натрійсилікатне скло	7025	21,0	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Св-08Г2С–свинцевмісне скло	6065	22,0	$7,6 \cdot 10^{-6}$

Одержані результати далі використовуються для вирішення часткових задач теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди і у дослідженні термомеханічних процесів, які відбуваються в опроміненому метал-скляному шарі конструкцій біологічного захисту.

4.4 Постановка експериментальних досліджень рентгенозахисних властивостей матеріалів і покриттів

Метою більшості експериментальних робіт з використанням низьких енергій випромінювань є попередній відбір найбільш перспективних матеріалів, який полягає у проведенні калібрувальних досліджень для

однотипних композицій на приладах неруйнуючого контролю, зокрема рентгенівських установках [30, 290]. Апробаційні дослідження розроблених метал-скляних матеріалів і покриттів виконано на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3, опромінювання якого згідно стандарту ДИН 6809 відноситься до ультрам'яких, проте за думкою авторів робіт [21, 283] може бути використано для моделювання процесів поглинання у гетерогенних композиціях. Як джерело випромінювань застосована трубка серії БСВ з мідним анодом $\text{Cu}_{k\alpha} = 1,54178$, напруженням до 45 Вт. Режими роботи трубки підібрані експериментально: напруження $U = 15 \dots 20$ кВ; струм накаливання $I = 8 \dots 12$ мА; інтенсивність випромінювання – 10^5 Р/мин; час експозиції – 1 хв. Схему постановки експерименту наведено на рис. 4.6: де дослідний зразок 5 встановлюється у приставку, де по осі ходу рентгенівського променя методом реєстрації імпульсів за допомогою пропорційного лічильника 6 вимірюється інтенсивність I_0 до та I за зразком. Інтенсивність первинного пучка для даного режиму трубки приймається за 100 %. У ході проведення експерименту використовується стандартне фокусування з кутом повороту лічильника – $2\theta = 0^\circ$, для чого зразок розвертається перпендикулярно до рентгенівського пучка, тобто на $\theta = 90^\circ$. Як еталон обрано пластинку листового свинцю марки С0 (ГОСТ 3778-98) щільністю 11340 кг/м^3 і товщиною 10 мм.

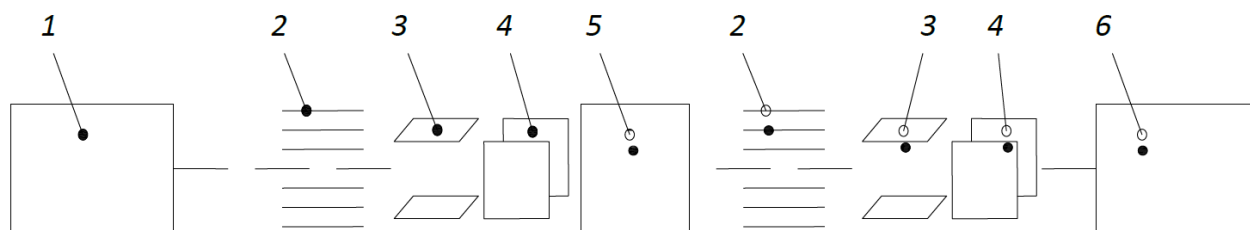


Рисунок 4.6 – Схема вимірювань інтенсивності рентгенівських випромінювань на установці ДРОН-3: 1 – джерело РВ – трубка БСВ-24-Сu;
2 – щілини Солера; 3 – горизонтальні щілини; 4 – вертикальні щілини;
5 – дослідний зразок; 6 – пропорційний лічильник

Характеристики, які визначають здатність матеріалів послаблювати рентгенівські випромінювання (кратність випромінювань $K_0 = \frac{I_0}{I}$, лінійний μ і масовий $\mu_{\text{мас}}$ коефіцієнти послаблення випромінювань, товщина шару половинного поглинання $\delta_{\text{кр}}$), розраховуються на підставі закону Бера-Ламберта [30, 157] за формулами (4.12) – (4.15)

$$I = I_0 e^{-\mu \delta} \quad (4.12),$$

де за умовами експерименту I_0 – інтенсивність потоку перед зразком;

I – інтенсивність потоку за зразком; δ – товщина зразка; μ – лінійний коефіцієнт послаблення;

$$\mu = -\frac{1}{\delta} \ln \frac{I_0}{I} \quad (4.13); \quad \mu_{\text{мас}} = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.14); \quad \delta_{\text{кр}} = \frac{1}{\mu} \ln 2. \quad (4.15)$$

Порівняльна оцінка ефективності використання матеріалів з різною щільністю здійснюється за свинцевим еквівалентом $\delta_{\text{рб}}$, який визначається товщиною шару свинцю, що забезпечує такий саме захист, як і пропонується матеріал. Для зіставлення рентгенозахисних властивостей у роботі прийнятий питомий свинцевий еквівалент $\delta'_{\text{рб}}$ – відношення свинцевого еквівалента до товщини зразка. Методику постановки експерименту щодо визначення рентгенозахисних властивостей композиційних матеріалів і покриттів наведено у Додатку Б2. Результати вимірювань та проміжні розрахунки було включено у звіти з науково-дослідних робіт НУК за держбюджетними темами № 1674 «Теоретичні і технологічні основи створення комплексно-захисних матеріалів і покриттів для засобів зберігання та транспортування небезпечних речовин» (ДР № 0108U001169); № 1852 «Наукові основи формування наноструктурних елементів у пластично деформованих металах та прогнозування фізико-механічних властивостей наноструктурних металокомпозитів» (ДР № 0112U000350); № 1988 «Наукові основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів із металів і сплавів

формуванням наноструктурних елементів термічною обробкою та електроімпульсною дією» (ДР № 0115U00299).

У табл. 4.7 для порівняння наводяться характеристики електродугових покриттів Св-АМг5 і Св-08Г2С без наповнювача та таких аналогів, як САПи (композиції Al-Al₂O₃, Al-SiC) і синтактики (сферопластики і синтактичне піноскло – композиційний матеріал, одержаний спіканням ПСМ без сполучників).

Таблиця 4.7 – Рентгенозахисні властивості композицій

Композиція	$\delta_{кр}$, см	$\mu_{мас}$, см ² /г	Питомий свинцевий еквівалент δ_{Pb}	Рекомендована товщина шару, мм (еквівалентна 3мм Pb)
<i>Електродугові покриття на основі Св-АМг5 (35±7 % об'ємн.) скла</i>				
Св-АМг5-ПСМ	0,025	18,6	0,75	4,0
Св-АМг5-натрійсилікатне скло*	0,027	14,19	0,65	4,4
Св-АМг5-свинцевмісне скло**	0,026	14,5	0,7	4,25
Св-АМг5 (без наповнювача)	0,052	7,9	0,35	8,35
<i>Склоалюмінієві матеріали (50 % об'ємн.) ПСМ</i>				
ПСМ-Al-порошок	0,031	18,4	0,6	5,07
ПСМ-пудра Al-пудра	0,042	14,9	0,45	6,85
<i>Електродугові покриття на основі Св-08Г2С (35±7 % об'ємн.) скла</i>				
Св-08Г2С-ПСМ	0,023	4,93	0,75	3,78
Св-08Г2С-натрійсилікатне скло*	0,032	2,99	0,45	6,48
Св-08Г2С-свинцевмісне скло**	0,037	3,03	0,5	6,0
Св-08Г2С (без наповнювача)	0,040	2,46	0,6	5,31
<i>Порівняння з аналогами</i>				
Al-Al ₂ O ₃ (аналог САПів)	0,030	13,5	0,6	4,9
Al-SiC	0,025	14,0	0,75	4,0
Синтактичне піноскло (спечені без сполучника мікросфери)	0,013	14,6	0,14	21,36
Сферопластик ЕДС-7А	0,013	7,8	0,14	21,0
Сферопластик з додатковою пористістю	0,033	3,6	0,05	53,67
Клейова композиція ЕД-20-ПСМ (50 % об'ємн.)	0,015	7,0	0,15	23,5

* - скло системи Na₂O-CaO-SiO₂

** - скло системи K₂O-PbO-SiO₂

Одержані результати дають якісну оцінку дослідним матеріалам, найбільш інформативним показником рентгенозахисних властивостей слід вважати масовий коефіцієнт послаблення РВ $\mu_{\text{мас}}$, який показує максимальну здатність послаблювати випромінювання при мінімальній щільності композицій. Порівняння з відомими аналогами, такими як сферопластики та САПи, довели конкурентоспроможність метал-скляних матеріалів і покриттів: при рівному свинцевому еквіваленті значення $\mu_{\text{мас}}$ матеріалів і покриттів з алюмінієвою матрицею на 20...25 % перевищує $\mu_{\text{мас}}$ для САПів та у 2-3 рази – для синтактиків. Встановлено, що рентгенозахисні властивості клейової композиції ЕД-20–ПСМ не поступаються сферопластичним; це дозволяє її рекомендувати для подальшого застосування в умовах рентгенівських випромінювань. Вплив об'ємного вмісту наповнювачів, матеріалу матриці та структурних особливостей розроблених метал-скляних матеріалів і покриттів можна проаналізувати шляхом моделювання процесів взаємодії випромінювань з елементарною коміркою, виділеною з об'єму композицій.

4.5 Узагальнена модель послаблення іонізуючих випромінювань елементарною коміркою

Мета побудови моделі полягає у створенні наглядного подання про фізичні процеси послаблення випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів, що дає змогу з урахуванням механізмів їх взаємодії із захисним шаром, проектувати багат шарові конструкції, виходячи з умов повного поглинання енергії від РАВ, речовин з поверхневим радіоактивним забрудненням і прогнозувати умови руйнування та радіаційного пошкодження матеріалів.

Будучи нанесеним на сталеву поверхню, метал-скляний захисний шар у кожній точці зазнає впливу дифузного потоку випромінювань від РАВ. У випадках α - і β -випромінювань енергія I_0 повністю поглинається товщиною шару, γ - та РВ – послаблюється у декілька разів; непоглинута її частина

послаблюється сталевим листом і бетонним шаром. Таким чином, втрати енергії відбуваються не тільки у кожному з матеріалів конструкції, але й на поверхні поділу шарів. Від того, які процеси відбуваються саме в метал-скляному шарі, залежить ефективність його застосування та радіаційні пошкодження у інших шарах конструкції біологічного захисту. Головним структурним елементом виділеної елементарної комірки є суцільна частинка з натрійсилікатного або свинцевмісного скла, порожня скляна мікросфера (рис. 4.7), при взаємодії з якими потік іонізуючих випромінювань поглинається за різними механізмами. При взаємодії з ПСМ (рис. 4.7, а) поряд з відбиванням від її скляної поверхні утворюється потрійний ефект поглинання потоку, чого не спостерігається при взаємодії із суцільною скляною частинкою. У порівнянні з покриттями, наповненими суцільними скляними частинками, $\mu_{\text{мас}}$ наповнених ПСМ композицій (табл. 4.6) приблизно на 20 % вище.

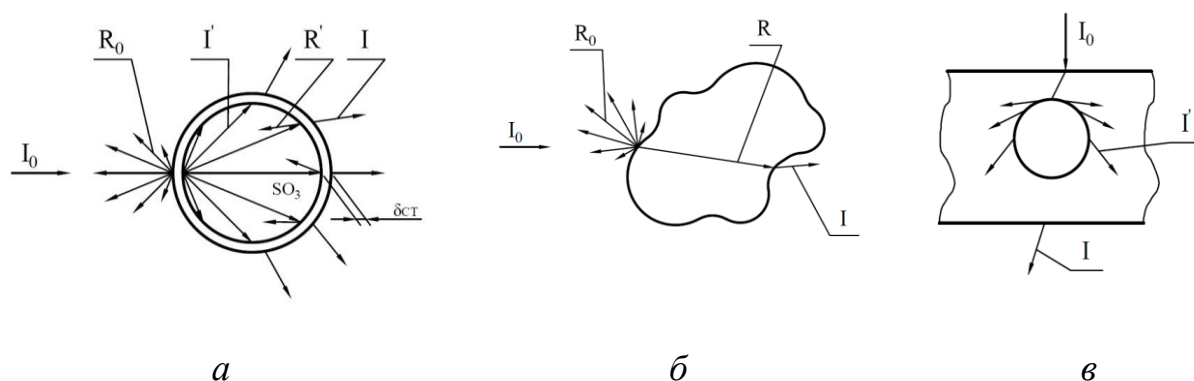


Рисунок 4.7 – Взаємодія потоку випромінювань зі структурними елементами:

а – порожньою скляною мікросферою; *б* – суцільною скляною частинкою; *в* – порою: I_0 – падаючий потік; R'_0 – відбитий від зовнішньої скляної стінки потік;

R – поглинутий скляною частинкою потік; I' – потік, частково відбитий від скляної стінки у середовище SO_3 ; I – потік на виході

Враховуючи основні положення радіаційного оптичного матеріалознавства [13, 402], припускається, що при взаємодії потоку енергії з прозорою скляною частинкою в її об'ємі виникає суцільне пружне розсіювання

енергії випромінювання, причому в областях фокусування внутрішнього оптичного поля воно найбільш інтенсивне. Ефект «потрійного поглинання» посилюється зі збільшенням об'ємного вмісту ПСМ у складі композицій. Ця тенденція підтверджується побудовою експериментальних залежностей $\mu_{\text{мас}}$ для метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-АМг5 і Св-08Г2С (рис. 4.8), максимальна об'ємна кількість мікросфер у складі яких обмежена на рівні $(35 \pm 7 \%)$ через технологічні чинники.

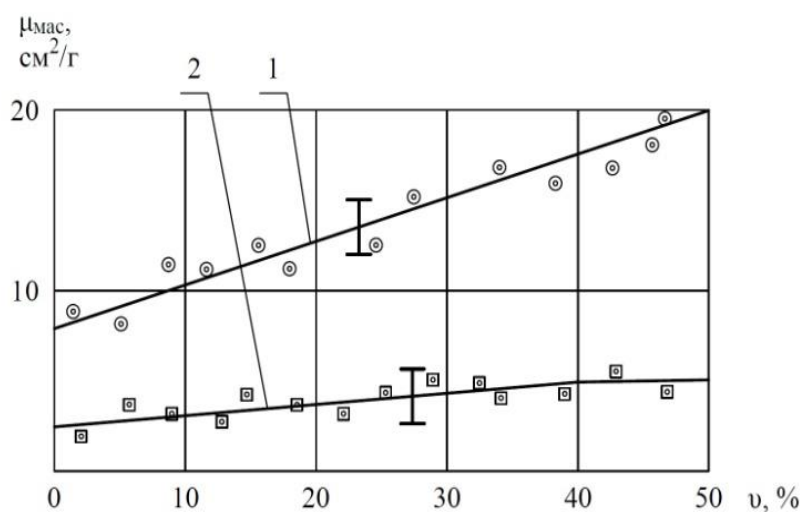


Рисунок 4.8 – Залежність $\mu_{\text{мас}}$ для електродугових покриттів від об'ємного вмісту v ПСМ: 1 – Св-АМг5; 2 – Св-08Г2С

Зіставлення з результатами, наведеними у табл. 4.6, показали, що введення до складу електродугових покриттів скляних наповнювачів $(35 \pm 7 \%$ об'ємн.) приблизно у два рази підвищує масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань, який для композицій Св-АМг5–ПСМ наближується до $\mu_{\text{мас}}$ спечених між собою ПСМ (синтактичного піноскла). Вплив матеріалу матриці на рентгенозахисні властивості можна визначити, аналізуючи гістограми розподілу (рис. 4.9), на яких наведено дані щодо $\mu_{\text{мас}}$ для композицій, наповнених ПСМ. Підвищені рентгенозахисні властивості композицій з алюмінієвою матрицею пов'язані з відбивною здатністю алюмінію [87, 177], яка зменшується зі зростанням енергії джерела і компенсується розсіюванням енергії навколо пор (рис. 4.7), як це підтверджується у роботі [273].

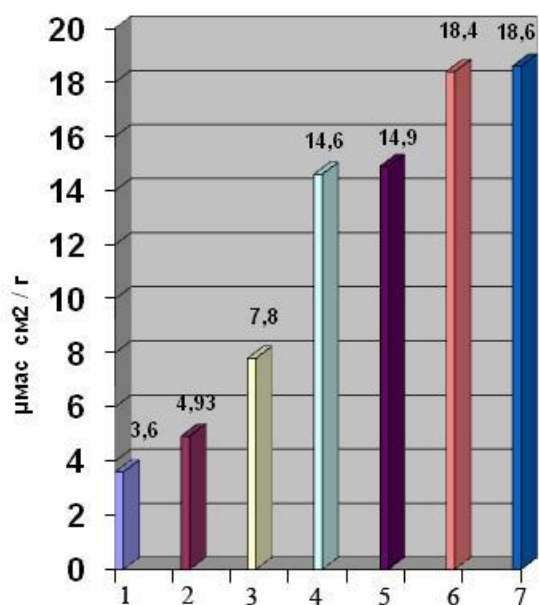


Рисунок 4.9 – Масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань для композицій, наповнених ПСМ: 1 – сферопластик з додатковою пористістю; 2 – покриття Св-08Г2С-ПСМ¹; 3 – сферопластик ЕДС-7А; 4 – синтактичне піноскло; 5 – ПСМ-АІ-порошок; 6 – ПСМ-АІ-пудра; 7 – покриття Св-АМг5-ПСМ

На відміну від покриттів на основі Св-08Г2С у склоалюмінієвих композиціях відбувається часткове відбивання потоку вторинного випромінювання (рис. 4.10).

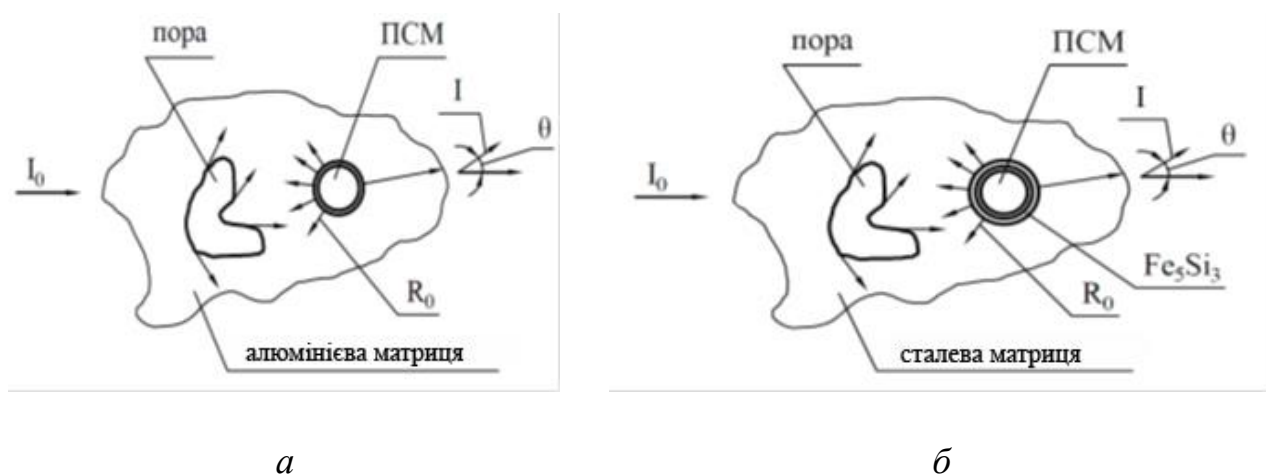


Рисунок 4.10 – Взаємодія потоку випромінювань з елементарною коміркою композицій, наповнених ПСМ: *a* – з алюмінієвою матрицею; *б* – зі сталеву матрицею: I_0 – падаючий потік; R'_0 – відбитий від стінки мікросфери потік; I – потік на виході з комірки

Падаючий потік I_0 , проходячи через елементарну комірку, розсіюється навколо пори, частково відбивається з енергією R_0 від стінки ПСМ, частково

¹ Об'ємний вміст ПСМ у складі електродугових покриттів (35±7 %)

нею поглинається і далі пропускається до наступної комірки з енергією I . В покриттях композиції Св-08Г2С відбувається додаткове поглинання енергії субструктурними елементами Fe_5Si_3 з розміром ОКР 87 нм. Дослідженням нанорозмірних елементів структури (нано-частинок, субзерен, кристалітів тощо) на підвищення радіаційної стійкості композиційних матеріалів і покриттів, зокрема з алюмінієвою та сталєвою матрицями, присвячені роботи [6–8, 14, 21, 87, 150, 165, 200, 224, 253, 254, 357], на відміну від яких встановлено можливість формування субструктурних елементів з розміром ОКР 75...97 нм шляхом проведення ПТО при температурі початку рекристалізації матриці 500 °С, що сприятиме підвищенню масового коефіцієнта послаблення РВ $\mu_{\text{мас}}$ приблизно на 27 %. Незважаючи на ефективність ПТО для підвищення рентгенозахисних властивостей електродугових покриттів на основі Св-08Г2С, застосування її для крупногабаритних виробів ускладнене через короткочасне нагрівання.

Вплив наповнювачів на масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань можна встановити, аналізуючи гістограми $\mu_{\text{мас}}$ для покриттів на основі Св-08Г2С, наповнених ПСМ, порошками натрійсилікатного, свинцевмісного скла (рис. 4.11).

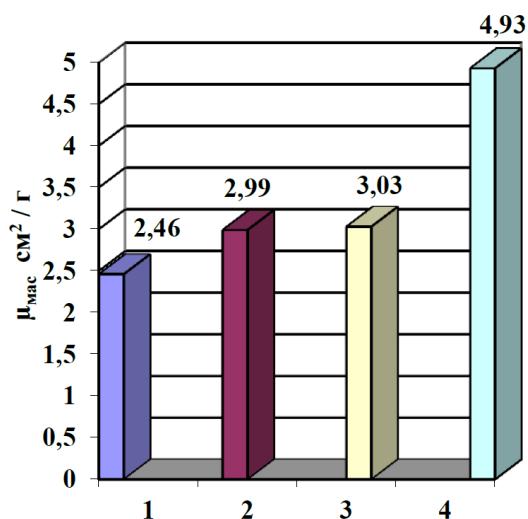


Рисунок 4.11 – Масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань покриттями з Св-08Г2С: 1 – без наповнювача; і наповнених²:
2 – натрійсилікатним склом; 3 – свинцевмісним склом; 4 – ПСМ

² Об'ємний вміст скляних включень у складі електродугових покриттів (35±7 %)

При взаємодії з елементарною коміркою метал-скляних покриттів, наповнених суцільними порошками (рис. 4.12), падаючий потік випромінювань I_0 розсіюється навколо пори, частково відбивається від стінки скляного включення і поглинається ним, решта енергії далі пропускається до наступних елементарних об'ємів. Таким чином, у метал-скляних покриттях спостерігається ефект багаторазового внутрішнього відбивання від скляних частинок у структурно неоднорідне середовище поглинання металевої матриці. При збільшенні об'ємного вмісту скляних включень у складі композицій цей ефект посилюється, що сприяє зростанню рентгенозахисних показників.

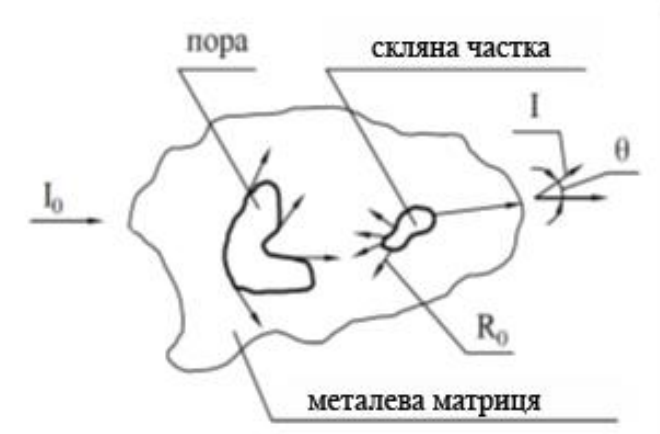


Рисунок 4.12 – Взаємодія потоку випромінювань з елементарною коміркою метал-скляних покриттів, наповнених суцільними скляними частинками:

I_0 – падаючий потік; R'_0 – відбитий від зовнішньої скляної стінки потік;

I – потік на виході з комірки; θ – кут когерентного розсіювання

При взаємодії випромінювань з елементарною коміркою спечених склоалюмінієвих матеріалів (ПСМ – Al-порошок, ПСМ–Al-пудра) має місце такий самий механізм, як і у випадку з електродуговими покриттями на основі Св-АМг5, що підтверджується експериментальними результатами щодо визначення масового коефіцієнта послаблення рентгенівських випромінювань (рис. 4.13). Застосування метал-скляних електродугових покриттів дозволяє зменшити товщину захисного шару навіть удвічі у порівнянні з покриттям без

наповнювача. Як еталон для вибору товщини в роботі запропоновано свинцевий еквівалент (рис. 4.14).

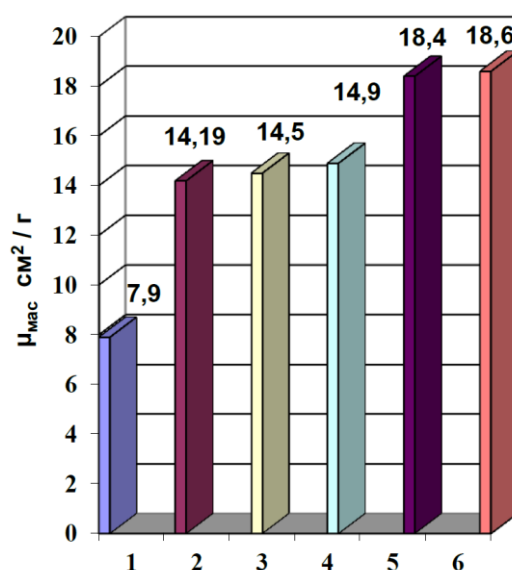


Рисунок 4.13 – Масовий коефіцієнт послаблення рентгенівських випромінювань матеріалами і покриттями з алюмінієвою матрицею:
 1 – покриття Св-АМг5 (без наповнювача); 2 – Св-АМг5–натрійсилікатне скло;
 3 – Св-АМг5–свинцевмісне скло; 4 – Св-АМг5 –ПСМ; 5 – ПСМ – Al-порошок;
 6 – ПСМ – Al-пудра

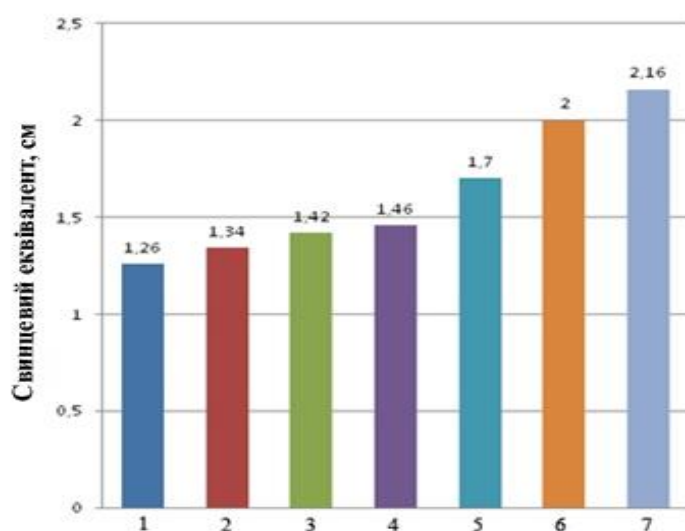


Рисунок 4.14 – Свинцевий еквівалент для композиційних матеріалів і покриттів: 1 – Св-08Г2С–ПСМ; 2 – Св-АМг5–ПСМ; 3 – Св-АМг5–свинцевмісне скло; 4 – Св-АМг5–натрійсилікатне скло; 5 –спечені склоалюмінієві КМ; 6 – Св-08Г2С–свинцевмісне скло; 7 – Св-08Г2С–натрійсилікатне скло

Свинцевий еквівалент листової сталі і алюмінію товщиною 1 см відповідно дорівнюють 2,5 і 5,0 см. Замінити традиційне свинцеве облицювання товщиною 3 мм нанесенням захисного метал-скляного шару $\delta = 4 \dots 6$ мм; товщиною 5 мм – $\delta = 7 \dots 10$ мм. Проте при виборі товщини захисного шару конструкцій біологічного захисту слід також враховувати технологічні вимоги, зокрема міцність зчеплення зі сталеву поверхню ($\sigma_{\text{відр}} = 15 \dots 27$ МПа), і обмеження, які пов'язані зі способом нанесення покриття.

Таким чином, рекомендована товщина для склоалюмінієвих плиток складає більш ніж 10 мм, для шару електродугових покриттів – 1,5...2 мм: це забезпечує такий самий захист, як і облицювання шаром свинцю $\delta = 1$ мм.

4.6 Вплив γ -випромінювань на структуру і властивості метал-скляних електродугових покриттів; дослідження їх екрануючої здатності

Ефективність застосування метал-скляного шару суднових конструкцій біологічного захисту в умовах безпосередньої дії γ -випромінювань визначається їх екрануючої здатністю, стабільністю механічних властивостей і відсутністю суттєвих структурних змін. Експериментальні роботи проведено на зразках у вигляді сталевих пластин із Ст3 розміром $140 \times 100 \times 1,5$ мм, на які з одного боку нанесено електродугові покриття на основі Св-08Г2С і Св-АМг5. Опромінення здійснено на базі ДП «Радма» Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України [274, 352], для чого застосовані джерело випромінювань типу ГИК 7-4 (ізоотоп Co^{60}) виробництва ФГУП ПО «Маяк» [78] і лінійний прискорювач ИЛУ-6 (розробник Інститут ядерної фізики ім. Г.І. Будкера СВ РАН «Россия») [90]. Постановка досліджень включала в себе опромінення зразків протягом 7 год джерелами з сумарною активністю 37127 Кі, що наближає умови випробувань до експлуатаційних. Для цього застосовано герметично закритий контейнер з нержавіючої сталі (Додаток Б, рис. Б.2), у якому у 30 каналах, розташованих по периметру, було розміщено джерела енергії: на ГИК 7-4 (рис. Б.3, енергія ізоотопів Co^{60} – 4,5 МеВ)

опромінено пластинки з покриттями, наповненими свинцевмісним склом; на ИЛУ-6 (рис. Б.4) – пластинки з покриттями, наповненими ПСМ і натрійсилікатним склом (енергія електронів 2,0 MeV). Поглинуту дозу D вимірено за допомогою плівкових дозиметрів СО ПД(Ф) 5/150 ТСО 4447-8, детектори прикріплено на фронтальній і тильній відносно опромінювача поверхні. Поряд зі сталевими (Ст3) пластинками з метал-скляними покриттями опромінення зазнавали пластинки з ненаповненими покриттями і пластинки без покриття. За результатами вимірювань побудовано гістограми (рис. 4.15), як еталон обрано пластинку Ст3 без покриття, для якої кратність послаблення γ -випромінювань прийнято за одиницю.

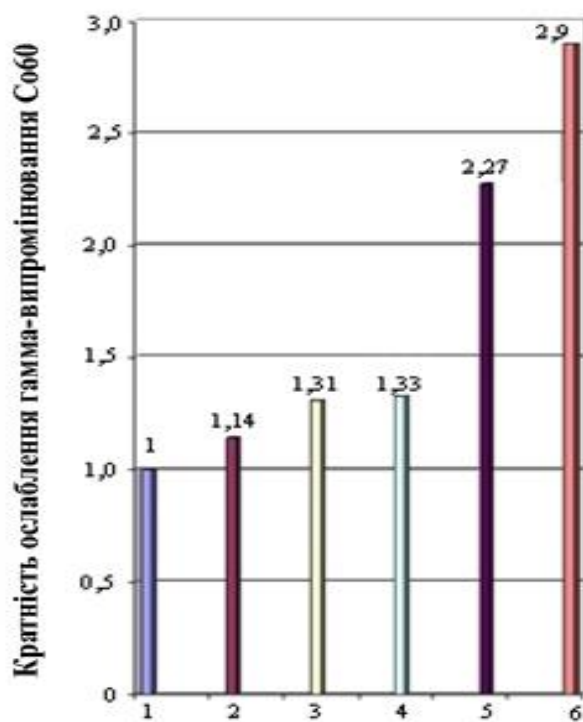


Рисунок 4.15 – Кратність послаблення γ -випромінювання Co^{60} композиціями, наповненими свинцевмісним склом: 1 – Ст3 без покриття (еталон); 2 – Ст3 з покриттям з Св-08Г2С; 3 – склотканина ТФ-10; 4 – фенолоформальдегідна свинцевмісна тканина; 5 – Ст3 з покриттям з Св-АМг5; 6 – пластина свинцю

Експериментально встановлено, що покриття товщиною 2 мм на основі Св-08Г2С екранує Ст3 на 28 % (кратність послаблення 1,14), на основі Св-

АМг5 – на 56 %, для якої кратність послаблення складає 2,27 та наближається до кратності пластинки з чистого свинцю (кратність послаблення 2,9). На гістограмах наведено порівняння захисних властивостей метал-скляних покриттів, наповнених порошком свинцевмісного скла ($35 \pm 7\%$ об'ємн.) з іншими композиційними матеріалами, наповненими свинцевмісним скловолокном: одержані результати показують ефективність застосування розроблених метал-скляних покриттів в умовах γ -випромінювань. Дослідження структури зразків та їх властивостей до та після опромінювань проведено на кафедрі матеріалознавства і технології металів НУК імені адмірала Макарова. Мікрорельєф поверхні визначено методом електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА-102-02 і оптичного мікроскопа ММР-2. За ознаку радіаційної пошкоджуваності прийнято пористість поверхневого шару (поверхнева пористість) та розмір пор, для визначення яких відповідно застосовано гідростатичне зважування (ГОСТ 85281-82) зразків без підкладки і комп'ютерна металографія [188]. Результати порівняно зі зразками опромінених електродугових покриттів без наповнювача. Мікротвердість вимірено по ГОСТ 9450-76 на нетравлених поперечних мікрошліфах за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3; навантаження на індентор при вимірюванні Н_м скляних включень склало 200 г, металевій матриці – 20 г. За критерій радіаційної стійкості обрано стабільність фазового складу покриттів, що визначено порівнянням результатів РСА зразків до та після їх опромінення. Для рентгеноструктурних досліджень застосовано установку ДРОН-3, зйомку дифрактограм здійснено зі зразків покриттів товщиною 2 мм, відокремлених від підкладки, у випромінюванні міді $\text{Cu}_{k\alpha=1,54178}$ при напруженні $U = 48$ кВт, струм накаливання $I = 28$ мА; у випромінюванні молібдену $\text{Mo}_{k\alpha=0,170696}$ – за режимами: $U = 50$ кВ; $I = 40$ мА. Для ідентифікації фаз використано довідникові таблиці [395]; розмір ОКР визначено за методикою Селякова–Шеррера [61]. Поверхневу пористість (табл. 4.8) досліджено на електронно-мікроскопічних знімках (у збільшенні 90 разів для композицій на основі Св-АМг5 і 120 разів – для Св-08Г2С) та оптичних мікрофотографіях ($\times 350$), виділених з найбільш інформативних ділянок.

Таблиця 4.8 – Фізико-механічні властивості електродугових
покриттів до та після опромінення

Властивості	Скляний наповнювач у покритті			
	ненапов- нене покриття	ПСМ	натрій- силікатне скло	свинце- вмісне скло
<i>Електродугові покриття на основі Св-08Г2С товщиною 2 мм</i>				
Щільність, кг/м ³				
до опромінення	7055	5800	7025	6065
після опромінення	6995	5715	7025	6065
Поверхнева пористість, %				
до опромінення	17	19	20	22
після опромінення	25	20	20	22
Середній розмір пор, мкм				
до опромінення	6,5...8,0	5,0...7,6	5,2...6,6	3,9...5,4
після опромінення	11,1...14,5	4,5...7,0	4,5...6,5	3,5...5,0
Мікротвердість покриттів до опромінення				
$H_{\mu 20}$ матриці, МПа	1280	1325	1300	1310
$H_{\mu 200}$ скла, МПа	–	1250	1400	1370
Мікротвердість покриттів після опромінення				
$H_{\mu 20}$ матриці, МПа	2855	2645	3335	2925
$H_{\mu 200}$ скла, МПа	–	1310	1500	1420
<i>Електродугові покриття на основі Св-АМг5 товщиною 2 мм</i>				
Щільність, кг/м ³				
до опромінення	1700	1480	1770	1860
після опромінення	1695	1480	1665	1860
Поверхнева пористість, %				
до опромінення	12	22	20	18
після опромінення	26	25	22	20
Середній розмір пор, мкм				
до опромінення	2,4...2,7	2,1...3,5	1,9...2,0	2,2...3,6
після опромінення	3,5...5,0	4,0...6,5	2,0...2,5	4,0...6,5
Мікротвердість покриттів до опромінення				
$H_{\mu 20}$ матриці, МПа	345	375	355	365
$H_{\mu 200}$ скла, МПа	–	1270	1420	1340
Мікротвердість покриттів після опромінення				
$H_{\mu 20}$ матриці, МПа	925	960	925	925
$H_{\mu 200}$ скла, МПа	–	1280	1480	1350

Дослідження структури опромінених електродугових покриттів свідчать про відсутність у них фазових перетворень, проте для покриттів без наповнювачів спостерігається збільшення пористості (рис. 4.16), яке є менш очевидним для композицій, наповнених склом. Це пояснюється тим, що процес опромінення супроводжується тепловими ефектами з його можливим оплавленням, що приводить до зростання мікротвердості та змін рельєфу поверхні, а саме збільшення пористості поверхневого шару: навіть удвічі для покриття Св-АМг5 і на 47 % – для Св-08Г2С. При цьому розмір пор відповідно зростає на 40...50 % і на 70%, а мікротвердість $H_{\mu 20}$ у 2,5 рази для покриттів Св-АМг5 і на 70 % – для Св-08Г2С.

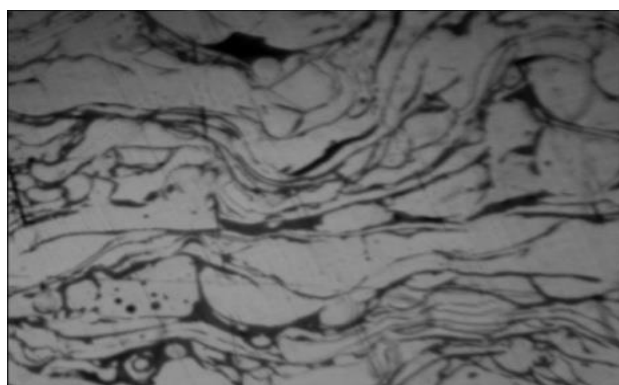
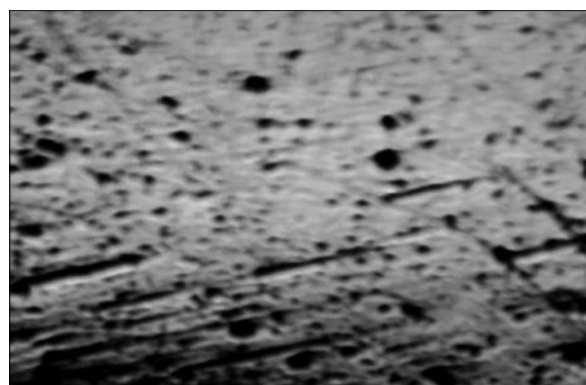
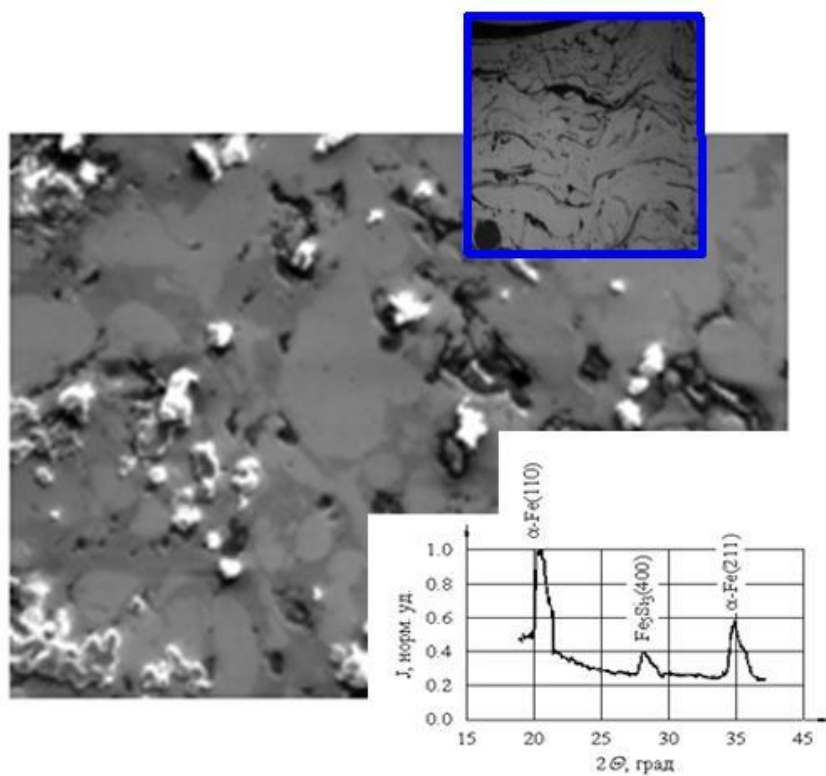
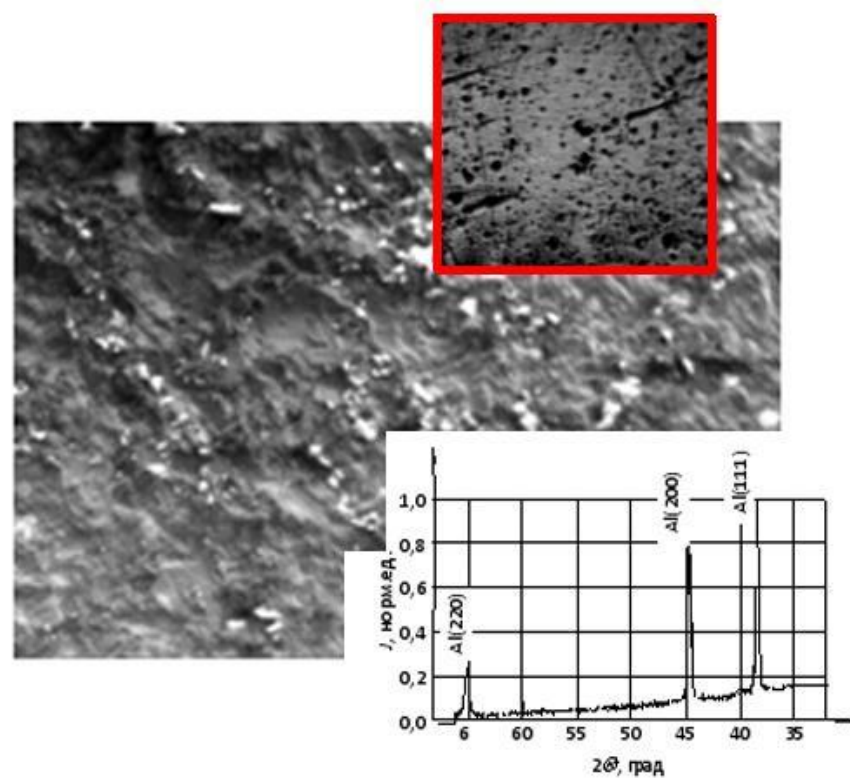
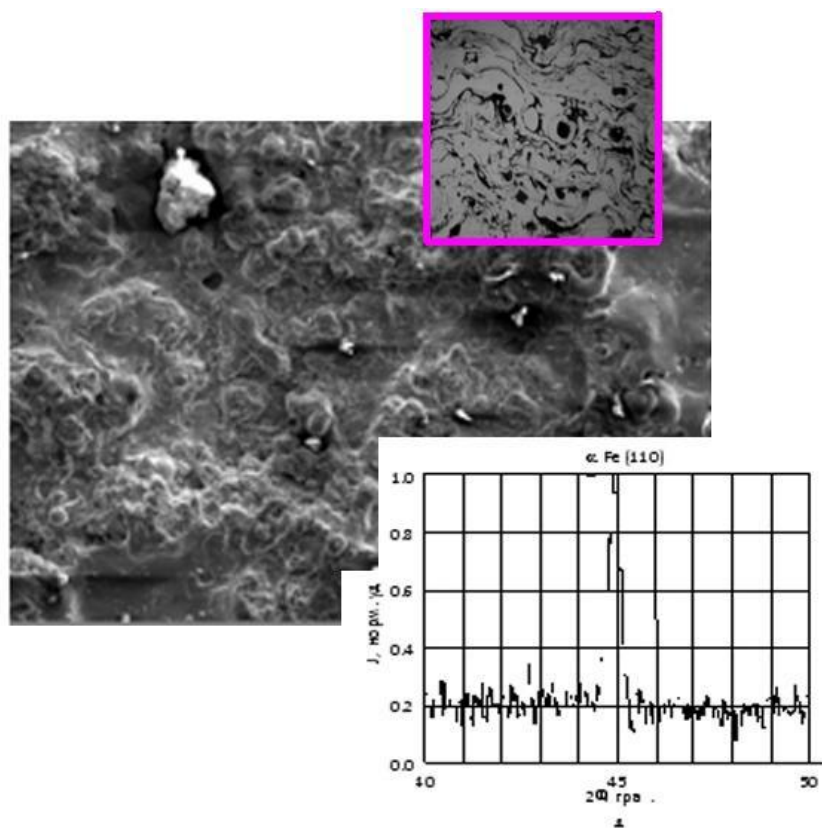
*a**б*

Рисунок 4.16 – Мікроструктури електродугових покриттів після опромінення (енергія $E = 2,0$ МэВ, поглинута доза опромінення $D = 100$ кГр):
a – покриття із Св-08Г2С ($\times 370$); *б* – покриття із Св-АМг5 ($\times 100$)

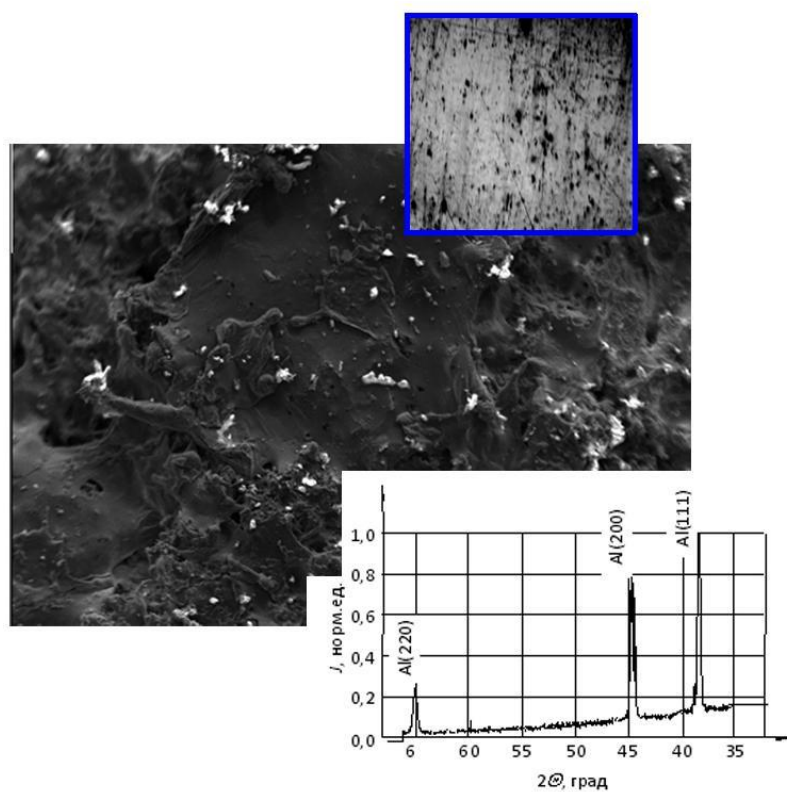
Незважаючи на те, що скляні включення є концентраторами напружень, на поверхні з якими відбуваються процеси енерговиділення та теплові втрати, після опромінення покриттів через високу теплостійкість їх мікротвердість навіть не змінюється. Таким чином, наявність скляних включень у структурі не тільки підвищує рентгенозахисні властивості електродугових покриттів, але й «гальмує» розвиток пористості, що сприяє підвищенню їх радіаційної стійкості.

Наведені на рис. 4.17 фрагменти дифрактограм опромінених метал-скляних покриттів свідчать про їх структурну стабільність.

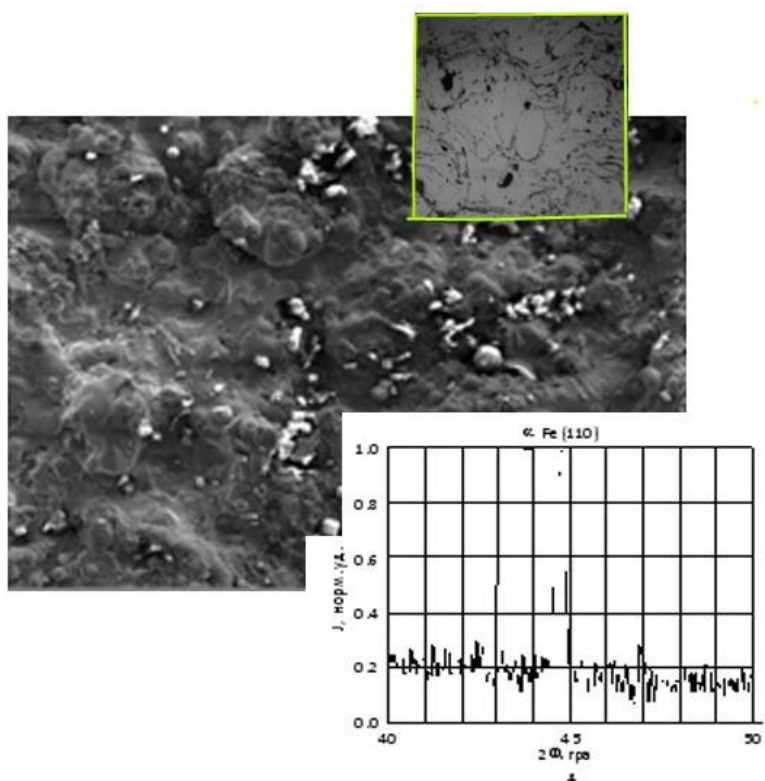
*a**б*



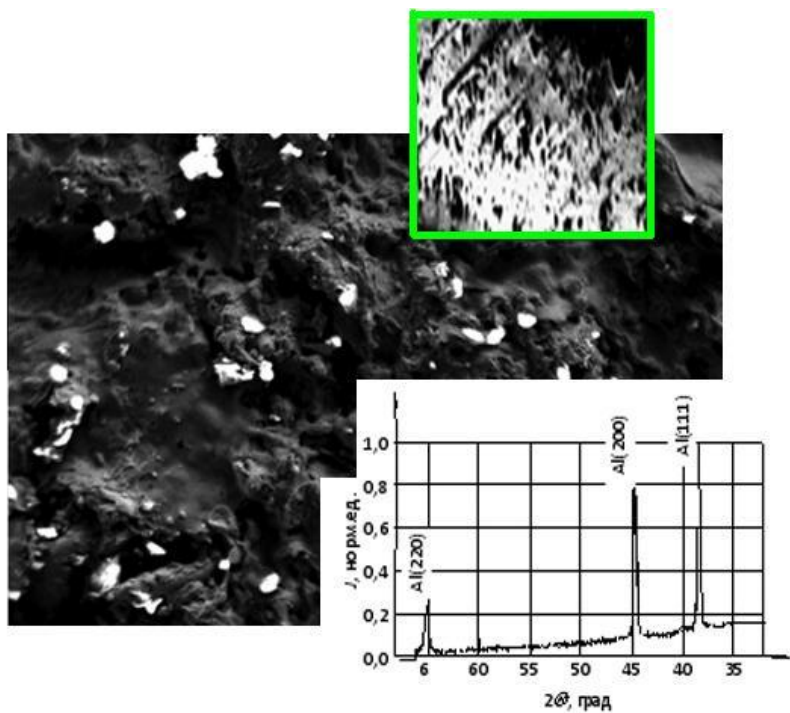
6



2



а



д

Рисунок 4.17 – Мікроструктури і фрагменти дифрактограм опромінених метал-скляних електродугових покриттів: *а* – Св-08Г2С–ПСМ; *б* – Св-АМг5–ПСМ; *в* – Св-08Г2С–натрійсилікатне скло; *г* – Св-АМг5–натрійсилікатне скло; *д* – Св-08Г2С–свинцевмісне скло; *е* – Св-АМг5–свинцевмісне скло

Мікроструктуру опроміненої пластинки Ст3 наведено на рис. 4.18, механічні властивості – у табл. 4.9.

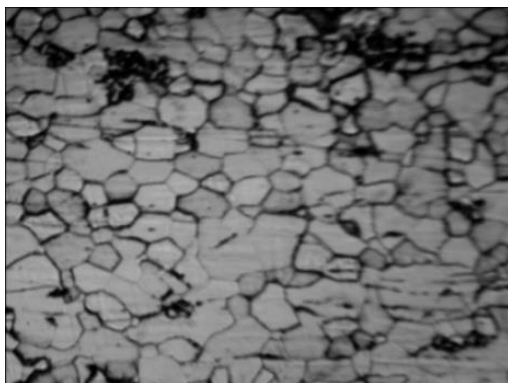


Рисунок 4.18 – Мікроструктура ($\times 370$)
опроміненого зразка Ст3
($E = 2,0 \text{ MeV}$, $D = 100 \text{ кГр}$)

Встановлено, що поглинута доза γ -випромінювань не викликає структурно-фазових змін: структура складається з дрібних зерен фериту із середнім розміром $0,02 \dots 0,025 \text{ мм}$, що відповідає 8-му балу шкали по ГОСТ 5639-82, у середині зерен та на їх границях розташований цементит різної форми та розмірів, що збігається з результатами досліджень структур до опромінення.

Границю міцності на розрив σ_b і границю текучості σ_t визначено за результатами розтягування пластинок Ст3 розміром $140 \times 100 \times 1,5 \text{ мм}$ на розривній машині ИР 5057-50 зі швидкістю навантаження $2,5 \text{ мм/хв}$, на якій також визначено міцність зчеплення покриттів з підкладкою. На пластинках Ст3 без покриттів за допомогою приладу ТПП-10 вимірено твердість за Віккерсом HV_5 .

Таблиця 4.9 – Механічні властивості пластин Ст3 до та після опромінення

Механічні властивості	До опромінення	Після опромінення $E = 2,0 \text{ MeV}$
Границя міцності на розрив, σ_b , МПа	365,0	371,0
Границя текучості, σ_t , МПа	292,5	302,5
Твердість за Віккерсом, HV_5 , МПа	1460	1485

Результати показали зростання твердості за Віккерсом HV_5 на 15 %, границі міцності на розрив σ_b і границі текучості σ_t – на 22...25 %, що вказує на радіаційне зміцнення пластинки Ст3 під дією опромінення. Зіставлення

отриманих даних з результатами механічних випробувань зразків з покриттями (таблиці 4.9 і 4.10) показали, що нанесення метал-скляних покриттів усуває радіаційне зміцнення пластин Ст3, забезпечуючи додатковий захист при формуванні конструкцій біологічного захисту суден і плавучих споруд.

Таблиця 4.10 – Механічні властивості пластин Ст3 з метал-скляними покриттями до та після опромінення

Властивості	Скляний наповнювач у покритті			
	ненаповнене покриття	порожні скляні мікросфери	натрійси-лікатне скло	свинце-вмісне скло
<i>Ст3 з покриттям на основі Св-08Г2С товщиною 2 мм</i>				
Границя міцності на розрив σ_B , МПа				
до опромінення	323,0	315,0	344,0	318,0
після опромінення	328,0	318,0	350,0	320,0
Границя текучості σ_T , МПа				
до опромінення	265,0	260,0	275,0	260,0
після опромінення	275,0	280,5	285,0	278,0
<i>Ст3 з покриттям на основі Св-АМз5 товщиною 2 мм</i>				
Границя міцності на розрив σ_B , МПа				
до опромінення	327,0	328,0	338,18	336,15
після опромінення	341,0	340,0	350,0	342,5
Границя текучості σ_T , МПа				
до опромінення	268,0	266,0	287,0	284,0
після опромінення	288,70	287,0	300,0	290,0

Таким чином, одержані експериментальні результати підтверджують установлені закономірності послаблення іонізуючих випромінювань структурними елементами та свідчать про радіаційну стійкість розроблених метал-скляних електродугових покриттів в умовах, наближених до експлуатаційних, та надалі застосовуються у міцнісних розрахунках конструкцій.

4.7 Термомеханічні процеси в опроміненому метал-скляному захисному шарі

Прогнозування механізмів руйнування метал-скляного шару в умовах теплових ефектів під час опромінення при транспортуванні або зберіганні радіоактивних вантажів, є важливою задачею при проектуванні елементів біологічного захисту, вирішення якої можливе шляхом моделювання термомеханічних процесів. Дифузні потоки випромінювань частково поглинаються метал-скляним захисним шаром, при цьому енергія випромінювань перетворюється на теплову, непоглинута її частка передається на інші шари конструкцій: таким чином утворюються теплові навантаження, які можуть призвести до руйнування та знеміцнення шарів (рис. 4.18).

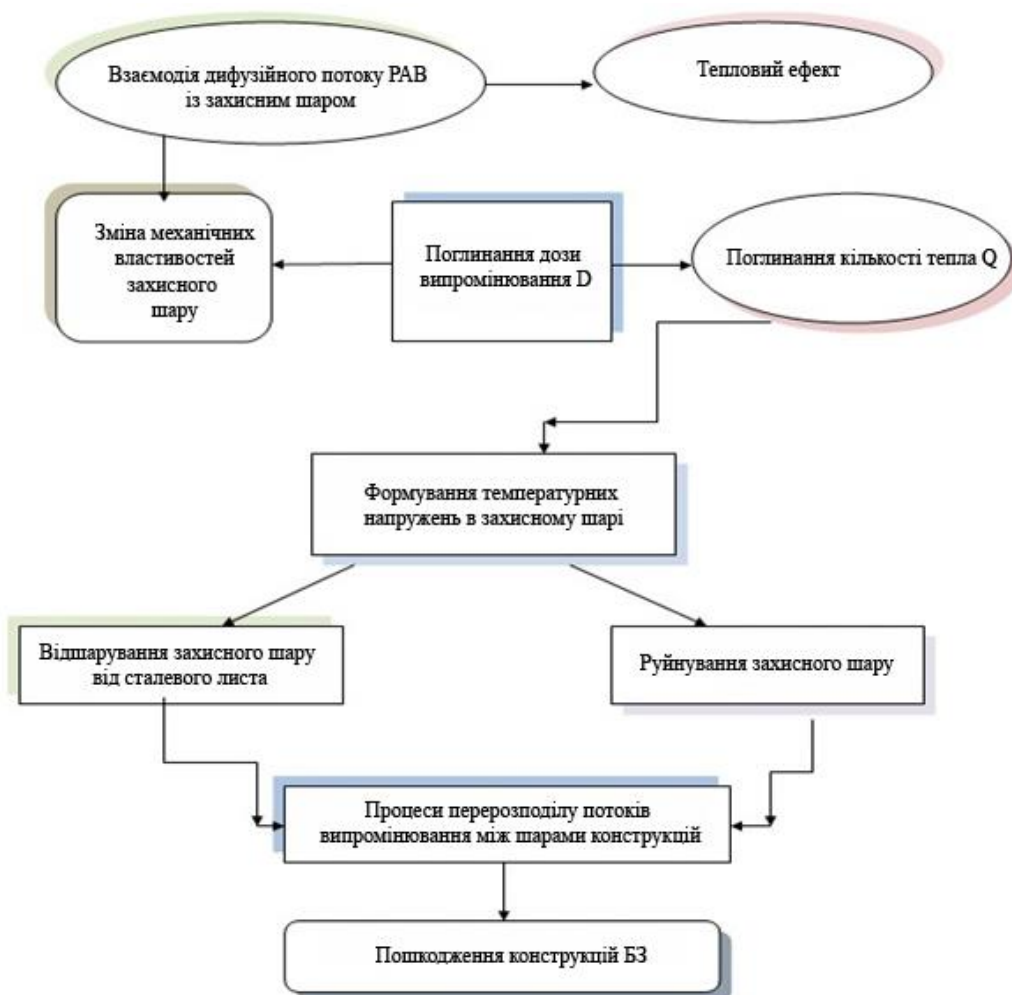
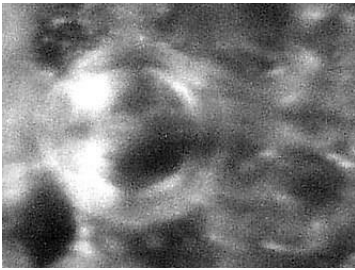
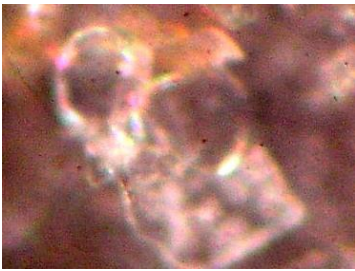
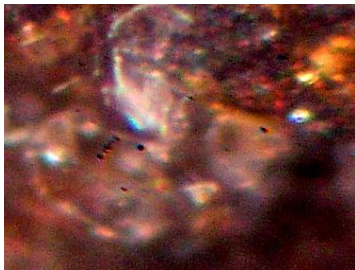


Рисунок 4.18 – Механізми знеміцнення конструкцій біологічного захисту під дією термомеханічних процесів у опроміненому захисному шарі

4.7.1 Термомеханічна модель поведінки опроміненого захисного метал-скляного шару в умовах теплових ефектів

Метою розробки моделі є опис механізмів деформації мікрооб'ємів у захисному метал-скляному шарі конструкції і визначення умов його руйнування під дією теплових ефектів залежно від об'ємного наповнення і розміру скляних включень. В основу моделі покладено гіпотезу про руйнування метал-скляного шару на поверхні поділу фаз метал–скло (табл.4.11).

Таблиця 4.11 – Характерні модельні області матеріалів і покриттів

Модельна область	Фрагмент мікроструктури, $\times 300$	Характеристика модельної області
1		Порожня скляна мікросфера оточена металом. Модель є характерною для склоалюмінієвих спечених матеріалів і електродугових покриттів, наповнених ПСМ. Температурні напруження виникають на поверхні поділу метал–скло.
2		Області спечених між собою порожніх скляних мікросфер: характерні для склоалюмінієвих спечених матеріалів. Температурні напруження виникають на межі між спеченими ПСМ і на поверхні метал–скло
3		Каркас зі спечених ПСМ, заповнений металом: фрагмент є характерний для склоалюмінієвих спечених матеріалів. Температурні напруження виникають як на поверхні поділу метал–скло, так і на межі між спеченими мікросферами

Для спрощення поставленої задачі введено наступні припущення: об'єм елементарної комірки при теплових навантаженнях залишається незмінним; у захисному шарі протягом всієї експлуатації не відбувається структурно-фазових перетворень; через малу товщину поверхні поділу метал–скло величини відносних радіальних деформацій скляних включень прирівнюються

до відносних радіальних деформацій металевої матриці. Геометричні уявлення поставленої задачі ґрунтуються на результатах структурних особливостей метал-скляних матеріалів і покриттів, згідно з якими в об'ємному масиві композицій можна виділити три характерні модельні області.

Розглянемо формування температурних напружень для кожного з випадків.

Модель 1. Задачу розглянуто на прикладі елементарної комірки радіусом R , яка являє собою пористу металеву матрицю з порожнім сферичним включенням (ПСМ) радіуса R_1 і товщиною стінки δ (рис. 4.19).

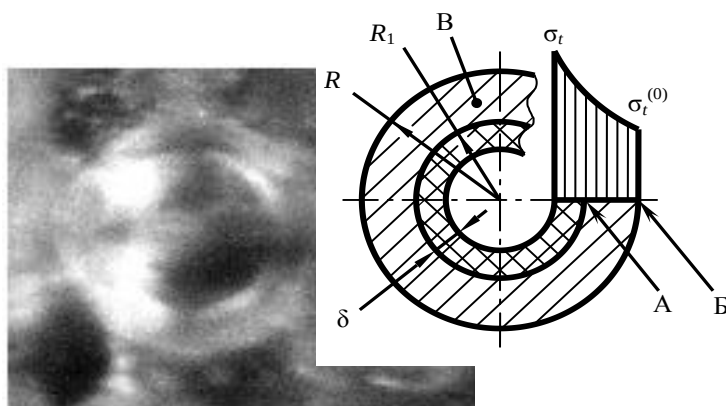


Рисунок 4.19 – Елементарна комірка: σ_t – температурні напруження на поверхні поділу фаз (т. А); $\sigma_t^{(0)}$ – температурні напруження на границі виділеного елемента (т. Б); т. В – металева матриця

Температурні напруження на поверхні поділу фаз метал-скло можна визначити з формули (4.10), а на межі виділеного елемента – з формули (4.16) [164, 166]

$$\frac{\sigma_t}{K_m} = \frac{3(\alpha_s \cdot \Delta T - \Delta m) \cdot (1 + 2\vartheta_s)}{2 \left(\frac{K_m}{K_s} \cdot \vartheta_m + \rho + \vartheta_s \right)}, \quad (4.16)$$

$$\frac{\sigma_t^{(0)}}{K_m} = \frac{9(\alpha_s \Delta T - \Delta m) \cdot \vartheta_s}{2 \left(\frac{K_m}{K_s} \cdot \vartheta_m + \rho + \vartheta_s \right)}, \quad (4.17)$$

де α_s – ТКЛР скла мікросфер, K^{-1} ; α_m – ТКЛР металевої матриці; ϑ_s – об'ємний вміст ПСМ у складі композицій; ρ – щільність композицій; K_m – умовний модуль пружності об'ємного стискання металевої матриці; K_s – умовний модуль об'ємного стискання ПСМ; ΔT – різниця температур; $\Delta m = \alpha_m \cdot \Delta T$ – лінійна деформація металевої матриці.

На відміну від найближчого аналога, який у математичній формі описує температурні деформації для сферопластиків за допомогою рівнянь (4.16) і (4.17), умовні модулі пружності K_m і K_s є функціями пористості металевої матриці та пористості, яка знаходиться всередині ПСМ, тобто об'ємного наповнення.

Допустимі напруження розраховуються за формулою (4.18) [317]:

$$\sigma_{екв} = \frac{\alpha ET}{1-\nu}, \quad (4.18)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона металевої матриці; T – температура експлуатації.

У розрахунках замість α слід застосовувати значення α^* для метал-скляних композицій, замість модуля пружності $E - K'_m$.

Для електродугових покриттів, наповнених суцільними частинками вводиться припущення про наближення форми скляних включень до сферичної. Узагальнені результати розрахунків допустимих напружень в діапазоні температур $0...500^\circ\text{C}$ у вигляді полів наведено у напівлогарифмічних координатах на рис. 4.20.

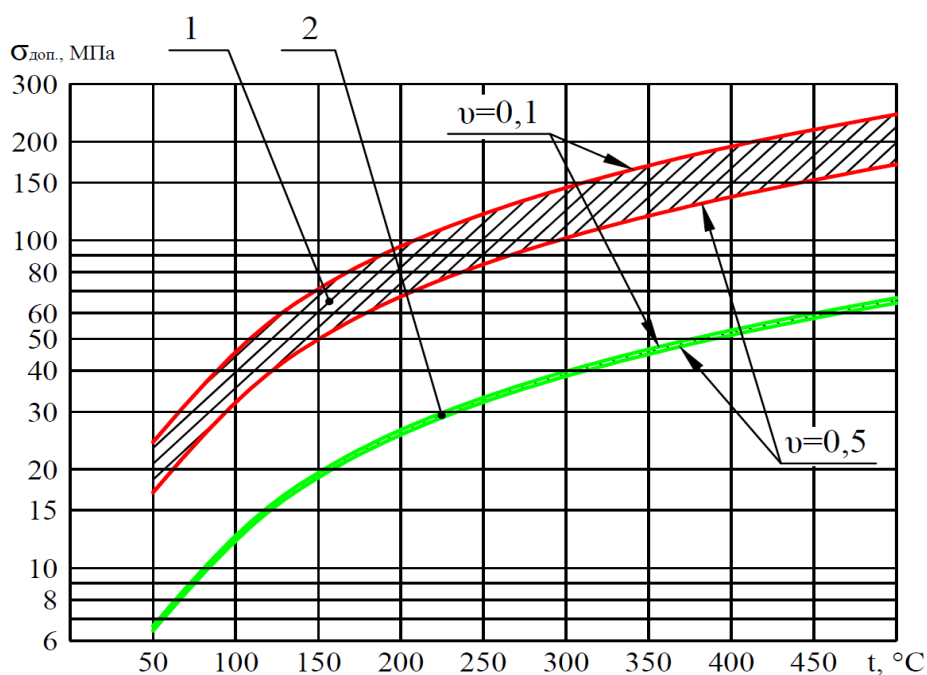


Рисунок 4.20 – Поля допустимих напружень на поверхні поділу:

1 – алюміній–скло; 2 – сталь–скло

Для розрахунків використано діапазони температур, що відповідають потужності остаточного тепловиділення РАВ у межах 2...20 кВт. Графічні залежності температурних напружень від температури для склоалюмінієвих матеріалів з об'ємним вмістом ПСМ 50 % і електродугових покриттів з об'ємним вмістом скляних порошків 35 ± 7 % наведено на рис. 4.21.

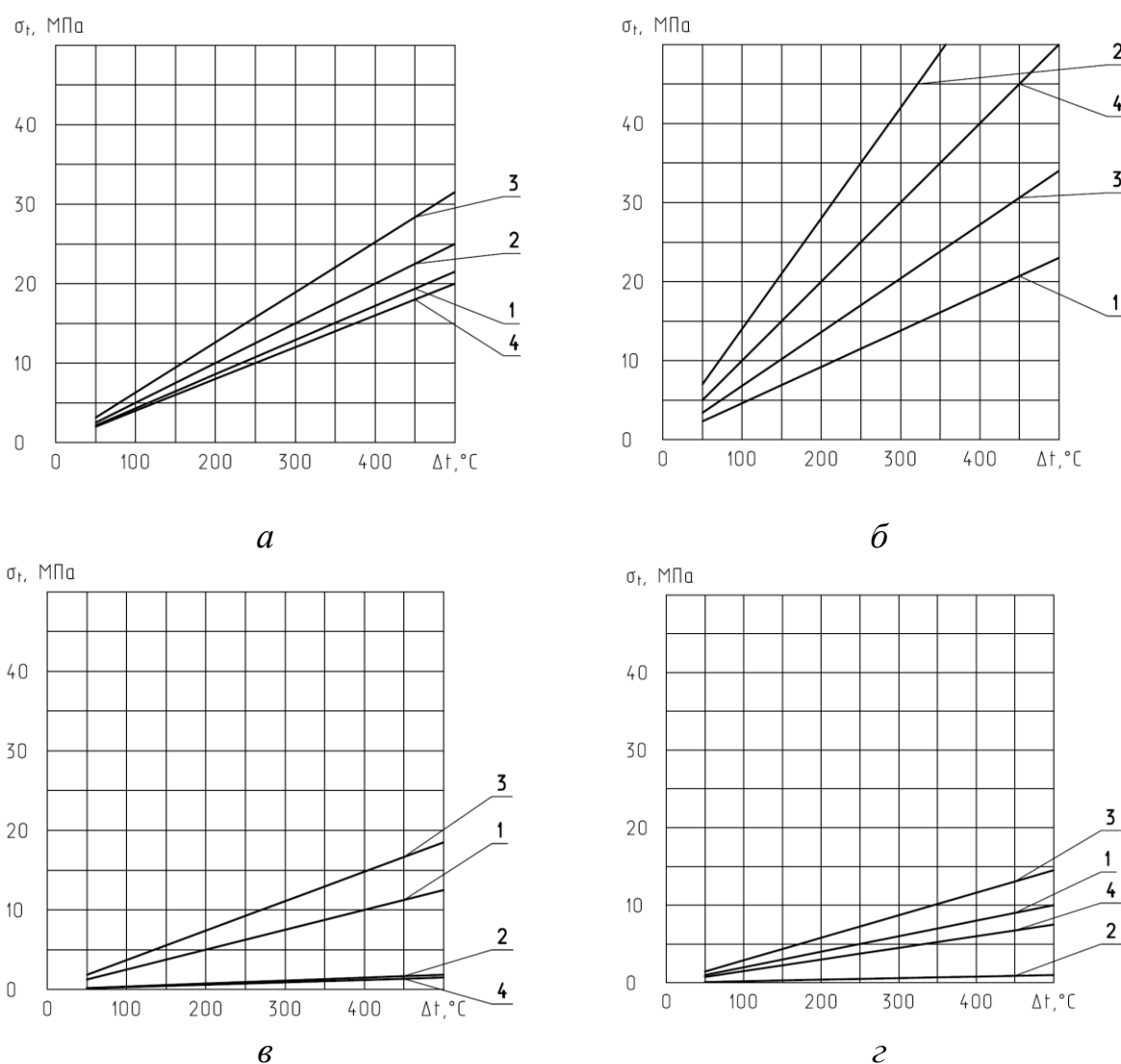


Рисунок 4.21 – Залежність температурних (тангенціальних) напружень від температури для: *a* – електродугових покриттів Св-АМг5–скло; *б* – склоалюмінієвих спечених матеріалів; *в* – електродугових покриттів Св-08Г2С–ПСМ; *г* – Св-08Г2С–скло: 1 – на поверхні поділу метал–скло для безпористих структур; 2 – на поверхні поділу метал–скло з урахуванням пористості; 3 – на границі виділеної комірки для безпористих структур; 4 – на границі виділеної комірки з урахуванням пористості

Результати показали тенденцію збільшення концентрації напружень на поверхні поділу метал–скло, яка спостерігається при зростанні температури, проте їх величина не перевищує допустимих значень (рис. 4.20). Теоретичні значення (рис. 4.21, лінії 1, 3), які одержано для безпористих структур, навіть удвічі перевищують аналогічні значення для пористих композицій. Таким чином, наявність пористості (10...20 %) у структурі метал-скляних матеріалів і покриттів практично у 2 рази знижує напруження, які виникають внаслідок теплових ефектів. Максимальні температурні напруження формуються у склоалюмінієвих композиціях на поверхні алюміній–скло слабшають у напрямку до границі виділеного елемента (рис. 4.21, лінії 2, 4). З наведених на рис. 4.21 графічних залежностей видно, що склад і форма скляних наповнювачів несуттєво впливає на формування полів допустимих напружень.

Модель 2. Температурні напруження, які виражено формулами (4.16) і (4.17), наведені для випадку рівномірного розподілу скляних включень у структурі пористої матриці. Проте в структурі склоалюмінієвих спечених матеріалів можна виділити характерні локальні ділянки спечених між собою мікросфер (табл. 4.10). У цьому випадку поверхня поділу фаз являє собою подвійну стінку мікросфери, ледь zdeформовану в процесі спікання. Така площадка сприятиме додатковому послабленню потоку випромінювань, який проходить через елементарну комірку. Для даної моделі визначення температурних напружень зводиться до розв'язування двовірних задач для стаціонарного теплового потоку. Радіальні і тангенціальні напруження, які виникають у результаті перешкоди вільному розширенню виділених елементів (елементарної комірки), визначаються як [317]

$$\sigma_r = -\frac{2}{3} \frac{\alpha^* T E a^3}{(1-\nu)r^3} \quad (4.19); \quad \sigma_t = \frac{1}{3} \frac{\alpha^* T E a^3}{(1-\nu)r^3}, \quad (4.20)$$

де α^* – ТКЛР метал-скляного спеченого матеріалу (для даного випадку ефективний ТКЛР); T – температура; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона для скла; a – внутрішній радіус сфери; r – радіус ПСМ.

Якщо знехтувати товщиною стінки мікросфери, то радіальні напруження прирівнюються до нуля. Значення ефективного ТКЛР для метал-скляних матеріалів визначаються за формулами (4.1) з урахуванням K_m і K_s для пористих композицій. Формула (4.20), що описує тангенціальні напруження на поверхні спечених ПСМ, враховує їх розміри. Вплив розмірів дисперсних включень на механізм послаблення рентгенівських випромінювань досліджено в роботах [14, 165]. Залежність тангенціальних напружень від температури для ПСМ дисперсністю 20, 40 і 100 мкм у графічному вигляді зображено на рис. 4.22. З наведених результатів слідує, що області спечених мікросфер утворюють небезпечний напружений стан. Наявність у складі склоалюмінієвих спечених матеріалів мікросфер з дисперсністю вище середнього розміру (≈ 40 мкм) призводить до зростання температурних напружень.

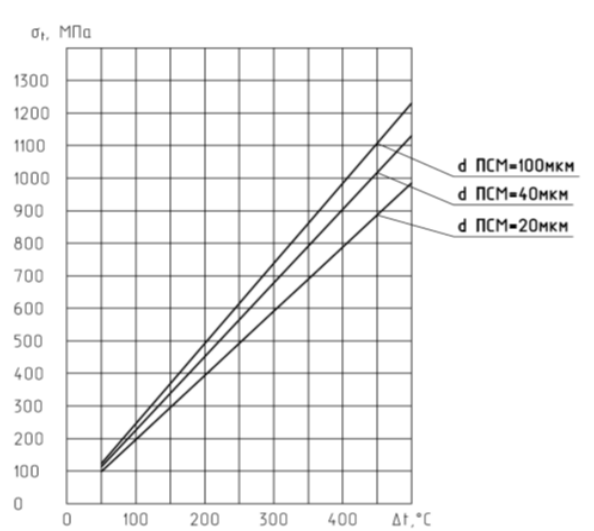


Рисунок 4.22 – Залежність тангенціальних напружень на межі між скляними мікросферами від температури та діаметра

Модель 3. Елемент комірки являє собою каркас зі спечених між собою ПСМ, пори між якими заповнено розплавленим металом. Модель є характерною для склоалюмінієвих спечених матеріалів, де температурні напруження виникають як на поверхні поділу метал-скло, що описуються рівняннями (4.16) і (4.17), так і на межі між спеченими мікросферами за формулою (4.20).

Розроблена термомеханічна модель описує температурні деформації мікрооб'ємів метал-скляного захисного шару та на відміну від існуючих аналогів [166, 219] враховує вплив пористості (10...20 %) і діаметр ПСМ (20...100 мкм), встановлює механізми руйнування в умовах теплових ефектів при 50...500 °C та підвищує достовірність прогнозування.

4.7.2 Модель поверхневого зміцнення метал-скляних електродугових покриттів дифузним потоком іонізуючих випромінювань

В роботах [181, 204] авторами достатньо повно описаний ефект поверхневого зміцнення металів та сплавів під дією спрямованих потоків випромінювань, проте для електродугових покриттів цей ефект ще не був досліджений. У результаті експериментальних досліджень (§ 4.6) встановлено, що після опромінення протягом 7 год дифузійним потоком Co^{60} з сумарною активністю джерел 37127 Кі спостерігається збільшення мікротвердості матриці $H_{\mu 20}$ метал-скляних покриттів на основі Св-08Г2С на 46 % і покриттів на основі Св-АМг5 – навіть у 2,5 рази (табл. 4.7), проте ефект зміцнення послаблюється у напрямку до основного металу (рис. 4.23, рис. 4.24).

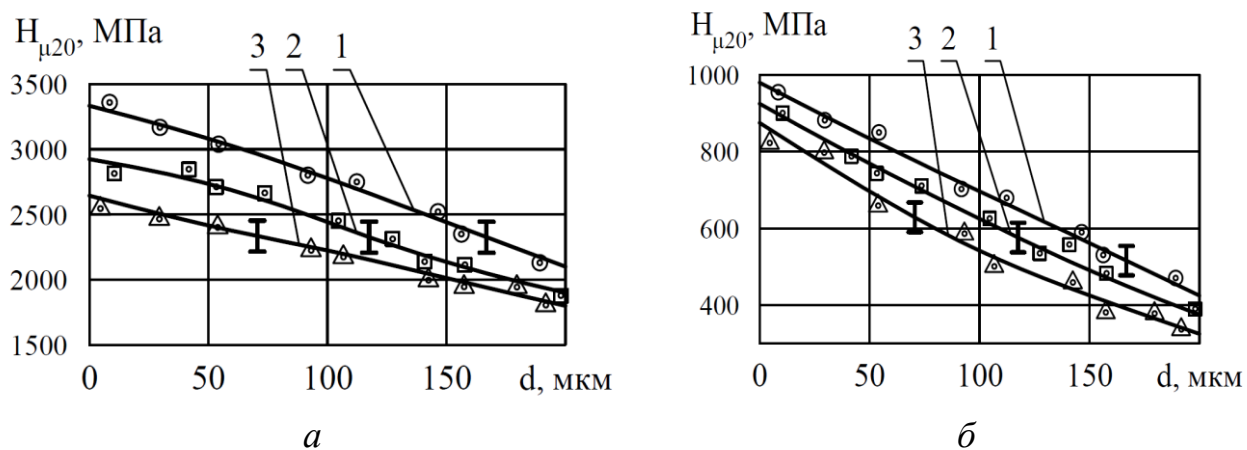


Рисунок 4.23 – Розподіл мікротвердості металевої матриці по глибині опромінених покриттів на основі: *а* – Св-08Г2С; *б* – Св-АМг5, наповнених:

1 – ПСМ; 2 – порошком натрійсилікатного скла;

3 – порошком свинцевмісного скла

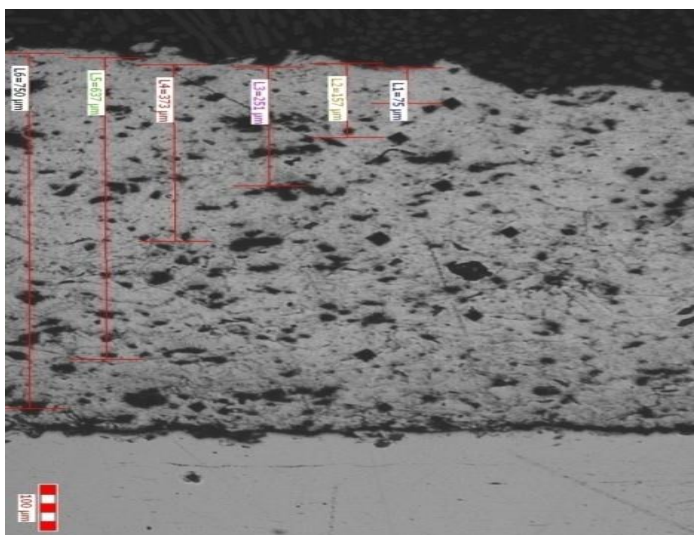


Рисунок 4.24 – Розподіл мікротвердості по перетину покриття Св-АМг5–натрійсилікатне скло у напрямку до підкладки Ст3

Модель поверхневого зміцнення ґрунтується на гіпотезі щодо формування наноструктурних елементів у металах в умовах теплових ефектів опромінення. Мета побудови моделі – встановити механізми та закономірності зміцнення метал-скляних покриттів під дією дифузійних потоків випромінювань, джерелом яких є радіоактивні вантажі. Фізична постановка задачі полягає у формуванні під дією теплових ефектів температурних полів, при поглинанні теплоти кожним із шарів покриття в місцях найбільшої концентрації напружень формуються наноструктурні елементи. Для геометричної інтерпретації товщину експериментальних зразків покриття ($\delta = 2$ мм) поділено на 4 характерних ділянки (рис. 4.25), у кожній з яких знаходиться приблизно одна скляна частинка, наприклад, мікросфера.

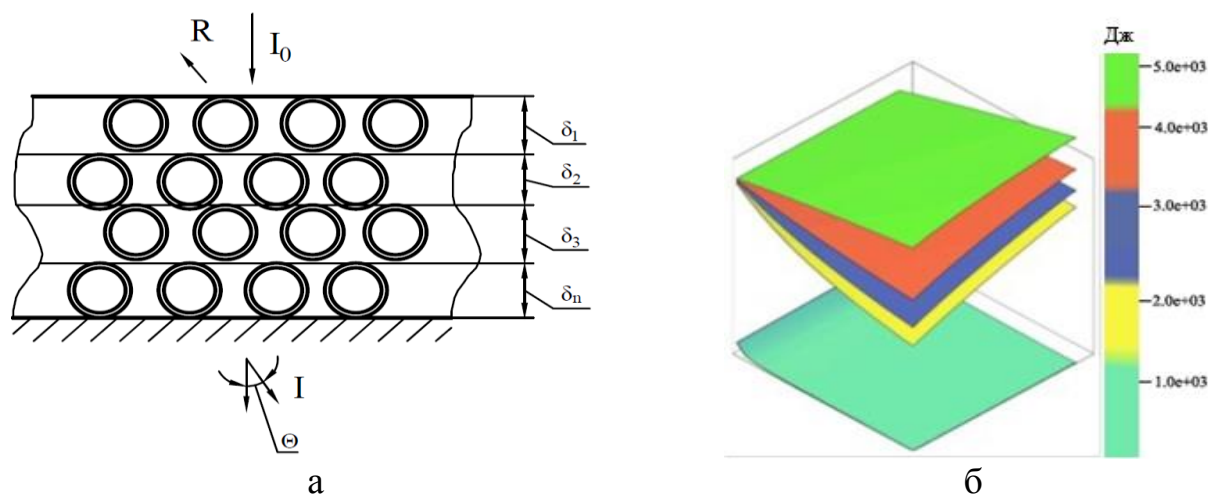


Рисунок 4.25 – Модель розподілу теплової енергії по товщині метал-скляного покриття: *а* – геометрична модель шару покриття; *б* – розподіл теплової енергії:

I_0 – падаючий потік енергії; R – відбитий потік; I – потік енергії на виході;

δ – товщина моношару

Для визначення розподілу температур по перетину метал-скляного захисного шару питома кількість тепла, яка поглинається кожним моношаром (рис. 4.25), визначається за формулою [202]:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_0 - T_n), \quad (4.21)$$

де q – питома кількість тепла – відношення потужності остаточного тепловиділення до маси виділеного моношару $\frac{dQ}{dm}$; λ – коефіцієнт теплопровідності метал-скляного покриття.

Для побудови числової моделі введено наступні припущення:

- формування наноструктурних елементів відбувається з нескінченно великою швидкістю;
- у захисному шарі протягом всього процесу експлуатації не відбувається структурно-фазових перетворень;
- кожен зі структурних елементів моношару прогрівається однаково, теплообмін між ними відсутній;
- відстань від джерел випромінювань до захисного шару не впливає на механізми послаблення.

Для розрахунків полів температур (рис. 4.25, б) за допомогою математичного моделювання [71] використано енергетичні і теплофізичні параметри. У формулі (4.21) значення T_0 відповідає потужності остаточного тепловиділення РАВ ($Q = 2; 8; 20$ кВт), значення T_n – температурі у кожному моношарі метал-скляного захисного покриття. Розрахунок маси покриттів виконано для панелі модуля розміром $1,5 \times 1,5$ м з товщиною захисного шару 2 мм. Експериментально встановлений ефект зміцнення (рис. 4.23) найбільш очевидний для покриттів, наповнених ПСМ, що пояснюється їх низькою теплопровідністю у порівнянні з суцільними скляними частинками. Так, при однаковій кількості поглинутої дози випромінювань внаслідок низької теплопровідності ПСМ основна кількість тепла поглинається металевою матрицею. Через високу теплостійкість мікротвердість скляних включень $H_{\mu 200}$ залишається незмінною. Проведені розрахунки показали, що у середньому одним квадратним метром моношару покриття композиції Св-08Г2–ПСМ поглинається 3,2 кДж тепла; Св-АМг5–ПСМ – 5,5 кДж. Покладена в основу моделювання гіпотеза про формування під дією теплових потоків субструктурних елементів опосередковано підтверджується числовою

обробкою рентгенограм, де за критерій прийняті розміри ОКР. У більшості випадків виявлення субструктурних елементів методами електронної мікроскопії ускладнюються через недостатню часову і просторову роздільну здатність. Як приклад на рис. 4.26 наведено фрагменти дифрактограм покриття композиції Св-АМг5-ПСМ до та після опромінення γ -квантами зі середньою енергією 1,25MeV ізотопу Co^{60} . Аналіз рентгенограм показав суттєве розширення піків: середній розмір ОКР до опромінення складає 201 нм, після опромінення – 110 нм. Аналогічний ефект спостерігається і для покриттів на основі Св-08Г2С: до опромінення середній розмір ОКР складає 110 нм, після опромінення зменшується до 80 нм. Ефект поверхневого зміцнення метал-скляних покриттів під дією опромінення зіставляється з механізмом підвищення твердості в результаті проведення ПТО.

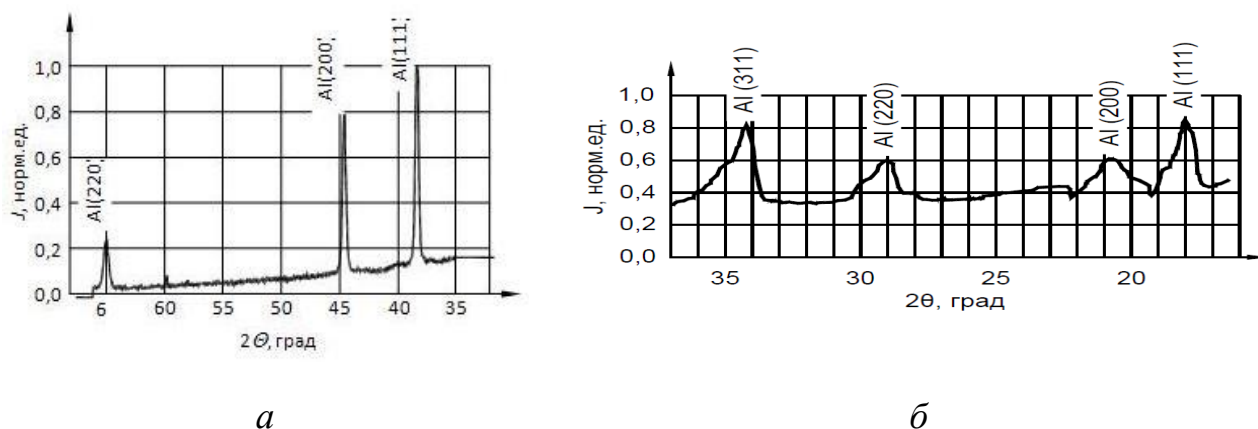


Рисунок 4.26 – Фрагменти дифрактограм електродугових покриттів композиції Св-АМг5-ПСМ товщиною 2 мм:

- а* – до опромінення (зйомка рентгенограм у випромінюванні міді $\text{Cu}_{k\alpha} = 1,54178$);
б – після опромінення (зйомка рентгенограм у випромінюванні $(\text{Mo}_{k\alpha} = 0,17069)$)

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень встановлено наступні закономірності:

- під час дифузійного опромінення γ -променями Co^{60} спостерігається ефект поверхневого зміцнення метал-скляного захисного шару, який відбувається без структурно-фазових перетворень та послаблюється по глибині перетину у

напрямку до основного металу, що пояснюється формуванням полів більш низьких температур і, як наслідок, зменшенням температурних напружень;

- мікротвердість скляних наповнювачів (ПСМ, суцільних частинок натрійсилікатного і свинцевмісного скла) залишається незмінною.

Розроблена модель описує характер зміцнення метал-скляного захисного шару в умовах транспортування радіоактивних вантажів, які є джерелами γ -випромінювань, та дає нові наукові уявлення про механізми поглинання теплової енергії під час опромінення шарами структурно-неоднорідних композицій з утворенням субструктурних елементів.

4.8 Експериментальні дослідження термостійкості опромінених метал-скляних електродугових покриттів

Екстремальні умови експлуатації метал-скляних покриттів у складі шаруватих суднових конструкцій вимагають проведення експериментальних досліджень щодо впливу температурних чинників на міцність їх зчеплення зі сталевую підкладкою. Передусім це термостійкість електродугових покриттів – кількісна оцінка можливості експлуатації в умовах перепадів температур. Не менш важливою характеристикою є їх термостабільність – здатність матеріалів і покриттів не змінювати структуру під впливом температури [340]., хімічного складу та об'ємного вмісту скляних наповнювачів.

Для досліджень застосовано попередньо опромінені γ -променями Co^{60} сталеві пластинки із Ст3 розміром $140 \times 100 \times 3,5$ мм з нанесеними з одного боку метал-скляними покриттями товщиною 2 мм (§ 4.6), які піддавали короткочасному (протягом 10 хв) температурному навантаженню у режимі нагрівання–охолодження. Температуру нагрівання (570°C – для покриттів на основі Св-08Г2С і 300°C – для покриттів на основі Св-АМг5) обрано, виходячи з умов розігрівання радіоактивних вантажів низької та середньої активності у

аварійних ситуаціях при їх зберіганні [1–3, 5]. Експериментальні роботи проводились у лабораторній електропечі марки СНОЛ-1.6.2.08/9-М1, охолодження – у ванні об’ємом 10 л з температурою води 10 °С. Після кожної теплосміни зразки висушувались при температурі (20±5) °С у сушильній шафі протягом 10 хв. За критерій прийнято кількість термоциклів до руйнування або пошкодження зразків (рис. 4.32). Для аналізу пошкоджень використано методи оптичної металографії. В табл. 4.14 наведено узагальнені результати для метал-скляних покриттів, наповнених усіма дослідними скляними наповнювачами: ПСМ, порошками натрійсилікатного або свинцевмісного скла.

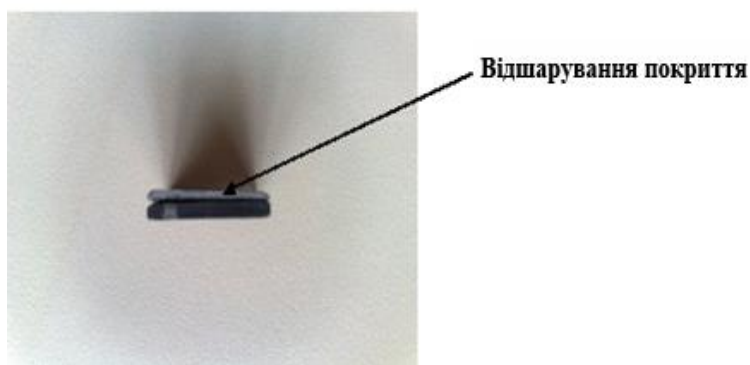
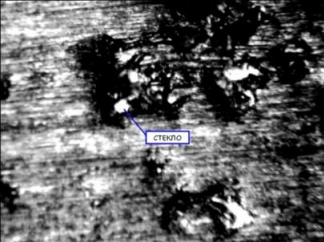
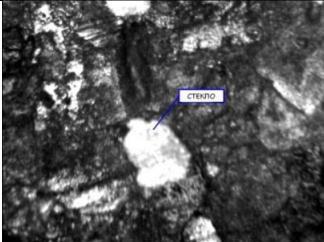
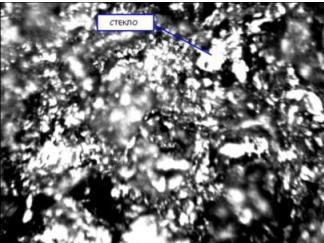
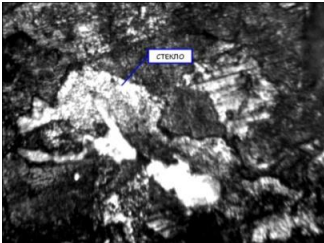
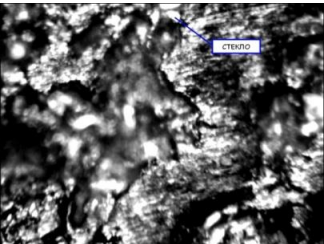
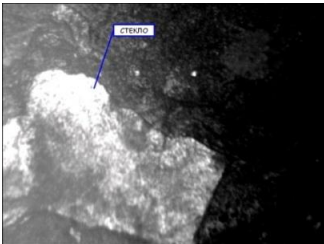


Рисунок 4.32 – Відшарування покриття (композиція Св-АМг5–скло, товщина 2 мм)

За результатами встановлено, що зразки з метал-скляними покриттями на основі Св-08Г2С витримують без руйнувань 15 повних циклів теплосмін 10/570 °С, з покриттями на основі Св-АМг5 – 18 теплосмін 10/300 °С. Мікроструктурні дослідження і рентгеноструктурний аналіз відшарованих покриттів показали, після термоциклічних випробувань суттєвих змін у їх структурі не відбувається, що свідчить про термостабільність опромінених зразків. Підкладка зі сталі Ст3 зазнає окиснення, на її поверхні утворюється окалина. Умови постановки експеримента задають інтенсивність теплової дії, але не враховують розмірів і форми зразків, технологічних режимів, товщини шару метал-скляного покриття, міцності зчеплення з підкладкою.

Таблиця 4.13 – Результати експериментальних досліджень термостійкості

Покриття	$t, ^\circ\text{C}$	N термоциклів	Мікрофотографія поверхні ($\times 230$) опромінених покриттів після випробувань	Покриття	$t, ^\circ\text{C}$	N термоциклів	Мікрофотографія поверхні ($\times 230$) опромінених покриттів після випробувань
Св-АМг5–скло	10/300	22		Св-08ГС–скло	10/570	18	
До опромінення			ПСМ 	До опромінення			ПСМ 
Після опромінення Co^{60}	10/300	18	натрійсилікатне скло 	Після опромінення Co^{60}	10/570	15	натрійсилікатне скло 
			свинцевмісне скло 				свинцевмісне скло 

Проведені експериментальні дослідження дають уявлення про максимальний ресурс і структурну стабільність метал-скляних електродугових покриттів в умовах короткочасних теплових, проте у реальних умовах експлуатації при виникненні аварійних ситуацій конструкції біологічного захисту не зазнають багаторазових температурних навантажень.

4.9 Термостійкість та горючість клейових з'єднань

При проектуванні шаруватих конструкцій за участю полімерних матеріалів необхідним етапом є визначення на простих геометричних моделях термостійкості та горючості сформованих з'єднань. Експериментальні дослідження проведено на пластинах із Ст3 розміром $140 \times 100 \times 3,5$ мм, на яких з різних боків за допомогою розробленої у п. 3.3.2 клейової композиції ЕД-20–ПСМ закріплено 2 зразки склоалюмінієвого спеченого матеріалу (ПСМ– Al-порошок і ПСМ– Al-пудра) і включали у себе випробування на термостійкість та підпалювання відкритим полум'ям газового пальника (рис. 4.33). Товщина клейового прошарку склала 3...5 мм.

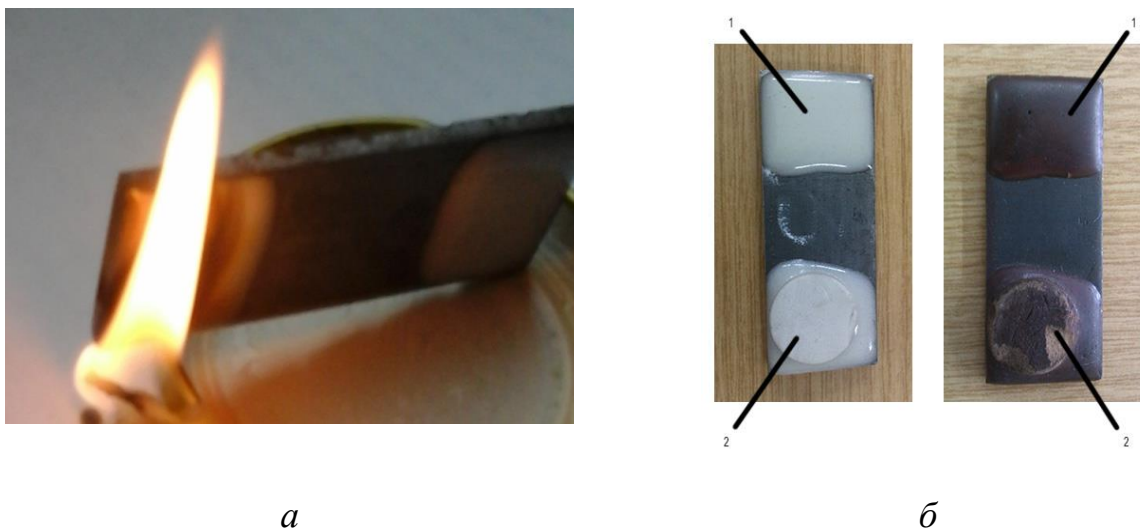


Рисунок 4.33 – Зразки під час випробувань: *а* – дією відкритого полум'я;

б – на термостійкість (до та після 11 термоциклів):

1 – клейова композиція ЕД-20–ПСМ; 2 – клейове з'єднання

Для випробувань клейових з'єднань на термостійкість у режимі нагрівання–охолодження застосовано лабораторну електропіч марки СНОЛ-1.6.2.08/9-М1, де зразки зазнавали нагрівання до температури 300 °С, яку обрано виходячи з умов термодеструкції полімерних композицій на основі ЕД-20. Охолодження зразків відбувалося у ванні місткістю 10 л при температурі 10 °С. Після кожної тепломіни (11 термоциклів) зразки висушувались у сушильній шафі при температурі 20 ± 5 °С протягом 10 хв. Одержані результати показали, що під час термоциклічних випробувань димовиділення, самозаймання та руйнування зразків не відбувається, проте вже після другого термоциклу нагрівання/охолодження при температурах 300/10 °С починаються деструкційні процеси, що свідчить про обмеженість застосування клейового з'єднання в умовах підвищених температур.

Експериментальні дослідження горючості проведено за ГОСТ 121.044-89: дослідні зразки з обох сторін піддавалися дії відкритого полум'я, швидкість розповсюдження якого реєструвалася за допомогою секундоміра; пошкоджуваність зразків оцінювалася візуально та за результатами зважування на аналітичних вагах GR200. Визначено, що процес горіння починається вже на 26-ій секунді та триває ще 100 с, кількість коксового залишку складає 80 %. Встановлено, що процес горіння не залежить від об'ємного вмісту ПСМ у складі композиції, а визначається термохімічними перетвореннями у полімерній матриці. Відповідно до загальноприйнятої класифікації [152] клейову композицію ЕД-20–ПСМ можна віднести до важкогорючих помірно небезпечних матеріалів. Отримані результати підтверджуються досвідом, який викладено в роботах [24, 320], мають практичне значення для прогнозування руйнування конструкцій в умовах пожежі та можуть бути застосовані для порівняльної оцінки полімерних матеріалів.

Експериментальні дослідження визначають здатність майбутньої конструкції витримувати термоциклічні та короточасні температурні навантаження при виникненні пожежонебезпечних ситуацій на судні.

4.10 Корозійна стійкість опромінених метал-скляних електродугових покриттів у розчинах кислот

З метою визначення ефективності застосування метал-скляних електродугових покриттів для захисту цистерн необхідно експериментально дослідити механізми їх корозійної пошкоджуваності в хімічно активних середовищах. Постановка експериментальних досліджень включає в себе витримку попередньо опромінених γ -променями Co^{60} зразків Ст3 розміром $140 \times 100 \times 1,5$ мм з метал-скляними електродуговими покриттями товщиною 2 мм у хімічно активних середовищах: 20%-водних розчинах соляної (HCl), сірчаної (H_2SO_4) та азотної (HNO_3) кислот, які найчастіше входять до складу розчинів для дезактивації. Зразки витримувались у агресивному середовищі протягом 72, 240 та 840 годин (відповідно 3, 10 та 35 діб) при температурі 18 ± 2 °C. Після кожної витримки зразки очищувалися від продуктів корозії, промивалися гарячою водою та висушувалися в сушильній шафі; методика випробувань описана в роботі [42]. Ознаки корозійних пошкоджень з'являються протягом перших десяти діб з моменту їх повного занурення в рідке агресивне середовище. Як критерій обрано швидкість поширення корозії, що розраховується за формулою [42]

$$K_m = \frac{m_0 - m}{S \cdot \tau}, [\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})] \quad (4.22)$$

де m_0 – маса зразка до випробування, г; m – маса зразка після витримки в корозійному середовищі та видалення продуктів корозії, г; S – площа зразка, м^2 ; τ – час, год.

Для визначення маси зразків застосовано аналітичні ваги GR 200, їх пошкоджуваність оцінено візуально та за допомогою оптичної металографії на мікроскопах ММР-2Р та БІОЛАМ-И.

При тривалій витримці в агресивних середовищах зразки електродугових покриттів характеризуються від'ємною зміною маси (табл. 4.14) з кожного міліметра площі $K'_m = \frac{m_0 - m}{S} [\text{г}/\text{мм}^2]$. На проміжному

етапі (10 діб) випробовувані зразки характеризуються зростанням маси, пов'язаним з розпадом продуктів корозії на пошкоджених ділянках. За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено, що пухкі продукти корозії мають явну структуру, яка була успадкована від шару покриття. У середньому протягом 840 годин зразки втратили в масі 30...40 %. Найбільш активне руйнування для покриттів на основі Св-08Г2С спостерігалось в середовищі 20 % HNO_3 , максимальна втрата маси склала близько 85 %. Склад скляних включень не впливає на характер руйнування опромінених покриттів.

Таблиця 4.14 – Зміна маси зразків при витримці в агресивних середовищах

Вид захисного покриття	$K_m \times 10^4$ за 72 год, г/мм ²			$K_m \times 10^4$ за 240 год, г/мм ²			$K_m \times 10^4$ за 840 год, г/мм ²		
	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃
Св08Г2С	-2,7	-3,6	-2,7	+0,2	-11,4	+0,89	-13,0	-22,0	-22,3
Св08Г2С-скло	-3,3	-4,9	-3,5	+0,4	-7,8	+0,76	-18,0	-27,8	-24,5
СвАМг5	-1,2	-1,9	-1,1	-0,74	-6,5	+2,6	-7,7	-14,3	-14,3
СвАМг5-скло	-0,8	-0,9	-0,5	-0,6	+0,04	+0,07	-8,8	-2,8	-8,6

Проникаючи в пористий шар електродугового покриття, розчини кислот викликають хімічну корозію матеріалу матриці; деструкції скляних включень не спостерігається; руйнування металевої матриці призводить до викришування на окремих локальних ділянках.

Оцінка хімічної стійкості металів за десятибальною шкалою (ГОСТ 5272-90) дозволяє віднести електродугові покриття (рис. 4.34) на основі Св-08Г2С та Св-АМг5 до нестійких.

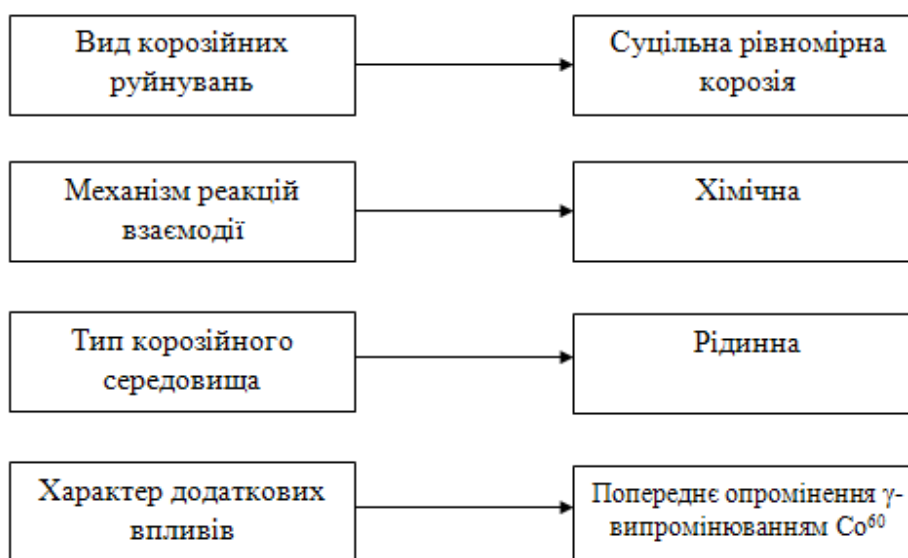


Рисунок 4.34 – Пошкоджуваність опромінених електродугових покриттів у розчинах кислот

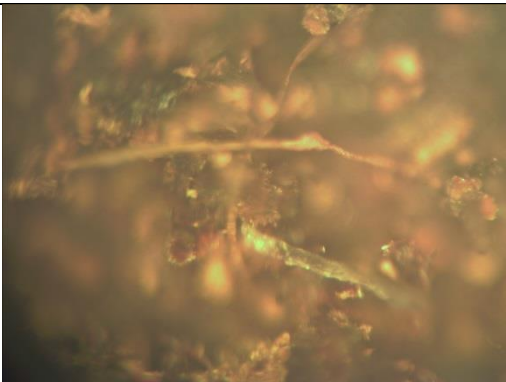
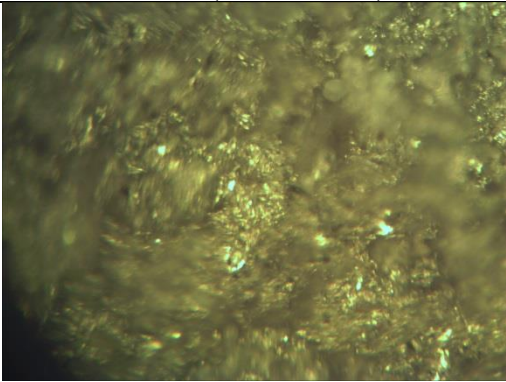
Порівняльні значення поверхневої швидкості поширення корозії в опромінених електродугових покриттях з Св-08Г2С та Св-АМг5, отриманих без наповнювача, наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Поверхнева швидкість поширення корозії у ненаповнених електродугових покриттях

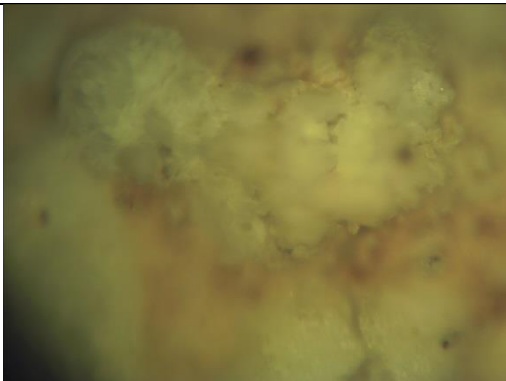
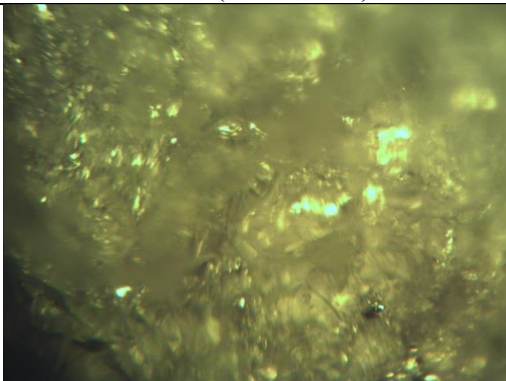
Покриття	Поверхнева швидкість поширення корозії U , г/м ² ·год		
	20 % HCl	20 % H ₂ SO ₄	20 % HNO ₃
Св-08Г2С	1,5	2,62	2,65
Св-АМг5	0,91	1,7	1,7

У табл. 4.16 наведено мікроструктури та ознаки зруйнованих покриттів, а також значення швидкості поверхневої корозії, розраховані за формулою (4.22).

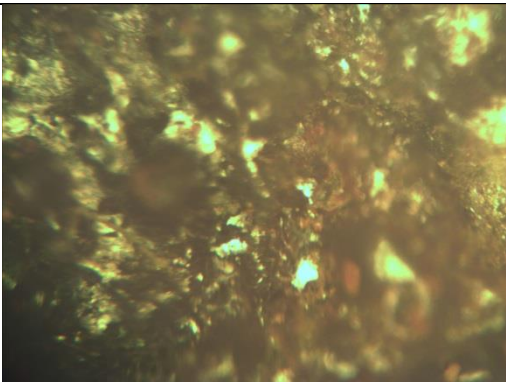
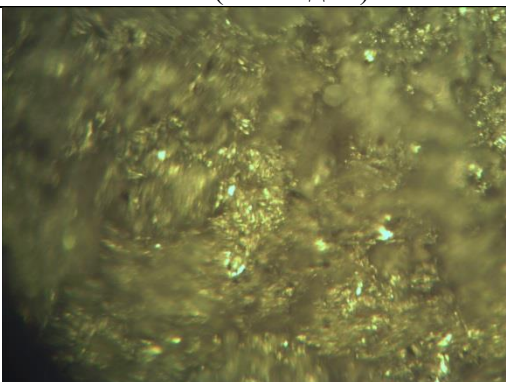
Таблиця 4.16 – Корозійна пошкоджувальність опромінених метал-скляних електродугових покриттів

Середовище	Покриття	Топографія поверхні	Поверхнева швидкість поширення корозії U , г/(м ² ·год)	Ознаки руйнування
20 %HCl	Св-08Г2С–скло	 ×150 (840 годин)	0,92	Утворений шар продуктів корозії поширюється рівномірно вглиб перерізу. Границя розділу Ст3–продукти корозії плавна, без тріщин та вертикальних виразкових уражень
	Св-АМг5–скло	 ×150 (840 годин)	1,05	

продовження таблиці 4.16

Середовище	Покриття	Топографія поверхні	Поверхнева швидкість поширення корозії U , г/(м ² ·год)	Ознаки руйнування
20 % H ₂ SO ₄	СВ-08Г2С–скло	 ×150 (840 годин)	3,3	Зі збільшенням часу перебування зразків у розчині кислоти спостерігається викришування скляних включень. Утворений шар продуктів корозії легко зчищається
	СВ-АМг5–скло	 ×150 (840 годин)	0,33	

продовження таблиці 4.16

Середовище	Покриття	Топографія поверхні	Поверхнева швидкість поширення корозії U , г/(м ² ·год)	Ознаки руйнування
20 %HNO ₃	СВ-08Г2С–скло	 ×150 (840 годин)	2,9	Шар продуктів корозії рівний та пухкий
	СВ-АМг5–скло	 ×150 (840 годин)	1,02	По всій товщині покриття утворюється пухкий бурий осад

Стійкість електродугових покриттів у розчинах кислот визначається їх складом та структурою. Встановлено, що швидкість поширення корозійних процесів у покриттях на основі Св-АМг5 на 35...40 % нижче, ніж у покриттях на основі Св-08Г2С, руйнуванню матеріалу матриці перешкоджають скляні включення. З іншого боку, покриття, виконуючи роль дифузійного бар'єра, гальмують процес руйнування основного металу цистерни, а продукт корозії утримується на її поверхні, перешкоджаючи доступу корозійного середовища. У процесі дезактивації шар покриття, що руйнується, може бути зчищений і при ремонтно-відновлювальних роботах нанесений заново.

4.11 Висновки до розділу 4

1. Зв'язок структури метал-скляних композицій з механічними властивостями у аналітичному вигляді описано через ефективні пружні модулі: умовний модуль об'ємного стискання металевої матриці K_m та скляних включень K_s , ефективний модуль зсуву композицій G^* та ефективний ТКЛР α^* , які враховують експериментально отримані значення щільності, пористості, об'ємного наповнення склом. Встановлено, що зі збільшенням скляних наповнювачів (до 50 % об'ємн.) у складі метал-скляних композицій: на 35 % зменшується теоретичне значення умовного модуля пружності об'ємного стискання металевої матриці $\bar{K}_m$; у 5 разів зростає α^* метал-скляних композицій; на 40 % знижується значення модулю зсуву G^* .

2. Розрахунково-експериментальні дослідження демпфірувальних властивостей, зокрема коефіцієнта вібраційних втрат ($\eta_{\text{вібр}} = 0,35...0,6$), коефіцієнта розсіювання енергії ($\Psi = 10...20$ %), залежно від об'ємного вмісту скляних наповнювачів (10...40 %) довели можливість експлуатації метал-скляних покриттів в умовах судових вібрацій у межах 40 Гц. Експериментально встановлено, що нанесення електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених ПСМ, у 3...6 разів підвищує демпфірувальну здатність пластини із Ст3; максимальне збільшення

спостерігається для зразків з об'ємним наповненням 15 %, подальше збільшення вмісту ПСМ у складі композиції Св-08Г2С на 5...15 % призводить до зниження демпфірувальної здатності покриттів.

3. Теоретично розраховано та експериментально визначено коефіцієнти теплопровідності для склоалюмінієвих матеріалів $\lambda = 80...90$ Вт/(м·К) для покриттів на основі Св-08Г2С – $\lambda = 18...22$ Вт/(м·К), Св-АМг5 – $\lambda = 61,5...70,0$ Вт/(м·К), що сприятиме відведенню тепла з найбільш розігрітих ділянок елементів суден.

4. Для визначення рентгенозахисних характеристик (кратності випромінювань, лінійного і масового коефіцієнтів ослаблення, свинцевого еквівалента, товщини шару половинного поглинання) апробовано розрахунково-експериментальну методику, яка полягає у вимірюванні інтенсивності рентгенівського пучка до та після його проходження через матеріал або покриття (без підкладки) на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 з джерелом випромінювань у вигляді трубки серії БСВ з мідним анодом $Cu_{\text{ка}} = 1,54178$ і напруженням до 45 Вт; одержані результати дають якісну оцінку та показують здатність пропонованих матеріалів і покриттів послаблювати рентгенівські випромінювання.

5. Порівняння з відомими аналогами, такими, як сферопластики та САПи, довели конкурентоспроможність склоалюмінієвих спечених матеріалів і метал-скляних електродугових покриттів: при рівному свинцевому еквіваленті значення $\mu_{\text{мас}}$ матеріалів і покриттів з алюмінієвою матрицею на 20...25 % перевищує значення $\mu_{\text{мас}}$ для САПів та у 2-3 рази – для синтактиків; рентгенозахисні властивості клейової композиції ЕД-20–ПСМ не поступаються сферопластикам. Рекомендована товщина для склоалюмінієвих плиток складатиме більш ніж 10 мм, для електродугових покриттів – 1,5...2 мм, що забезпечує такий саме захист, як і облицювання шаром свинцю $\delta = 1$ мм.

6. Встановлено закономірності послаблення іонізуючих випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів: порожні скляні мікросфери на відміну від суцільних скляних частинок утворюють

потрійний ефект поглинання потоку енергії, який посилюється зі збільшенням об'ємного вмісту у складі композицій; розвинута пориста структура збільшує анізотропію металевої матриці та викликає багаторазове розсіювання енергії променів, додатковому поглинанню яких сприяє формування субструктурних елементів з розміром ОКР 75...97 нм у покриттях композиції Св-08Г2С–ПСМ; в результаті передрекristалізаційної термічної обробки $\mu_{\text{мас}}$ зростає приблизно на 27 %.

7. Експериментально встановлено, що під дією опромінення γ -променями Co^{60} з енергіями $E = 2,0; 4,5 \text{ MeV}$ у метал-скляних електродугових покриттях не виникає структурно-фазових перетворень, проте на 46 % зростає мікротвердість $H_{\mu 20}$ матриці покриття на основі Св-08Г2С, у 2,5 рази – покриттів на основі Св-АМг5; мікротвердість скляних включень залишається незмінною, їх наявність гальмує розвиток пористості поверхневого шару, підвищуючи тим самим радіаційну стійкість покриттів.

8. Експериментально встановлено, що покриття на основі Св-08Г2С товщиною 2 мм екранує Ст3 на 28 % (кратність послаблення 1,14), на основі Св-АМг5 – на 56 % (кратність послаблення складає 2,27) та наближається до кратності пластинки з чистого свинцю (кратність послаблення 2,9); при поглинанні дози випромінювань $D 12,5 \text{ кГр}$ і 100 кГр зразки із Ст3 з метал-скляними електродуговими покриттями зберігають стабільними механічні властивості ($\sigma_{\text{в}}$ і $\sigma_{\text{т}}$) та захищають від радіаційної пошкоджуваності, проте як для еталонних пластинок Ст3 (без покриття) спостерігається зростання на 22...25 % границі міцності на розрив $\sigma_{\text{в}}$ і границі текучості $\sigma_{\text{т}}$, на 15 % – твердості за Віккерсом HV_5 .

9. Граничні умови експлуатації конструкцій при температурних навантаженнях визначаються за допомогою удосконаленої термомеханічної моделі, яка на відміну від існуючих аналогів враховує температурні деформації мікрооб'ємів в залежності від структури метал-скляного шару: наявність пористості 10...20 % приблизно у два рази знижує напруження, що виникають в діапазоні температур 50...500 °С на поверхні метал–скло; на границі спечених

між собою мікросфер у структурі склоалюмінієвих матеріалів формуються максимальні температурні напруження 200...900 МПа, які при збільшенні дисперсності ПСМ з 20 мкм до 100 мкм зростають на 25 %.

10. Внаслідок теплових ефектів опромінення в місцях найбільшої концентрації напружень формуються субструктурні елементи з розміром ОКР 80...110 нм, в результаті чого мікротвердість металевої матриці метал-скляних електродугових покриттів зростає у 2...2,5 рази, проте знижується по товщині у напрямку до підкладки із Ст3. Це пояснюється формуванням більш низьких температур і, як наслідок, зменшенням тангенціальних напружень, що у вигляді експериментальних досліджень разом з аналітичним розподілом теплової енергії являють собою модель «поверхневого зміцнення композиційного шару», яка дає уявлення про процеси в опроміненому захисному шарі при транспортуванні РАВ – джерел γ -випромінювань.

11. Експериментальні дослідження показали, що опромінені зразки Ст3 з електродуговими покриттями Св-08Г2С – скло витримують 15 теплостій (570/10 °С $\tau = 10$ хв), з покриттями на основі Св-АМг5 – 18 теплостій (300/10 °С, $\tau = 10$ хв), зберігаючи структуру стабільною. Термоциклічні випробування до 300 °С (11 термоциклів) клейових з'єднань Ст3–склоалюмінієві матеріали свідчать про обмеженість застосування клейової композиції ЕД-20–ПСМ через деструкційні процеси, проте за результатами випробувань на горючість її віднесено до помірно важкогорючих матеріалів. Отримані результати дають уявлення про максимальний ресурс метал-скляних покриттів та клейових з'єднань в умовах, найбільш наближених до екстремальних.

12. Встановлено механізми корозійних руйнувань опромінених γ -променями Co^{60} метал-скляних електродугових покриттів в умовах витримки (до 840 годин) у 20%-розчинах HCl , H_2SO_4 , HNO_3 : проникаючи у пористий шар електродугового покриття, розчини кислот викликають хімічну корозію матеріалу матриці, швидкість поширення якої становить 0,9...3,3 г/(м²·год), проте хімічна деструкція скляних включень не спостерігається. Продукти

корозії утримуються на поверхні Ст3, перешкоджаючи доступу корозійного середовища, і гальмують процес руйнування основного металу; додатковим способом захисту поверхні метал-скляних електродугових покриттів є просочення рідким склом, що заповнює пори в поверхневому шарі і тим самим блокує подальше проникнення агресивних середовищ.

Наукова значущість розділу полягає у встановлених закономірностях і механізмах послаблення γ і рентгенівських випромінювань структурними елементами метал-скляних матеріалів і покриттів, впливі дисперсних скляних наповнювачів ($10...35 \pm 7$ % об'ємн.) на підвищення їх рентгенозахисних властивостей та радіаційну стійкість; нових наукових уявленнях про термомеханічні процеси, які відбуваються при теплових ефектах під час опромінення у метал-скляному захисному шарі конструкцій, які підтверджують висунуті в роботі гіпотези про можливість його руйнування по границі поділу метал–скло та формування наноструктурних елементів у місцях найбільшої концентрації напружень; встановленому зв'язку між структурою метал-скляних матеріалів і покриттів та їх механічними властивостями, описаному через ефективні пружні модулі.

Практична значущість розділу полягає у одержаних розрахунково-експериментальним шляхом ефективних механічних і демпфірувальних властивостях з переважним впливом на них об'ємного вмісту скляних дисперсних наповнювачів; експериментально-теоретичному обґрунтуванні доцільності застосування розроблених метал-скляних матеріалів і покриттів для ефективного захисту конструкцій і елементів суден, призначених для транспортування радіоактивних вантажів, а саме: в умовах рентгенівських і γ -випромінювань, теплових ефектів, зокрема термоциклічних навантажень і хімічно активних середовищ.

Результати розділу опубліковані у роботах [93, 95, 114, 118, 122, 125, 136, 137–139, 160, 233, 324, 335, 374, 375, 377–379]

РОЗДІЛ 5

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ПРИНЦИПИ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЕТАПАХ ПРОЕКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

5.1 Задачі оцінювання технічного стану та багатокритеріальна оцінка якості композитних конструкцій

Оцінювання технічного стану елементів біологічного захисту є комплексною задачею, яка полягає у визначенні якісних та кількісних критеріїв, що характеризують процеси втрати працездатності конструкцій, вирішення якої триває на всіх етапах життєвого циклу судна та ґрунтується на узагальненні наступних груп дефектів:

- конструктивних – через неправильний вибір складу (об’ємного вмісту та виду наповнювача), режимів отримання й обробки, товщини захисного композиційного шару;
- виробничо-технологічних, що виникають у випадках порушення технологічних процесів або невідповідності нормативній документації;
- експлуатаційних – як наслідок експлуатації конструкцій в умовах іонізуючих випромінювань, температурних навантажень, корозійного впливу агресивних середовищ.

Мета розділу полягає у розробленні нових науково-методичних засад оцінювання технічного стану захисних суднових конструкцій, які ґрунтуються на систематизації та доступності інформації щодо пошкоджуваності матеріалів конструкцій в умовах опромінення, термоциклічних навантажень і хімічно активних середовищ та взаємозв’язку проектних, технологічних і експлуатаційних факторів. Це потребує розв’язування окремих задач підвищення якості композитних суднових конструкцій, управління процесами підвищення техніко-економічних показників під час проектування елементів біологічного захисту за умовами експлуатаційних вимог, розробки

інформаційної підтримки оцінювання технічного стану, для чого застосовано одержані у попередніх розділах роботи результати.

Об'єкт досліджень – процеси обробки і систематизації даних щодо пошкоджуваності матеріалів конструкцій суден під час експлуатації, взаємозв'язку проектних, технологічних і експлуатаційних факторів.

Предмет досліджень – моделі і механізми управління процесами діагностики та систематизації технологічних і експлуатаційних дефектів конструкцій і елементів суден для радіоактивних вантажів.

5.1.1 Систематизація технологічних дефектів за допомогою побудови причинно-наслідкових діаграм

Захисні конструкції суден та плавучих споруд для радіоактивних вантажів являють собою складну систему, при проектуванні якої важливим завданням є управління якістю на всіх стадіях життєвого циклу судна, що має виконуватися у відповідності до ДСТУ ISO 9001-2001. Для розробки технологічних рекомендацій необхідно виявити фактори, недотримання або відхилення від норми яких може призвести до виникнення дефектів аж до втрати працездатності конструкцій.

На рис. 5.1 наведено причинно-наслідкову діаграму Ісікави, яку складено для випадку облицювання сталеві поверхні панелей модулю біологічного захисту склоалюмінієвими плитками. Як критерій оцінювання вибрано механічну міцність, необхідну для виконання вантажно-розвантажувальних робіт на судні, кількісними показниками якої можуть виступати міцність зчеплення алюмоматрічної плитки зі сталевим облицюванням через клейовий прошарок. За допомогою діаграми наочно представлені причини, які призводять до втрати працездатності конструкції – це так звані «великі риб'ячі кістки»: («Матеріали», «Засоби технологічного оснащення», «Технологія монтажу», «Технологія ремонту»), та «дрібні риб'ячі кістки» – параметри, що

безпосередньо впливають на дотримання технологічних режимів, рецептури плиток та клейового з'єднання.

«Матеріали» – фактори, які формуються на початковій стадії проектування модулю, включають в себе вибір складу композиційних плиток (матриця, наповнювач та об'ємний вміст компонентів), клейової композиції та захисного просочення: їх невідповідність може призвести до низької механічної міцності плиток.

«Засоби технологічного оснащення» – пов'язані з організацією виробництва на технологічній ділянці і в складських приміщеннях з вибором устаткування (для гарячого пресування, отримання та дозування клейової композиції, поверхневого просочення рідким склом), що є необхідним для дотримання вибраних технологічних режимів і якості продукції.

«Технологія монтажу» – включає в себе технологічну підготовку, ручні операції, температурні умови формування, товщину клейового з'єднання, контроль непроклеєних місць. На даному етапі виділяються технологічні причини, що призводять до виробничого браку в умовах цеху.

«Технологія ремонту» – передбачає температурні умови формування, технологічну підготовку ділянки і ремонтних робіт, заміну плиток та закладення місць з'єднань, дозування і контроль клейового з'єднання, умов зберігання рідкого скла, тобто матеріали і технологічні заходи, необхідні для проведення профілактичного ремонту та відновлювальних робіт.

Таким чином, формується наочне уявлення про взаємний вплив різних груп факторів на механічну міцність захисного шару як показника якості конструкції, на основі чого розробляються технологічні рекомендації щодо виготовлення і ремонту, а також необхідні профілактичні заходи.

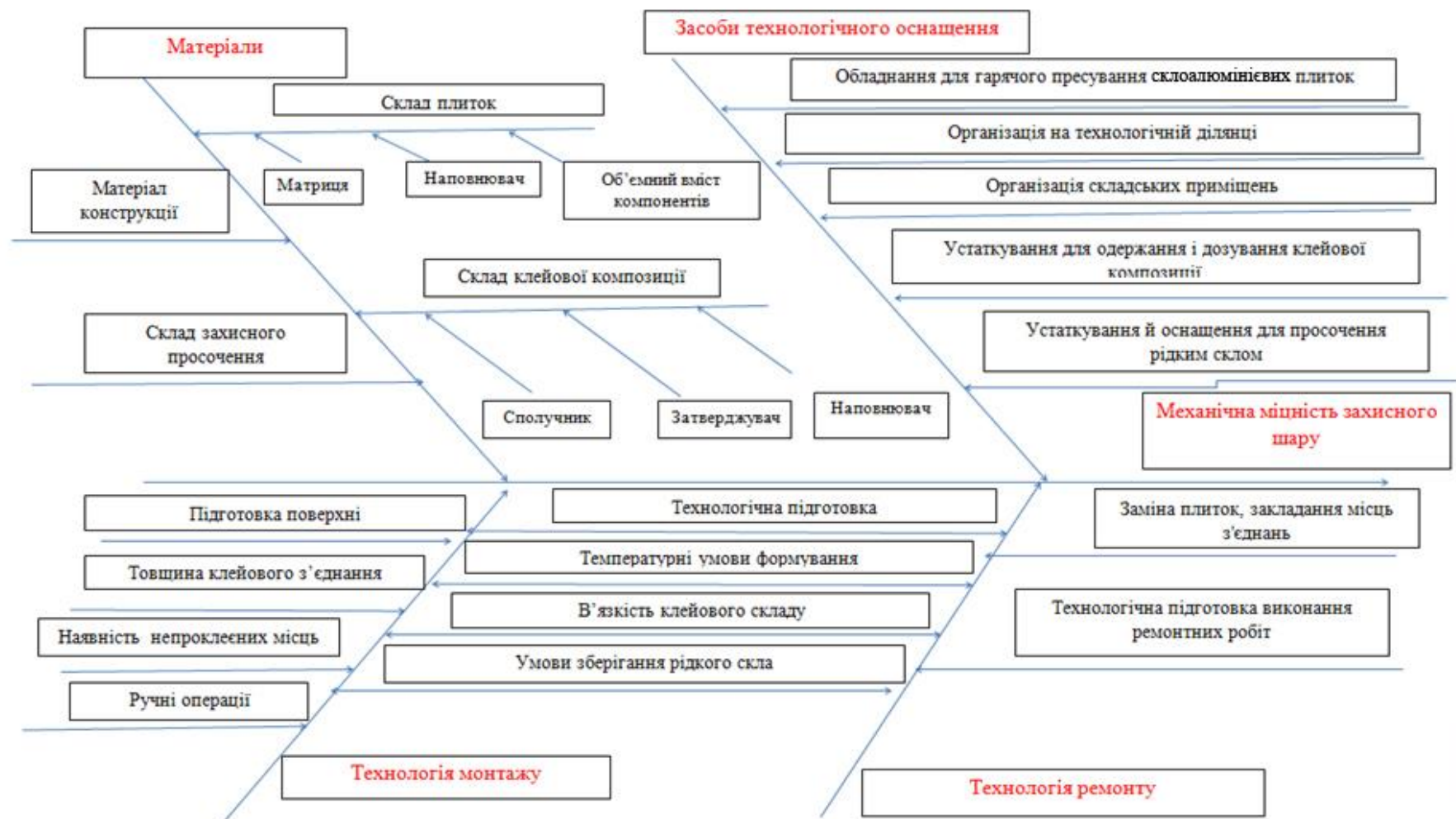


Рисунок 5.1 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави для випадку облицювання поверхні плитками

На рис. 5.2 наведено причинно-наслідкову діаграму Ісікави, яку складено для випадку формування захисного шару методом електродугового напилення, що застосовано при виготовленні баків (цистерн) для РАВ, панелей модулю біологічного захисту. Як кількісний параметр, що визначає якість конструкції, обрано міцність зчеплення $\sigma_{\text{відр}}$ покриття зі сталеву основою, результати експериментальних досліджень якої для метал-скляних покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених ПСМ, порошками натрійсилікатного та свинцевмісного стекл, наведено у розділі 3. Відповідно до діаграми Ісікави, на міцність зчеплення покриттів впливають конструктивні і виробничо-технологічні фактори. Це т. зв. «великі кістки», які в поєднанні з т. зв. «дрібними кістками», є причинами, які призводять до формування низької міцності зчеплення або до її зниження в процесі експлуатації.

«Матеріали конструкції» – це технологічні операції підготовки сталевому облицювання, включаючи вибір геометричних параметрів сталевих листа та додаткову обробку.

«Матеріал покриття» – включає в себе вибір матеріалів для формування метал-скляного покриття, завдання його структурних характеристик (зокрема пористості матриці, об'ємного вмісту скляних наповнювачів).

«Товщина покриття» – важливий геометричний параметр конструкції біологічного захисту, що визначає масогабаритні і вартісні показники, на який безпосередньо впливають пористість та теплопровідність (т. зв. «дрібні кістки») напиленого шару.

«Технологія підготовки поверхні» та *«Технологія нанесення покриття»* включають в себе необхідні режими та обладнання.

Кількісні показники заносяться в інформаційно-пошукову систему, яка дає змогу підвищити ефективність застосування причинно-наслідкової діаграми Ісікави для розробки технологічних заходів.

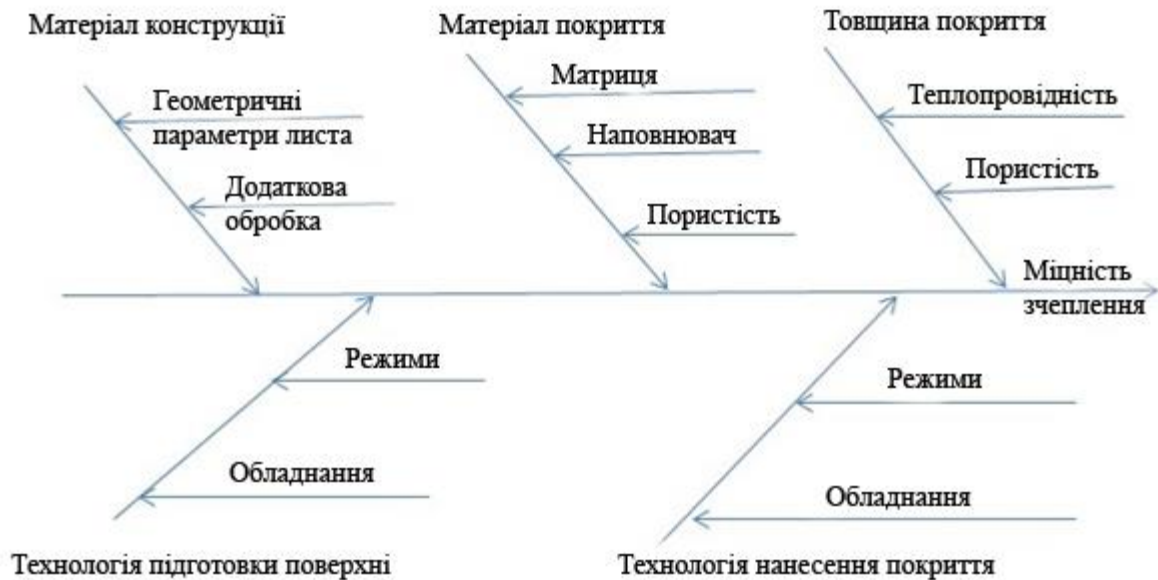


Рисунок 5.2 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави для випадку формування захисного шару методом електродугового напилення

Зображені на рис. 5.1 та 5.2 діаграми Ісікави через специфіку предметної області та суднобудівної галузі дещо відхиляються від стандартних груп факторів, які визначають якість продукції (організація виробництва, технологія, обладнання, зовнішні умови, методи вимірювання, матеріали, персонал) [252, 373]. Так, наприклад, під визначенням «методи вимірювання» та «персонал» маються на увазі технологія монтажу та технологія ремонту, що входять до складу виробничо-технологічних факторів. Оскільки в отриманих діаграмах Ісікави деякі групи факторів (т. зв. «великі кістки») містять однакові підгрупи (т. зв. «середні кістки»), доцільно застосувати закон Парето з побудовою відповідної стовпчикової діаграми, суміщеної з кумулятивною кривою, де за віссю абсцис за спаданням відкладено виробничо-технологічні дефекти, ординат – значення кожного з факторів у безрозмірних одиницях (рис. 5.3). Це дає змогу виділити головні однорідні фактори, які впливають на формування виробничо-технологічних дефектів.

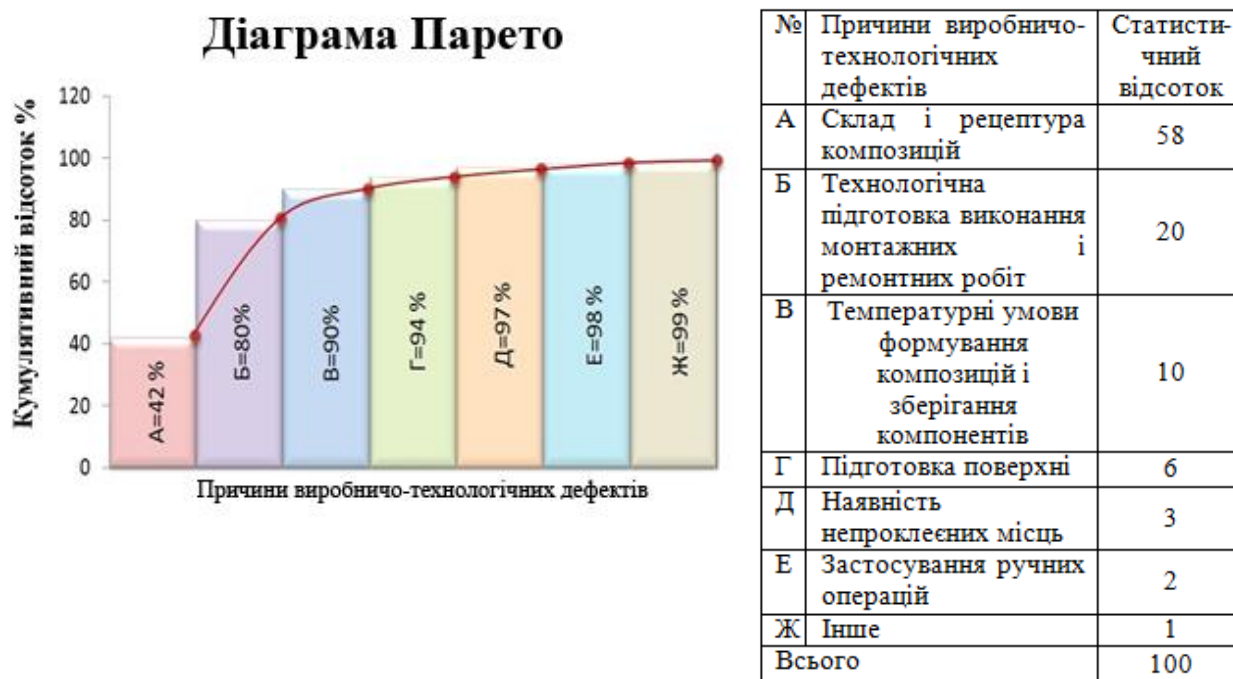


Рисунок 5.3 – Діаграма Парето

Оцінкою технічного стану на етапі виготовлення композитних конструкцій є контроль якісних та кількісних показників, що характеризують точність дотримання технологічних процесів з метою запобігання утворенню дефектів, для визначення яких застосовуються методи кількісної металографії, механічних випробувань, системного аналізу і комп'ютерного моделювання.

За допомогою побудови причинно-наслідкових діаграм виконано аналіз та систематизація технологічних дефектів, що призводять до втрати міцності композитних конструкцій біологічного захисту з метал-скляним шаром (для випадків облицювання гарячепресованими плитками та електродугового покриття). Проте отриманої інформації недостатньо для управління техніко-економічними показниками на етапах проектування елементів біологічного захисту. Надати певні кількісні значення проектним і експлуатаційним факторам можливо в процесі когнітивного моделювання, де при постановці числових експериментів задаються фізико-механічні величини.

5.1.2 Взаємозв'язок проектних і експлуатаційних факторів

Реалізація механізмів прийняття рішень при оцінці технічного стану на етапі проектування елементів біологічного захисту суден та плавучих споруд можлива шляхом побудови когнітивної моделі. Процес включає у себе: виявлення та коригування факторів, визначення їх взаємного впливу, напрямків і діапазонів змін значень, складання когнітивної карти ситуації, визначення кількісних оцінок сили взаємного впливу факторів та, як окремі випадки, розв'язок прямих та обернених задач. Для побудови когнітивної моделі вибрано систему підтримки прийняття рішень (СППР) «Канва» [168], досвід застосування якої апробований у роботах [39, 40] на прикладі вирішення задач оцінки безпеки експлуатації авіаційної техніки. Сили взаємного впливу факторів у режимах прямого оцінювання, парного порівняння та функціональної залежності пояснюються за допомогою підсистеми вилучення вподобання експерта. На початковому етапі досліджень виділено 15 факторів, які дозволяють скласти аналітичний прогноз на всіх етапах експертного процесу оцінки технічного стану конструкцій, з яких складається елемент біологічного захисту:

X_1 – сумарна активність випромінювань – енергетична характеристика РАВ, залежить від їх радіонуклідного складу та агрегатного стану;

X_2 – довговічність роботи конструкції, під якою розуміють тривалість надійної роботи всього елемента біологічного захисту, що визначається здатністю захисного шару протягом цього часу зберігати необхідні експлуатаційні властивості;

X_3 – товщина захисного шару матеріалу або покриття;

X_4 – поглинена енергія іонізуючих випромінювань: частина енергії, поглинена захисним шаром конструкції;

X_5 – поглинена кількість тепла: кількість тепла, що виділяється вантажем у результаті екзотермічних реакцій та поглинена захисним шаром;

X_6 – розмірна стабільність матеріалу захисного шару: в розрахунках визначена як температурний коефіцієнт лінійного розширення;

X_7 – *структурна стабільність матеріалів та покриттів* – здатність зберігати структуру в умовах опромінення та в умовах температурних навантажень (безрозмірна відносна величина);

X_8 – *стабільність властивостей міцності* – зміна характеристик міцності матеріалів та покриттів в умовах опромінення і температурних навантажень (безрозмірна відносна величина, виражена в %);

X_9 – *стабільність теплофізичних властивостей* – зміна теплопровідності матеріалів та покриттів в умовах опромінення і температурних навантажень (безрозмірна відносна величина, виражена в %);

X_{10} – *об'ємний вміст скляного наповнювача у складі композиційних матеріалів та покриттів*: параметр, заданий при проектуванні та розробці технологічного процесу;

X_{11} – *пористість* матеріалів та покриттів;

X_{12} – *технологічність* (комплексний відносний показник) – сукупність властивостей, завдяки яким надається можливість виготовити блок або модуль біологічного захисту з найменшими витратами праці, матеріалів та засобів, дотримуючись при цьому експлуатаційних вимог (економічність, надійність, міцність тощо);

X_{13} – *кількість термоциклів*: кількісний показник термостійкості, необхідної для працездатності конструкцій в умовах термоциклічних навантажень;

X_{14} – *питома матеріаломісткість*: відносний безрозмірний показник, що вимірюється кількістю витрачених матеріальних ресурсів на один виріб;

X_{15} – *ефективність захисту від іонізуючого випромінювання*: екрануюча здатність матеріалів та покриттів, виражена в %.

Взаємозв'язок варіювання факторів інформаційної системи, що базується на принципі парного порівняння, наведений у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Взаємозв'язок факторів інформаційної системи

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1				+	+	–	–	–	–						
X_2														+	+
X_3												+		+	+
X_4					+							+			
X_5								+	+				–	+	+
X_6		+						–	–				+		
X_7		+				+		+	+				+		
X_8		+				+							+		
X_9		+			+	+							+		
X_{10}		+		+	+	+	+	+	+						
X_{11}		–		+	+			–	+				–		
X_{12}													+	+	+
X_{13}														+	+
X_{14}															
X_{15}															

У рамках формування вихідної інформації для кожного з факторів у таблицях також задається інтервал варіювання та його поточне значення (табл. 5.2). Когнітивна модель ситуації представлена на рис. 5.4. Червоними стрілками показані позитивні казуальні зв'язки (зростання одного фактора призводить до зростання іншого), синіми – негативні (зростання одного фактора призводить до зниження іншого). Побудова когнітивних карт з наступним розв'язанням прямих і зворотних задач дає можливості візуалізації взаємного впливу проектних та експлуатаційних факторів з реалізацією механізмів прийняття рішень при оцінюванні технічного стану на етапах виготовлення і експлуатації композитних конструкцій біологічного захисту. Результати моделювання представлені у вигляді двовірного масиву, рядки і стовпці якого визначають відповідно значення кожного з факторів (рядки) і значення всіх факторів (стовпці) у послідовні моменти часу. Інформація з двовірного масиву даних використовується підсистемами представлення результатів моделювання та підтримки думки експертів.

Таблиця 5.2 – Діапазони варіювання факторів

X	Фактор	Min	Поточне	Max
1	Сумарна активність випромінювань, МБк/л	370	1200	2000
2	Довговічність роботи конструкції, років	0	10	100
3	Товщина шару захисного матеріалу, мм	0,5	2	25
4	Поглинена енергія випромінювань, мбер/год	3,3	50	130
5	Поглинена кількість тепла, Вт/м	0,235	10	990
6	Розмірна стабільність, К ⁻¹	8,55	11,72	22,58
7	Структурна стабільність матеріалу, бали	0	30	10
8	Стабільність властивостей міцності, %	2	30	50
9	Стабільність теплофізичних властивостей, %	3	40	50
10	Об'ємний вміст скляного наповнювача, %	10	40	50
11	Пористість, %	0	18	30
12	Технологічність, бали	0	8	10
13	Кількість термоциклів, од.	0	18	30
14	Питома матеріаломісткість, бали	0,1	0,8	10
15	Ефективність захисту від випромінювань, %	0	50	100

Результати вирішення поставлених завдань носять узагальнений характер та можуть бути використані при виконанні проектної оцінки як конструкцій, так і елементів суден і плавучих споруд, призначених для транспортування та зберігання РАВ.

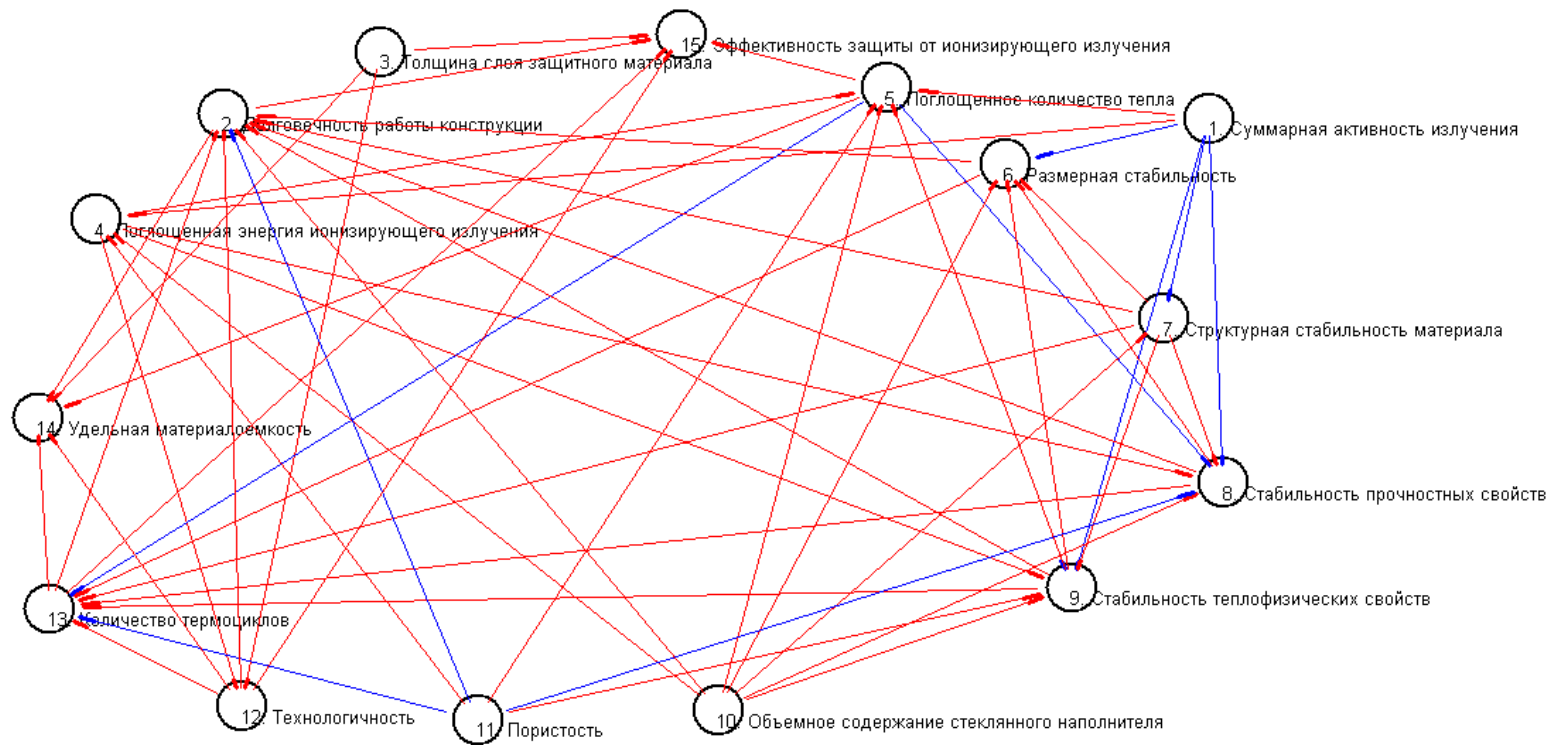


Рисунок 5.4 – Когнітивна модель ситуації взаємного впливу факторів проектування та експлуатації

(скріншот з програми наведений російською мовою)

В табл. 5.3 зведені результати вирішених у рамках розробленої когнітивної моделі задач, що наочно демонструють взаємозв'язок параметрів експлуатації конструкцій з властивостями та товщиною захисного шару.

Таблиця 5.3 – Результати розв'язання задач когнітивної моделі

Поставлене завдання	Тип задачі	Результати числового експерименту
	Призначення	
Збільшення сумарної активності РАВ з 1200МБк/л до 2000МБк/л	Пряма задача	- Зменшення довговічності роботи конструкції на 65 %. - Зниження ефективності захисту на 64,7 %. - Збільшення матеріаломісткості конструкції на 59,2 %.
	Розширення асортименту РАВ	
Підвищення екранування конструкції на 80 %	Обернена задача	- Зниження довговічності конструкції на 24%. - Збільшення поглиненої кількості тепла на 60,6 %.
	Підвищення ефективності захисту конструкції від дії випромінювань	
Підвищення довговічності конструкції до 20 років	Пряма задача	- Зниження поглиненої захисним шаром кількості тепла на 10 %. - Зниження поглиненої захисним шаром кількості енергії випромінювань на 10 %. - Збільшення питомої матеріаломісткості в 3 рази.
	Подовження терміну служби технічного засобу	
Необхідний приріст факторів для вирішення поставлених завдань	- Збільшення товщини захисного шару в 3 рази - Отримання безпористого шару конструкції біологічного захисту - Збільшення термостійкості захисного шару на 66,7% - Підвищення стабільності теплофізичних властивостей захисного шару на 25%	

Як приклад на рис. 5.5 наочно показано кількісну зміну факторів при вирішенні завдання збільшення сумарної активності радіоактивних вантажів.

	ВХОД	ТЕКУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	ВЫХОД	Консонанс
Суммарная активность излучения	Растет на 66,7%	1200,01	Не меняется	Невозможно (0,00)
Долговечность работы конструкции		10,00	Падают на -65,3%	Невозможно (0,01)
Толщина слоя защитного материала		2,00	Не меняется	Невозможно (0,00)
Поглощенная энергия ионизирующего излучения		49,98	Растет на 66%	Достоверно (1,00)
Поглощенное количество тепла		9,99	Растет на 65,3%	Почти достоверно
Размерная стабильность		11,72	Падают на -66%	Очень возможно
Структурная стабильность материала		9,00	Падают на -66%	Достоверно (1,00)
Стабильность прочностных свойств		30,00	Падают на -66%	Невозможно (0,01)
Стабильность теплофизических свойств		40,00	Растет на 65,3%	Возможно (0,51)
Объемное содержание стеклянного наполнителя		40,00	Не меняется	Невозможно (0,00)
Пористость		18,00	Не меняется	Невозможно (0,00)
Технологичность		8,00	Растет на 13,1%	Достоверно (1,00)
Количество термоциклов		18,00	Падают на -64,7%	Возможно (0,62)
Удельная материалоемкость		0,80	Растет на 59,2%	Очень возможно
Эффективность защиты от ионизирующего излучения		50,00	Растет на 64,7%	Очень возможно (0,76)

Рисунок 5.5 – Моделювання ситуації: збільшення сумарної активності випромінювання РАВ
(скриншот з програми російською мовою)

Завдання управління якістю конструкцій на етапі експлуатації включає в себе необхідність проведення числових експериментів з факторами у вигляді наступних властивостей захисного шару: X_1 – корозійна стійкість в агресивних середовищах; X_2 – міцність; X_3 – зносостійкість; X_4 – радіаційна стійкість; X_5 – рентгенозахисні властивості конструкцій; X_6 – товщина шару захисного покриття; X_7 – теплопровідність; X_8 – пористість; X_9 – вартість конструкції. Відповідні кількісні критерії оцінювання обраних показників визначені через відносну зміну маси, $\Delta m/m_0$, %; границю міцності при розтягуванні σ_b , МПа; ступінь екранування іонізуючих випромінювань, %; масовий коефіцієнт поглинання іонізуючого випромінювання $\mu_{\text{мас}}$, см²/г; товщину шару захисного покриття δ , мм; коефіцієнт теплопровідності конструкції λ , Вт/(м·К); пористість покриття, %; та вартість конструкції, грн. За даними критеріями здійснюється контроль якості конструкцій на стадіях проектування, виготовлення та експлуатації. Когнітивна модель ситуації наведена на рис. 7.6. Упорядкування факторів причин за силою впливу на фактор висновку здійснюється в режимі парного порівняння (рис. 5.7).

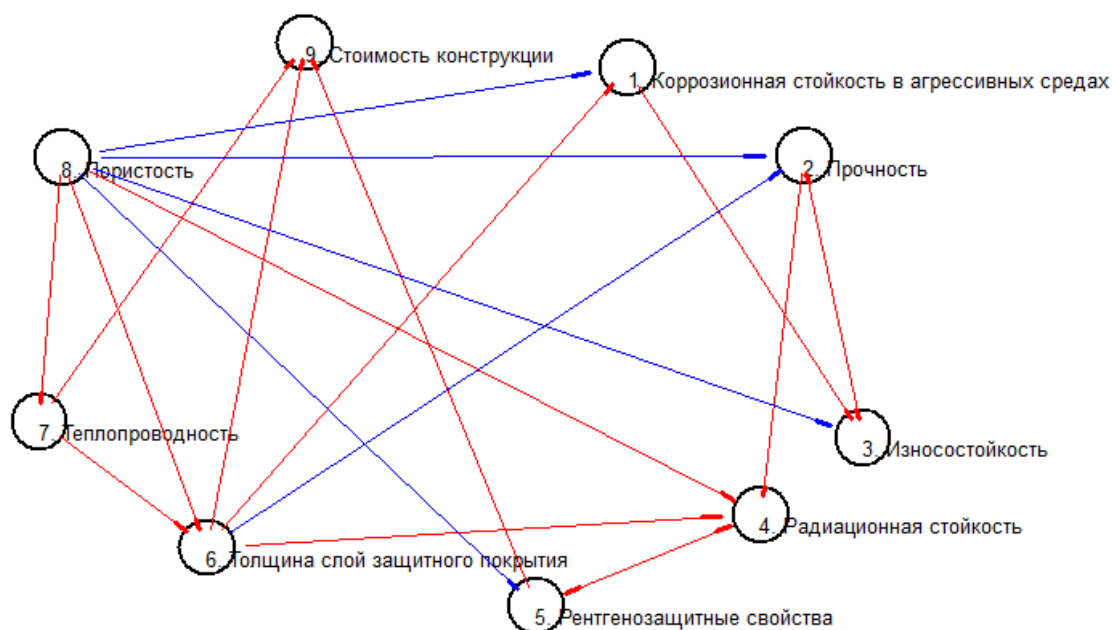


Рисунок 5.6 – Когнітивна модель ситуації
(скриншот з програми російською мовою)

	Корр стойк в	Проч	Износ	Ради стойк	Рент свой	Толщ слой защи	Тепл	Пор	Стои конс:
Коррозионная стойкость в агрессивных средах			1						
Прочность			1	1					
Износостойкость		1							
Радиационная стойкость					1				
Рентгенозащитные свойства				1					1
Толщина слой защитного покрытия	1	-1		1					1
Теплопроводность						1			1
Пористость	-1	-1	-1	1	-1	1	1		
Стоимость конструкции									

Рисунок 5.7 – Кількісна оцінка величини взаємного впливу факторів
(скриншот з програми російською мовою)

Числові діапазони варіювання критеріїв для композицій алюміній–скло та сталь–скло наведені у таблицях 5.4 і 5.5.

Таблиця 5.4 – Діапазони варіювання критеріїв для композицій алюміній–скло

X	Фактор	min	поточне	max
X_1	$\Delta m/m_0$, %	17	50	70
X_2	σ_b , МПа	328	350	365
X_3	HV_5 , МПа	703	750	777
X_4	Ступінь екранування ІВ, %	1	30	56
X_5	$\mu_{\text{мас}}$, см ² /г;	7,9	14,2	18,6
X_6	δ , мм	0,1	1	2
X_7	λ , Вт/(м·К)	41	45	88
X_8	Пористість, %	12	15	22
X_9	Вартість покриття 1м ² , грн	80	92	95

Таблиця 5.5 – Діапазони варіювання критеріїв для композицій сталь–скло

X	Фактор	min	поточне	max
X_1	$\Delta m/m_0$, %	20	50	85
X_2	σ_b , МПа	315	350	365
X_3	HV_5 , МПа	1800	2015	2663
X_4	Ступінь екранування ІВ, %	1	14	28
X_5	$\mu_{\text{мас}}$, см ² /г;	2,46	3	4,93
X_6	δ , мм	0,1	1	2
X_7	λ , Вт/(м·К)	22	26	41
X_8	пористість, %	17	22	20
X_9	вартість покриття 1м ² , грн	75,0	100	200

Експертно-аналітичний прогноз впливу товщини захисного шару (як важливого проектного критерія) на показники якості конструкцій біологічного захисту представлений у вигляді обробки числових експериментів, результати розв’язання задач наведені у табл. 5.6.

**Таблиця 5.6 – Вплив товщини захисного шару на показники якості
конструкцій**

Постановка задачі	Результати числових експериментів
Збільшення товщини захисного шару конструкцій на 50 %	• на 4,8 % знижується міцність зчеплення • на 4,6 % підвищується зносостійкість • на 26,7 % підвищується радіаційна стійкість • на 48,2 % зростає вартість конструкцій
Збільшення товщини захисного шару конструкцій у 2 рази	• на 16,5 % зростає стійкість в агресивних середовищах • на 9,8 % зменшується міцність зчеплення • на 9,3 % знижується зносостійкість • на 54,1 % підвищується радіаційна стійкість • на 53,6 % підвищуються рентгенозахисні властивості • на 97,8 % зростає вартість конструкції
Зменшення товщини захисного шару конструкцій на 50 %	• на 8,4 % знижується корозійна стійкість в агресивних середовищах • на 5 % підвищується міцність зчеплення • на 4,8 % знижується зносостійкість • на 27 % знижуються радіаційна стійкість та рентгенозахисні властивості • на 50 % знижується вартість конструкцій

За допомогою розробленої когнітивної моделі у числовому вигляді розв'язано задачу підвищення корозійної стійкості конструкції при негативному впливі на захисний шар агресивних середовищ, де як критерій вибрано відношення зміни маси Δm захисного композиційного шару під впливом хімічно активних середовищ до його вихідної маси m . З отриманих результатів видно, що підвищення корозійної стійкості конструкцій можливе на 16,5 % за рахунок збільшення товщини захисного шару майже в два рази. Встановлено, що під впливом хімічно активних середовищ на 9,8 % зменшується твердість захисного шару, при цьому його пористість та

теплопровідність практично не змінюються. Підвищення рентгенозахисних властивостей на 62,4 % та відповідно радіаційної стійкості на 63 % можливе при одночасному збільшенні товщини захисного шару на 98,8 %, що тягне за собою зростання вартісних показників конструкцій $\approx$ на 97,8 %.

Проведені на базі розроблених моделей числові експерименти показали добру узгодженість теоретичних та дослідних результатів; з їх допомогою визначено закономірності зміни факторів, які становлять найбільш практичний інтерес, що дає змогу отримати прогноз розвитку ситуацій без проведення великої кількості дороговартісних експериментів. Результати досліджень надалі використані для розробки практичних рекомендацій з виготовлення конструкцій біологічного захисту суден та плавучих споруд.

5.2 Аналіз критеріїв пошкоджуваності та систематизація експлуатаційних дефектів матеріалів конструкцій

Надійність суднових конструкцій визначається параметрами ремонтпридатності, до яких, у першу чергу, належать експлуатаційна та ремонтна технологічність – пристосованість до проведення робіт, які виконуються при технічному обслуговуванні та ремонті. Прогнозування можливості утворення експлуатаційних дефектів дає змогу оцінювати реальний ресурс роботи композитних конструкцій та розробити технологічні заходи, спрямовані на його продовження. Термін «експлуатація конструкцій» визначається станом поверхні, деградацією структури та властивостей матеріалів захисного шару, в першу чергу схильного до впливу іонізуючих випромінювань, температурних навантажень і хімічно активних середовищ. Для визначення якісних та кількісних критеріїв у роботі використані металографічні методи досліджень [44, 158, 294], де головний пріоритет віддається діагностиці структурних змін. Зіставлення результатів досліджень зразків матеріалів та покриттів, які спершу зазнали опромінення γ -променями Co^{60} , а потім пройшли термоциклічні випробування або витримку в хімічно активних середовищах, з їхніми вихідними характеристиками дозволило встановити якісні критерії (поява додаткових пор; утворення мікро- та макротріщин; відшарування покриттів; викришування скляних включень;

утворення корозійного осаду, зміна забарвлення, набухання) та кількісні критерії (глибина та розміри механічних пошкоджень, мм; обсяг та розмір пор, мкм; бал зерна, розмір ОКР, нм; мікротвердість металевої матриці Нц або за Віккерсом HV, МПа; питомі значення зміни маси $\Delta m/S$, г/м²). Для їх діагностики слід використовувати параметричний та інструментальний методи мікро- і макроаналізу, механічні випробування зразків-свідків.

Експлуатаційні дефекти умовно можна поділити на радіаційні, корозійні, дефекти термічного впливу і випадкового характеру, де за інформаційні параметри обрано ознаки деградації структури, які утворюються внаслідок:

- опромінення потоками частинок або квантів іонізуючих випромінювань (радіаційні дефекти, рис. 5.8); їх джерелами можуть стати неупаковані тверді РАВ (наприклад, елементи обладнання, металовиробів), рідкі РАВ, вантажі з пошкодженою упаковкою;
- короткочасного або тривалого впливу температури на матеріали конструкцій, перш за все, на захисний композиційний шар (дефекти термічного впливу, рис. 5.9); до підвищених температур можуть призвести екзотермічні процеси під час саморозігрівання РАВ, короткочасного температурного впливу в умовах виникнення пожежонебезпечних та аварійних ситуацій;
- впливу на матеріали конструкцій хімічно активних середовищ, зокрема рідких РАВ, розчинів для дезактивації (корозійні дефекти, рис. 5.10);
- механічних пошкоджень під час вантажно-розвантажувальних робіт (дефекти випадкового характеру); це можуть бути механічні пошкодження, зломи, що утворюються від з'єднувальних елементів та ін.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з організацією обчислювальних процесів та обробки інформації у вирішенні задач оцінки технічного стану конструкцій, які входять до складу елементів біологічного захисту на суднах і плавучих спорудах.



Рисунок 5.8 – Радіаційні дефекти метал-скляного захисного шару конструкцій



Рисунок 5.9 – Дефекти термічного впливу на метал-скляний захисний шар конструкцій



Рисунок 5.10 – Корозійні дефекти метал-скляного захисного шару конструкцій

5.3 Інформаційна підтримка оцінювання технічного стану композитних конструкцій суден та плавучих споруд

5.3.1 Розробка моделі та структури спеціалізованої інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*»

Сучасний розвиток комп'ютерних технологій, розширення номенклатури застосовуваних у суднобудуванні матеріалів і покриттів створюють передумови для реалізації нових механізмів управління засобами технічної діагностики дефектів конструкцій суден і плавучих споруд. Інформація, яка надходить від розробників нових матеріалів, як правило, представлена у вигляді експериментальних робіт з виконаними мікроструктурними дослідженнями і не зібрана в єдиний інформаційний масив, що містить порівняльні відомості про структуру, властивості та характер пошкоджуваності. На рис. 5.11 представлено узагальнену структурну схему застосування інформаційних ресурсів для оцінювання технічного стану суднових захисних конструкцій.



Рисунок 5.11 – Узагальнена структурно-логічна схема застосування інформаційних ресурсів для оцінювання технічного стану захисних композитних конструкцій

В основу створення нової інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» покладені результати проведених у попередніх розділах роботи досліджень щодо вибору технологічних параметрів формування композиційних матеріалів і покриттів, їх структури та властивостей, аналіз і систематизація експлуатаційних дефектів в умовах опромінення, термоциклічних навантажень, хімічно активних середовищ. Розробка бази даних для великих обсягів інформації є досить складним завданням, основні етапи вирішення якого включають концептуальне моделювання предметної області та розробку їх структури на основі систематизації табличної і графічної інформації; реалізацію всіх етапів проектування матеріалів з особливими властивостями.

В основу проектування структури БД покладені завдання мінімізації дублювання даних і спрощення процедур їх обробки та поновлення, що реалізовано за допомогою побудови фізичної моделі бази даних (рис. 5.12). Згідно з розробленою моделлю, дані, що обробляються, подаються у вигляді таблиць, де як записи виступають основні атрибути об'єктів, а поля записів призначені для зберігання значень атрибутів окремих екземплярів об'єктів. Основним елементом ІПС є інформативно-пошуковий масив документально-фактографічного типу, документальна частина якого створюється шляхом обробки відповідних документів: статей, патентів, протоколів, реферативної інформації та містить графічні об'єкти, такі, як мікроструктури матеріалів, фрагменти дифрактограм, мікрофотографії порошків та інших наповнювачів. Цифрові об'єкти повинні надаватися в окремому файлі з розширенням *.pdf, *.tiff. Фактографічна частина інформаційно-пошукового масиву має рядковий запис та заповнюється за результатами проведення експериментальних досліджень. Розроблена БД має віддалений доступ та є дворівневою, протестована за допомогою генератора даних. Серверна частина виконує обслуговування та управління базою даних, відповідає за цілісність і збереження даних, забезпечує операції введення–виведення при доступі клієнта до інформації.

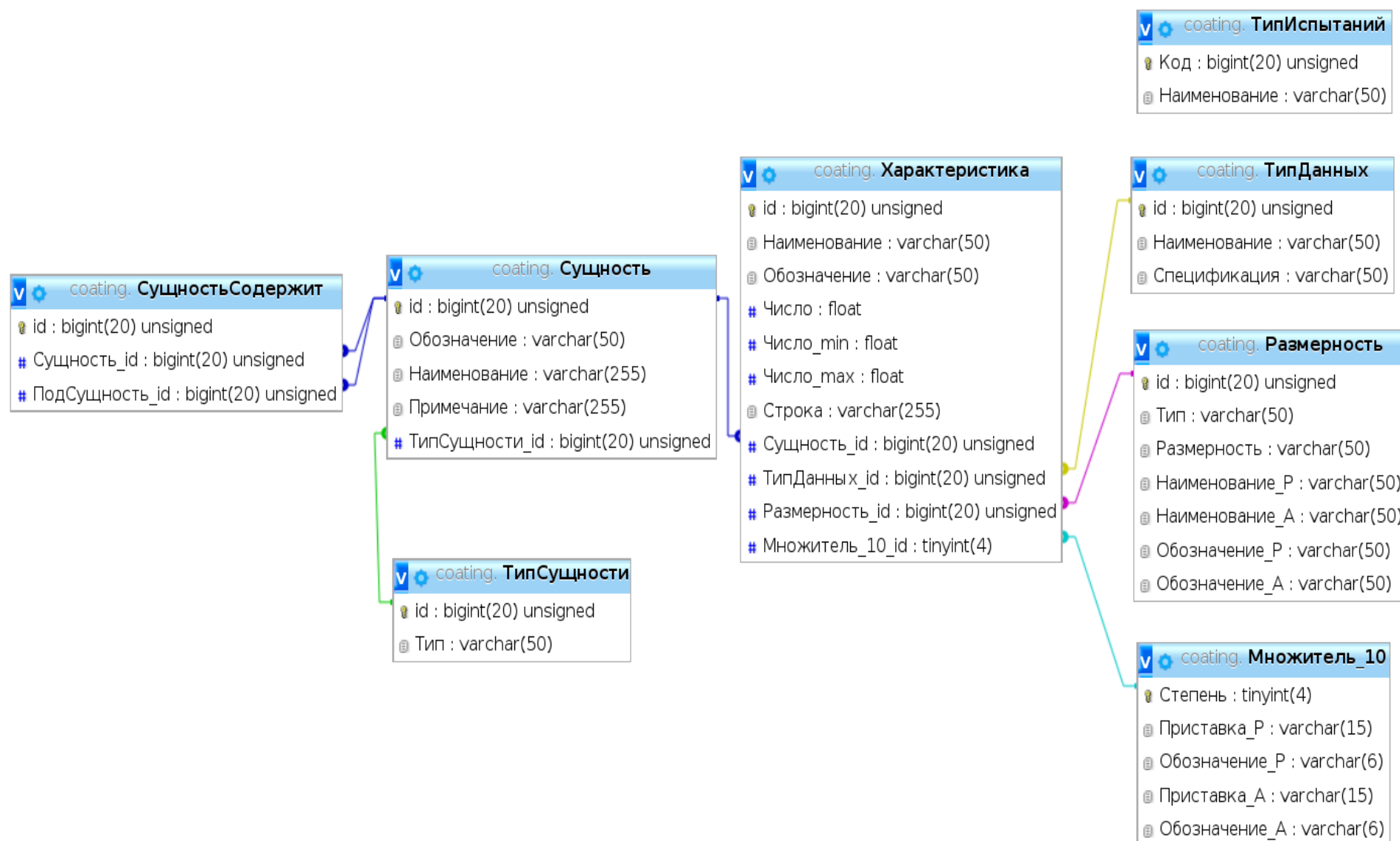


Рисунок 5.12 – Фізична модель бази даних

Представлений програмний продукт, розроблений мовою SQL (Stucturend Query Language) [100, 197, 365], може працювати під управлінням операційних систем Linux, Windows. Web-додатки написані мовою програмування PHP, перевагою якої є здатність генерувати не тільки HTML-документи, а й зображення різних форматів: IPEG, GIF, PNG, файли PDF та FLACH. Разом з MySQL мова PHP є оптимальним варіантом для створення інтернет-сайтів будь-якої складності; текст пакета програм наведено у Додатку Г1. Дані, які вносяться до БД, супроводжуються відповідною графічною інформацією: мікрофотографіями мікроструктур, порошків, наповнювачів, фрагментами дифрактограм та іншими об'єктами. Клієнтська частина системи управління базами даних (СУБД) забезпечує інтерфейс зв'язку користувача з базою даних: перетворює запити в команди запитів до серверної частини. Доступ до БД здійснюється через web-сервер Apache [197] – програму, яка здійснює прийом запитів по протоколу http, їх обробку і передачу відповіді відвідувачеві сервера у вигляді запитів або html-документів, картинок і файлів. У базу даних можуть заноситися відомості як про сучасні матеріали та покриття, що застосовуються в суднобудівних технологіях, так і про нові розробки. Розроблене інформаційне забезпечення дає змогу систематизувати та обробляти отриману інформацію, а також спростити процедуру заміни і впровадження нових матеріалів.

Створення ІПС «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» спрямовано на вирішення завдань оцінки технічного стану конструкцій суден та плавучих споруд і дасть змогу удосконалити роботу експерта, скоротивши час на обробку інформації, розробку моделей поведінки матеріалів, що застосовуються в умовах експлуатації.

5.3.2 Принципи формування та заповнення інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*»

Наступні етапи роботи пов'язані з апробацією ІПС «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» у системі адміністратор–користувач: робота починається з

інтерфейсу (рис. 5.13), який написаний російською мовою і містить необхідні розділи для швидкого ознайомлення з роботою в системі.

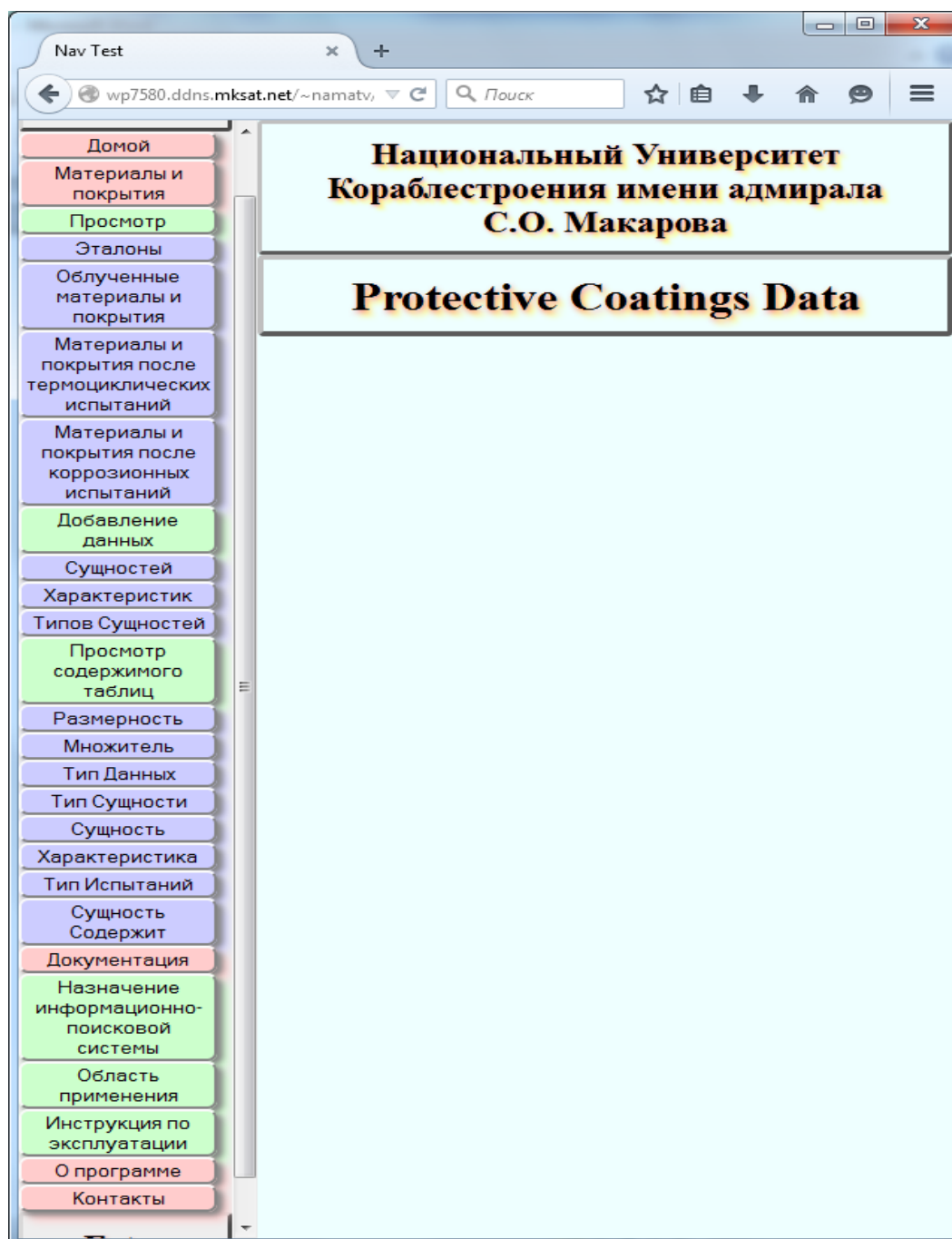


Рисунок 5.13 – Интерфейс користувача ІПС
«PROTECTIVE COATINGS DATA»
(скріншот з програми російською мовою)

Для зберігання інформації в системі реалізовано базу даних, яка містить такі головні таблиці:

- *«суцності»* – назви композицій, режими отримання та підготовки поверхні, графічні об'єкти (мікроструктури і фрагментів рентгенограм);
- *«характеристики»* – властивості матеріалів та покриттів: щільність, пористість (загальна, відкрита), мікротвердість H_m (матриці, включень), твердість за Віккерсом HV, адгезійна міцність $\sigma_{отр}$, ефективний ТКЛР α^* , коефіцієнти тепло- та температуропровідності λ та a , масовий коефіцієнт послаблення випромінювань $\mu_{мас}$, ступінь екранування, коефіцієнт розсіювання енергії ψ – їх значення наведені у таблиці у вигляді чисел; розмірність додається з допоміжних таблиць (рис. 5.14), інформація також може мати рядковий запис;
- *«типи суцностей»* – графічні об'єкти: мікроструктури, ескізи, схеми.

Електронна форма подання даних дає змогу порівнювати властивості одних і тих самих матеріалів до та після випробувань, інформація про які вводиться адміністратором у таблиці (рис. 5.14). Зібрана інформація супроводжується фотографічними об'єктами мікроструктур, мікрофотографіями наповнювачів, фрагментами рентгенограм:

- *«Эталон»* – містить інформацію про матеріали та покриття до їх експлуатації; в процесі оцінки технічного стану відомості з цієї таблиці приймаються як базові;
- *«Облученные материалы и покрытия»* – зібрані результати випробувань опромінених матеріалів; основна таблиця доповнена записом «Режимы облучения», поля якої містять довільну текстову інформацію необмеженої довжини;
- *«Материалы и покрытия после термоциклических испытаний»* – основна таблиця містить усі записи таблиці «Эталон» та доповнена записами «Режимы испытаний», «Описание повреждений» з довільною текстовою інформацією та «Количество термоциклов», поле якої містить числове значення;

- «Материалы и покрытия после коррозионных испытаний» – основна таблиця доповнена записами «Режимы испытаний», «Внешние признаки разрушений» з довідною текстовою інформацією необмеженої довжини, а також записом «Отрицательное изменение массы», поле якої містить цифрове значення.

The screenshot shows a web application interface for managing characteristics. On the left is a sidebar menu with items like 'Домой', 'Материалы и покрытия', 'Просмотр', 'Эталоны', etc. The main area is titled 'Добавление характеристик' (Adding characteristics). It contains a form with fields for 'Сущность' (Entity) set to 7, 'Характеристики' (Characteristics) set to 'Св-АМг5-ПСМ (40)', 'Тип данных' (Data type), '10%', 'Размерность' (Dimension), 'Наименование' (Name), and 'Обозначение' (Designation). Below the form is a table titled 'haracteristic_list.php' with columns: id, Наименование, Обозначение, Число, Число_min, Число_max, Строка, Сущность_id, Файл_id, Тип_Данных_id, Размерность_id, Множитель_10_id. The table contains 16 rows of data.

id	Наименование	Обозначение	Число	Число_min	Число_max	Строка	Сущность_id	Файл_id	Тип_Данных_id	Размерность_id	Множитель_10_id
4	Кажущаяся плотность	ρ	1500				7		1	15	0
5	Пористость общая	П	22				7		1	66	0
6	Пористость открытая	ПО	5				7		1	66	0
7	Микротвердость матрицы	H _ц 20	470				7		1	25	6
8	Микротвердость включения	H _ц 200	1250				7		1	25	6
9	Твердость покрытия	HV5	777				7		1	25	6
10	Прочность сцепления с подложкой	сопр	15				7		1	25	6
11	Эффективный ТКЛР	α^*	6.91				7		1	64	-6
12	Коэффициент теплопроводности	λ	75				7		1	55	0
13	Коэффициент температуропроводности	a	53				7		1	67	-6
14	Массовый коэффициент поглощения излучений	$\mu_{\text{мас}}$	18.6				7		1	69	0
15	Степень экранирования γ -излучений Со60	ϵ	55				7		1	66	0
16	Коэффициент рассеивания энергии	Ψ	12.32				7		1	66	0

Рисунок 5.14 – Інтерфейс введення експериментальних даних
(скріншот з програми російською мовою)

Робота з базою даних можлива у двох режимах: адміністратора та користувача. Введення і редагування інформації здійснюється адміністратором, користувачеві надаються функції швидкого пошуку та порівняння, сортування матеріалів за назвами і датою останнього редагування, перегляду повної інформації про матеріал. У рамках системи пошук може бути здійснений за запитом, що включають в себе конкретні назви композицій та ключові слова. Крім функцій перегляду, інформаційно-пошукова система дає змогу здійснювати додавання даних і перегляд вмісту таблиць. У базу даних заноситься інформація не тільки про нові композиції, але й про інші матеріали і покриття, що застосовуються у суднобудуванні.

5.3.3 Застосування інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» на етапах проектування і технологічної підготовки конструкцій

На етапі проектування елементів суден здійснюється вибір матеріалів, які надалі забезпечують їх надійну експлуатацію. На основі інформації, занесеної в базу даних, зіставляються зміни, які відбуваються у структурі і властивостях матеріалів в умовах, найбільш наближених до умов експлуатації (опромінення, термоциклічного навантаження, контакт з хімічно активними речовинами і корозійними середовищами). Робота з таблицями «Облученные материалы и покрытия», «Материалы и покрытия после термоциклических испытаний», «Материалы и покрытия после коррозионных испытаний» (рис. 5.14) дає змогу проаналізувати закономірності можливої пошкоджуваності матеріалів конструкцій та розробити комплекс відповідних технологічних заходів; тоді ж призначаються номінальні (вхідні), допустимі і граничні значення діагностичних параметрів. Таким чином, в єдиній, раціонально структурованій системі (рис 5.11) зберігається інформація, отримана з документальних джерел (протоколів, сертифікатів), наукової літератури

(статей, патентів), рекламної продукції (каталогів підприємств), на підставі результатів експериментальних досліджень, виконаних у спеціалізованих лабораторіях, або в процесі випробувань на виробництві. У таблицю «Сущности» вносяться дані, які стосуються хімічного складу, технологічних режимів формування матеріалів і покриттів, їх рекомендованих товщин та ін. Таким чином, відповідно до рекомендацій можна вибирати конструкційні, облицювальні, теплоізоляційні, захисні матеріали та покриття, їх склад (матрицю, наповнювач), оцінювати мікроструктуру і фазовий склад, що доповнюється можливістю роботи з фотографічними об'єктами. Поряд з мікрофотографіями, занесеними до бази даних, наводиться додаткова інформація про прилади, умови зйомок та збільшення. Разом з відцифрованими дифрактограмами вноситься інформація про об'єкти пробопідготовки, обладнання, типи і режими рентгенівських трубок (рис. 5.15), що зменшує ймовірність випадкових помилок.

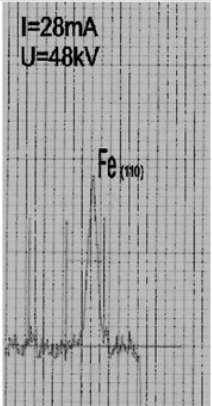
Установка	ДРОН-3	
Рентгеновская трубка	$\text{CuK}(\alpha=1.54178)$	
Режимы работы трубки	Напряжение $U = 48 \text{ кВ}$; Ток накала $I = 28 \text{ мА}$; Интенсивность излучения $2,0 \cdot 10^4$; постоянная времени $S = 1$.	
Регистрация дифракционных картин	Самописец с автоматическим отметчиком углов	
Объект пробоподготовки	Плоский шлиф толщиной 2 мм	

Рисунок 5.15 – Фрагмент візуалізації режимів рентгеноструктурного аналізу (скріншот з програми російською мовою)

Інтерфейс роботи з мікроструктурами наведено на рис. 5.16.

Nav Test – Mozilla Firefox

Nav Test

localhost/~namatv/Coating/

Search

Header

Домой

Материалы и покрытия

Просмотр

Добавление данных

Сущностей

Характеристик

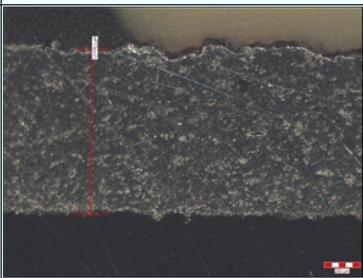
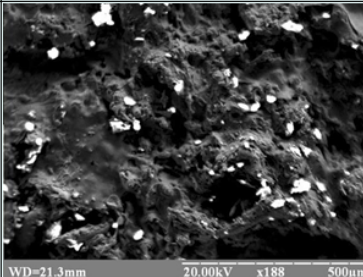
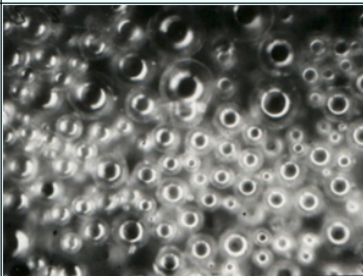
Типов Сущностей

Документация

О программе

Контакты

Foter

Микротвердость включения Н _μ 200, Па	1250*10 ⁶
Твердость покрытия HV5, Па	777*10 ⁶
Прочность сцепления с подложкой σотр,	15*10 ⁶
Эффективный ТКЛР α*, 1/К	6.91*10 ⁻⁶
Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	75
Коэффициент температуропроводности а, м2/с	53*10 ⁻⁶
Массовый коэффициент поглощения излучений μмас, см2/г	18.6
Степень экранирования γ-излучений Со60	55
Коэффициент рассеивания энергии	12.32
Микроструктура покрытия на подложке. Прибор для измерения микротвердости МПТ-3+ цифровая камера. Увеличение, x70	
Электронный микроскоп РЭММА-102а. Увеличение, x188	
Полые стеклянные микроферы. Увеличение x200	

Запрос вернул 16 строк.

Рисунок 5.16 – Интерфейс роботи з мікроструктурами
(скріншот з програми російською мовою)

Виготовлення конструкцій в умовах суднобудівного підприємства вимагає точного дотримання умов формування та підготовки поверхні, режими яких також заносяться в базу даних (рис. 5.17).

Режимы нанесения		Режимы дробеструйной обработки	
Сила тока, А	80	Давление сжатого воздуха, МПа	0,6
Напряжение, В	30	Диаметр сопла, мм	10
Давление сжатого воздуха	0,4	Расстояние от среза сопла к поверхности образца, мм	100
Диаметр основного сопла, мм	6	Угол наклона сопла к поверхности, °	90
Диаметр дополнительного сопла, мм	8	абразив	электрокорунд марки 7Б
Расстояние от среза дополнительного сопла к подложке	90		

Рисунок 5.17– Фрагмент візуалізації технологічних режимів
(скріншот з програми російською мовою)

Використання проектантом відомостей, які занесені до бази даних, спільно з причинно-наслідковими діаграмами Парето та Ісікави дає змогу попередити та, по можливості, усунути технологічні дефекти на етапах виготовлення конструкцій. Користувачеві надається можливість швидкого пошуку, сортування матеріалів за назвою, категорією, властивостями, датою останнього редагування; перегляду повної інформації про певний матеріал з виведенням на друк необхідної інформації.

Робота вузькопрофільних фахівців з інформаційно-пошуковою системою «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» спрямована на отримання нових знань про пошкоджуваність існуючих і нових матеріалів на етапах тестування та пробних випробувань.

5.3.4 Застосування інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» для оцінювання експлуатаційних дефектів конструкцій

Технічна діагностика суднових конструкцій виконується в період поточного та капітального ремонту відповідно до спеціального положення, виданого судновласником [300]. Суднобудівні і судноремонтні підприємства, невід’ємною частиною яких є лабораторії: центральні заводські, неруйнівного контролю, улаштовані спеціальним обладнанням для проведення хімічного, металографічного та рентгеноструктурного аналізу,

механічних випробувань металів і сплавів, віброакустичного контролю. Сучасна практика оцінки технічного стану показала ефективність застосування переносних діагностичних приладів, розміщених в лабораторії плавучих майстерень [341]. Методи, що використовувалися, засновані на фотографуванні та детальному описі пошкоджених ділянок, а також на відборі проб для проведення досліджень з подальшим закладенням місць пошкодження. Застосування в процесі діагностування спеціалізованої ІПС «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» дозволить експерту порівнювати структурні зміни на пошкоджених ділянках з еталонними зразками, скласти об'єктивний висновок та призначати ремонтні роботи відповідно до рекомендацій, використовуючи занесені в базу даних технологічні режими. Завдяки запропонованій структурі інформаційно-пошукової системи створюється повна картина про можливі види пошкоджуваності матеріалів у вибраних умовах експлуатації.

Діагностика проводиться шляхом зіставлення мікроструктур зразків-свідків або топографії поверхні конструкцій після експлуатації з мікрофотографіями з групи «Эталоны», в яку поміщена інформація про матеріали та покриття до експлуатації. Крім того, використання функцій пошуку дозволяє порівняти виміряні фізико-механічні характеристики з даними, наприклад, по твердості HV_5 , по границях міцності σ_b та текучості σ_T як еталонних зразків, так і матеріалів, що попередньо пройшли випробування. За результатами порівняння графічних об'єктів можна, наприклад, оцінити вид корозійного пошкодження (рівномірна, піттингова корозія та ін.), зміну текстури, появу додаткових пор, тріщин, розшарування, викришування включень та інші дефекти. Як приклад на рис. 5.18 наведено накладення графічних об'єктів: мікроструктур (а) і фрагментів рентгенограм (б) електродугових покриттів на основі Св-08Г2С, наповнених ПСМ.

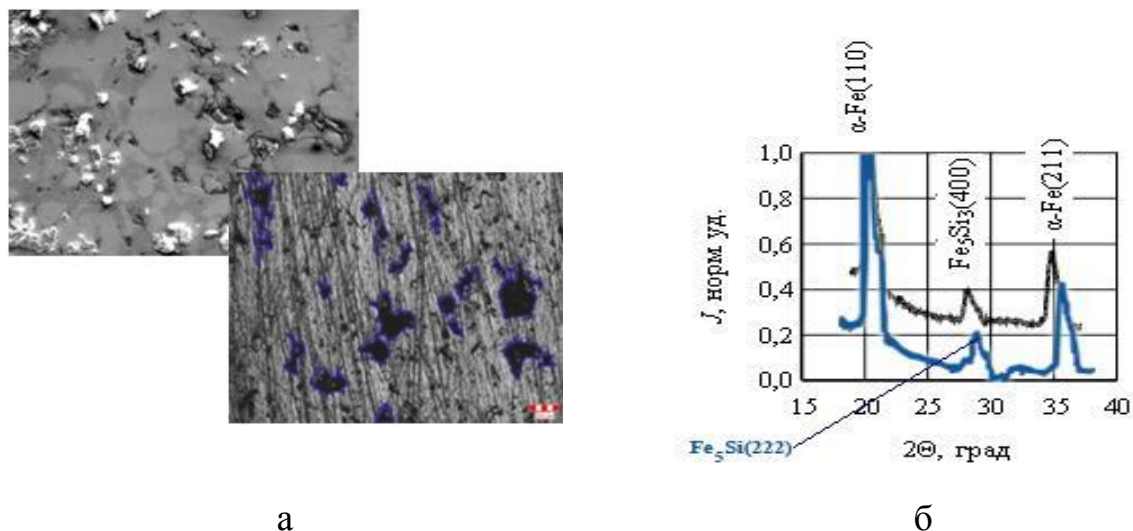


Рисунок 5.18 – Приклад накладення графічних об'єктів:

a – мікроструктур ($\times 120$): еталон–зразок після корозійного руйнування в середовищі HNO_3 (20 %) протягом 840 годин; *б* – фрагментів рентгенограм: еталон–зразок після термообробки при температурі 500 °С

Накладанням фрагментів мікроструктур (рис. 5.18, *a*) можна отримати висновок про характер пошкоджуваності: викришування скляних включень та появу нових пор. За допомогою цифрової обробки місць пошкоджень можна визначати розміри пор, що дає змогу прогнозувати властивості конструкцій. Шляхом накладання фрагментів дифрактограм (рис. 5.18, *б*), де чорним кольором виділено еталон, а синім – фрагмент дифрактограми після термообробки при температурі 500 °С, можна судити про зміну ширини піків, а отже, про зміни розмірів зерен. Обробка отриманої інформації дає змогу розрахувати розмір ОКР і аналізувати структурні зміни, які були викликані впливами температур. Таким чином, ще на етапі проектування судна або плавучої споруди конструктор володіє всім спектром інформації про матеріали та покриття, що застосовуються, включаючи технологічні рекомендації, і може вирішувати оптимізаційні задачі з вибору найкращих альтернатив під конкретні цілі. Розроблене програмне забезпечення дасть змогу ефективно вирішувати дослідницькі та експлуатаційні завдання, підвищити якість роботи, скоротити час на отримання кінцевого результату, а також сприяє полегшенню впровадження нових матеріалів і покриттів у

суднобудівні технології. Запропонований метод оцінки технічного стану може бути реалізований також для інших металевих та неметалевих конструкцій суден, призначених для транспортування небезпечних вантажів.

5.4 Алгоритм оцінювання технічного стану композитних конструкцій

5.4.1 Основні положення

Алгоритм оцінки технічного стану являє собою перелік інструкцій, що визначають порядок дій науково-технічного працівника на етапах проектування і технологічної підготовки композитних конструкцій та дій експерта на етапах експлуатації судна або плавучої споруди. Оцінювання технічного стану проводиться з урахуванням процесів пошкоджуваності, деградації структури та властивостей в умовах тривалої експлуатації.

5.4.2 Нормативні посилання

- Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі СОЛАС-74/88;
- Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення з суден МАРПОЛ 73/78;
- Норми МАГАТЕ з безпеки для захисту людей та навколишнього середовища: правила безпечного перевезення радіоактивних матеріалів;
- Міжнародний кодекс морського перевезення небезпечних вантажів; Правила морського перевезення небезпечних вантажів;
- Європейська угода про міжнародне перевезення небезпечних вантажів внутрішніми водними шляхами;
- Рекомендації з безпечного транспортування небезпечних вантажів та пов'язаною з цим діяльністю в портах, 1995 р.;
- Рекомендації ООН з перевезення небезпечних вантажів. Типові правила (ST/SG/AC, 10/1/ Rev.10);

- Правила технічної експлуатації морських суден. Основне керівництво. РД 31.20.01-97;
- Правила техніки безпеки на суднах морського флоту РД 31.81.10-91 Керівництво з технічного нагляду за судами в експлуатації. Регістр;
- Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр;
- Санітарні правила для морських суден України. ДСП 7.7.4-057-2000;
- Комплексна система технічного обслуговування і ремонту суден. РД 31.20.50-87.

5.4.3 Оцінювання технічного стану композитних конструкцій на етапі проектування елементу біологічного захисту

У процесі проектування конструкцій виконується вибір матеріалів та покриттів. На підставі наявних в ІПС «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» даних про структуру, властивості та їх зміну в певних умовах експлуатації складається висновок, результати якого в подальшому використовуються для зіставлення даних при виконанні технічної експертизи.

5.4.4 Оцінювання технічного стану композитних конструкцій на етапі технологічної підготовки елементу біологічного захисту

При відсутності сертифікатів або невідповідності фактичної марки сталі, зазначеної в проекті, визначаються показники міцності сталі, а також металографічні або хімічні дослідження зразків відповідно до ГОСТ 7564-97, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 22536.0-87. При виборі складу та для призначення технологічних режимів необхідно строго дотримуватися режимів, указаних у техзавданні.

5.4.5 Оцінювання технічного стану композитних конструкцій на етапі експлуатації елементу біологічного захисту

Для огляду виконується очищення поверхні від продуктів забруднення та корозії. У місцях пошкоджень захисного композиційного шару відбираються проби. При виявленні великих ділянок ушкоджень захисний шар видаляється повністю.

У разі пошкоджень тільки захисного композиційного шару застосовуються методи дефектоскопії – сукупності методів неруйнівного контролю, що здійснюється на зразках-свідках за допомогою вимірювального інструменту, лупи, мікроскопів, рентгенівських установок, товщиномірів та іншої апаратури.

Тріщини визначаються візуальним оглядом за допомогою лупи, дефектоскопів, протирання гасом. Обстеження та контроль технічного стану металевих конструкцій виконується за методиками відповідно до ГОСТ 12503-75, ГОСТ 20415-82, ГОСТ 9.101-2002, ГОСТ 9.908-85, ГОСТ 9.407-84, ГОСТ 9012-73, ГОСТ 14782-86.

Обстеження бетонних панелей з визначенням характеристик фізико-механічного стану бетону виконується згідно з методиками, викладеними в ГОСТ 22690-88, ГОСТ 17624-2012, ГОСТ 18105-2010. При необхідності відбираються зразки матеріалу та досліджуються в спеціалізованих лабораторіях відповідно до ГОСТ 12730.0-84–12730.4-84, ГОСТ 22783-77, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 26134-84.

5.4.6 Діагностування експлуатаційних дефектів

Металографічний аналіз ушкоджень сталевोї обшивки виконується за ГОСТ 5639-82 на спеціально підготовлених мікрошліфах, вирізаних із зразків-свідків. Для зразків композиційних захисних покриттів, що були сколені зі сталевого облицювання, можна використовувати топографію поверхні. Для вимірювань величин корозійних пошкоджень на поверхні захисного покриття та сталевих конструкцій слід застосовувати лінійки (ГОСТ 427-75), штангенциркулі (ГОСТ 166-89), товщиноміри: механічні (ГОСТ 11358-89), магнітні ультразвукові, γ -товщиноміри. Вимірювання глибини пошкоджень можуть виконуватися глибиномірами (ГОСТ 7661-67) або індикаторами годинникового типу (ГОСТ 577-68). Вимірювання проводяться відповідно до вимог ГОСТ 26466.2-94.

Розміри ушкоджень вимірюються з точністю до 50 мкм, вимірювання глибини та ширини тріщин менше 1 мкм можна виконувати за допомогою

щупів, а з шириною більше 1 мм – за допомогою металевої лінійки за ГОСТ 427-75 з точністю до 0,5 мм. При відборі проб для підготовки зразків-свідків необхідно документально зафіксувати, з якої ділянки взяті матеріали для досліджень.

5.4.7 Висновок

Висновок про ступінь пошкоджуваності та необхідності виконання заміни захисного метал-скляного шару або самої конструкції складається на підставі результатів візуального контролю поверхні конструкцій та виконаних досліджень зразків-свідків. Отримані результати в процесі обробки інформації підлягають зіставленню з еталонними зразками з БД ІПС «*PROTECTIVE COATINGS DATA*» та даними про можливі види пошкоджуваності.

5.5 Висновки до розділу 5

1. За допомогою графічного методу аналізу причинно-наслідкових зв'язків побудовані діаграми Парето та Ісікави, які встановлюють взаємний вплив проектних і технологічних факторів на якість композитних конструкцій із захисним шаром у вигляді метал-скляного електродугового покриття або облицювання склоалюмінієвими плитками, що дасть змогу виявити дефекти та виключити чинники їх виникнення ще на етапах виготовлення.

2. Побудова когнітивних карт з постановкою числових експериментів і розв'язуванням прямих і обернених задач дає можливості візуалізації взаємного впливу проектних і експлуатаційних факторів композитних конструкцій з реалізацією механізмів прийняття рішень при оцінюванні їх технічного стану. Визначено, що підвищення на 80 % ступеня екранування конструкцій сприятиме збільшенню $\approx$ на 60 % кількості поглинутої теплової енергії, проте призведе до зниження їх довговічності на 24 %; збільшення удвічі товщини захисного шару і зростання на 98 % вартісних показників,

дозволить десь на 16 % підвисити його стійкість у агресивних середовищах, до 54 % – рентгенозахисні властивості та радіаційну стійкість, проте на 10 % знизиться міцність зчеплення для метал-скляних електродугових покриттів.

3. Розроблено нову інформаційно-пошукову систему «*PROTECTIVE COATINGS DATA*», основним елементом якої є інформаційно-пошуковий масив документально-фактографічного типу; база даних має віддалений доступ та є дворівневою; програмний продукт написаний мовою SQL, може працювати під управлінням операційних систем Linux, Windows; Web-додатки написано мовою програмування PHP.

4. Завдяки структурі інформаційно-пошукової системи утворюється повна картина щодо можливих видів пошкоджуваності матеріалів і покриттів в умовах опромінення, термоциклічного навантаження, корозійного впливу хімічно активних середовищ, що дасть змогу ефективно вирішувати дослідницькі та експлуатаційні завдання.

5. Запропоновано алгоритм оцінювання технічного стану композитних конструкцій, які складають елементи біологічного захисту суден та плавучих споруд на стадіях проектування, технологічної підготовки та експлуатації конструкцій.

Наукова значущість розділу полягає у розробці нових науково-методичних принципів оцінювання технічного стану композитних захисних конструкцій суден та плавучих споруд, призначених для транспортування і зберігання РАВ, які шляхом побудови причинно-наслідкових діаграм, когнітивних та інформаційних моделей розкривають взаємозв'язок між проектними, технологічними і експлуатаційними факторами.

Практична значущість розділу полягає у можливості виявлення експлуатаційних дефектів ще на етапах проектування, доступності методів їх систематизації і аналізу.

Результати розділу викладені в роботах [40, 104, 115, 117, 131, 132, 264, 267, 325, 327, 329, 376].

РОЗДІЛ 6

ПРОЕКТНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИГОТОВЛЕННЯ МОДУЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ СУХОВАНТАЖНОГО СУДНА

За мету прийнято зниження масогабаритних показників елемента біологічного захисту шляхом удосконалення за допомогою нових метал-скляних матеріалів і покриттів модульної конструкції з розв'язанням задач міцності щодо раціонального її розташування на багатоцільовому суховантажному судні, розробкою технологічних рекомендацій щодо її виготовлення та прогнозуванням можливості експлуатації у екстремальних умовах.

Об'єктом досліджень є процеси формування та монтажу модуля біологічного захисту в залежності від енергетичних параметрів РАВ та координат центра його ваги порожнем або в умовах завантаження.

Предметом досліджень є закономірності формування панелей модуля біологічного захисту та їх знеміцнення в умовах короточасних температурних навантажень.

6.1 Аналіз проектно-технологічних факторів з вибором матеріалів

У роботі розглядається можливість безпечної ізоляції як неупакованих РАВ, так і радіоактивних речовин без остаточного тепловиділення, упакованих у вантажні контейнери, бочки, промислові упаковки (табл. 6.1, 6.2). Кожній упаковці, транспортному пакету, контейнеру, резервуару, цистерні, ємності, а також неупакованому вантажу з низькою питомою активністю (НПА) та об'єкту з поверхневим радіоактивним забрудненням (ОПРЗ) присвоюється транспортний індекс – число, яке визначає максимальну дозу випромінювання (мР/год) на відстані 1 м від поверхні упаковки і надалі використовується для забезпечення контролю за радіоактивним опроміненням.

Таблиця 6.1– Контейнери універсальні. Типи. Основні параметри [269]

Типорозміри (позначення) контейнерів		Маса, т		Розміри, мм					
ТИП	ИСО	бруто	тара	габаритні		внутрішні		дверних прорізів	
				довжина	ширина	довжина	ширина	довжина	ширина
Крупнотонажні									
УУК-30	1А	30,48	–	12192	2438	11998	2299	2286	2133
УУК-220	1С	20,32	–	6058	2438	5867	2299	2286	2133
УУК-10	1	10,16	–	2291	2438	2802	2299	2286	2133
Середньотонажні									
УУК-5	–	5,0	0,95	2100	2650	1950	2510	1952	2100
УУК-5У	–	5,0	0,75	2100	1325	1980	1225	1225	2100
УУК-2,5(3)	–	2,5(3)	0,5	2100	1325	1980	1232	1229	2150
Малотонажні									
АУК-1,25	–	1,25	0,36	1800	1050	1710	960	960	1775
АУК-0,625	–	0,625	0,26	1150	1000	1070	910	910	1500

Таблиця 6.2 – Уніфікація розмірів транспортної тари за ГОСТ 21140-88

Параметр	Переважні розміри тари для максимального завантаження трюму
Довжина	1200, 800, 600, 400, 300, 240, 200
Ширина, висота	1000, 600, 484, 435, 400, 370, 351, 320, 294
Діаметр круглої тари	800, 600, 484, 435, 400, 370, 351, 320, 294, 277, 266, 246, 226, 219, 200

Біологічний захист проектується за умовами, що потужність еквівалентної дози випромінювання в будь-якій точці зовнішньої поверхні транспортних засобів та на границях виділених місць на судах не перевищувала 200 мбер/год, а на відстані 2 м від цих поверхонь – 10 мбер/год [209, 299]. Науково-технічне завдання проектувальника зводиться до вибору

габаритів модуля біологічного захисту (рис. 6.1) в залежності від виду РАВ і типорозміру транспортного обладнання; перевірочних розрахунків міцності, які дозволяють рекомендувати модуль для певного типу судна без його модернізації (переобладнання, зокрема збільшення дедвейту, подовження корпусу, підвищення висоти борта тощо); прогнозування впливу зовнішніх ситуацій (зокрема пожежонебезпеки) та розрахунків потужності експозиційної дози у місцях можливого знаходження персоналу з урахуванням активності певних джерел іонізуючих випромінювань.

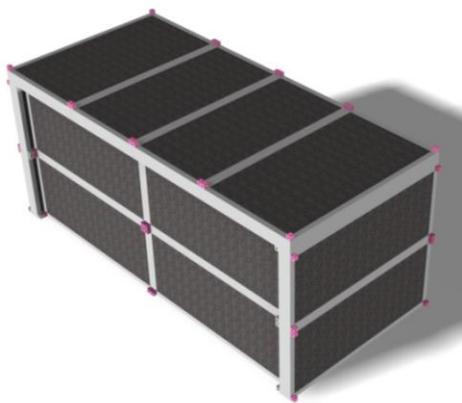


Рисунок 6.1 – Модуль біологічного захисту

Конструктивне рішення щодо зниження маси модуля полягає у формуванні шаруватих панелей, виготовлених з бетону, облицьованих лише з одного боку сталевим листом, на який нанесено метал-скляний захисний шар. Формування такого багатошарового пакету вимагає розробки технологічних заходів, в основу яких покладено вимоги на міцного з'єднання різних за властивостями матеріалів, що гарантує герметичність стику, інертність структури і зберігання експлуатаційних характеристик (радіаційної стійкості, корозійної стійкості, демпфіруючої здатності тощо) кожного з шарів. Вибір матеріалів ґрунтується на сучасному досвіді (табл. 6.3) застосування для виготовлення транспортного обладнання і конструкцій біологічного захисту сталей, склад і властивості яких регламентовані як вітчизняними, так і зарубіжними стандартами: *DIN 11850-1999* (Німеччина), британським стандартом *BS43600*, стандартом Американського товариства випробування матеріалів *ASTM – American Society for Testing and Materials*; чавунів; бетонів.

Таблиця 6.3 – Конструкційні матеріали для виготовлення транспортного обладнання і біологічного захисту [складено автором]

Матеріал	Хімічний склад	Елементи конструкції
Сталь марок 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72)	до: 0,12 % С, 17...19 % Cr, 8...11,0 % Ni, 0,6...0,8 % Ti, 0,3 % Cu, 2,0 % Mn, 0,8 % Si, 0,035 %P, 0,02 % S	Облицювання конструкцій, контейнери, танки, баки, бочки для РАВ
Сталь марки 09Г2С (ГОСТ 5520-79)	до: 0,12 % С, 1,3...1,7 % Mn, 0,5...0,8 % Si, 0,035 % P, 0,04 % S	Танк-цистерни для РРВ
Сталь марок ВСт3сп, Ст3пс (ГОСТ 380-94)	до: 0,14...0,22 % С; 0,30...0,60 % Mn; не більш 0,05 % Si	Контейнери, танк-цистерни, баки, бочки для РАВ
Високоміцний чавун ВЧ40 (ГОСТ 7293-45)	до: 3,3...3,8 % С, 1,9...2,9 % Si, 0,2...0,6 % Mn, 0,1 % P, 0,02 % S, 0,1 % Cr	Корпус ТПК для РАВ
Свинець листовий С0 (ГОСТ 3778-98)	до: 99,992 % Pb; $3 \cdot 10^{-4}$ % Ag; $5 \cdot 10^{-4}$ % Zn; 0,001 % Bi; $5 \cdot 10^{-4}$ % Sb; $5 \cdot 10^{-4}$ % As; $5 \cdot 10^{-4}$ % Sn; 0,001 % Fe; 0,002 % (Mg+Ca+Na)	Облицювання контейнерів, цистерн та баків
Вуглецева сталь А36 (ASTM A36/A36М)	до: 0,20...0,25 % С; 0,8...1,2 % Mn; 0,40 % Si; 0,050 % S; 0,04 %P; 0,2 % Cu	Контейнери, баки, бочки для РАВ
Вуглецева сталь А516 (ASTM A516/A516М)	до: 0,21...0,23 % С; 0,85...1,2 % Mn; 0,15...0,40 % Si; 0,035 % S; 0,035 % P	Кришки контейнерів, танк-цистерн
Низьколегована сталь А588 (ASTM A588/A588М)	до: 0,15...0,20 % С; 0,5...1,2 % Mn; 0,80...1,35 % Si; 0,050 % S; 0,04 %P	Контейнери, танки, баки, бочки для РАВ
Корозійностійка сталь 316L (аналог 03Х17Н14М3, ГОСТ 5632-72)	до: 0,035 % С; 16,0...18,0 % Cr; 10,0...15,0 % Ni; 2,0...3,0 % Mo; 0,04 % P; 0,03 % S; 2 % Mn; 0,75 % Si	Контейнери, баки, цистерни для високоактивних РАВ та РРВ
Корозійностійка сталь 304L (аналог 03Х18Н11, ГОСТ 5632-72)	до: 0,03 % С; 18,0...20,0 % Cr; 8,0...12,0 % Ni; 0,045 % P; 0,03 % S; 2 % Mn; 1,0 % Si	
Бетони ГОСТ 27006-86 ГОСТ 7473-94	з магнетитовим, гематитовим, металевим заповнювачем	Конструкції біологічного захисту

Панель модуля біологічного захисту (рис. 6.4) являє собою жорстко-закріплену за допомогою швелерів тришарову плоску пластину скінчених розмірів, жорсткість якої забезпечується плитою товщиною 200 мм із радіаційно стійкого бетону (ГОСТ 7473-94), яка водночас виконує екрануючу функцію; результати роботи [169], у якій досліджено демпфіруючі властивості ($\Psi = 2,5$) дозволяють рекомендувати бетон для експлуатації в умовах вібрацій.



Рисунок 6.2 – Панель модуля біологічного захисту

Двобічне облицювання із плакованої (ГОСТ 10885-85) або нержавіючої (ГОСТ 5632-72) сталі $\delta = 10$ мм [244] пропонується замінити на облицювання з одного боку (що наближений до контейнерів з РАВ) листом той же товщини з нанесеним метал-скляним захисним шаром, який зазнає основного опромінення та поглинає більшість (а у окремих випадках і усю) кількість енергії (рис. 6.3), непоглинута її частка далі поглинається сталевим облицюванням та бетоном.

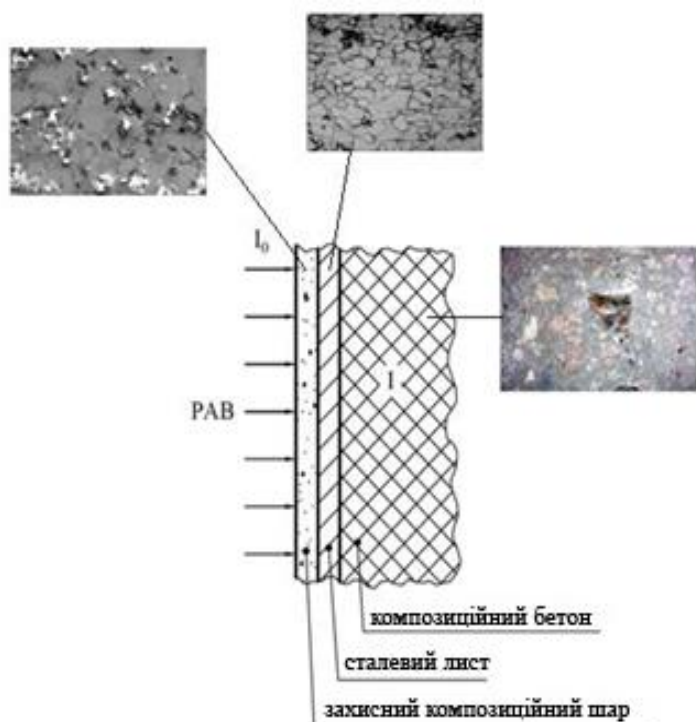


Рисунок 6.3 – Взаємне розташування шарів у модульній панелі біологічного захисту: I_0 – падаючий потік випромінювань від РАВ; I – потік, поглинутий бетонним шаром

Заміну дороговартісних плакованих та нержавіючих сталей на вуглецеві (наприклад ВСт3 кп, ГОСТ 5521-93) обґрунтовано їх достатньою зварюваністю, відсутністю схильності до відпускнуї крихкості та досвідом їх застосування для виготовлення транспортного обладнання (суднових цистерн, баків, контейнерів, призначених для перевезення і зберігання небезпечних речовин, зокрема РАВ). Листова сталь захищає бетон від корозійних та механічних пошкоджень, створюючи вторинний рівень захисту. Замінити традиційне свинцеве облицювання товщиною 3 мм можна нанесенням захисного метал-скляного шару у 4...6 мм, свинцеве облицювання товщиною 5 мм – 7...10 мм. Проте при виборі товщини захисного шару конструкцій біологічного захисту слід враховувати технічні вимоги, зокрема міцність зчеплення зі сталеву поверхнею ($\sigma_{\text{відр}} = 15...27$ МПа), та технологічні обмеження, які пов'язані зі способом нанесення покриття. Таким чином, рекомендована товщина для гарячепресованих склоалюмінієвих плиток складає від 10 мм, для електродугових покриттів – 1,5...2 мм, що забезпечує такий самий захист, як і облицювання шаром свинцю $\delta = 1$ мм. Складність питання технології виготовлення і виконання монтажних робіт на судні полягає у виборі конструктивно-технологічних рішень кріпильних з'єднань на рівні переходу від композитного шару до бетону, збирання панелей та їх монтажу на судні.

6.2 Технологічні рекомендації щодо виготовлення та монтажу панелей модуля на судні

6.2.1 Модуль біологічного захисту являє собою панельний екран, призначений для зниження рівня іонізуючих випромінювань, джерелом яких є радіоактивні вантажі.

6.2.2 Модуль біологічного захисту встановлюється у вантажній зоні судна, з урахуванням відстані кожної з панелей від контейнера (тари) з РАВ на рівні 1...3 м.

6.2.3 Модуль біологічного захисту являє собою елемент збірно-розбірної конструкції та виготовлюється з бетонної плити товщиною 200 мм, яку облицьовано вуглецевою сталлю товщиною 10 мм з нанесеним композиційним шаром.

6.2.4 З метою попередження руйнувань зовнішня поверхня бетонної плити забарвлюється вогнезахисним покриттям з товщиною шару до 1 мм, для чого рекомендуються наповнені силікатами Hf, Sc, Yb фарби [360].

6.2.5 Облицювання бетонних плит виконується зі сталевих листів товщиною 10 мм, з яких складаються збільшені панелі площею до 50 м².

6.2.6 Жорсткість панелей забезпечується шляхом приварювання швелерів, які залишаються в бетоні як з'єднувальні елементи. З цією метою до облицювальних листів за ГОСТ 14098-91 приварюються «вуса» з круглої сталі (ГОСТ 2590-71) діаметром 12...16 мм. Сталеві панелі монтуються у проектне положення кранами і кріпляться за допомогою електрозварювання.

6.2.7 Кріплення панелей, які складаються з бетонних плит, здійснюється за допомогою анкерних петель або тяжів, які проходять через отвори у плитах і приварюються до армокаркаса.

6.2.8 Панелі конструкцій встановлюються на знімні напрямні планки, які розділяють трюм у повздовжньому і поперечному напрямках або кріплять до днищевих секцій за допомогою засобів кріплення багаторазового застосування, зокрема знімних з'єднувальних пристроїв, запірних елементів.

6.2.9 Кріплення модуля до днищевих секцій можливе за допомогою підрамників.

6.2.10 Монтаж сталевих панелей здійснюється за допомогою кранів, кріплення відбувається шляхом електрозварювання. Приварені швелери залишаються у бетоні і забезпечують з'єднання зі сталевою обшивкою.

6.2.11 Роботи щодо нанесення метал-скляного захисного шару методом електродугового напилення слід виконувати в умовах цеху. В окремих випадках допускається проведення ремонтно-відновлювальних заходів,

виконання робіт на будівельному місці або у доці. Технологічні рекомендації щодо нанесення метал-скляних покриттів на Ст 3 наведені у розділі 8.

6.2.12 Допускається з метою вирівнювання поверхні виконувати механічну обробку електродугових покриттів.

6.2.13 Просочення рідким склом поверхні електродугового захисного шару виконується після проведення механічної обробки в умовах цеху або будівельного місця.

6.2.14 Облицювання склоалюмінієвими плитками здійснюється в умовах цеху відповідно до технологічної схеми (рис. 6.4).

6.2.15 Композитні плитки кріпляться за допомогою клейової композиції на внутрішню поверхню кожної з панелей модуля біологічного захисту.



Рисунок 6.4 – Технологічна схема облицювання сталевих поверхонь панелі модуля біологічного захисту склоалюмінієвими плитками

6.2.16 Затвердіння клейової композиції на основі ЕД-20 здійснюється в умовах цеху при температурі 15...20 °С протягом 24 год. Герметизація та закладання місць виконується після повного затвердіння клейової композиції.

6.2.17 Підготовка сталевій поверхні під облицювання композитними плитками включає в себе очищення від іржі за допомогою щіток та піскоструминної обробки; рекомендована шорсткість поверхні $Ra = 1,6$ мкм. Перед облицюванням слід провести додаткову обробку сталевій поверхні за допомогою перетворювача іржі по ГОСТ 30662-99.

6.2.18 Розмітка сталевій поверхні конструкції під облицювання плитками повинна виконуватися за допомогою трафаретів.

6.2.19 Допускається застосування плиток зі сколами, тріщинами та іншими дрібними дефектами. Технологічні рекомендації щодо виготовлення плиток наведено у розділі 8.

6.2.20 Просочення рідким склом (ГОСТ 13078-81) виконується за допомогою спеціальних щіток та фарбопультів після закладання стикових місць склоалюмінієвих плиток в умовах цеху.

6.2.21 В окремих випадках (включаючи проведення ремонтно-відновлювальних робіт), герметизацію та закладання місць стикувань, а також просочення рідким склом можна виконувати на будівельному місці або у доці.

6.3 Вплив зниження масогабаритних показників модуля біологічного захисту на міцність і навантаженість судна

Модернізація модуля біологічного захисту, яка полягає у заміні матеріалів, розробці технологій формування з них панелей, технологій з'єднання цих панелей і монтажу всього модуля на судні вимагає проведення розрахунків міцності, які зможуть підтвердити можливість застосування модуля біологічного захисту на певному судні. Для цього необхідно обрати певні габаритні розміри модуля, розрахувати його масу та визначити центр ваги

(відносно координат центра ваги судна) модуля у порожньому та завантаженому стані та виконати перевірку міцності судна.

6.3.1 Вибір транспортного обладнання для перевезень рудних уранових концентратів

Враховуючи широкий спектр РАВ з різними показниками питомої ваги та технологіями їх пакування під час транспортування в роботі розглядається один із найбільш важких сипучих вантажів – концентрат уранової руди, його насипна щільність становить близько 2300 кг/м^3 . Найбільші родовища викопного урану розташовані в Кіровоградському рудному басейні, в даний час розробляються родовища на півночі Миколаївської області. Перероблена уранова руда у вигляді концентрату порошкоподібного стану транспортується як вантаж 7-го класу небезпеки для подальшої обробки на підприємства по переробці палива, які знаходяться у Росії та у Південній Європі. Урановий концентрат пакується у сталеві бочки об'ємом 210 л зі знімною кришкою (рис. 6.5) та відповідним маркуванням. Внутрішня поверхня бочок не повинна бути оцинкованою або мати будь-яке, навіть органічне покриття [20].



a



б

Рисунок 6.5 – Бочки для транспортування уранового рудного концентрату [20]:

a – бочка; *б* – знак маркування вантажу 7-го класу небезпеки

Концентрати урану, в основному, складаються з двох α -випромінювачів ^{238}U і ^{234}U і двох β -випромінювачів $^{234}\text{Pa}^m$ і ^{234}Th , упаковані у сталеві бочки уранові концентрати, не являють собою небезпеку для здоров'я вантажників та іншого персоналу. Низький ($0,4 \text{ Бк/см}^2$), проте вимірювальний рівень радіації, які випромінюють бочки з урановими концентратами, не може викликати шкідливе опромінювання людини або обладнання. За рахунок незначної хімічної токсичності урановий концентрат може являти собою небезпеку при вдиханні або при попаданні у шлунковий тракт.

Для перевезень водним транспортом бочки у два ряди завантажують у ISO-контейнери (рис. 6.7, а, табл. 6.4), у якому вони повинні бути розподілені у поздовжньому і поперечному напрямках (рис. 6.7, б).



а



б

Рисунок 6.7 – Завантаження бочок з урановим рудним концентратом у контейнери ISO [20]:

а – розташування бочок у контейнері; б – схема контейнеру

Згідно з Міжнародним кодексом морських перевезень небезпечних вантажів заповнюється «Форма на небезпечні вантажі при змішаних перевезеннях» та контейнери повинні мати відповідні надписи.

Таблиця 6.4 – Основні розміри суховантажних контейнерів ISO
[ISO 1496/1]

Параметри	20-футовий стандартний контейнер	20-футовий високий контейнер (High Cube)
Розміри зовнішні		
Довжина, мм	6058	6058
Ширина, мм	2438	2438
Висота, мм	2591	2896
Розміри внутрішні		
Довжина, мм	5905	5905
Ширина, мм	2350	2350
Висота, мм	2381	2693
Ширина, мм	2336	2340
Висота, мм	2291	2597
Характеристики		
Маса брутто, кг	24000-30480	30480
Масса тари, кг.	2145-2370	2340
Корисне навантаження, кг	21630-28335	28140
Об'єм, м ³	33-33,2	37,5
Штабелювання ярусів	86400, 9	86400, 9

6.3.2 Визначення габаритних розмірів і координат центра тяги модуля біологічного захисту на початкових етапах проектного аналізу

Ефективність рейсів визначається максимальною завантаженістю судна, для чого часто покладаються на досвід і кваліфікацію фахівців з управління. Проте враховуючи, що останнім часом спостерігається тенденція зростання будівельної вартості суден та витрат на їх утримання, вирішення завдань, пов'язаних із завантаженням та розміщенням вантажів на судні, доцільно розглядати на етапах проектування та вважати суднобудівними. Для розв'язання подібних задач, як правило, застосовуються методи ситуаційного управління [35], де рішення приймаються для певної ситуації. Крім того, існуючі методи проектування не враховують виконання вантажних операцій, пристосованість судна до різних видів радіоактивних матеріалів, зокрема активність, різновиди радіоактивних джерел, саморозігрівання, остаточне тепловиділення, корозійність та ін., що вимагає від проектувальника розглядати загальну міцність судна з урахуванням його повної або неповної завантаженості. В основу проектного аналізу суден покладено принципи

максимальної експлуатаційної ефективності, які висвітлені у роботах [190, 205, 227] і на відміну від принципів мінімізації будівної вартості розглядають задачі оптимального проектування з позицій ефективності комерційного судна в умовах конкурентного середовища, де ціннісні критерії мають загальний і порівняльний характер. В табл. 6.5 наведені масогабаритні показники транспортного обладнання і модуля біологічного захисту у порівнянні з прототипом (бетонна плита, облицьована з двох боків листами нержавіючої сталі), для визначення яких використані значення густин наступних матеріалів: бетону – 2298 кг/м^3 ; сталі марки ВСт3 – 7850 кг/м^3 , сталі марки 12Х18Н10Т – 7920 кг/м^3 . Щільність склоалюмінієвих плиток ($1000...1100 \text{ кг/м}^3$) і покриттів ($5800...7025 \text{ кг/м}^3$ для композицій Св-08Г2С–скло і $1480...1860 \text{ кг/м}^3$ для Св-АМг5–скло) при обраних товщинах (10 мм для плиток і 2 мм для електродугових покриттів) незначно впливає на його вагу.

Таблиця 6.5 – Масогабаритні показники транспортного обладнання і модуля біологічного захисту

Стаття навантаження	Маса порожнем, т	Маса з вантажем, т	Розміри, м	Об'єм, м^3	Умови завантаженості
Бочка	0,02	0,503	$h = 0,880$ $d = 0,610$	0,21	Завантажено 483 кг уранового концентрату
Контейнер	2,340	27,162	$l = 6,058$ $b = 2,438$ $h = 2,896$	42,8	У кожен контейнер завантажено 54 бочки
Модуль біологічного захисту (розроблений варіант)	97,662	151,985	$l = 8,478$ $b = 7,296$ $h = 4,106$	251,0	У модулі розташовано два контейнери з бочками
Модуль біологічного захисту (прототип)	112,455	166,779			

Розрахунки геометричних розмірів модуля біологічного захисту виконані за умовами розміщення в середині нього двох 20-ті футових високих контейнерів. Координати центру мас (ЦМ, рис. 6.8) визначені у векторній формі за сумою елементів

$$r = \frac{\sum_{i=1}^i r_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^i m_i} \quad (6.1)$$

та складають: $x = 4239$ мм; $y = 3648$ мм; $z = 1982,8$ мм.

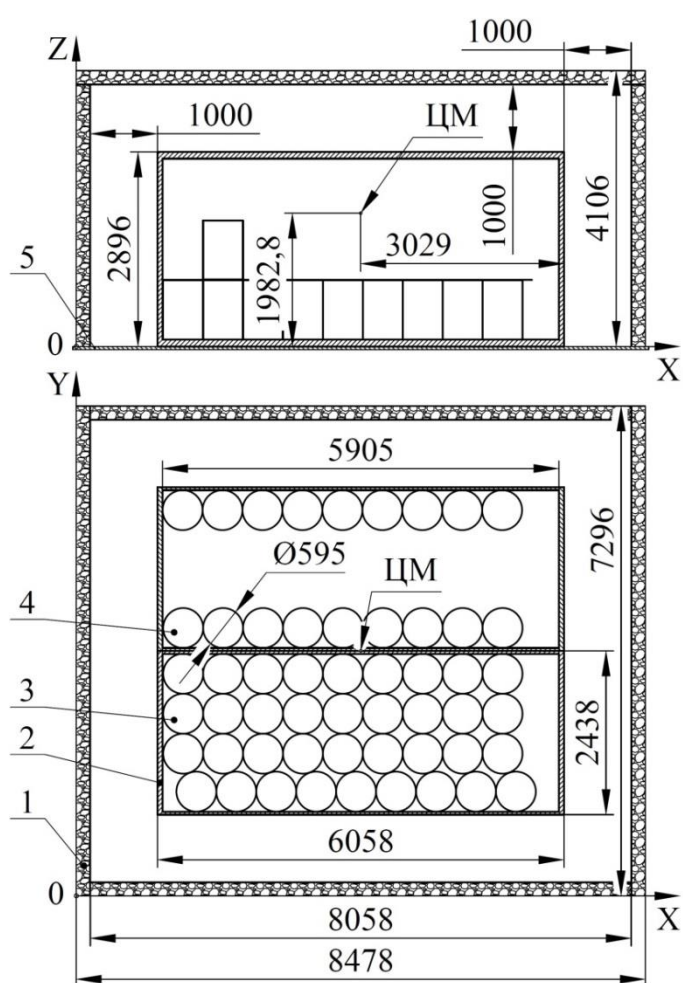


Рисунок 6.8 – Розрахункова схема укомплектування модуля біологічного захисту: 1 – стінка модуля; 2 – стінка контейнера; 3 – бочки першого шару укладки; 4 – бочки другого шару укладки; 5 – днище

Запропонована конструкція модуля біологічного захисту на відміну від існуючої має знижену на 14,5 т (майже на 10 %) масу, що дає змогу розширити асортимент вантажів та підвисити завантаженість судна. За рахунок зменшення маси спрощується технологія та зменшується вартість виготовлення. Модуль біологічного захисту може бути закріплений на палубі контейнеровоза або розміщений у трюмі суховантажного судна.

Архітектурно-компонувальні схеми суден, призначених для транспортування РАВ низької і середньої активності разом з іншими небезпечними вантажами, визначаються відповідними нормативними документами, а саме конвенціями СОЛАС-74/88 і МАРПОЛ 73/78, нормами МАГАТЕ, а також Регістром судноплавства України. Враховуючи специфіку вантажів, зокрема їх енергетичні характеристики, та особливості проведення вантажних операцій, проаналізувавши існуючий досвід проектування і будівництва таких суден [72, 73, 244], визначено, що це повинно бути двокорпусне судно із середнім розташуванням вантажної зони.

Подальші дослідження виконані у напрямку «вантажі→судна-претенденти→модель функціонування».

6.4 Модель функціонування судна

Вирішення проблеми ефективності експлуатації судна дозволяє розглядати процес управління його завантаженням як задачу оптимального проектування [205], що описується через модель функціонування судна з урахуванням режимів рейсів (лінійного або трампового) [190, 227].

Враховуючи географічне положення добичі уранової руди (Миколаївська і Кіровоградська області), а також розташування підприємств атомної енергетики у Південній Європі, обрано лінійний маршрут Одеса–Генуя із загальною протяжністю 1668 миль (рис. 6.9). Об'єми транспортування уранових концентратів до країн Південної Європи пов'язані з певним попитом на подільні елементи як вихідну сировину для ядерного пального.



Рисунок 6.9 – Схема рейсу судна Одеса–Генуя

Одеський порт – один з найкрупніших портів Чорноморсько-Азовського басейну із загальною протяжністю причальної лінії більш ніж 8000 м. Потужності порту дозволяють щорік переробляти більше 14 млн т сухих та 24 млн т наливних вантажів. На 38 причалах обслуговуються судна довжиною до 270 м і осадкою 13,0 м. Порт Генуя – один з важливіших портів Середземномор'я, довжина причального фронту якого складає 33,2 м з глибинами до 15 м. Сумарний обіг морських перевезень складає вище ніж 42 млн. т. До порту ввозяться нафта, залізо, вугілля, кокс, метали, руди, хімічні продукти, хлопок, каучук тощо. На території порту функціонують крупні суднобудівні підприємства, які у своєму арсеналі мають дев'ять сухих та два плавучих дока, що забезпечує будівництво танкерів, контейнеровозів та будь-який ремонт суден і кораблів.

Основні данні щодо важливих ділянок рейсу влітку, включаючи порти, які накладають обмеження на швидкість судна, наведені у табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Характеристика портів та магістральної вузькості

[складено автором за матеріалами <https://www.searates.com>]

Найменування порту або ділянки траси	Прохідні канали			Глибина, м	
	довжина, мілі	ширина, мілі	глибина, м	у причалів	на акваторії
Генуя	–	–	–	9...15	–
Месінський пролів	18	1,8	600	–	–
Пролів Дарданели	65	7...20	до 25	–	–
Пролів Босфор	16	0,4...2	до 17	–	–
Одеса	–	–	–	8...13	12

Вибір певного судна орієнтований на його морехідні якості та максимальне використання об'єму трюмних приміщень. Чиста вантажопідйомність судна визначається як різниця між розрахунковим дедвейтом та запасами на рейс [58]

$$D_{\text{ч}} = D_{BP} - G_P, \quad (6.2)$$

де D_{BP} – розрахунковий дедвейт (т); G_P – розрахункові запаси на рейс (т), які у свою чергу, складаються з ходових запасів G_X на період від порту завантаження до порту призначення, та запасів на стоянку G_{cm} ;

$$G_P = G_X + G_{cm}. \quad (6.3)$$

Враховуючи маршрут (рис. 6.10), кліматичне і сезонне районування плавання, то $D_{BP} = D_B$, $G_{cm} = 0$. Запаси на рейс визначаються як [58]

$$G_X = \left(\frac{L - l_o}{V_m} - \frac{l_o}{V_o} + t_x^{\text{дон}} \right) \cdot (g_x^m + g_x^e + g_{np}) \cdot K_{um}, \quad (6.4)$$

де $L = 1668$ миль – протяжність переходу; l_o – протяжність ділянок, на яких швидкість судна обмежена: $l_{o_1} = 18$ миль; $l_{o_2} = 65$ миль; $l_{o_3} = 16$ миль;

V_m – швидкість навантаженого судна, для суховантажного судна прийнята як $V_m = 16 \dots 19$ вуз; V_o – обмежена швидкість судна ($V_{o_1} = V_{o_2} = V_{o_3} = 8$ вуз);

$t_x^{\text{дон}} = 10$ год – додаткові витрати ходового часу (швартування, відшвартовування, лоцманська проводка тощо); $g_x^m = 34$ т/добу – норма витрат палива на ходу; $g_x^e = 10$ т/добу – норма витрат води на ходу; $g_{np} = 1$ т/добу – норма витрат інших запасів; $K_{um} = 1,1$ – коефіцієнт штормового запасу.

Запаси пального складають 80 % від рейсових, води – 20 %.

Для випадку кормового розташування машинного відділення абсциса центра ваги судна порожнем, $X_{g(\text{пор})}$, складає [4]

$$X_{g(\text{пор})} = -(0,07 \dots 0,09) \cdot L, \quad (6.5)$$

де L – довжина судна між перпендикулярами, м.

Апліката центра ваги судна порожнем, $Z_{g(\text{пор})}$ визначається як [4]

$$Z_{g(\text{пор})} = -(0,7 \dots 0,75) \cdot D, \quad (6.6)$$

де D – висота корпусу судна на міделі, м.

На підставі орієнтувальних розрахунків мас (табл. 6.7) і розрахунків довжини $L_{\text{вант}}$ і ширини $B_{\text{вант}}$ монтажного місця під модуль з РАВ, у яких поряд з габаритними розмірами модуля біологічного захисту (рис. 6.9) враховані технологічні зазори для монтажних робіт, для подальших досліджень обрано універсальне суховантажного судна (рис. 6.10) серії Beluga P1-/P2 – судна цього класу являють собою покоління сучасних багатоцільових суден для перевезень крупнотонажних вантажів. Техніко-експлуатаційні характеристики судна наведені у табл. 6.8.

Таблиця 6.7 – Орієнтувальні розрахунки мас для визначення вибору судна

Стаття розрахунку	Маса, т	Стаття розрахунку	Маса, т
Модуль з вантажем	152	Запаси води	50
Інші вантажі	200	Запаси пального	200
Запаси на рейс	250	Екіпаж (≈ 25 чол.)	2,1
Інші маси (сепарація, багаж тощо)	100	Дедвейт мінімальний D_{min} , Т	10 тис.



Рисунок 6.10 – Універсальне судно серії Beluga, побудоване у 2006 р. для компанії «BELUGA PROJECTS» [<http://www.marinetraffic.com>]

Таблиця 6.8 – Техніко-експлуатаційні характеристики судна

[<http://www.marinetraffic.com>]

Паспортні характеристики судна		Розрахункові параметри	
Повна вантажопідйомність, т	12764	Добові норми витрат пального, води та інших запасів	$q_{пр} = 1-2$; $q_x^T = 34$;
Осадка судна з вантажем, м	7,8	на ходу, т/добу	$q_x^B = 10$;
Довжина судна максимальна, м	156,76	на стоянці, т/добу	$q_{ст}^T = 1,5$; $q_{ст}^B = 10$
Ширина судна максимальна, м	21,82	Абсциса центра ваги судна порожнем, $X_{g(пор)}$, м	-10,55
Висота борта, м	12		
Довжина між перпендикулярами, м	140	Апліката центра ваги судна порожнем, $Z_{g(пор)}$, м	9,2
Валова місткість судна	10899		
Маса судна порожнем, т	5430	Кількість тон на 1 см осадки, т/см	24,5
Силовa установка	MAN7L58/64 N = 9800 кВт		

Якщо вагу судна порожнем прийняти за одиницю ваги, тобто $\Delta_{пор}=1$, то за статистичними даними вага, яка приходить на модуль біологічного захисту, складатиме $G_{мод}=0,018$.

В умовах діяльності порту задачі максимальної завантаженості судна розв'язуються фахівцями з управління за допомогою методів ситуаційного моделювання [35]. Це дає змогу зручно розташовувати вантажі на конкретному судні, виходячи з його маршруту. Проте враховуючи, що останнім часом спостерігається тенденція зростання будівельної вартості суден та витрат на їх утримання, вирішення завдань, пов'язаних із завантаженням та розміщенням вантажів, доцільно розглядати на етапах проектування та вважати суднобудівними. У роботах [190, 205, 227] постановка та вирішення оптимізаційних задач щодо визначення головних елементів і характеристик суден розглянуто з позицій математичного моделювання функціонування судна в режимах послідовних і трампових рейсів, що дає змогу ще на початкових стадіях проектування задавати певні морехідні якості. В основу проектного аналізу суден покладено принципи максимальної експлуатаційної ефективності, які на відміну від принципів мінімізації будівної вартості розглядають задачі оптимального проектування з позицій ефективності комерційного судна в

умовах конкурентного середовища, де ціннісні критерії мають загальний і порівняльний характер.

Розрахунки остійності та міцності ґрунтуються на відомостях про розташування вантажів, проте їх виконання у ручному режимі являє собою труднощі та призводить до системних похибок. Застосування імітаційного моделювання з розробкою моделі функціонування судна дозволяє уявляти його експлуатацію на етапах переходу за маршрутом та знаходження у портах відправлення і призначення, розглядаючи задачу синтеза статистичної моделі як об'єкт для управління його завантаженням з використанням інтелектуальних систем. Розробка існуючих програмних продуктів ґрунтується на розв'язанні оптимізаційних задач за допомогою симплекс-методу [45], що дає змогу обробляти великий обсяг теоретичного матеріалу, отримуючи при цьому спрощені рішення для знаходження цільової функції. Таким чином, розглядаючи задачу функціонування судна як міждисциплінарну, слід відмітити, що розширення можливостей всебічної і об'єктивної оцінки з обґрунтуванням та вибором оптимального варіанту завантаження потребує розробки програмного забезпечення, за допомогою якого стає можливою перевірка міцності судна, моделювання у автоматичному режимі комплектації та розташування вантажів у вантажних відсіках і приміщеннях. Проте загальні алгоритми не можуть бути застосовані для суховантажних суден, на яких одночасно транспортуються такі небезпечні вантажі як радіоактивні матеріали та сипучі речовини, зокрема мінеральні добрива. Задачі проектування та розробки вантажних операцій вимагають розглядати загальну міцність судна з урахуванням його повної або неповної завантаженості та враховувати фізико-хімічні властивості речовин та умови їх пакування.

Розв'язання статичної задачі оптимального планування розподілу навантажень можливе за допомогою методів механіки суцільних середовищ, застосовуючи розрахунки балансу мас і балансу площ [74], що вимагає побудови деревоподібної декомпозиції простору допустимих рішень [380]. Однією із класичних задач дискретної оптимізації вважаються задачі про ранець [406], постановка і розв'язання якої для судна, що транспортує радіоактивні речовини, дасть змогу знайти оптимальне рішення щодо завантаженості, враховуючи необхідні умови міцності.

Постановку оптимізаційної задачі зведене щодо ефективного розміщення модуля біологічного захисту як великої вантажної одиниці на судні разом з іншими вантажами за критеріями мінімізації сталійного часу (*англ. Laytime*) з дотриманням умов міцності судна. Для цього сформульовано класичну задачу про ранець (*англ. Knapsack*), основні сфери застосування якої належать до планування і управління виробничими і транспортними системами, що дає змогу розв'язувати задачі багатокритеріальної оптимізації зі змінним середовищем шляхом підбору, комбінування і варіації параметрів. Для розв'язання застосовано метод генетичного алгоритму [406], який дозволяє шляхом варіювання розташування графів вирішувати завдання проектування і конструювання. За цільову функцію (6.9) обрано мінімізацію сталійного часу – термін (у торговельному мореплавстві), протягом якого здійснюється завантаження судна без додаткових до суми фрахту платежів. Задачу розв'язано через введення до розрахунків показника норм навантаження шляхом монтажу у трюмі судна елементу біологічного захисту та додатковим завантаженням іншими вантажами. Модель процесу аналізу даних побудовано у вигляді системи рівнянь (6.10), де чиста вантажопідйомність $\mathcal{D}_q$ і вантажомісткість W є функціями характеристик вантажу, геометричних розмірів та розташування вантажних приміщень суховантажного судна (6.11)

$$t_{cm} = \sum_{j=1}^m t_{j\,cm} = \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^{i \leq n} x_{ji}}{N_{ji}} \rightarrow \min \quad (6.9)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ji} = \mathcal{D}_q \\ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n u_i x_{ji} = W \\ x_{ji} > 0 \end{cases} \quad (6.10)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (6.11)$$

де t_{cm} – сталійний час судна; t_{jcm} – час вантажної обробки j-го трюму; x_{ji} – кількість i-го вантажу в j-му трюмі; N_{ji} – норма навантаження i-го вантажу в j-й трюм; m – кількість вантажних приміщень; n – кількість вантажів; D_q – чиста вантажопідйомність судна; W – вантажомісткість судна; u_i – питомий навантажувальний обсяг вантажу.

Як граничні умови введено функції перевірки відповідності комбінації вантажу у трюмі обов'язковим критеріям завантаження.

$$\begin{aligned}
 \Phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= true \\
 \Phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \bar{P} \\
 \Phi_3(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \bar{S} \\
 \Phi_4(x_1, x_2, \dots, x_n) &= d_{onm} \\
 \Phi_5(x_1, x_2, \dots, x_n) &= +h_k \\
 \Phi_n
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

де $\Phi_1(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ – функція сумісності вантажів, параметрами якої є властивості j-го вантажу. Функція повинна повертати результат true, тобто вантажі повинні бути сумісні для перевезення в одному приміщенні;

$\Phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція визначення послідовності завантаження трюму відповідно до портів заходу. Функція повинна повертати вектор $\bar{P}$, тобто послідовність завантаження вантажу;

$\Phi_4(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція перевірки диференту судна на оптимальність при заданому розміщенні вантажу в трюмі;

$\Phi_5(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функція перевірки остійності судна; результат повинен бути додатнім числом;

Φ_n – інші функції перевірки дотримання критеріїв завантаження.

Етапи розв'язання поставленої задачі включають у себе визначення питомих показників (табл. 6.9) та сукупності відповідних моментів [172].

Таблиця 6.9 – Побудова алгоритму розрахунків

Показники	Формули для розрахунків
Питомі показники	
Питома навантажувальна площа	$\mu_g = \frac{S_g}{Q_g}$, де Q_g – маса вантажу (зокрема маса всього елемента БЗ); V_g – об'єм; S_g – площа горизонтальної проекції (у даному випадку обмежена контуром модуля БЗ)
Сукупність моментів	
Момент оптимального диференту	$M_{d_{opt}} = D_p x_c - D_o x_o + d_{opt} M_x - \sum G_{z_j} x_{z_j}$ де D_p – водотоннажність судна, т : $D_p = D_o + G_z + \sum Q_i$; D_o – маса судна порожнем, x_g – абсциса центра ваги судна, визначається за кривими елементів теоретичного креслення; x_o – абсциса центра ваги судна порожнем; d_{opt} – оптимальний диферент; M_x – питомий диферентуючий момент; $\sum G_{z_j} x_{z_j}$ – момент відносно міделя, що утворений рейсовими запасами, розподіленими по j-тим відсікам судна
Момент від змінних та постійних навантажень відносно кілю	$M_{cm_z} = D_p (z_m - h_{opt}) - D_o z_o - \sum G_{z_j} z_{z_j}$ де z_m – апліката поперечного метacentра, визначається за кривими елементів теоретичного креслення; h_{opt} – оптимальне значення метacentричної висоти; z_o – апліката центра ваги судна порожнем; $\sum G_{z_j} z_{z_j}$ – сумарний статичний момент від рейсових запасів відносно кіля
Статичний момент відносно міделя від сумарної дії усіх навантажень	$M_{cm_x} = D_o x_o + \sum Q_{ij} x_{ij} + \sum G_{z_j} x_{z_j}$ де Q_{ij} – маса i-тої партії вантажу у j-тому вантажному приміщенні; x_{ij} – абсциса центра ваги партії вантажу у j-тому вантажному приміщенні
Диферентуючий момент	$M_{dif} = D_p \cdot c$, де $c = x_g - x_c$ – плече диферентуючої пари сил Абсциса центра ваги завантаженого судна визначається як $x_g = \frac{M_{cm_x}}{D_p}$

Розподілення маси трюмів $\sum Q_{mp}$ і твіндеків $\sum Q_{me}$ визначається шляхом розв'язання системи рівнянь [15]

$$\begin{cases} \sum Q_{mp} + \sum Q_{me} = D\chi \\ \sum Q_{mp} \cdot z_{mp} + \sum Q_{me} \cdot z_{me} = M_{cm.Z} \end{cases} \quad (6.13)$$

Відповідність умовам міцності визначається за відношенням фактичної напівсуми моментів сил дедвейта без урахування знаку його оптимального згинального значення M_{onm} ($M_{onm} = 0,9 \dots 1,1$)

$$K_{onm} = \frac{0,5(\sum Q_j X_{ij} + \sum G_{3,i} X_{3,i})}{M_{onm}}, \quad (6.14)$$

$$M_{onm} = K_{c.n.} \cdot D_p \cdot L_{nn} + 0,5(\kappa_2^n - \kappa_2^e) \cdot \delta \cdot B_{max} \cdot L^{2,3} - \kappa_0 \cdot D_0 \cdot L_{nn}, \quad (6.15)$$

де $\kappa_{c.n.} = 0,0315 + 0,0895 \cdot \delta$ – коефіцієнт, який враховує дію сил підтримки; δ – коефіцієнт загальної повноти (визначається за кривими теоретичного креслення); κ_2^n, κ_2^e – коефіцієнти, які враховують додаткові згинальні моменти при постановці судна на хвилю (на підшві та вершині відповідно $\kappa_2^n = 0,036$; $\kappa_2^e = 0,0325$); κ_0 – коефіцієнт, який враховує розташування машинного відділення ($\kappa_0 = 0,11$).

Перевірка умов місцевої міцності здійснюється виходячи з відношення фактичного навантаження до технічно допустимого

$$K_m = \frac{P_\phi}{P_{дон}} \leq 1 \quad (6.16).$$

Таким чином, на етапі початкового проектування враховуються властивості вантажів, особливості їх обробки і вантажних операцій, дотримання умов міцності.

Алгоритм програми розрахунку наведено на рис. 6.11.



Рисунок 6.11 – Алгоритм програми розрахунків завантаженості судна

Виконання усіх перелічених задач реалізовано за допомогою окремих відповідних модулів, розроблених за допомогою мови програмування Java [100, 298]. Формалізація області допустимого стану представлена у вигляді документації по судну з базою даних.

В основу проектування структури бази даних покладені завдання мінімізації дублювання даних і спрощення процедур їх обробки та поновлення, що реалізовано за допомогою побудови узагальненої фізичної моделі завантаженості судна (рис. 6.12).

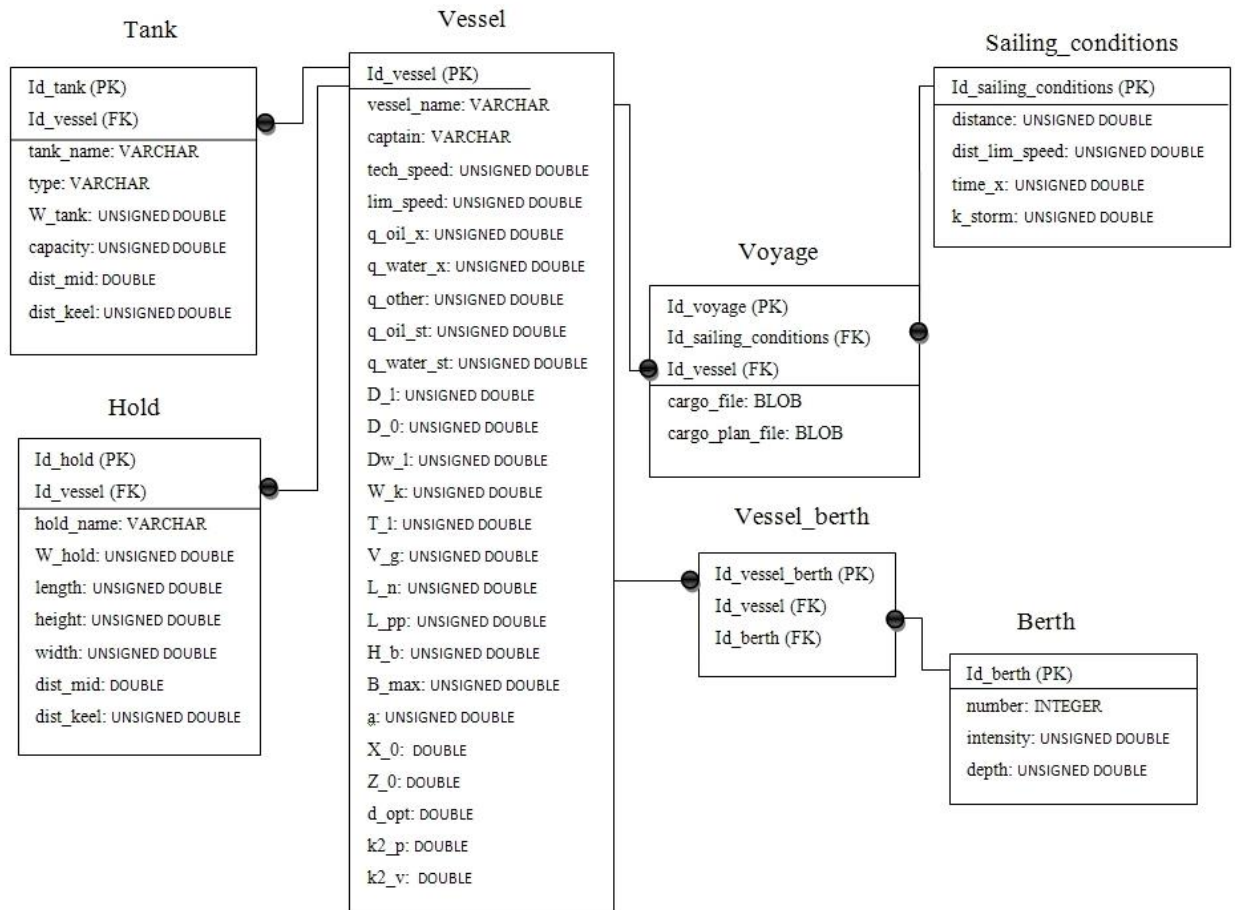


Рисунок 6.12 – Фізична модель бази даних інформаційної системи завантаженості судна

Згідно з розробленою моделлю, дані, що обробляються, подаються у вигляді таблиць, де як записи виступають основні атрибути об'єктів. Основним елементом інформаційної системи є інформативно-пошуковий масив документального типу. Розроблена БД має віддалений доступ та є дворівневою, протестована за допомогою генератора даних. Серверна частина виконує обслуговування та управління базою даних, відповідає за цілісність і збереження даних, забезпечує операції введення–виведення при доступі клієнта

до інформації. Клієнтська частина системи управління базами даних забезпечує інтерфейс зв'язку користувача з базою даних: перетворює запити в команди запитів до серверної частини. У базу даних можуть заноситися відомості про вантаж та його пакування, тип та розмірення судна та його маршрут (рис. 6.13).

The screenshot shows a web interface with three sections, each with a green title and a green plus button below it:

- Данные о судне** (Ship Data):
 - Судно: (empty text box)
 - Длина: (empty text box)
 - Ширина: (empty text box)
 - Осадка: (empty text box)
- Данные о грузе** (Cargo Data):
 - Груз: (text box containing "Конструкция биологической защиты")
 - Удельный погрузочный объем: (text box containing "1, 621")
 - Количество груза: (text box containing "157 т")
- Данные об условиях рейса** (Trip Conditions):
 - Порт отправления: (text box containing "Одесса")
 - Порт назначения: (text box containing "Генуя")

Рисунок 6.13 – Діалогове вікно користувача
(скріншот російською мовою)

Описи даних, накопичених у таблицях, дають змогу моделювати проекти і логістичні процеси як в умовах планування, так і оперативного управління.

Реалізація моделі функціонування судна продемонстрована на прикладі транспортування двох видів небезпечних вантажів – уранового рудного концентрату і аміачної селітри за лінійним маршрутом Одеса–Генуя (рис. 6.9). Селітра аміачна – гранульоване добриво (NH_4NO_3), що містить 33...35 % азоту в аміачній і нітратній формах, за транспортною класифікацією МОПОГ відноситься до 5-го класу небезпечних вантажів (5.1 – окиснювальні речовини).

При взаємодії з сіркою, сірчанім колчеданом, суперфосфатом, порошкоподібними металами (особливо з Zn) та при температурі вище 300 °С починає швидко розкладатися з виділенням токсичних окислів азоту і кисню, що може призвести до займання горючих матеріалів [157]. Аміачна селітра для сільськогосподарських робіт пакується у поліетиленові (масою 50 кг), пропіленові або паперові мішки (рис. 6.14) або у спеціалізовані м'які контейнери типу МКР [316].



Рисунок 6.14 – Упаковка для аміачної селітри [316]:

а – поліпропіленовий мішок; *б* – м'який контейнер; *в* – паперові мішки

Завантаженість судна у графічному вигляді наведено на масштабній схемі діаметрального перерізу судна (рис. 6.15). Результати розрахунків зведено до табл. 6.10 і 6.11.

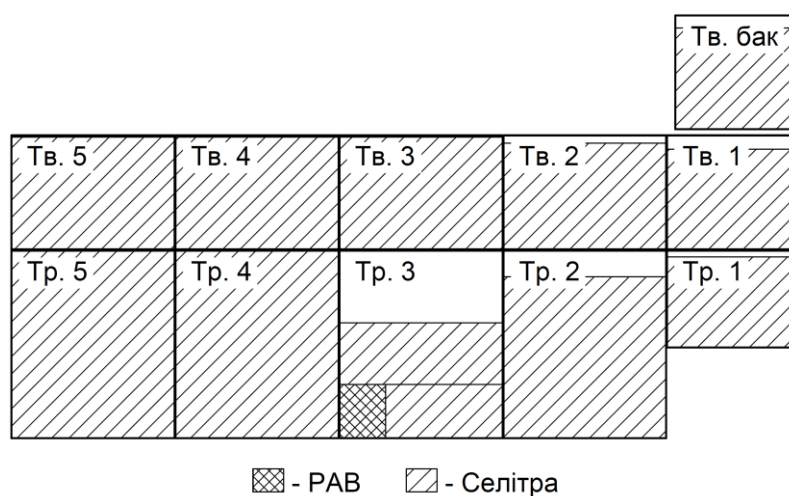


Рисунок 6.15 – Графічна схема завантаженості судна серії Beluga: результати розрахунків (масштаб 1:200 по довжині, 1:50 – по висоті)

Таблиця 6.10 – Результати розрахунків навантажень і сумарних статистичних моментів відносно міделя і кіля

Вантажне приміщення	Найменування вантажу	Маса Q, т	Абсциса центру мас X_q , м		Апліката центру мас Z_g , м	Статичний момент (тм) відносно		
			у ніс судна	у корму судна		міделя		кіля
						у ніс судна	у корму судна	
Трюм 1	Селітра	365	50	—	6,08	18243,5		2218,4
Трюм 2	Селітра	1416	30,6	—	4,28	43327,8		6060,2
Трюм 3	Селітра	1391	10,1	—		14088,11		2763,2
	Елемент біологічного захисту	157	3,0	—	0,76	471,0		119,3
Трюм 4	Селітра	1816	—	11,85	4,65		-21517,7	84443,7
Трюм 5	Селітра	740	—	33,45	4,65		-24753,0	3441,0
Твіндек під баком	Селітра	639	50,3	—	13,38	32117,1		8543,3
Твіндек 1	Селітра	520	50	—	9,43	26013,5		4906,1
Твіндек 2	Селітра	1307	30,6	—	9,55	39995,1		12482,1
Твіндек 3	Селітра	1429	9,35	—	9,6	13357,9		13715,0
Твіндек 4	Селітра	1676	—	-11,85	9,6		-19862,5	16091,1
Твіндек 5	Селітра							
Всього за вантажами		—	—	—	—	187613,9	-102259,2	89151,4
Всього за запасами		256	—	—	—	-5060		461
Судно порожнем		5430	—	—	—	-19,55		9,2
Всього			18200					

Таблиця 6.11 – Результати розрахунків місцевої міцності

Вантажне приміщення	Найменування вантажу	Висота шару партії вантажу, м	Питомий навантажувальний об'єм з урахуванням сепарації U_v , м ³ /т	Фактичне навантаження P_{ϕ} , т/м ²	Допустиме навантаження, $P_{\text{доп}}$, т/м ²	Критерій раціонального навантажування
Трюм 1	Селітра	6,1	1,38	4,4	9,5	0,46
Трюм 2	Селітра	10,9	1,38	7,9	9,5	0,83
Трюм 3	Селітра	3,75	1,38	3,8	9,5	0,4
	Елемент біологічного захисту	1,75	1,62			
Трюм 4	Селітра	12,2	1,38	8,9	9,5	0,94
Трюм 5	Селітра	15,5	1,38	9,4	9,5	0,99
Твіндек під баком	Селітра	6,9	1,38	3,8	4	0,95

Оціночні розрахунки міцності показали, що розташування спроектованого елементу у трюмі суховантажного судна не порушує умов загальної і місцевої міцності. Діалогове вікно інформаційної системи наведено на рис. 6.16.

Каргоплан:

				Аммиачная сепитра
Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра
Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра	Элемент биологической защиты	Аммиачная сепитра	Аммиачная сепитра

Дифферент оптимальный: -0,5 м

Дифферент расчетный: -0,46 м

Удифферентовать

Оптимальная метацентрическая высота: 0,6 м

Расчетная метацентрическая высота: 0,58 м

Исправить

Расчетный коэффициент прочности: 0,95

Корректировать грузовой план

Рисунок 6.16 – Результати оптимального розташування вантажів: діалогове вікно (скріншот російською мовою)

Отримані результати можуть бути застосовані для техніко-економічного обґрунтування монтажу на суховантажних суднах елементу біологічного захисту модульного типу, необхідного для ізолювання РАВ без остаточного тепловиділення.

6.5 Моделювання процесів руйнування панелей модуля біологічного захисту у пожежонебезпечних ситуаціях на судні

Проблема транспортування та зберігання радіоактивних вантажів пов'язана з виникненням пожежонебезпечної ситуації на спеціалізованих суднах. При тривалому зберіганні вантажів з питомою активністю

0,0004...0,4 МБк/кг конструкції спеціалізованої тари або контейнерів можуть зазнавати короточасних температурних навантажень до 250...300 °С, а вантажів з питомою активністю до 40 ГБк/кг – до 570 °С [1–3]. При виникненні аварійних ситуацій метал-скляний захисний шар електродугового покриття, нанесений на внутрішню поверхню цистерн для РАВ, зазнає водночас опромінення і короточасних температурних навантажень. Тому важливою задачею проектування конструкцій біологічного захисту є дослідження та прогнозування напруженого стану, який формується на поверхні поділу матеріалу цистерни і метал-скляного електродугового покриття.

Існуючі методи досліджень напруженого стану двошарових пластин з напиленими покриттями передбачають комп'ютерне моделювання [371, 386, 405], вирішення задач термопружності [317] та експериментальні дослідження на термостійкість.

В основу числового експерименту покладено модель пластини з розміром малого вантажного контейнера (1,5×1,5 м) [209]. Пластина виконана двошаровою і складається із сталевого листа Ст3 та метал-скляного електродугового покриття (рис. 6.17). Для одержання невикривленої внаслідок масштабного фактору інформації щодо розподілу полів напружень товщина шару покриття удвічі менша, ніж товщина сталевого листа, тобто $\delta_{\text{пок}} = 2 \text{ мм}$, $\delta_{\text{листа}} = 4 \text{ мм}$.

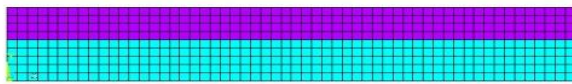


Рисунок 6.17 – Скінченно-елементна модель Ст3–покриття

Постановка задачі полягає у короточасному термічному навантаженні двошарової пластини з боку покриття: для композицій Св-АМг5–скло – до температури 300 °С, для композицій Св-08Г2С–скло – до 570 °С. У процесі моделювання введені наступні припущення:

- двошарова пластина прогривається рівномірно;
- механічні властивості обраних матеріалів не залежать від температури;
- вплив скляного наповнювача на механічні властивості метал-скляних електродугових покриттів є незначним, тому далі в роботі застосовуються узагальнені поняття Св-АМг5–скло, Св-08Г2С–скло;
- після короткочасної ($\tau = 10$ хв) термічної дії самовільне охолодження відбувається з нескінченно малою швидкістю, що дозволяє знехтувати виникаючими напруженнями.

Задачу розв'язано у пружній постановці методом скінчених елементів. У розрахунках використані ефективні механічні характеристики метал-скляних електродугових покриттів (§ 5.1), зокрема ефективний ТКЛР α^* , модуль пружності E прирівняний до умовного модуля стискання металевої матриці K_m ; значення щільності ρ та коефіцієнта теплопровідності λ визначені експериментально (табл. 3.8); границя міцності на розрив σ_b і текучості σ_t для опромінених зразків наведені у табл. 3.4. Вихідні розрахункові дані зведені до табл. 6.12.

Таблиця 6.12 – Вихідні розрахункові дані

Властивості	Ст3	Метал-скляне покриття	
		Св-08Г2С–скло	Св-АМг5–скло
E , МПа	$2 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^4$
α^* , K^{-1}	$12 \cdot 10^{-6}$	$3,18 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
ν	0,25	0,27	0,3
σ_b , МПа	365	315	328
σ_t , МПа	292,5	260	290
ρ , $кг/м^3$	7800	6000	1500
λ , $Вт/(м \cdot K)$	41	22	61
Товщина, мм	4	2	2

Результати моделювання представлені у вигляді розподілу полів напружень по двошаровій пластині (рис. 6.18 – 6.21). Розрахункові значення максимальних напружень зведені до табл. 6.13.

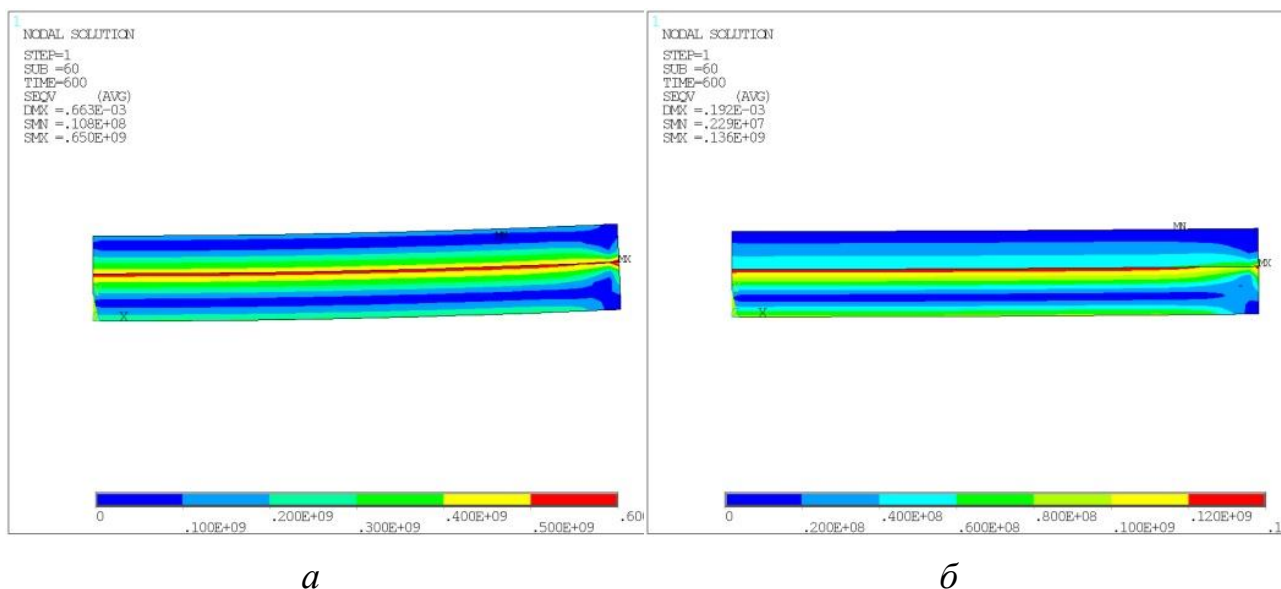


Рисунок 6.18 – Поля радіальних напружень при термічному навантаженні пластин Ст3 з метал-скляними покриттями: *а* – Св08Г2С–скло (до 570 °C);
б – СвАМг5–скло (до 300 °C)

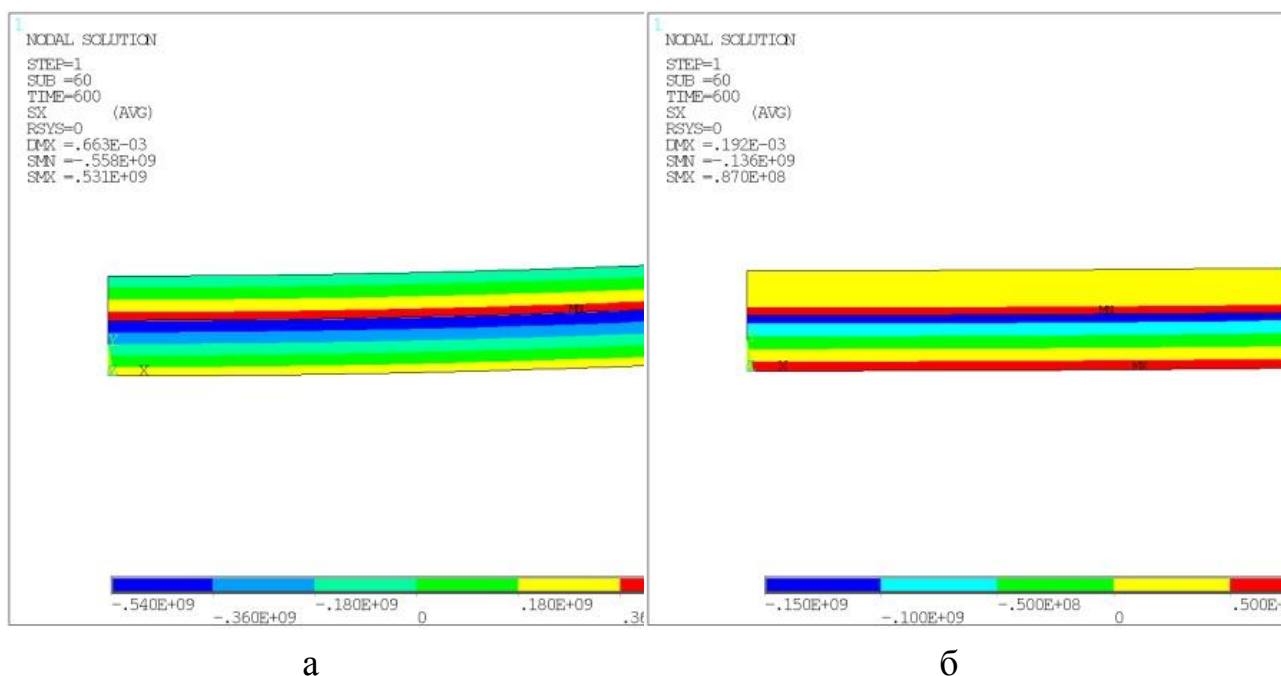


Рисунок 6.19 – Поля осевих напружень при термічному навантаженні пластин Ст3 з метал-скляними покриттями: *а* – Св08Г2С–скло (до 570 °C);
б – СвАМг5–скло (до 300 °C)

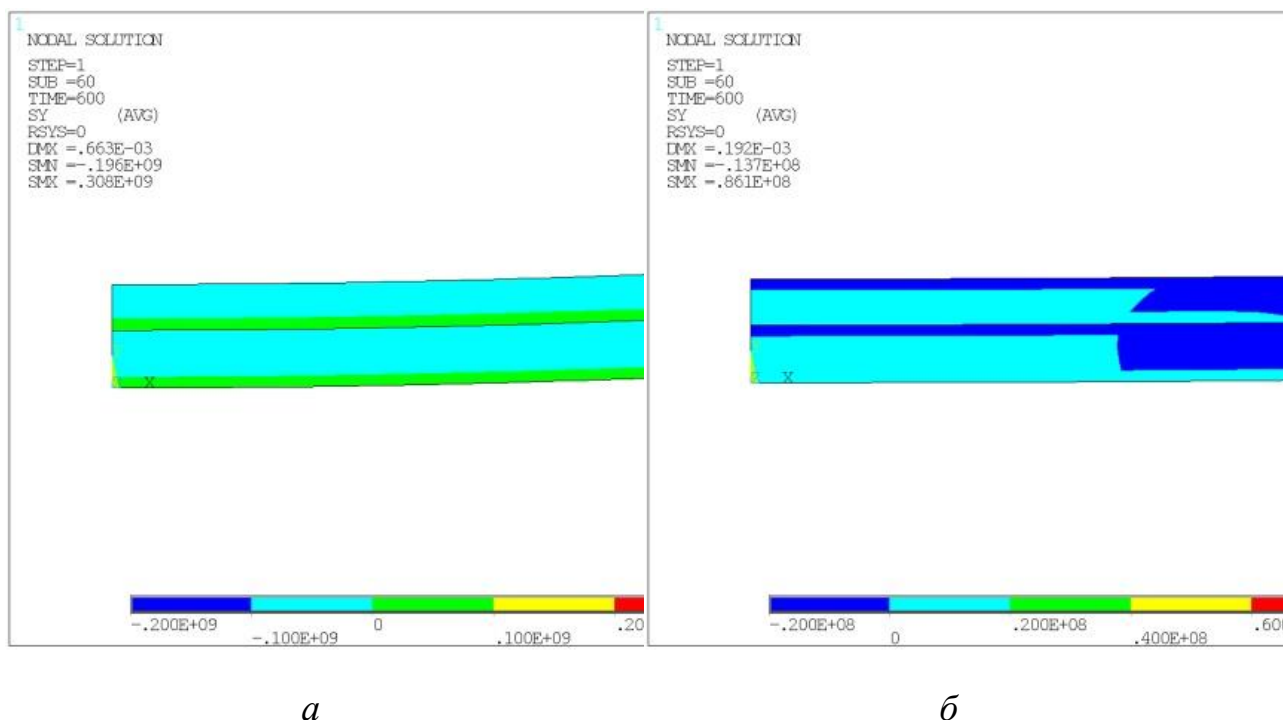


Рисунок 6.20 – Поля окружних напружень при термічному навантаженні пластин Ст3 з метал-скляними покриттями: *а* – Св08Г2С–скло (до 570 °C);
б – СвАМг5–скло (до 300 °C)

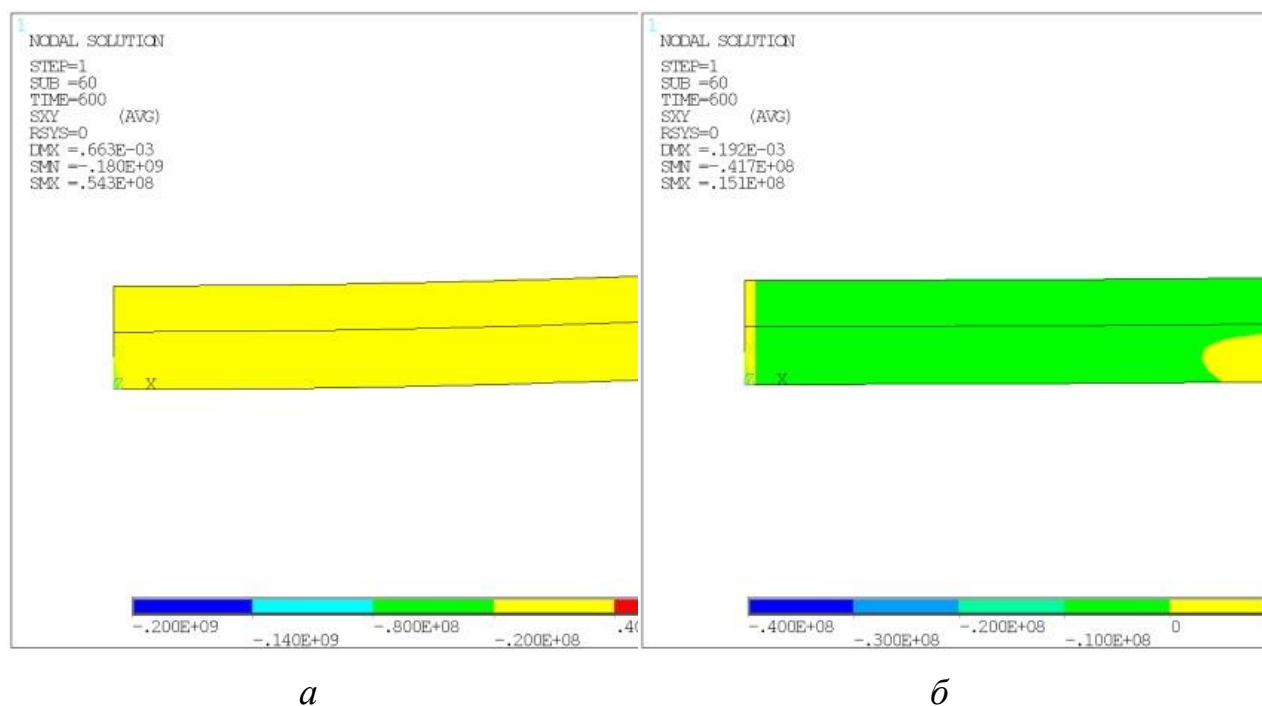


Рисунок 6.21 – Поля дотичних напружень при термічному навантаженні пластин Ст3 з метал-скляними покриттями: *а* – Св08Г2С–скло (до 570 °C);
б – СвАМг5–скло (до 300 °C)

Таблиця 6.13 – Максимальні напруження у двошаровій пластині

Напруження, МПа	Ст3– (Св08Г2С–скло), нагрівання до 570°C		Ст3– (СвАМг5–скло), нагрівання до 300°C	
	min	max	min	max
Радіальні	-558	531	-136	87
Осьові	-196	308	-13,7	86,1
Окружні	$6,63 \cdot 10^{-10}$		$1,92 \cdot 10^{-10}$	
Дотичні	-180	54,3	-41,7	15,1
Еквівалентні	10,8	650	2,29	136

Аналіз полів напружень (рис. 6.18–6.21) показав, що при короткочасному температурному напруженні у двошаровій пластині, яка складається з матеріалів з різним ТКЛР, виникає складний напружений стан, де найбільш небезпечною зоною є поверхня поділу сталь–покриття, що підтверджується результатами дослідження термостійкості (див. § 4.8).

Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє наглядно візуалізувати формування напруженого стану на поверхні двошарової пластини протягом короткочасного температурного навантаження, проте не дає повної інформації про ресурс з'єднання, структурні та міцнісні зміни у шарі покриття.

6.6 Висновки до розділу 6

1. Запропоновано модульну конструкцію елемента біологічного захисту, кожна з панелей якого являє собою жорстко-закріплену за допомогою швелерів тришарову плоску пластину, жорсткість якої забезпечується плитою товщиною 200 мм з радіаційно-стійкого бетону, яка на відміну від існуючих лише з одного боку облицьована листовою сталлю ВСт3 товщиною $\delta = 10$ мм, на яку нанесено шар метал-скляного

електродугового покриття або за допомогою розробленої клейової композиції кріпляться гарячепресовані плитки розміром до 500 мм. Товщина плиток $\delta > 10$ мм і метал-скляного електродугового покриття $\delta = 1,5 \dots 2$ мм зможе забезпечити такий самий захист, як і облицювання шаром свинцю $\delta = 1$ мм.

2. Розроблено практичні рекомендації щодо виготовлення збірно-розбірних панелей площею до 50 м² модулів біологічного захисту з використанням нових метал-скляних матеріалів і покриттів та їх монтажу у трюмі суховантажного судна.

3. Розрахунки геометричних розмірів модуля біологічного захисту ($l = 8,478$, $b = 7,296$, $h = 4,106$) виконані за умовами розміщення в середині нього двох 20-ті футових високих ISO-контейнерів, де в середині кожного з них розташовано у два ряди 54 бочки вистоя і діаметром відповідно 880 і 610 мм, наповнені урановим рудним концентратом). Запропонована конструкція модуля біологічного захисту на відміну від існуючої має знижену на 14,5 т (майже на 10 %) масу, що дає змогу розширити асортимент вантажів та підвищити завантаженість судна.

4. Запропоновано модель функціонування судна, яка включає у себе розробку нової інформаційної системи та розв'язання оптимізаційної задачі щодо ефективного розміщення модуля біологічного захисту як великої вантажної одиниці на суховантажному судні разом з іншими вантажами за критеріями мінімізації сталійного часу. Реалізацію моделі розглянуто на прикладі суховантажного судна серії Beluga для випадку одночасного транспортування уранового рудного концентрату і аміачної селітри.

5. Аналіз напруженого стану в умовах короткочасного температурного навантаження показав можливість руйнування елементів конструкцій саме по поверхні поділу Ст3–покриття, що підтверджується результатами експериментальних досліджень термостійкості: з'єднання Ст3–покриття (Св-АМг5–скло) витримує 18 теплосмін (300/10 °С, $\tau = 10$ хв), максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max}$ складають 136 МПа; Ст3–покриття (Св-

08Г2С–скло) – витримує 15 теплостій (570/10 °С $\tau = 10$ хв) і $\sigma_{\max} = 650$ МПа; під час термоциклічних навантажень структурних змін не відбувається: отримані результати дають уявлення про максимальний ресурс з'єднань та структурну стабільність метал-скляних електродугових покриттів в умовах, найбільш наближених до екстремальних.

Наукова значущість розділу полягає в удосконаленні теоретичного підходу до проектування модулів біологічного захисту, який враховує його раціональне розташування на суховантажному суді, алгоритмізацію вантажних операцій за дотриманням умов міцності та прогнозування руйнування при виникненні пожежонебезпечних ситуацій під час транспортування РАВ середньої і високої активності.

Практична значущість розділу полягає в удосконаленні конструкції модуля біологічного захисту за рахунок заміни традиційних матеріалів на розроблені у роботі метал-скляні композиції, що дає змоги майже на 10 % знизити його масу; розроблених технологічних рекомендаціях щодо виготовлення і монтажу модуля на судні.

Результати розділу наведено у роботах [106, 108, 121, 127, 134, 140, 142, 236, 315, 327–329, 374, 376].

РОЗДІЛ 7

ПРОЕКТНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БЛОКІВ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ ПЛАВУЧИХ СПОРУД ЗА ОБМЕЖЕННЯМИ ПОТУЖНОСТІ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВАНТАЖІВ

Вирішення проблеми розроблення конструктивних заходів щодо ізолювання РАВ при їх зберіганні на плавучих спорудах є комплексною проектною задачею, розв'язання якої повинно враховувати тепловий фактор остаточного тепловиділення радіоактивних речовин, їх агрегатний стан та систему заходів, пов'язаних з корозійним захистом, включаючи відновлювальні та ремонтні роботи деталей запірної арматури.

У розділі виконано проектне дослідження блоку біологічного захисту з розробкою практичних рекомендацій з вибором раціонального конструктивно-компонувального рішення, що у найбільшій мірі відповідає умовам безпечного транспортування або зберігання РАВ на плавучій базі. За критерій обрано обмеження щодо потужності їх остаточного тепловиділення, встановлені на вимогами МАГАТЕ. Моделювання теплового стану у вантажній зоні плавучої споруди дасть змогу скоротити час та матеріальні витрати на проведення дороговартісних натурних експериментів.

Метою розділу є створення нового теоретичного підходу до проектування блоків біологічного захисту, оснований на принципах відведення тепла з найбільш розігрітих ділянок при зберіганні РАВ з остаточним тепловиділенням, та комплексного захисту цистерн, у які вони завантажуються, за допомогою нових метал-скляних матеріалів і покриттів. Технологічне завдання полягає у розробці практичних рекомендацій щодо захисту циліндричних баків (цистерн) для РАВ з урахуванням їх агрегатного стану та монтажу на плавучій споруді, а також заходів, пов'язаних з ремонтом запірної арматури вантажних систем.

Об'єкт досліджень – процеси теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди між рідкими радіоактивними вантажами, що завантажені у циліндричні баки (цистерни) та повітрям, яке циркулює у подвійному борті або дні; технологічні процеси захисту цистерн для рідких РАВ.

Предмет досліджень – закономірності впливу потужності остаточного тепловиділення РАВ на проектні параметри блоку біологічного захисту; закономірності впливу властивостей метал-скляних матеріалів і покриттів (зокрема теплофізичних, технологічних, хімічної стійкості) на зниження температур з найбільш розігрітих ділянок та корозійний захист цистерн для рідких РАВ.

7.1 Постановка завдань проектного дослідження

Об'єктом для розрахункового аналізу вибрано плавбазу (несамохідне судно) з певними розмірностями (довжиною $L = 5,8$ м; шириною $B = 11,5$ м; з висотою борта $h = 6$ м), яку у зарубіжній практиці застосовано для тривалого зберігання високоактивних відходів, зокрема рідких РАВ, відпрацьованого ядерного палива, технологічного устаткування [10, 149, 221]. Радіоактивний вантаж розміщується у двох герметично закритих сталеву кришкою товщиною 300 мм циліндричних баках (цистернах) діаметром 3,6 м і висотою 3,4 м, які виготовлені з вуглецевої сталі ВСт3 (ГОСТ 5521-93) та розташовані в середні блоку біологічного захисту.

На першому етапі сформульовано загальну задачу про тепловий стан вантажної зони (рис. 7.1), яка у постановочному плані розглядається симетричною відносно діаметральної площини плавучої споруди, без урахування процесів променевого теплообміну. При виконанні аналізу процесів теплообміну вводяться наступні припущення, які спрощують розрахунки і забезпечують на точність результатів:

- потужність остаточного тепловиділення РАВ прирівнюється до кількості тепла, яке виділяється вантажем;

- форма баків (цистерн) прийнята циліндричною, зовнішній корпус блоку виконаний у вигляді паралелепіпеда з урахуванням закруглень корпусу плавбази;
- у розрахунках не враховуються швидкості заборотної води та повітря;
- дотримується рівність температур вантажів у симетрично розташованих баках з РАВ;
- на торцевих стінках не відбувається теплообмін з сусідніми відсіками (адіабатичні стінки).

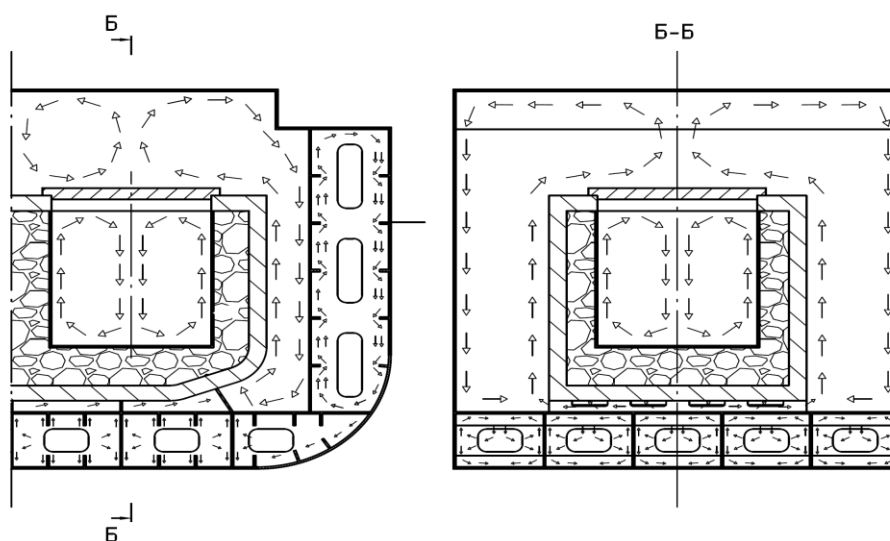


Рисунок 7.1 – Розрахункова схема процесів теплообміну
у вантажній зоні плавучої споруди

Для виявлення найбільш розігрітих та застійних зон, які призводять до виникнення пожежонебезпечних ділянок на судні, необхідно визначити поля температур та швидкості потоків циркулюючого повітря: тому поставлену задачу необхідно розглядати як спряжену [187, 350], в основу розв'язання якої покладено модель одиночної цистерни (рис. 7.2) з багатошаровою теплопровідною стінкою. Виходячи з умов тривалого зберігання РАВ на плавучих спорудах, задача розглядається як стаціонарна, тобто незалежно від часу зберігання з дотриманням постійності погодних умов. Постановка задачі не враховує наявності природної та штучної конвекції.

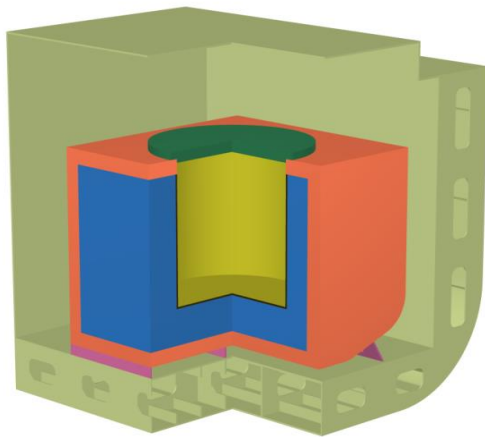


Рисунок 7.2 – Геометрична модель
одиначного бака для зберігання
РАВ

Задані наступні граничні умови: потужність остаточного тепловиділення РАВ $Q = 2 \text{ кВт}; 8 \text{ кВт}; 20 \text{ кВт}$; температура за зовнішньою обшивкою корпусу $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній обшивці корпусу судна $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2$. При моделюванні розглянуто декілька конструктивно-компонувальних схем, серед яких:

- існуючий варіант з вбудованими баками із нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632-72) для РАВ;
- схема з нанесенням на внутрішню поверхню баків із вуглецевої сталі ВСт3сп (ГОСТ 5521-93), метал-скляним електродуговим покриттям та склоалюмінієвим облицюванням на внутрішній поверхні кришки;
- схема з вкладеними циліндричними цистернами із нержавіючої сталі.

На кожному з етапів одержано нову інформацію, яка вносить певні коректування для подальших розробок.

7.2 Взаємозв'язок між енергетичними характеристиками радіоактивних вантажів і проектними параметрами блоку біологічного захисту плавучої споруди

В основу моделювання проектної ситуації покладено математичний опис процесів теплообміну при природній конвекції та вільному турбулентному русі розігрітого повітря (як нестисливої рідини) уздовж

вертикальної пластини з висотою бака x [170]. Явище тепловіддачі (7.1) з поверхні описується за допомогою критеріальних рівнянь (7.1) – (7.6), що враховують критерій Нуссельта $Nu_{жх}$, (7.2), який не залежить від координати x , температура повітря у просторі подвійного борту визначається як середнє значення за формулою (7.3). Число Грасгофа $Gr_{жх}$ на координаті x у діапазоні температур у межах товщини багат шарової стінки бака, яка складається з n шарів різних матеріалів, з урахуванням коефіцієнта температурного розширення β повітря уздовж стінки (7.4) і кінематичної в'язкості $\nu_{ж}$ при температурі повітря $\nu_{ж} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ визначається за формулою (7.5); відносна температура стінки – за формулою (7.6):

$$\alpha_{БЗ} = \frac{Nu_{жх} \cdot \lambda_{ж}}{x} \quad (7.1);$$

$$Nu_{жх} = 0,15 \cdot (Gr_{жх} \cdot Pr_{ж})^{1/3} \cdot (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \quad (7.2);$$

$$T_{\theta} = \frac{T_{знБЗ} + T_{зв}}{2} \quad (7.3) \quad \beta = \frac{1}{273 + T_{ж}} \quad (7.4);$$

$$Gr_{жх} = \int_{T_0}^{T_{ви}} \frac{g \beta \nu_c x^3}{\nu_{ж}^2} \quad (7.5) \quad T_c = \int_{Q_0}^{Q_i} T_{ж} - \int_{T_0}^{T_{виБЗ}} T_c \quad (7.6),$$

де $T_{знБЗ}$ – температура на зовнішній стінці блоку, К; $T_{зв}$ – температура заборотної води, К; T_0 – температура вантажу при різній потужності тепловиділення, К; T_c – температура у будь-якій точці багат шарової конструкції, К; $T_{ж}$ – температура потоку повітря уздовж внутрішньої стінки бака для РАВ, К; Q_0 – потужність тепловиділення вантажу (Вт) у процесі транспортування при $T = 273$, К; Q_i – гранична потужність тепловиділення вантажу, Вт; $\lambda_{ж}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі $T_{п}$, Вт/(м·К); g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м}_2/\text{с}$; $Pr_{ж}$ – значення числа Прандтля для повітря при температурі $T_{п}$; Pr_c – значення числа Прандтля для повітря при температурі стінки T_c .

З урахуванням процесів теплопровідності у вертикальній стінці бака тепловий потік для кожного шару визначається рівнянням (7.7), сумарний тепловий потік для всього блоку – рівнянням (7.8):

$$Q_i = \frac{\lambda_i}{\delta_i} F(T_i - T_{i-1}) \quad (7.7); \quad Q = [F(T_{\text{внБЗ}} - T_0)] / \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (7.8)$$

де F – площа бокової стінки бака, м²; T_i – температура на зовнішній стінці i -го шару, К; T_{i-1} – температура на внутрішній стінці i -го шару, К.

Тепловий баланс для вантажної зони плавучої споруди можна записати як для випадку трубчастого реактора з поздовжнім перемішуванням:

$$\rho C_{\text{вант}} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta H w, \quad (7.9)$$

де T – температура циркулюючого повітря, К; v – лінійна швидкість потоків повітря, м/с²; x – координата, яка прирівнюється до висоти бака для РАВ; енергетичні параметри радіоактивних вантажів: ρ – густина РАВ, кг/м³; $C_{\text{вант}}$ – теплоємність вантажу, Дж/К, яку виражено як $C_{\text{вант}} = \frac{dQ}{dT}$; λ – коефіцієнт теплопровідності РАВ, Вт/(м·К); ΔH – тепловий ефект екзотермічної реакції, Дж; w – швидкість реакції, м/с.

Виконання умов третього роду визначається як

$$\frac{\partial T}{\partial x}(t, x=0) = \varphi_1(t) \quad (7.10); \quad \frac{\partial T}{\partial x}(t, x=l) = \varphi_2(t) \quad (7.11)$$

Рівняння теплового балансу (7.9) у постановочному для числового моделювання плані буде мати вигляд

$$\frac{m_{\text{вант}}}{V_{\text{бака}}} \frac{\partial Q}{\partial T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta H w, \quad (7.12)$$

де $m_{\text{вант}}$ – маса вантажу нетто, кг; $V_{\text{бака}}$ – об'єм бака, м³; Q – тепловиділення вантажу, яке прирівнюється потужності остаточного тепловиділення РАВ, Вт; координата x – висота бака, м.; t – час (не враховується у випадку стаціонарної задачі); T – температура повітря, яке циркулює, К; v – лінійна швидкість потоку повітря, м/с²; λ – коефіцієнт теплопровідності РАВ, Вт/(м·К); ΔH – тепловий ефект екзотермічної реакції, Дж; w – швидкість екзотермічної реакції, м/с.

Для вирішення поставленої задачі застосовано метод скінчених об'ємів із застосуванням *CFD*-пакету Flowision [405], що обумовлено можливостями і ресурсами інформаційної системи. Сітчаста модель розрахункової області одиничного бака (рис. 7.3) являє собою сукупність скінчених об'ємів. Геометричні розміри обрано на підставі вивчення іноземних аналогів плавучих баз, які призначені для довготривалого зберігання високоактивного відпрацьованого ядерного палива [149, 194, 217, 251].

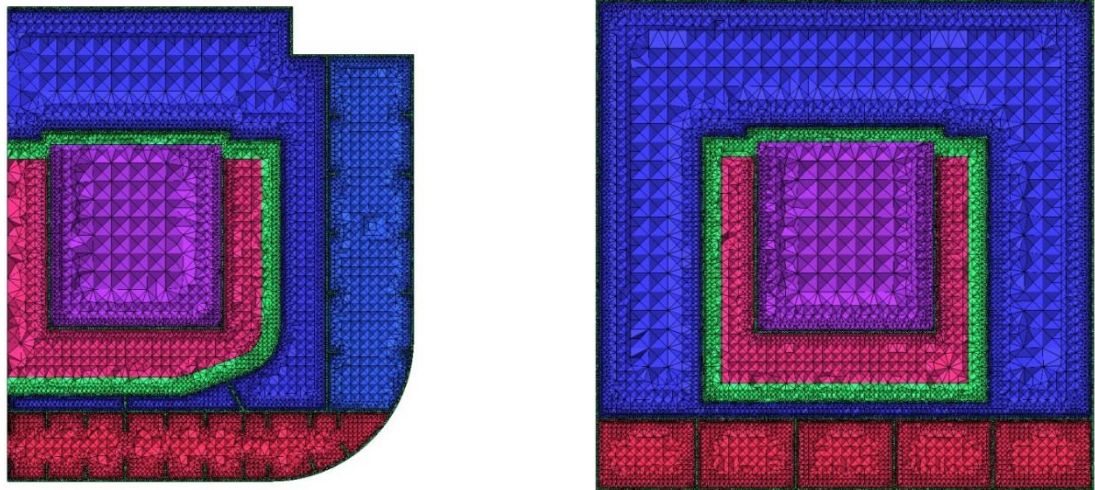


Рисунок 7.3 – Сітчаста модель одиничного бака для зберігання РАВ

Числову модель складено на основі рівняння теплового балансу (7.12) з урахуванням критеріальних рівнянь (7.1) – (7.8), рівномірний підігрів прикладається по внутрішньому периметру бака.

Для узагальнення уявлень щодо зберігання РАВ на плавучих об'єктах вирішено задачу про визначення променистої складової, яку на підставі робіт [3, 203] можна описати рівнянням

$$Q_{\text{л}} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{зв}} (T_{\text{вант}}^4 - T_{\text{зов.БЗ}}^4) F, \quad (7.13)$$

де $\sigma_0 = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{\text{зв}}$ – зведений ступінь чорноти шаруватої конструкції; $T_{\text{вант}}$ – температура вантажу з потужністю тепловиділення ($Q = 9 \text{ кВт}$), К; $T_{\text{зов.БЗ}}$ – температура зовнішньої поверхні конструкції блока, К; F – площа внутрішньої поверхні бака для РАВ, у розрахунках прийнята $F = 63,86 \text{ м}^2$.

В основу досліджень покладено теорію про хвильову природу випромінювань, згідно з якою радіоактивний вантаж у процесі перевезення або зберігання випромінює спектр хвиль довжиною λ_u , які поглинаються матеріалами захисного шару і сталевому корпусу бака. Коефіцієнт поглинання для променя з довжиною хвилі λ визначається як [203]

$$A = (I_1 - I_2) / I_1, \quad (7.14)$$

де I_1 – вхідна інтенсивність променя; I_2 – інтенсивність променя на виході.

При розв’язанні задачі висунуто наступні припущення: потужність теплового потоку від РАВ однакова у всіх напрямках; зведений ступінь чорноти $\varepsilon_{3\theta}$ визначається із експерименту як $\varepsilon_{3\theta} = D/D_0$, тобто відношення поглинутої дози до та після зразка, який складається зі сталеві пластини з шаром метал-скляного покриття $\delta = 2$ мм (§ 4.6), і залежить від оптико-геометричних властивостей випромінюючої системи тіл, враховуючи фактор багаторазового відбивання теплових потоків хвильового характеру. Як видно з табл. 7.1, внаслідок відбиваючої здатності алюмінію значення $\varepsilon_{3\theta}$ для композиції Св-АМг5–скло (0,0612...1,266 кВт) удвічі нижче від зведеного ступеня чорноти композиційного покриття Св-08Г2С–скло (0,122...2,532 кВт).

Таблиця 7.1 – Характеристики захисного шару в умовах променистого теплообміну

Захисний шар	Зведений ступінь чорноти $\varepsilon_{3\theta}$	Коефіцієнт поглинання A	Поглинута промениста енергія E , Вт/м ²
Св-08Г2С–скло	0,88	0,12	0,027
Св-АМг5–скло	0,44	0,56	0,126

У випадку прирівнювання температур на стінках цистерни енергія E , відбита від захисного шару, буде рівною поглинутій енергії, тобто [203]

$$E = E_s A, \quad (7.15)$$

де A – коефіцієнт поглинання шару, визначений за формулою (7.14);

E_s – щільність інтегрального потоку, що випромінюється з елементарної площадки dF : $E_s = 5.77(T/1000)^4$, Вт/м² [203].

Виконана оцінка питомих теплових потоків (рис. 7.4) показала, що величина щільності потоку випромінювання (лінії 2, 3) у 1,5–3 рази нижча за щільність теплового потоку, переданого теплопровідністю через шарувату стінку (лінія 1). Промениста енергія, що поглинається метал-скляним шаром, є незрівнянно малою, тобто при постановці стаціонарної задачі про тепловий стан вантажної зони радіаційний теплообмін можна не враховувати.

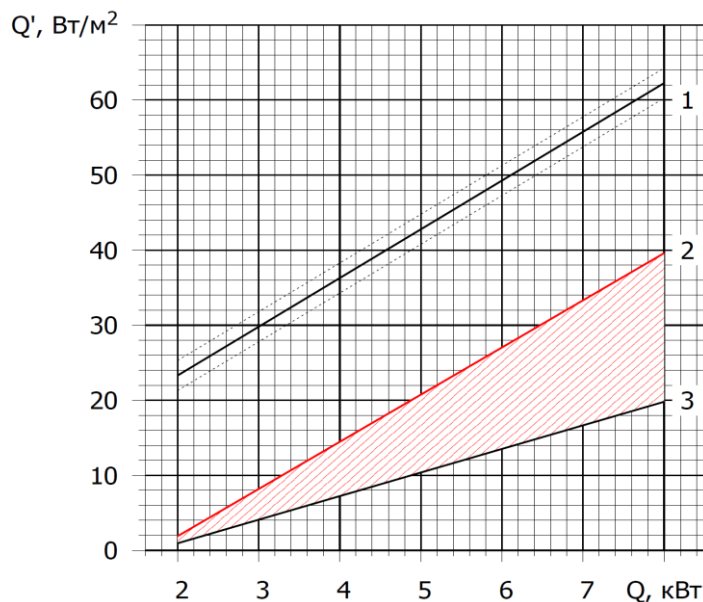


Рисунок 7.4 – Щільність теплового потоку при різних механізмах переносу тепла: 1 – теплопровідність через шарувату стінку зі склоалюмінієвим гарячепресованим шаром; 2, 3 – променистим теплообміном через шарувату стінку із захисним покриттям композиції Св-08Г2С–скло (2) і Св-АМг5–скло (3)

Розв’язання задачі про визначення променистої складової дає уявлення про умови теплової безпеки зберігання РАВ на плавучих об’єктах, її результати можна використовувати для моделювання пошкоджуваності захисного шару в умовах теплових ефектів.

7.3. Результати числового моделювання теплового стану вантажної зони

Для аналізу розподілу полів температур та потоків повітря складено розрахункову схему, яку для існуючого варіанту наведено на рис. 7.5.

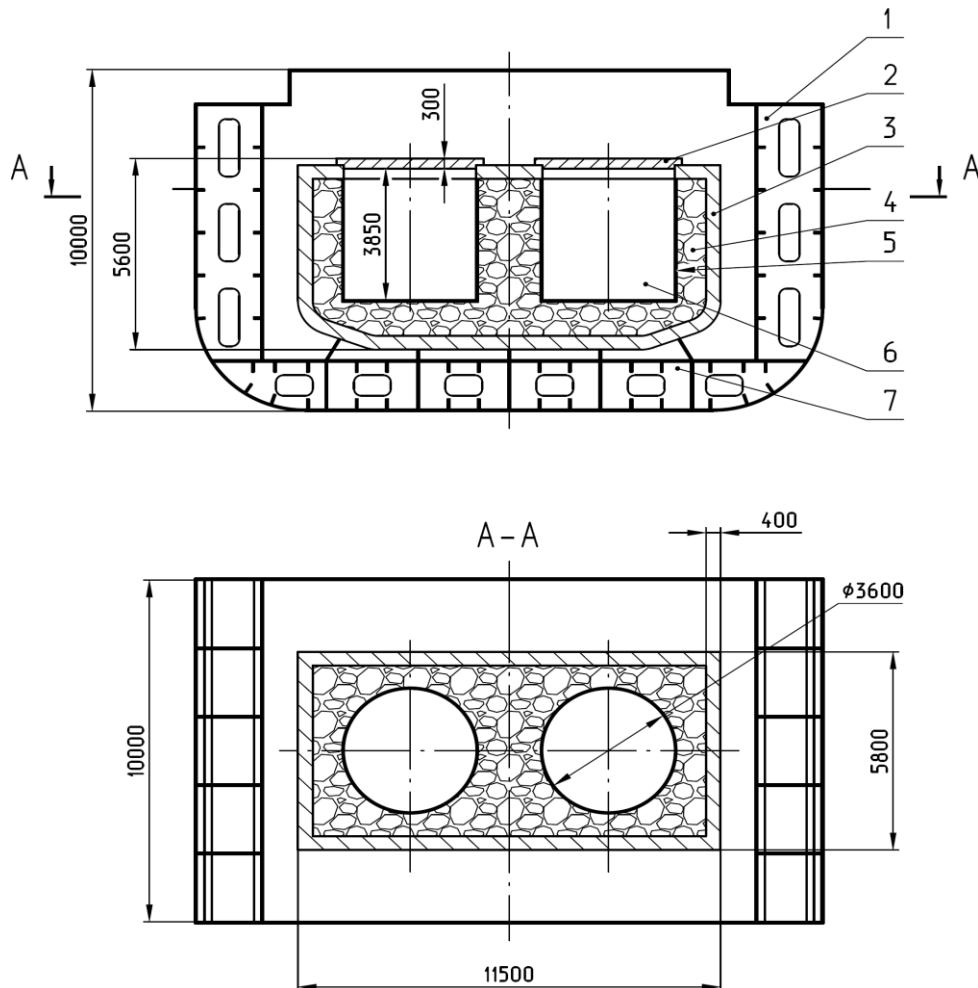


Рисунок 7.5 – Розрахункова схема для моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди (існуючий варіант):

1 – подвійний борт; 2 – кришка; 3 – зовнішній корпус; 4 – бетонна заливка;

5 – цистерни для РАВ; 6 – РАВ; 7 – подвійне дно

Розрахунки виконано з урахуванням товщин і коефіцієнтів теплопровідності обраних матеріалів: товщина (δ) зовнішнього корпусу з плакованої сталі (ГОСТ 10885-85) – 400 мм; $\lambda = 42 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; δ бетонної заливки (ГОСТ 25192-2012) – 800...1000 мм, $\lambda = 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; δ стінки

вкладеної цистерни зі сталі марки Х18Н9Т (ГОСТ 5632-72) – 50 мм, кришки – 300 мм, $\lambda = 15 \text{ Вт/(м·К)}$; результати наведено у вигляді розподілу полів температур (рис. 7.6) осереднені значення – у табл. 7.2.

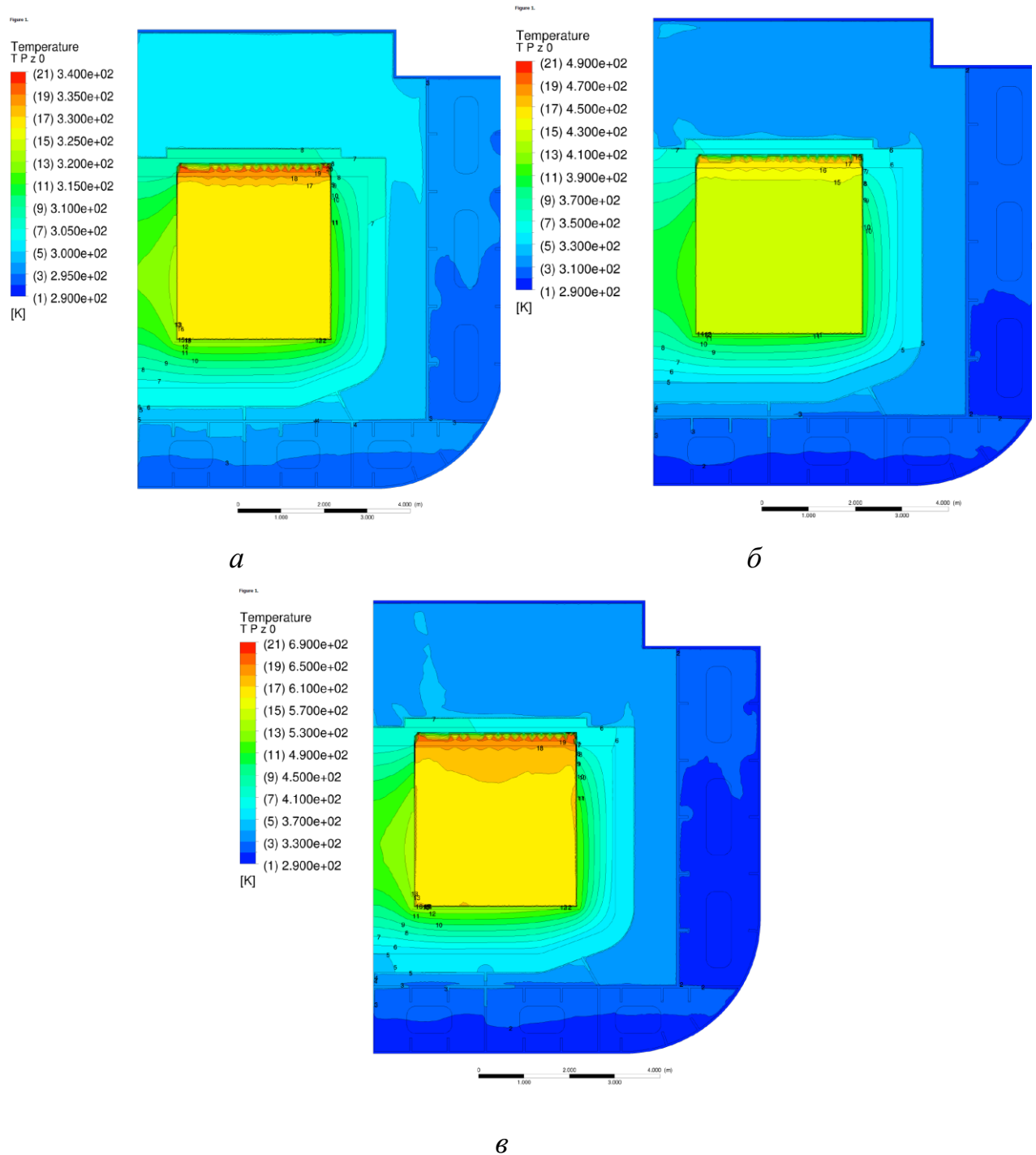


Рисунок 7.6 – Поля температур у вантажній зоні плавучої споруди (існуючий варіант) для РАВ з потужністю Q :

a – 2 кВт; *б* – 8 кВт; *в* – 20 кВт

Таблиця 7.2 – Середні значення температур у вантажній зоні плавучої споруди (існуючий варіант)

Температури у вантажній зоні	Потужність тепловиділення Q		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
T вантажу, К	330	410	610
T стінки бака, К	320	390	490
T повітря під кришкою, К	340	450	610
T на зовні кришки, К	320	430	510
T бетону, К	310...305	410...390	530...410
$T_{\text{зов}}$ на зовні корпусу блока, К	305	350	410...370
T подвійного борту, К	290	310	330
T подвійного дна, К	290	290	290

Одержані результати показали неоднорідність розподілу полів температур як по об'єму вантажної зони плавучої споруди, так і по товщині стінки. Для потужності тепловиділення 2 кВт перепад температур по товщині бетонного шару є незначним і складає 310...305 К; фактичний вклад бетонного шару в процесі відведення тепла – 5...35 %. Розподіл потоків повітря (рис. 7.7) свідчить про дотримання на плавучій споруді допустимих для природної конвекції умов теплообміну (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Середні значення швидкостей потоків повітря у вантажній зоні плавучої споруди (існуючий варіант)

Швидкість повітря у вантажній зоні	Потужність тепловиділення		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
$V_{\text{вн}}$ біля стінок бака, м/с	0,12	0,18	0,17
$V_{\text{вн}}$ під кришкою, м/с	0,24	0,2	0,17
$V_{\text{зов}}$ на зовні кришки, м/с	0,3	0,3	0,53
$V_{\text{вн}}$ біля подвійного борту	0,12	0,1	0,17
$V_{\text{вн}}$ біля подвійного дна	0,05	0,1	0,1

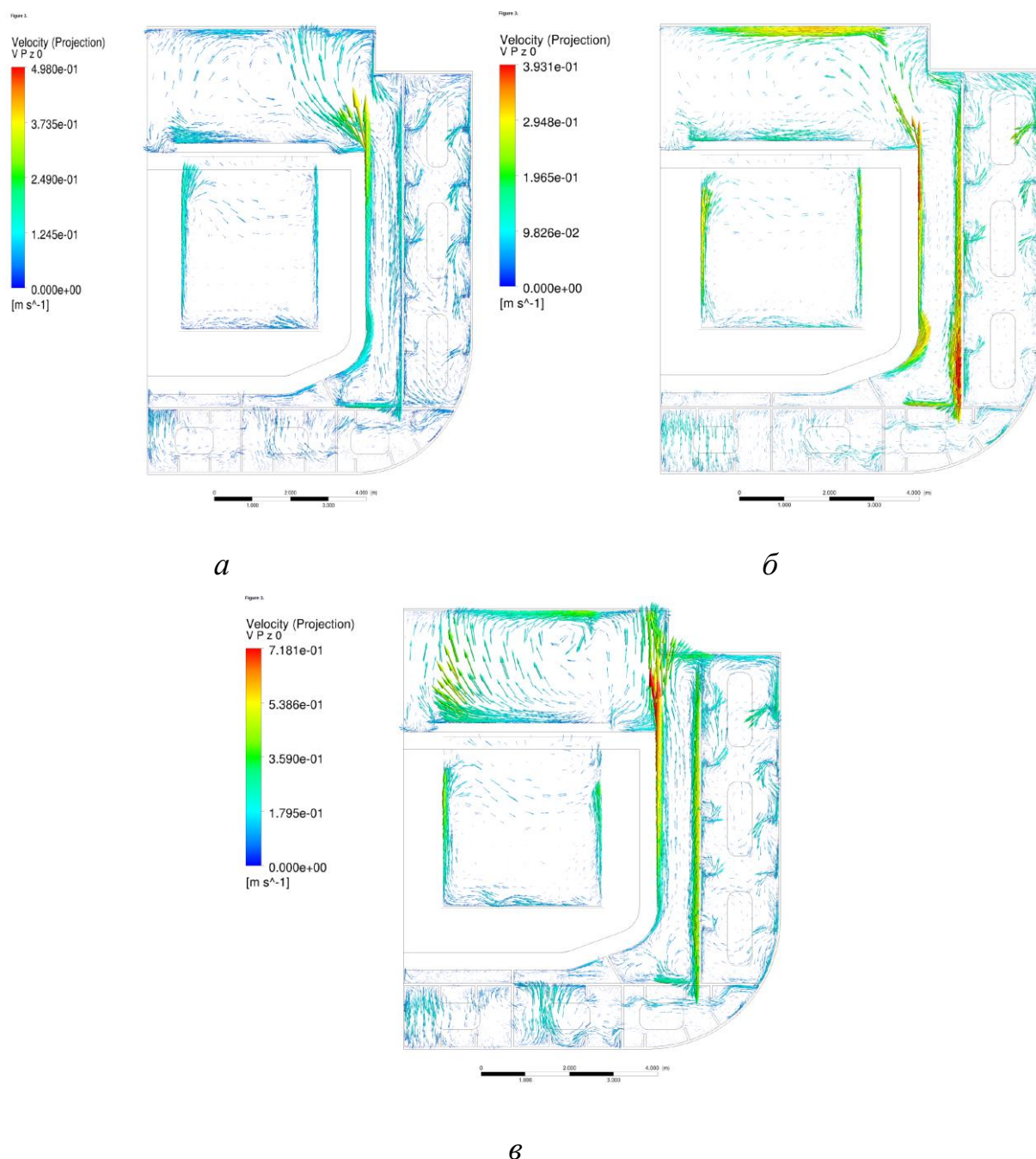


Рисунок 7.7 – Поля швидкостей повітря у вантажній зоні плавучої споруди (існуючий варіант) для РАВ з потужністю Q :

a – 2 кВт; $б$ – 8 кВт; $в$ – 20 кВт

Наступним завданням моделювання проектної ситуації поставлено дослідження впливу метал-скляного шару на процеси теплообміну та відведення тепла з найбільш розігрітих поверхонь. Розрахункова схема (рис. 4.8) враховує товщини і коефіцієнти теплопровідності обраних матеріалів: зовнішній корпус із плакованої сталі (ГОСТ 10885-85) товщиною

400 мм, $\lambda = 42 \text{ Вт/(м·К)}$, бетонна заливка (ГОСТ 25192-2012) товщиною 800...1000 мм, $\lambda = 0,12 \text{ Вт/(м·К)}$; вкладається цистерна для РАВ із ВСтЗсп (ГОСТ 5521-93) товщиною 50 мм, $\lambda = 40 \text{ Вт/(м·К)}$, товщина кришки 300 мм, проте знехтувані товщина і теплопровідність клейової композиції ЕД20–ПСМ.

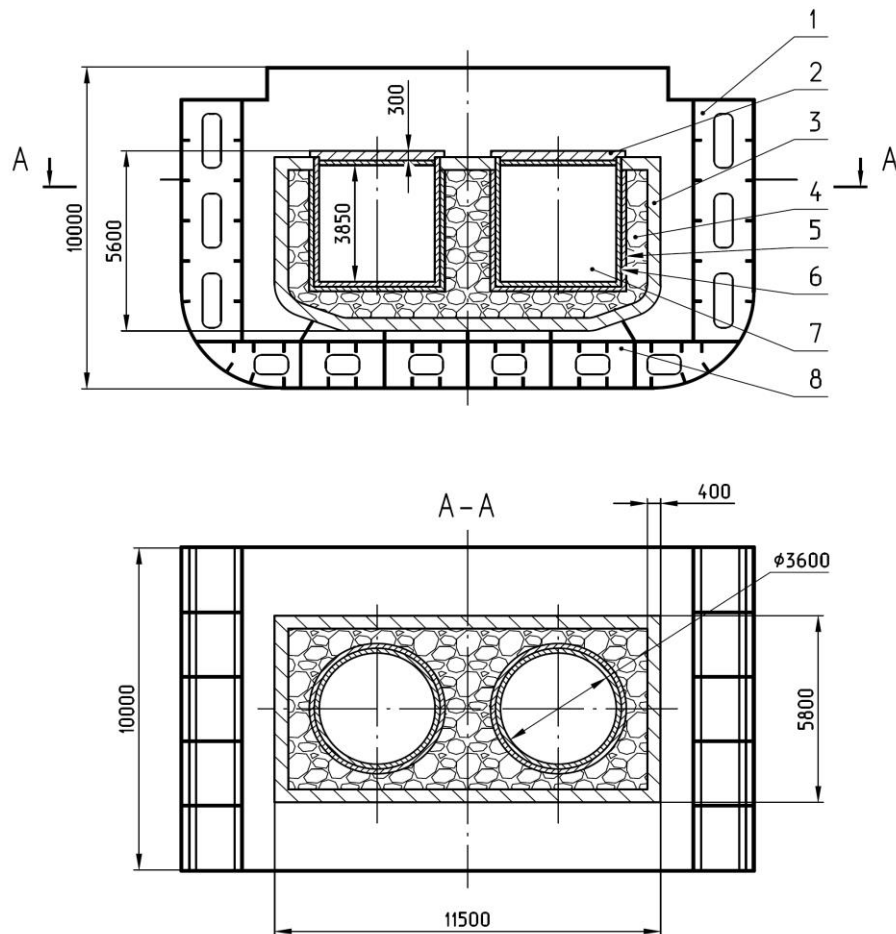


Рисунок 7.8 – Розрахункова схема для моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з нанесеним на внутрішню поверхню баків метал-скляним шаром): 1 – подвійний борт; 2 – кришка; 3 – зовнішній корпус конструкції; 4 – бетонна заливка; 5 – цистерни для РАВ; 6 – метал-скляний захисний шар; 7 – РАВ; 8 – подвійне дно

Результати числового моделювання наведені на рис. 7.9.

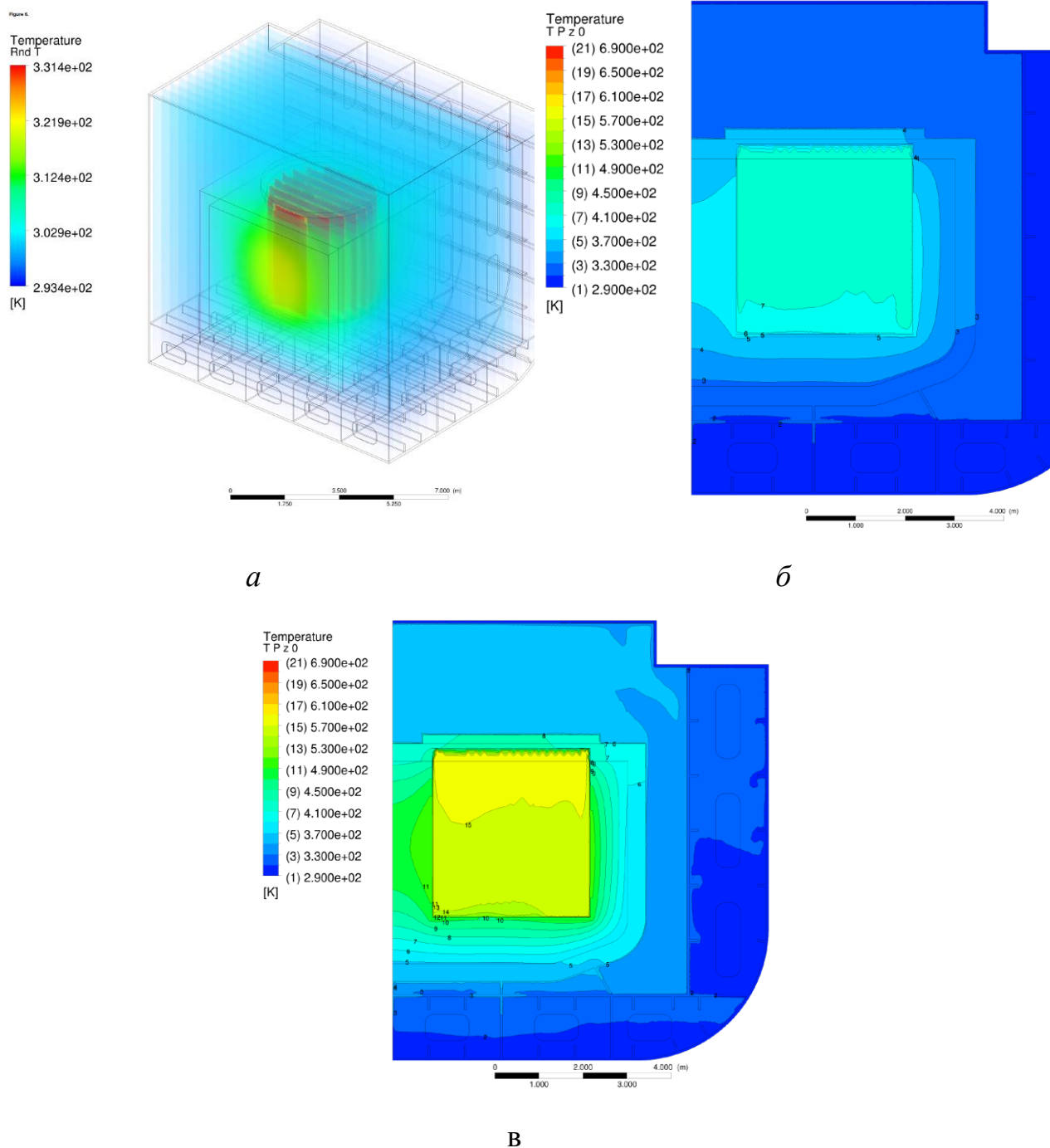


Рисунок 7.9 – Результати числового моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з нанесеним на внутрішню поверхню баків метал-скляним шаром) в умовах зберігання РАВ з потужністю Q :

a – 2 кВт; $б$ – 8 кВт; $в$ – 20 кВт

Встановлено, що нанесення електродугових покриттів композицій Св-08Г2С–скло з коефіцієнтом теплопровідності 18...22 Вт/(м·К) не впливає на зміну теплового стану вантажної зони. Облицювання склоалюмінієвими

плитками з $\lambda = 80 \dots 90$ Вт/(м·К) товщиною 50 мм внутрішньої поверхні кришки та нанесення на внутрішню поверхню бака для РАВ електродугового покриття Св-АМг5–скло з $\lambda = 61,5 \dots 70,0$ Вт/(м·К) товщиною 2 мм знижує температуру зовні на $60 \dots 80$ К (рис. 7.9), що пов'язано з низьким термічним опором метал-скляного шару ($\frac{\delta}{\lambda} = 0,02 \cdot 10^{-3}$ (м²·К)/Вт для покриттів, $\frac{\delta}{\lambda} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ (м²·К)/Вт для плиток) у порівнянні з шарами сталі ($\frac{\delta}{\lambda} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (м²·К)/Вт для стінки бака, $\frac{\delta}{\lambda} = 7,1 \cdot 10^{-3}$ (м²·К)/Вт для кришки) та бетону ($\frac{\delta}{\lambda} = 6,67$ (м²·К)/Вт). Залежно від потужності тепловиділення вантажів $Q = 2 \dots 20$ кВт температура покриття складає $370 \dots 530$ К, бетонної заливки – $290 \dots 410$ К, зовнішнього корпусу блока – $290 \dots 370$ К (табл. 7.4).

Таблиця 7.4 – Середні значення температур у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з нанесеним на внутрішню поверхню баків метал-скляним шаром)

Температура у вантажній зоні	Потужність тепловиділення		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
T вантажу, К	370	450	570
T покриття, К	370	410	530
T повітря під кришкою, К	370	450	610
T на зовні кришки, К	330	370	450
T бетону, К	290	350	410
$T_{\text{зов}}$ зовні корпусу блока, К	290	330	370
T подвійного борту, К	290	290	330
T подвійного дна, К	290	290	290

Рух повітря у просторі подвійного борту ввєрх забезпечує ефективне теплознімання з найбільш розігрітих ділянок, зокрема з кришки,

інтенсивність потоку повітря у нижній частині моделі (подвійне дно) обмежена та вирівнюється вздовж бокової поверхні бака для РАВ. Одержані в результаті числового моделювання значення температур надалі використовуються для розв'язування задач у плоскій постановці, зокрема для стаціонарної задачі про визначення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні кришки як найбільш розігрітої частині моделі.

Результати числового моделювання показали, що у внутрішній поверхні кришки бака температура вантажу в залежності від потужності тепловиділення досягає 200 °С. У постановочному плані задачі кришку представлено у вигляді двошарової горизонтальної пластини розміром d , облицьованої шаром склоалюмінієвого матеріалу товщиною 50 мм, який сприймає теплові навантаження, тобто підведення тепла здійснюється знизу. В задачі необхідно визначити температуру на зовнішній поверхні кришки, обмежуючись у розрахунках температурою зовнішнього повітря ($t_{\text{ж}}$ на віддаленні) 38 °С. На зовнішній та внутрішній поверхні кришки відбувається конвективний теплообмін між РАВ з потужністю тепловиділення $Q = 2 \dots 20$ кВт і зовнішнім повітрям (тобто повітрям на видаленні від стінки), що визначає відведення тепла із зони максимального розігрівання. У розрахунках товщини шарів прийняті постійними, зміною коефіцієнтів теплопровідності сталі ВСтЗсп і склоалюмінієвого матеріалу можна знехтувати.

Розподіл температур по шарах кришки визначається:

- рівнянням [170]:

$$t_{\text{зов}} = t_{\text{вн}} - \frac{\hat{Q}}{F} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (7.15)$$

де $t_{\text{зов}}$ – температура на зовнішній стінці кришки; $t_{\text{вн}}$ – температура на внутрішній стінці кришки, °С; $\hat{Q}$ – кількість тепла, що проходить через кришку, Вт; F – площа кришки діаметром d , м²; δ , λ – відповідно товщини та коефіцієнти теплопровідності кожного із шарів кришки;

- кількістю тепла, що проходить через кришку ($2\hat{Q}$ прийнято як 35 % від сумарного тепловиділення у баку з РАВ);
- температурою на віддаленні $t_{ж} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- умовами конвективного теплообміну на верхній та нижній поверхнях кришки, що визначаються критеріями Нуссельта для ламінарного (7.16) і турбулентного (7.17) режимів [170]:

$$Nu_{nc} = 0,71 \cdot (GrPr)_{nc}^{0,25} \quad (7.16);$$

$$Nu_{nc} = 0,162(GrPr)_{nc}^{0,33} \quad (7.17).$$

Режим руху повітря визначається за добутком критеріїв Грасгофа і Прандтля, що складає:

- для ламінарного режиму $(GrPr)_{nc} = 10^3 - 10^9$;
- для турбулентного режиму $(GrPr)_{nc} > 10^9$.
- Число Грасгофа для обох випадків знайдено як [170]

$$Gr = \frac{gd^3}{\nu} \beta \Delta t, \quad (7.18)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81\text{ м/с}^2$; d – діаметр кришки, м^2 ; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\nu = 18 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; β – коефіцієнт об'ємного розширення $\beta = 1/T, \text{ K}^{-1}$; $\Delta t = t_{нар} - t_{ж}$.

За результатами розрахунків встановлено наявність турбулентного режиму. За допомогою критерія Нуссельта (7.17) визначено коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої поверхні кришки [170]

$$\alpha = \frac{\lambda_n Nu}{d}, \quad (7.19)$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря.

Кількість тепла, що проходить через кришку [170]

$$\hat{Q} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F, \quad (7.20).$$

Задача визначення температури зовнішнього шару кришки вирішується методом послідовних наближень. У результаті розрахунків (рис. 7.10) встановлено, що відповідність температур зовнішньої поверхні Правилам МАГАТЕ можлива при транспортуванні (зберіганні) РАВ з потужністю тепловиділення до 8 кВт: подальше перевищення енергетичних параметрів РАВ може призвести до виникнення пожежонебезпечних ситуацій на плавучих об'єктах.

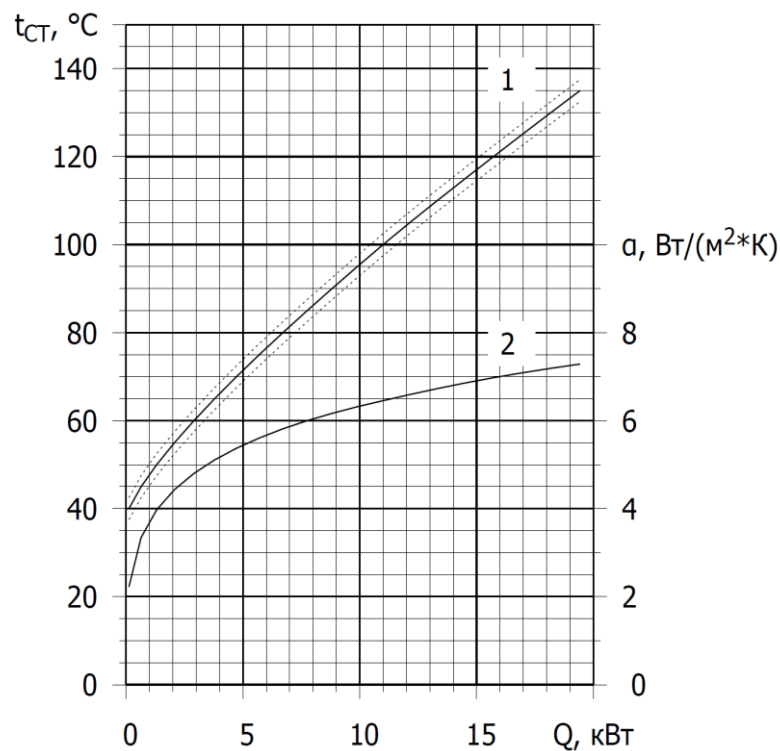


Рисунок 7.10 – Розрахункові значення температури (1) і коефіцієнта тепловіддачі (2) з поверхні кришки бака в залежності від потужності тепловиділення РАВ

7.4 Визначення обмежень щодо остаточного тепловиділення радіоактивних вантажів. Доцільність зменшення товщини бетонного шару

Розв'язання у спряженій тривимірній постановці стаціонарної задачі про тепловий стан вантажної зони має важливе значення як для

проектування, так і для модернізації існуючих плавучих засобів під перевезення та зберігання радіоактивних вантажів: надається можливість отримувати локальні значення температур і швидкостей повітря у будь-якій завданій точці в умовах, максимально наближених до експлуатаційних, що необхідно для прогнозування міцності в умовах теплових ефектів. У відповідності з Правилами МАГАТЕ [209], де максимальна температура на зовнішніх поверхнях кришки та корпусу блока біологічного захисту не повинна перевищувати $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 7.11), визначено, що безпечному зберіганню підлягають радіоактивні вантажі з сумарною потужністю не більше ніж 9 кВт , що збігається з результатами розв'язання плоскої стаціонарної задачі про визначення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні кришки (рис. 7.10). Враховуючи геометричні розміри розрахункової моделі (рис. 7.8), питомий показник складає 230 Вт/м^3 . Для зберігання РАВ з більшим Q слід передбачати облаштування засобами примусового охолодження.

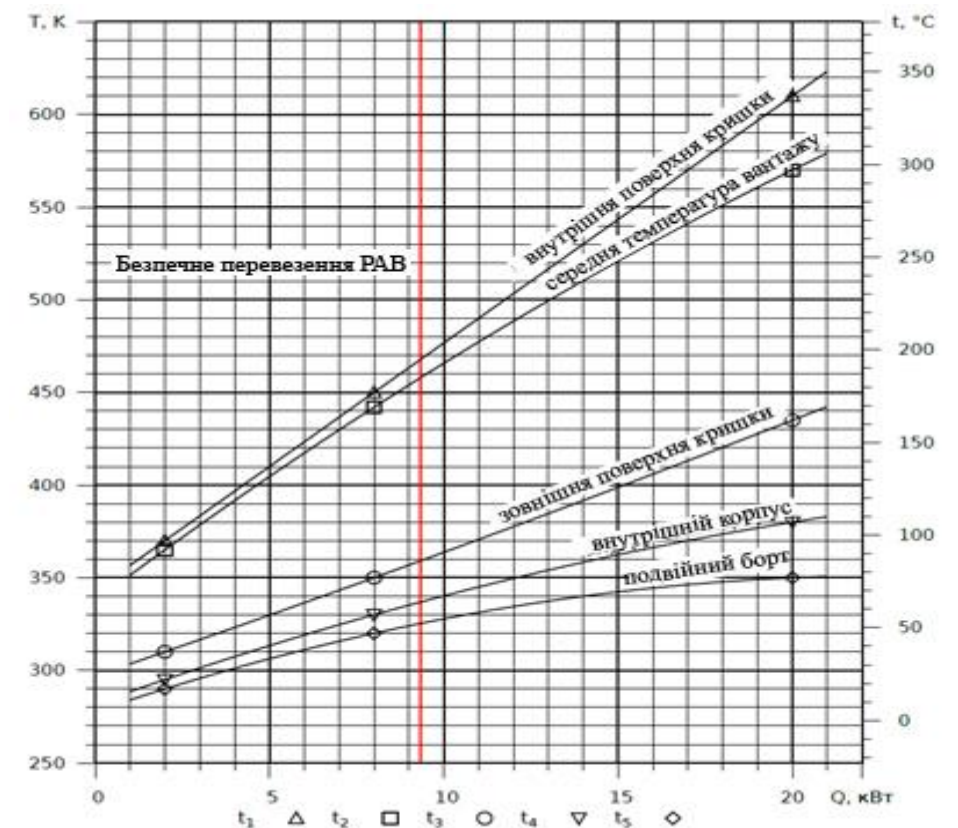


Рисунок 7.11 – Вплив потужності тепловиділення РАВ на розподіл температур у вантажній зоні плавучої споруди

За мету постановки задачі обрано дослідження можливості зниження масогабаритних показників блоку біологічного захисту через зменшення товщини бетонного шару до 200 мм, як це пропонується у роботі [244]. Приймаючи бокову стінку моделі (рис. 7.8) у вигляді шарів різномірних матеріалів (склоалюмінієвого захисного шару, сталеві стінки бака та бетонного шару), введено поняття «еквівалентної теплопровідної стінки» товщиною $\delta = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i$, припускаючи, що шари щільно прилягають один до одного. Задачу розв'язано як стаціонарну у плоскій постановці та розглянуто як частковий випадок спряженої задачі конвективного теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди. Аналогічний підхід запропоновано авторами роботи [1] для багатомісної корзини зберігання відпрацьованого ядерного палива в умовах його наземного зберігання на майданчику. Заміна складного об'єкта на більш спрощений дозволяє розраховувати розподіл температур у кожному із шарів конструкції, визначаючи відповідність Правилам МАГАТЕ.

За вихідні данні прийнято: товщини моделі та коефіцієнти теплопровідності шарів (табл. 4.7); значення температур на поверхні метал-скляного захисного шару (рис. 7.11) при потужності остаточного тепловиділення в діапазоні $Q = 2 \dots 8$ кВт. У результаті розв'язання задачі необхідно визначити температуру зовні бетонного шару при зменшенні його товщини до 200 мм. Розглянемо цистерну для РАВ у вигляді моделі зі спрощеною геометрією, де $\lambda_{екв}$ [203] у випадку облицювання склоалюмінієвими плитками визначається за формулою

$$\lambda_{екв} = \delta / \left(\frac{\delta_{покр}}{\lambda_{покр}} + \frac{\delta_{кл}}{\lambda_{кл}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{бет}}{\lambda_{бет}} \right) \quad (7.20),$$

а для конструкції зі електродуговим шаром $\lambda_{екв}$ композиції Св-АМг5–скло визначається за формулою

$$\lambda_{екв} = \delta / \left(\frac{\delta_{покр}}{\lambda_{покр}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{бет}}{\lambda_{бет}} \right), \quad (7.21)$$

де товщина і коефіцієнт теплопровідності: $\delta_{бет}$, $\lambda_{бет}$ – бетонного шару;

$\delta_{ст}$, $\lambda_{ст}$ – сталевих стінок; $\delta_{покр}$, $\lambda_{покр}$ – метал-скляного шару; $\delta_{кл}$, $\lambda_{кл}$ – клею.

Через велику товщину бетонного шару, яка значно перевищує товщину покриття та стінки цистерни, еквівалентний коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{екв}$ для обох випадків складає 0,14...0,17 Вт/(м·К), тобто така конструктивна схема не сприяє відведенню тепла, що також підтверджується розрахунками за формулою (7.22) величин питомого теплового потоку Q'/F , який передається через плоску стінку [170, 203]:

$$Q' = \frac{\lambda_{екв}}{\delta} F (T_{бет} - T_{вант}), \quad (7.22)$$

де $\lambda_{екв}$ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності багатошарової стінки, Вт/(м·К); F – площа стінки, прийнятої плоскою, м²; $T_{вант}$ – температура вантажу при певній потужності тепловиділення, К; $T_{бет}$ – температура бетонного шару назовні, К.

Для тепловиділення РАВ потужністю 2...8 кВт одержані значення питомого теплового потоку Q'/F складають 23,3...62,25 Вт/м, що у відповідності з Правилами МАГАТЕ [209] перевищує Q'/F для неупакованих вантажів (15 Вт/м). Це означає, що процес тепловідведення з вантажної зони плавучої споруди забезпечується не тільки шляхом підбору матеріалів з певним коефіцієнтом теплопровідності, у вирішенні задачі важливе місце займає механізм конвективного теплообміну.

Визначення температур по товщині багатошарової стінки (рис. 7.12) згідно з методикою [203] за формулами (7.23)–(7.25) для випадку нанесення електродугового покриття та формулами (7.26)–(7.22) для облицювання склоалюмінієвими плитками показало, що зі зменшенням товщини бетонного шару з 800 до 200 мм при перевезенні (зберіганні) вантажів з потужністю остаточного тепловиділення 2...8 кВт на його зовнішній поверхні спостерігаються температури 38...73 °С, що відповідає Правилам МАГАТЕ:

$$t_{\text{покр}} = t_{\text{вант}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{покр}}}{\lambda_{\text{покр}}}, \quad (7.23)$$

$$t_{\text{см}} = t_{\text{покр}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}}, \quad (7.24)$$

$$t_{\text{бет}} = t_{\text{см}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{бет}}}{\lambda_{\text{бет}}}, \quad (7.25)$$

$$t_{\text{покр}} = t_{\text{вант}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{покр}}}{\lambda_{\text{покр}}} \quad (7.26); \quad t_{\text{кл}} = t_{\text{покр}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} \quad (7.27);$$

$$t_{\text{см}} = t_{\text{кл}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}} \quad (7.28); \quad t_{\text{бет}} = t_{\text{см}} - \frac{Q'}{F} \cdot \frac{\delta_{\text{бет}}}{\lambda_{\text{бет}}}, \quad (7.29)$$

де $t_{\text{вант}}$ – температура вантажу, визначено за результатами числового моделювання.

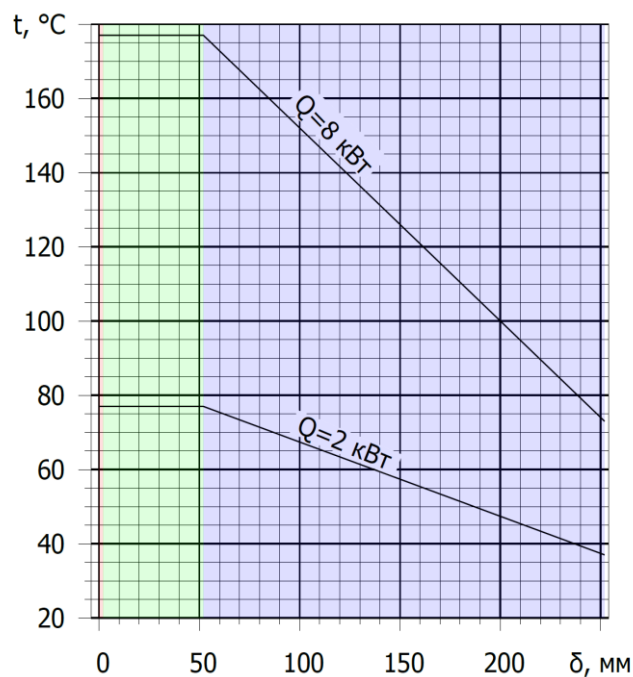


Рисунок 7.12 – Розподіл температур у багатошаровій плоскій стінці

Розрахунки виконані з коефіцієнтом запасу 1,2...1,8 та показали, що товщина клейового шару не впливає на процеси теплопровідності.

Запропоновані конструктивні рішення щодо зменшення товщини бетону вимагають проведення подальших досліджень процесів теплообміну, які зможуть підтвердити результати розв'язання плоскої задачі про еквівалентну теплопровідність шаруватої стінки. Моделювання теплових

потоків розглянуто на прикладі конструктивно-компонувальної схеми з вкладеними циліндричними цистернами, встановленими на фундаменті (рис. 7.13). Зовнішній корпус блоку і кришки баків виконані із плакованої сталі (ГОСТ 10885-85) з основним шаром із сталі ВСт3сп, який облицьований з двох боків корозійностійким шаром із 12Х18Н10Т; товщина плит зовнішнього корпусу – 400 мм, кришки – 300 мм. Вантажні цистерни з товщиною стінки 50 мм виготовлені з нержавіючої сталі аустенітного класу (наприклад, марки 12Х18Н9Т, ГОСТ 5632-72). У розрахунках прийняті узагальнені, незалежні від температури значення коефіцієнтів теплопровідності: для плакованих плит $\lambda_{екв} = 42 \text{ Вт/(м·К)}$, для сталі марки 12Х18Н9Т $\lambda = 15 \text{ Вт/(м·К)}$.

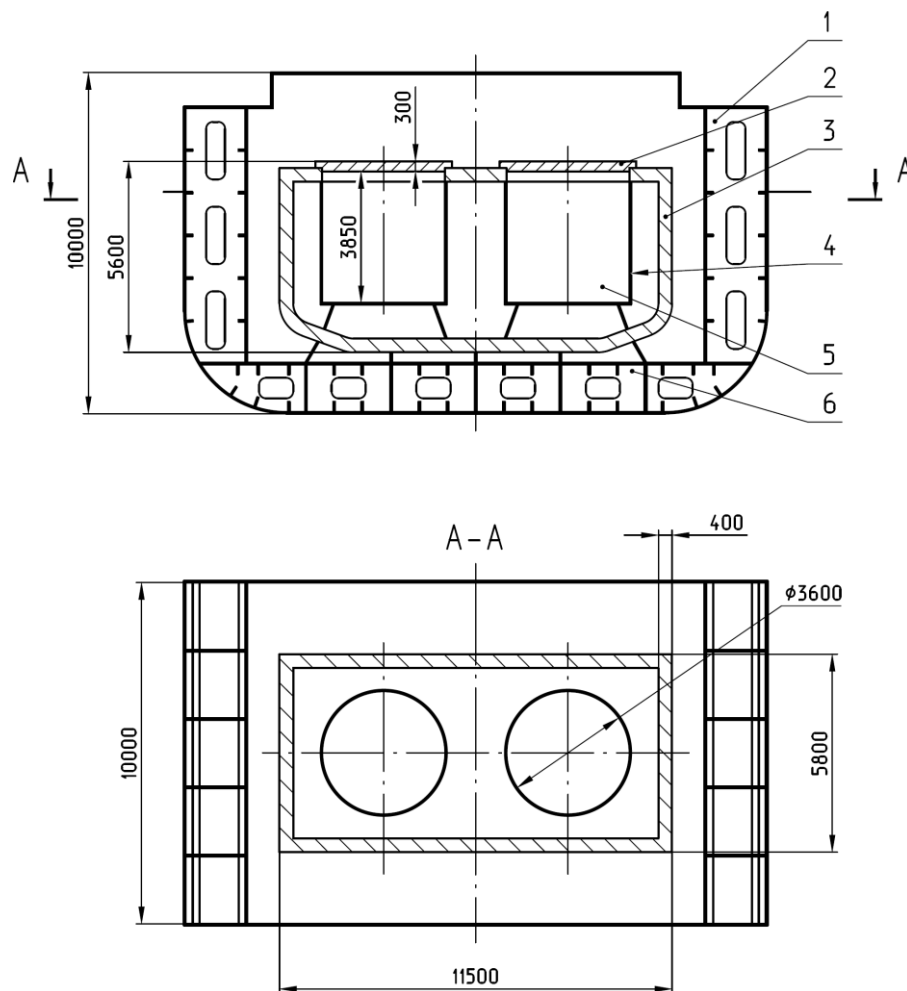


Рисунок 7.13 – Розрахункова схема для моделювання процесів теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з вкладеними цистернами):

- 1 – подвійний борт; 2 – кришка; 3 – зовнішній корпус; 4 – вкладені цистерни для РАВ; 5 – вантаж; 6 – подвійне дно

За мету досліджень поставлено визначення температурних полів (рис. 7.14) та безпечної циркуляції потоків повітря (рис. 7.15) між цистернами та корпусом блока біологічного захисту.

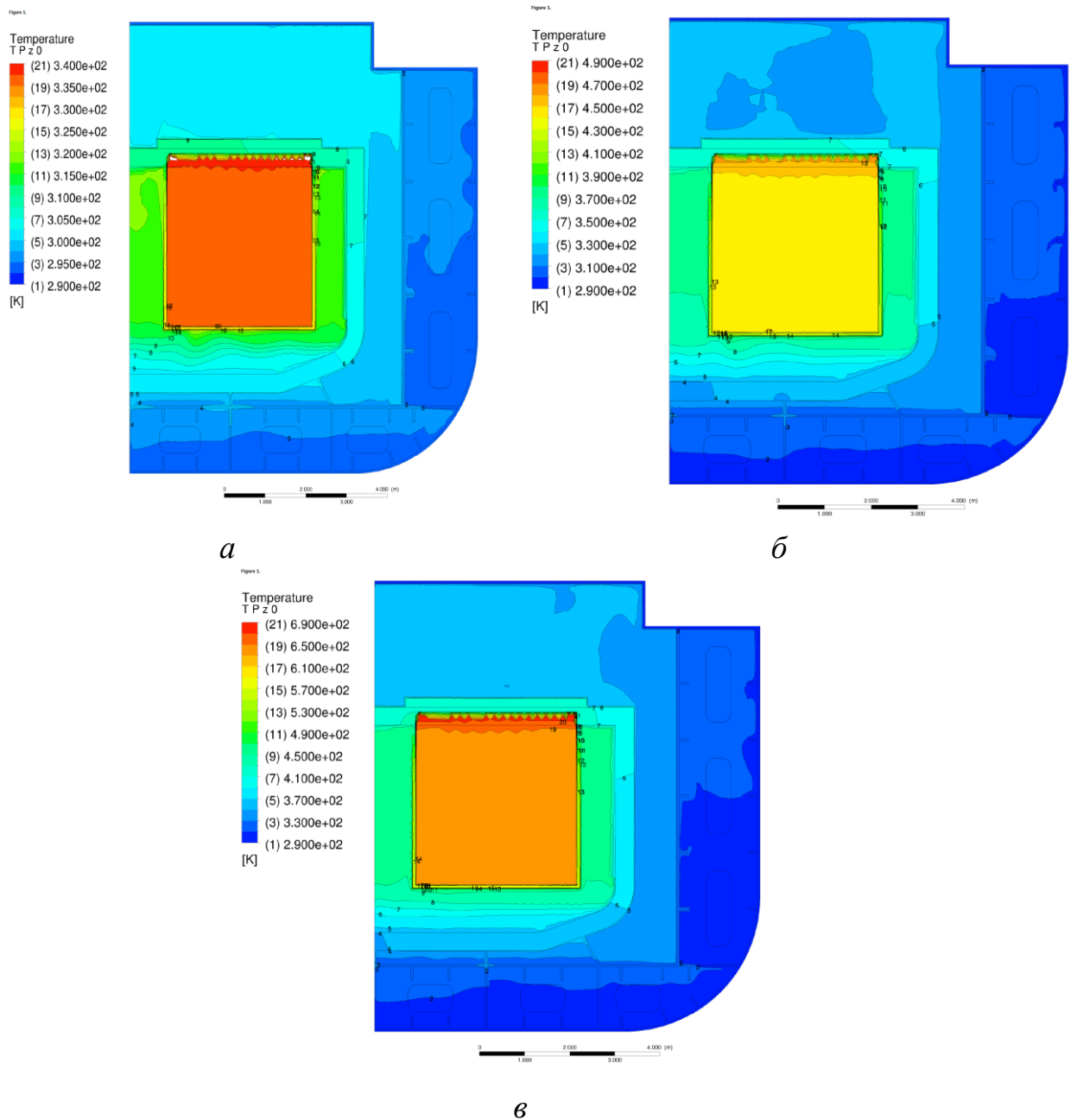


Рисунок 7.14 – Поля температур у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з вкладеними цистернами) для зберігання РАВ потужністю Q :

a – 2 кВт; $б$ – 8 кВт; $в$ – 20 кВт

Результати числового моделювання показали неоднорідність розподілу полів температур по об'єму вантажної зони плавучої споруди. Найбільш розігрітою є верхня зона моделі (табл. 7.5): температура РАВ під кришкою

складає 330...690 К, зовні – 320...450 К; у просторі подвійного дна температура значно нижче – 290...330 К, що пояснюється інтенсивним зніманням теплоти.

Таблиця 7.5 – Середні значення температур у вантажній зоні плавучої споруди (варіант з вкладеними цистернами)

Температури у вантажній зоні	Потужність тепловиділення		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
T вантажу, К	335	430	690
T стінки цистерни, К	315	410	570
T повітря під кришкою, К	340	470	690
T зовні кришки, К	320	350	450
T повітря всередині блока	315	390	450
$T_{\text{зов}}$ зовні корпусу, К	305	350	410...370
T подвійного борту, К	300	310	330
T подвійного дна, К	290	290	290...330

Зі збільшенням потужності тепловиділення вантажів спостерігається зростання температур всередині цистерни з РАВ і при $Q = 20$ кВт значення на зовнішніх стінках корпусу з плакованої сталі і кришки не відповідають нормам, встановленим МАГАТЕ [209]. Отже, зберігання незапакованих РАВ з $Q \geq 2$ кВт неприпустимо на плавучих спорудах, біологічним захистом яких є зовнішній корпус, виконаний з плакованої сталі. Внаслідок екзотермічних реакцій у повітрі можуть виникати скупчення шкідливих та небезпечних речовин, що збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій. Результати числового моделювання повітряних потоків (рис. 7.15) дозволяє виявити застійні зони. З отриманих даних видно (табл. 7.6), що температура на стінці зовнішнього корпусу біологічного захисту, виготовленого з плакованої сталі, при зберіганні РАВ з $Q = 2$ кВт складає 305 К (32 °С), з $Q = 20$ кВт досягає 410 К (137 °С), що не задовольняє нормам МАГАТЕ та становить для

зовнішнього середовища потенційну небезпеку. Проте результати розподілу швидкостей повітря (рис. 7.15) показали відсутність ризику виникнення пожежонебезпечної ситуації, оскільки забезпечується відведення тепла потоками повітря, які омивають стінки цистерни зі швидкістю 0,23...0,38 м/с та циркулюють зі швидкістю 0,1-0,2 м/с у просторі між зовнішнім корпусом блока та цистерною.

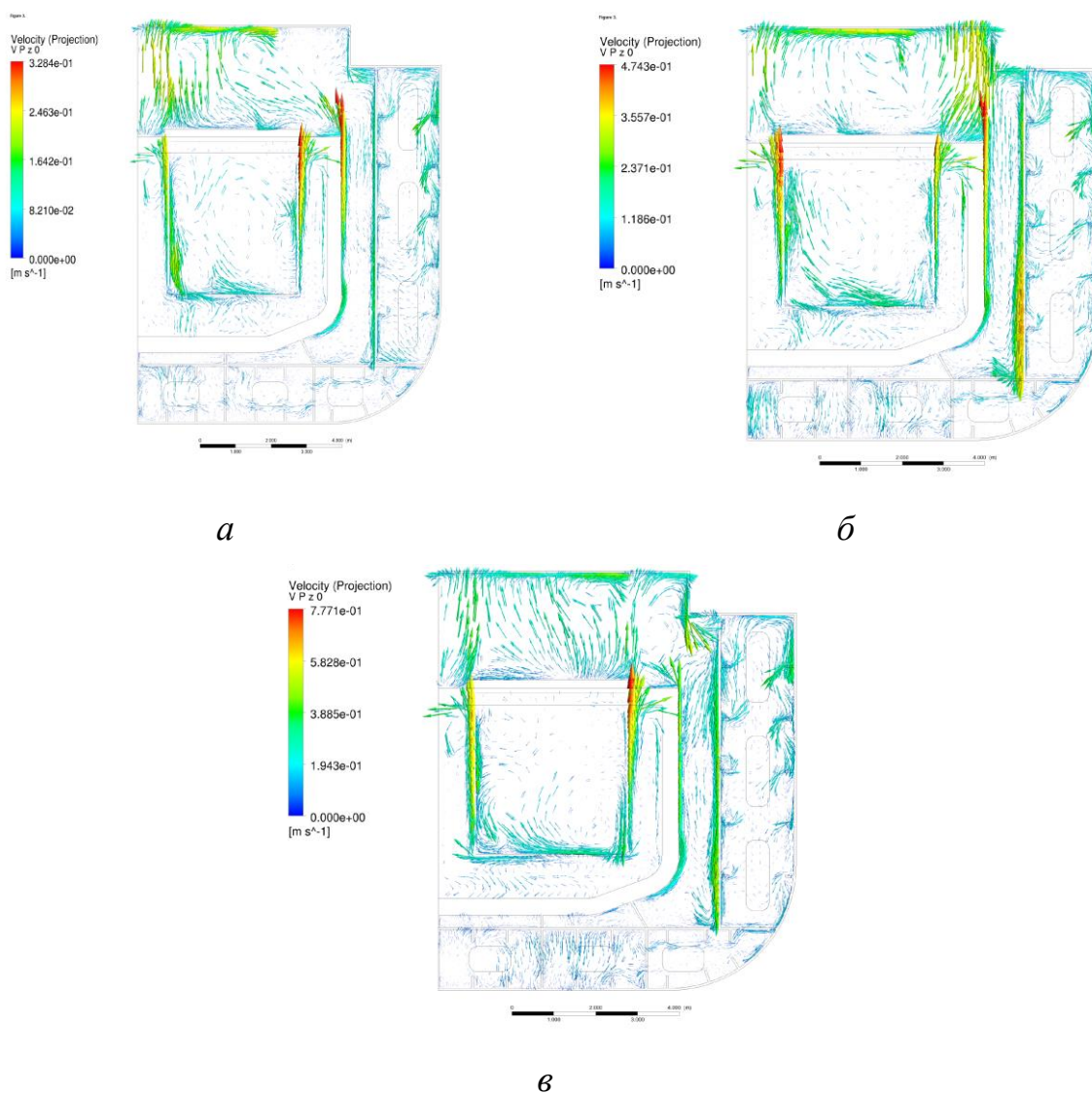


Рисунок 7.15 – Поля швидкостей повітря у вантажній зоні плавучої споруди з вкладеними цистернами для РАВ з потужністю Q :

a – 2 кВт; *б* – 8 кВт; *в* – 20 кВт

Найбільш інтенсивний рух повітря спостерігається у верхній частині моделі, яка розігрівається до максимальних температур 340...690 К.

Таблиця 7.6 – Середні значення швидкостей потоків повітря у вантажній зоні плавучої споруди з вкладеними цистернами

Швидкість повітря у вантажній зоні, м/с	Потужність тепловиділення		
	2 кВт	8 кВт	20 кВт
V біля стінок цистерн	0,082	0,23	0,38
V під кришкою	0,16	0,24	0,58
V уздовж корпусу блока	0,24	0,1	0,2
V біля подвійного борту	0,082	0,11	0,14
V у подвійного дна	0,05	0,05	0,05

Одержані результати показали підвищену інтенсивність теплознімання, яка ускладнена через низьку теплопровідність бетонної заливки у інших розглянутих варіантах, що підтверджує доцільність зменшення товщини бетонного шару. Проведені за геометричними розмірами моделей (рис. 7.8 і 7.13) оціночні розрахунки, які далі наведено у розділі 8 (§ 8.3) довели зниження маси бетонної заливки (при щільності бетону 2298 кг/м^3 [250]) більш ніж удвічі. Враховуючи те, що масу блока у порівнянні з існуючими варіантами знижено, у роботі не виконуються розрахунки міцності плавучої технічної бази.

Моделювання проектної ситуації з позицій обмежень за потужністю остаточного тепловиділення РАВ дало змогу обрати раціональне конструктивно-компонувальне рішення, яке полягає у збереженні вихідних розмірів блока біологічного захисту, застосуванні вертикальних сталевих цистерн (матеріал яких замінено з нержавіючої сталі марки 12X18H10T, ГОСТ 5632-72 на вуглецеву сталь марки ВСт3сп, ГОСТ 5521-93), на внутрішню поверхню яких нанесено шар метал-скляного електродугового покриття. Циліндричний бак, у який пропонується завантажувати рідкі радіоактивні речовини або тверді РАВ, попередньо упаковані у крафт-пакети або полімерні упаковки [316], навколо оточується циліндричною бетонною стінкою товщиною 200 мм; внутрішня поверхня кришки бака облицьована

склоалюмінієвими гарячепресованими плитками. Запропоновані конструктивні зміни сприятимуть полегшенню доступу до вантажних систем та дозволять зберігати на плавучій технічній базі вантажі підвищеної щільності, зокрема рідкі.

Одержані результати розширюють наукові уявлення про процеси теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди, які відбуваються при зберіганні РАВ з остаточним тепловиділенням та дозволяють встановити проектні обмеження, необхідні для безпечного зберігання РАВ без додаткового обладнання засобами примусового охолодження.

Розв'язання спряженої задачі теплообміну сприяє скороченню часу і матеріальних витрат на постановку та проведення дороговартісних експериментальних досліджень з використанням складних вимірювальних засобів.

7.5 Технологічні заходи щодо реалізації конструктивних змін блока біологічного захисту з урахуванням агрегатного стану радіоактивних вантажів

Ефективність висунутих конструктивних рішень вимагає розробки певних технологічних рекомендацій, які пов'язані з особливостями розроблених метал-скляних композицій та доведенням можливості їх застосування в умовах зберігання рідких РАВ. Тому у розділі розглянуті технологічні заходи за наступними напрямками:

- виготовлення вертикальних циліндричних баків для РАВ з використанням метал-скляних електродугових покриттів;
- облицювання внутрішньої поверхні кришки склоалюмінієвими плитками товщиною 50 мм;
- формування бетонної заливки навколо бака.

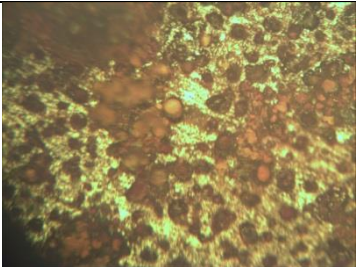
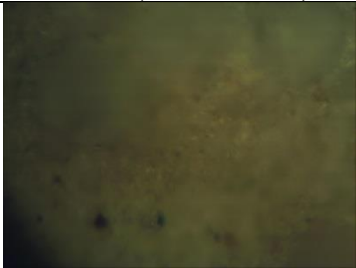
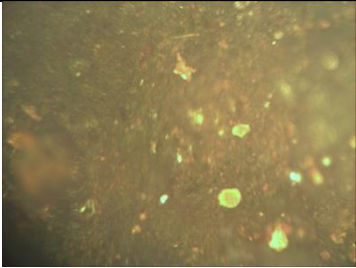
Вирішення поставлених завдань вимагає додаткових взаємно-зв'язаних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на виключення

аварійних наслідків, пов'язаних з вантажообігом різних за агрегатним станом, способом пакування та щільністю радіоактивних відходів.

Технологічний процес починається з виготовлення вертикальних цистерн для РАВ як невід'ємної частини блока біологічного захисту, де захист внутрішніх поверхонь є важливим завданням, що забезпечує надійну експлуатацію та можливість зберігання на плавучих спорудах широкого асортименту вантажів. Перед усім, заміна матеріалу вимагає проведення додаткових досліджень щодо корозійного руйнування, яке має місце у випадках зберігання РАВ та дезактивації.

Поряд з дослідженнями корозійної пошкоджуваності опромінених метал-скляних покриттів, результати яких наведено у розділі 4 (§ 4.9), визначено механізми руйнування ВСтЗсп. Постановка експериментальних досліджень включала в себе витримку попередньо опромінених γ -променями Co^{60} зразків ВСтЗсп розміром $140 \times 100 \times 1,5$ мм у 20 %-водних розчинах соляної (HCl), сірчаної (H_2SO_4) та азотної (HNO_3) кислот протягом 72, 240 і 840 год при температурі $18 \pm 2^\circ\text{C}$; результати досліджень наведено у табл. 7.7. У всіх випадках корозійні пошкодження носять поверхневий характер без ознак розтріскування, поверхнева швидкість поширення корозії не перевищує $0,088 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Проведені мікроструктурні дослідження показали, що при використанні метал-скляного захисного шару поверхня зразка СтЗ залишається без видимих змін, що свідчить про ефективність її захисту. Таким чином, покриття, виконуючи роль дифузійного бар'єра, гальмують процес руйнування основного металу цистерни, а на її поверхні утримується продукт корозії, який далі перешкоджає доступу агресивного середовища. У процесі дезактивації шар зруйнованого покриття може бути зчищений і при ремонтно-відновлювальних роботах нанесений заново.

Таблиця 7.7 – Корозійна пошкоджувальність опромінених пластин ВСтЗсп

Середовище	Топографія поверхні	Характеристика корозійного руйнування
20 % HCl	 ×150 (840 годин)	Піттингова корозія з явно вираженими виразками сферичної форми розміром 50...150 мкм
20 % H ₂ SO ₄	 ×150 (840 годин)	Пошкоджувальність відбувається з утворенням на поверхні пухкого осаду сіро-зеленого кольору; глибина пошкодження становить 30...40 мкм
20 % HNO ₃	 ×150 (840 годин)	Характерні локальні ділянки пошкоджень у вигляді плям розміром 0,3...0,5 мм; в окремих місцях спостерігається відшарування плям разом з продуктами корозії. Поверхня має буро-зелений відтінок без металевого блиску

Процес виготовлення бака (цистерни) зі знімною кришкою відбувається в умовах цеху і включає в себе підготовку листів на спеціальній листоправильній машині; перевірку якості поверхні і геометричних параметрів листових деталей; підготовку пакетів листів; обробку кромek на кромкофрезерному верстаті; комплектацію деталей на стенді; зварювання та рулонування підготовлених полотнищ. Зверху цистерни приварюється обичайка ($\delta = 300$ мм), у якій зроблено шість отворів під римб-бовти. Перед нанесенням метал-скляних покриттів здійснюється струминно-абразивна обробка внутрішньої поверхні цистерни, після якої не повинно залишатись заусенців, залишкового флюса, раковин, тріщин, зварювальних бризок. Щоб уникнути утворення конденсаційного шару вологи, який призводить до зниження міцності зчеплення покриття на напилювальною поверхнею, необхідно підтримувати температуру в цеху на рівні кімнатної (18 ± 2 °C). Якщо нанесення покриття відбувається на судні (у випадку ремонту) або у приміщенні з меншою температурою, достатньо попереднього нагрівання поверхні до $100 \dots 120$ °C. Як джерело нагрівання може бути використано струмінь продуктів згоряння електродугового апарату без подачі напилювального матеріалу. При виготовленні бака (цистерни) покриття наноситься виключно на бокові стінки, на її дно – після з'єднання з фундаментною плитою. Для напилення внутрішніх поверхонь цистерни як тіл обертання застосовується обертач. Товщина шару за один прохід становить $0,10 \dots 0,25$ мм, тобто для напилення $\delta = 1,5 \dots 2$ мм процес здійснюється у декілька проходів. Контроль товщини шару покриття вимірюється у трьох перетинах (по три виміру у кожному перетині). Після закінчення процесу напилена поверхня очищується за допомогою металевої щітки. Більш детальні технологічні рекомендації щодо електродугового напилення наведені у розділі 8.

Встановлено, що проникненню агресивних середовищ вглиб товщини метал-скляних електродугових покриттів до основного металу сприяє їх пориста структура. Знизити ймовірність корозійних пошкоджень можна через додаткове просочення рідким склом (ГОСТ 13078-81) – водним розчином

силікатів натрію $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ або калію $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$, ефективність яких пояснюється високою лужністю та колоїдно-хімічними властивостями [57]. Проникаючи в пори, рідке скло заповнює їх у приповерхневому шарі метал-скляних електродугових покриттів (рис. 7.16), блокуючи подальше проникнення агресивних середовищ.

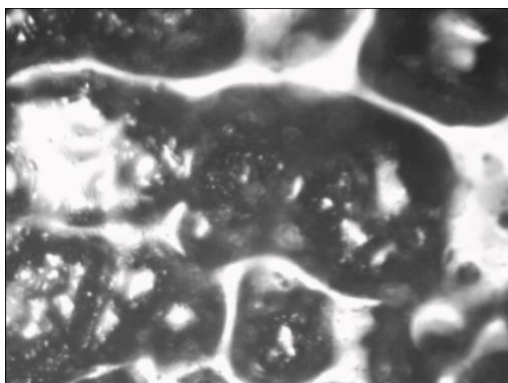


Рисунок 7.16 – Оптична мікрофотографія поверхні ($\times 350$) електродугового покриття композиції Св-08Г2С–ПСМ, додатково обробленого рідким склом

Щільність натрієвих силікатних стекол (мас. %: 22,7...36,7 SiO_2 ; 7,9...13,8 Na_2O) становить 1450...1500 кг/м^3 , кремнеземний модуль 2,2...2,8; їх застосування як зв'язуючого для отримання вогнезахисних, жаростійких і кислотостійких покриттів пояснюється високими адгезійними та антибактеріальними властивостями. Одним з найважливіших технологічних характеристик рідкого скла є в'язка консистенція (1 Пз), яка регулюється шляхом змішування силікатного розчину з водою, та здатність до самозастигання на повітрі. Покриття з рідкого скла можуть наноситися щіткою, фарбопультотом або методом просочення.

Кришка бака (цистерни), по краю якої приварюється обичайка з кріпленнями, виготовлюється з поковки листа сталі звичайної якості марки ВСт3сп (ГОСТ 380-87) товщиною 300 мм з категорією міцності КП175. У технології використовується вільна ковка за технічними вимогами галузевого стандарту ОСТ 5.9125-73 «Поковки стальные для судостроения. Технические требования». Кришка пригвинчується бовтами та облаштовується індикаторами для виявлення спроби несанкційованого зняття. Внутрішня поверхня кришки за допомогою клейової композиції облицьована склоалюмінієвими плитками товщиною 50 мм, технологія виготовлення яких описана у розділі 8.

Формування навколо цистерни циліндричної бетонної стінки здійснюється шляхом заливки розведеної бетонної суміші у знімну опалубку, яка складається зі сталевих листів товщиною 5...10 мм, що з'єднуються між собою за допомогою бовтів, або сіток з розміром комірки 5×5 мм або 8×8 мм, яка натягується уздовж усій обмежувальній поверхні, залишаючи зазор у 5...7 мм для термічного розширення. Вибір марки бетонної суміші ґрунтується на відповідності вимогам радіаційної стійкості, морозостійкості, водонепроникненості і терміну служби не менш ніж 50 років. Це бетони марки М500, М700 (клас на стискання В50), F300, W8. Розведена водою бетонна суміш заливається у попередньо обмежені опалубкою порожнини; найбільш сприятливою для твердіння вважається температура 15...25 °С, процес гідратації з наступною кристалізацією триває на протязі 28...30 діб. Досягти додаткового екзотермічного ефекту можливе шляхом утворення спеціального термовологого режиму шляхом улаштування теплошатрів або укрить, проте це пов'язано з додатковими витратами, ускладнює суміжні роботи і не скорочує термін побудови. Заливка бетоном здійснюється вже на будівельному місці після закріплення фундаментів блоку біологічного захисту на подвійному дні. Сформована циліндрична бетонна поверхня зовні забарвлюється вогнезахисним покриттям товщиною шару 1 мм, для чого рекомендується застосовувати наповнені силікатами Hf, Sc, Yb фарби [360].

Реалізація розроблених конструктивних і технологічних заходів для випадків зберігання на плавучих спорудах рідких РАВ пов'язана з вирішенням додаткових завдань щодо аналізу напружено-деформованого стану бака по поверхні бетон–сталь–покриття та ремонту запірної арматури вантажних систем, яка виходить з ладу через шкідливий вплив хімічно активних речовин.

Заміна матеріалу бака (цистерни) при зберіганні товщини його стінки та зменшення до 200 мм товщини бетонної заливки, зокрема в районі дна цистерни (рис. 7.17) у випадках зберігання рідких радіоактивних вантажів може викликати деформації стінки в зоні нижнього вузла. Аналітично-графічне оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) стінка–дно, виконано на

прикладі ідеальної циліндричної оболонки, всісиметрично навантаженої гідростатичним тиском без урахування фізичної і геометричної нелінійності матеріалу конструкції [311]. Розрахункова схема (рис. 7.17, а) враховує радіальне переміщення стінки W_x ; вертикальне переміщення днища W_y ; тиск рідини P_x на висоті x ; тиск рідини P на дно, тобто при $x = 0$; реакцію опори $q(y)$, а також M_x , M_y – згинальні моменти та Q_x , Q_y – поперечні сили у стінки (за координатою x) та днищі (за координатою y).

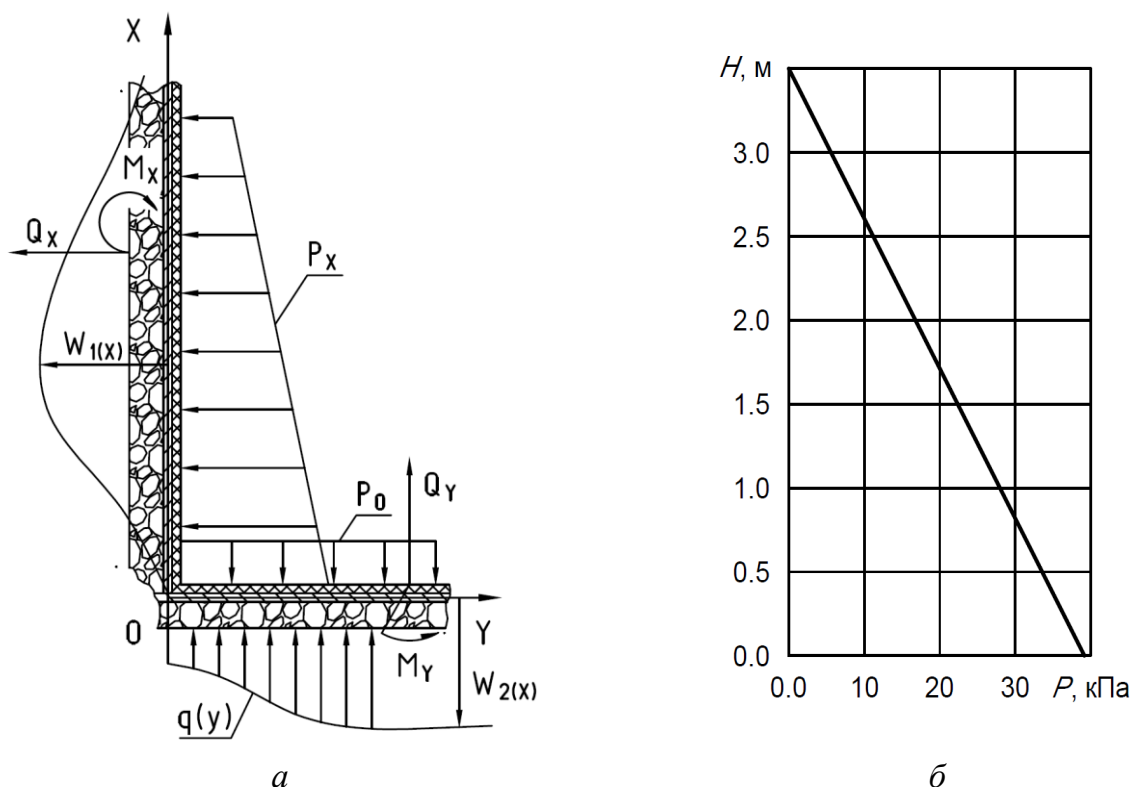


Рисунок 7.17 – Результати аналітично-графічного оцінювання НДС стінка–дно при збереженні рідких РАВ: а – розрахункова схема;

б – напруження в стінці бака

Узагальнене диференціальне рівняння [311] замкненої кругової циліндричної оболонки, яка знаходиться під дією вісесиметричного гідростатичного навантаження, з урахуванням багатошарової стінки буде мати вигляд

$$D \frac{d^4 \omega}{dx^4} + \frac{(E_{бет} \cdot \delta_{бет} + E_{ст} \cdot \delta_{ст} + E_{пок} \cdot \delta_{пок})}{r^2} \omega = P(x), \quad (7.30)$$

де D – циліндрична жорсткість; $P(x)$ – інтенсивність зовнішнього навантаження; x – координата висоти прогину; r – радіус циліндричного бака; $E_{\text{бет}}$, $E_{\text{ст}}$, $E_{\text{покр}}$ – модуль пружності відповідно бетону, сталі, метал-скляного покриття; $\delta_{\text{бет}}$, $\delta_{\text{ст}}$, $\delta_{\text{покр}}$ – товщина шару відповідно бетону, сталі, метал-скляного покриття; ω – значення прогину у радіальному напрямку, який визначається як

$$\omega = -\frac{\rho r^2}{E_{\text{екв}} \delta_{\text{екв}}} X, \quad (7.31)$$

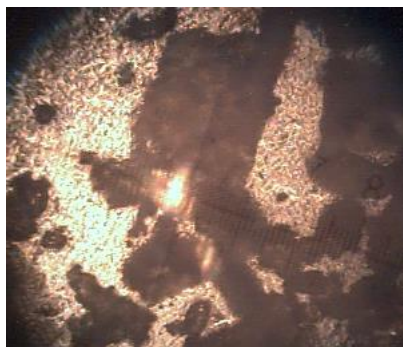
де ρ – густина рідини; H – висота цистерни; $\delta_{\text{екв}}$ – еквівалентна товщина стінки, визначається як $\delta_{\text{екв}} = \delta_{\text{бет}} + \delta_{\text{ст}} + \delta_{\text{покр}}$; $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль пружності багатошарової стінки бака (визначено за середніми значеннями); X – координата, еквівалентна висоті стінки.

При постановці задачі висунуто припущення, що вільна поверхня рідини є плоскою. Крім того, не враховано рух рідини внаслідок качки. Сили, позначені у розрахунковій схемі, прикладаються одночасно; еквівалентну стінку слід вважати жорсткою. Задачу розв'язано як вісісиметричну, у лінійній постановці за допомогою методу скінчених елементів. Для завдання гідростатичного навантаження обрано наступні параметри: висота завантаження – 3,5 м; радіус циліндричного бака – 1,8 м; густина рідини – 1140 кг/м³; значення гравітаційної сталої – 8,91 кг/(м·с). Задачу розв'язано методом скінчених елементів. Результати наведені у вигляді розподілу напружень по висоті стінки. Розрахунки за формулою (7.31) прогину довели жорсткість циліндричної стінки через бетонний шар. Одержані результати показали лінійність побудованої моделі; розрахункова похибка пов'язана з приблизними значеннями еквівалентних модулів пружності.

Не зважаючи на те, що застосування вертикальних цистерн або баків є більш переважним та універсальним, у них обмежено завантаження рідких радіоактивних вантажів: оточення бетонною заливкою ускладнює облаштування вантажної зони вантажними і зачисними системами.

7.6 Технологічні рекомендації щодо виготовлення та ремонту деталей запірної арматури вантажних систем

Для виготовлення арматури вантажних систем доцільно замість литих матеріалів використовувати порошки бронзи і бабіту, які широко застосовуються в ремонтних технологіях, зокрема для відновлення валів суднового устаткування, виготовлення і ремонту підшипників [43]. Для цього у роботі обрано порошки бронзи марки ПР-Бр-АМц9-2 (ГОСТ 28377-89) із середнім розміром частинок 60 мкм і бабіту марки Пр-Б83 (ТУ 14-22-91-95) розміром 40 мкм. Їх хімічний склад, мікрофотографії та властивості наведено у розділі 2 (табл. 2.3). Аналіз перспективних напрямків порошкової металургії [220, 259] показав доцільність використання виробничих відходів, що спрямовано на здешевлення продукції та сприяє утилізації вторинних металоресурсів: пилу, окалини, стружки, шламі. При обробці заготовок з кольорових сплавів основну масу відходів становить стружка, подальша переробка якої є нерентабельною через значний відсоток вигару. У науковій літературі відсутні публікації про формування покриттів на поверхні виробів за допомогою гарячого пресування з використанням відходів виробництва. Для виготовлення арматурних виробів у роботі пропонується використання механічно подрібненої стружки бабіту (рис. 7.18) марки Б83 (ГОСТ 1320-74), яка залишається після виконання ремонтно-відновлювальних робіт підшипників, а також відходів від олов'яних припоїв.



Дисперсність	60...120 мкм
Середній розмір частинок	80 мкм
Середній фактор форми	0,6
Насипна щільність	4150 кг/м ³
Мікротвердість Н _{μ20}	190 МПа
Температура плавлення	360°C

Рисунок 7.18 – Оптична мікрофотографія ($\times 90$) здрібненої стружки бабіту та його властивості

Пробні зразки одержані на установці (розділ 3, рис. 3.13), за допомогою якої досліджені усадочні процеси. Як матеріал підкладки обрано сталь 20 (ГОСТ 1050-88), підготовка поверхні якої під нанесення покриття включала в себе очищення від окалини з подальшим промиванням у холодній воді та просушенням. Лудіння здійснювалось за допомогою анодів з чистого олова марки О2 (ГОСТ 860-75) та відбувалось на наступних режимах: температура електроліту 30 °С, густина струму – 0,5 А/дм², швидкість осадження струму – 0,16...0,2 мкм/хв з подальшим промиванням у холодній воді. Використано електроліт наступного складу: олово сірчанокисле – 45...55 г/л; кислота сірчана – 60...100 г/л; клей міздровий – 2...5 г/л; емульгатор ОП-7 або ОП-10 – 5...10 г/л. Технологічні рекомендації та обладнання наведені у розділі 8.

Процес формування порошкового покриття відбувався у прес-формі, виготовленій з термічно необробленого графіту марки МПГ-6 (ТУ 48-4807-29-700), нагрівання у якій створює атмосферу СО та дозволяє здійснювати процес в одну технологічну стадію. Підготовлена формувальна суміш наноситься на луджену поверхню зразка, прес-форма герметично закривається пуансоном (рис. 3.14), тиск пресування прикладається на стадії проміжного прогрівання при температурі 70...90 °С, яка потім підвищується до температури ізотермічної витримки 450...550 °С. Температурний діапазон вибраний із діаграм стану Sn-Sb та Cu-Al-Mn [97]; значення тиску 0,5...1,5 МПа підібрані експериментально [232]. Вибір об'ємного вмісту компонентів бронзи та бабіту у складі формувальної суміші розглянуто, виходячи з умов утворення рідкої фази. Введення рівних об'ємів компонентів сприяє формуванню рівномірної структури матеріалу. Одночасно з процесами пресування та спікання відбувається формування перехідної зони (рис. 7.19) на поверхні поділу сталь-бронзобабітове покриття, що забезпечує міцність зчеплення на рівні $\sigma_{\text{відр}} = 60$ МПа. Мікроструктурні дослідження проведені за допомогою оптичних мікроскопів ММР-2Р і БИОЛАМ-И; рентгеноструктурний аналіз виконаний на установці ДРОН-3 у випромінюванні міді $\text{Cu}_{\text{K}\alpha=4,54178}$; вимірювання мікротвердості складових фаз на мікрошліфах (ГОСТ 9450-76) –

за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 при навантаженні 20 г. Встановлено формування псевдосплавної структури покриттів із остаточною пористістю 2...4 % та рівномірним розподілом твердої і м'якої фаз: на рентгенограмах (рис. 7.19, а) видно піки чистого Cu та хімічної сполуки Cu_2Sn ; на мікроструктурі видно чітку межу шару олова з дрібнокристалічною структурою, без набухань та відшарувань.

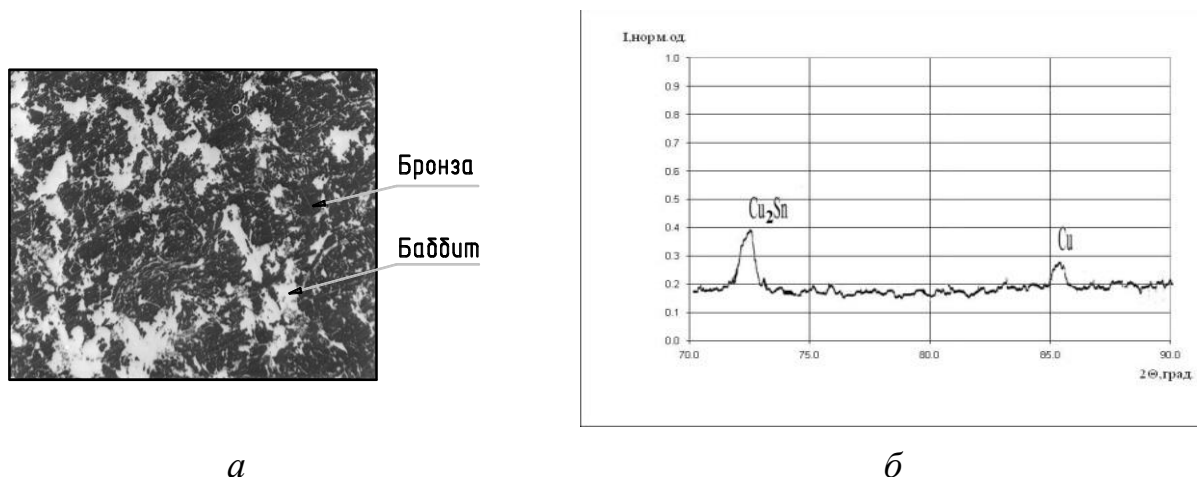


Рисунок 7.19 – Мікроструктура (а) $\times 150$, і фрагмент дифрактограми (б) бронзабабітового псевдосплаву

Обрані температурні режими процесу напікання бронзобабітової суміші не викликають структурних змін у сталі 20 (рис. 7.20).

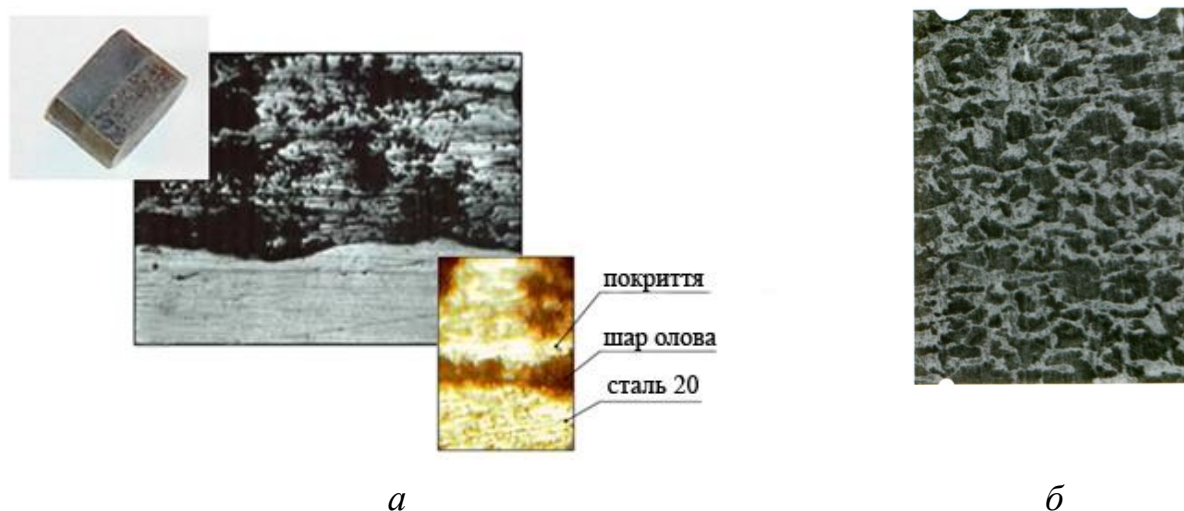


Рисунок 7.20 – Мікроструктура зразка ($\times 200$)

($P = 0,7$ МПа; $t = 450$ °С; $\tau = 30$ хв): а – псевдосплавного покриття з порошків бронзи та бабіту; б – металу-основи (сталь 20)

Для визначення границі міцності при осьовому стисненні застосовано прес FR10/1 з фіксованою швидкістю навантаження 5 мм/хв. Вимірювання теплопровідності проведені за допомогою приладу ИТ-λ-400 з похибкою $\pm 10^\circ\text{C}$. Зносостійкість досліджено на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик–колодка в умовах обмеженого змащування: ролик діаметром 500 мм виконаний з термообробленої сталі 40 твердістю 32 HRC. Колова швидкість у процесі випробувань складала 0,8 м/с, питомий тиск 28 МПа, пройдений шлях після притирання – 10 км. Величину зносу виміряно по змінах маси зразків, для чого використані електронні ваги GR200. Міцність зчеплення перевірена випробуваннями на відрив по ГОСТ 6996-66 із застосуванням розривної машини ИР 5057-50. Покриття має близьку до теоретичної щільність, яка становить 7600 кг/м^3 та характеризується наступними властивостями:

- границя міцності при осьовому стисканні 46 МПа;
- мікротвердість $H_{\mu 20}$:

бронзової складової,	1288 МПа;
бабітової складової,	383 МПа;
- коефіцієнт теплопровідності:

при 50°C	35,5 Вт/(м·К);
при 150°C	30,47 Вт/(м·К);
- коефіцієнт температуропровідності

при 50°C	$162,47 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с};$
при 150°C	$139,45 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}.$

Покриття з псевдосплавною структурою отримано з матеріалів, що не утворюють твердих розчинів і з'єднань у рідкому та твердому стані, завдяки чому вони поєднують у собі властивості кожного з компонентів, такі як висока теплопровідність та зносостійкість; інтенсивність зносу при навантаженні 28 МПа становить $34,7 \cdot 10^{-6}$ мкм/м. При формуванні покриття на поверхні сталевого виробу відбувається усадка (рис. 7.21), яка починається при температурі 70°C і триває 30...40 хв. При температурі, яка відповідає початку плавлення бабіту – $240...250^\circ\text{C}$, спостерігається максимальна швидкість

усадки – 4 мм/хв; при підвищенні температури ізотермічної витримки до 700 °С (крива 1) спостерігається витікання рідкої фази, що призводить до різнотовщинності покриття.

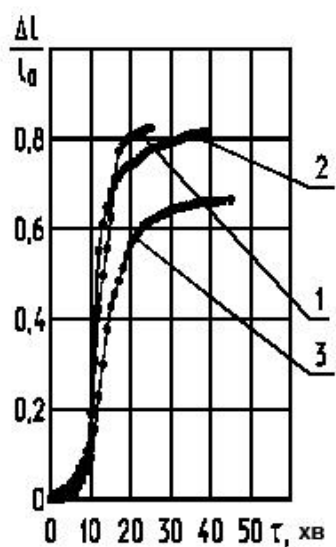


Рисунок 7.21 – ККУ процесу спікання порошків бронзи та бабіту (без підкладки) при температурах: 1 – 740 °С; 2 – 600 °С; 3 – 500 °С

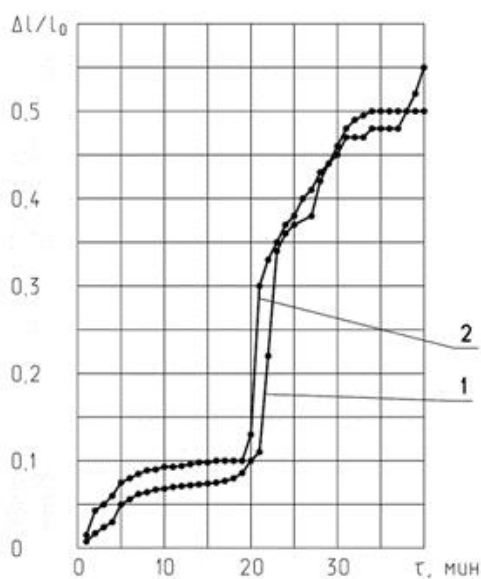


Рисунок 7.22 – ККУ при формуванні покриття на сталевому зразку при ізотермічній витримці: 1 – $t = 700$ °С; 2 – $t = 450$ °С

Встановлено, що наявність шару олова в процесі напікання порошкової суміші сприяє зниженню температури ізотермічної витримки до 450 °С (рис. 7.22) у порівнянні з окремим формуванням бронзобабітового псевдосплаву (рис. 7.21). Експериментальні дослідження показали, що введення до складу формувальної суміші замість порошку бабіту подрібненої стружки не впливає на механізм формування структури: під час виходу на режим ізотермічної витримки бабітова складова утворює рідку фазу, яка інтенсифікує усадкові процеси. Варіюючи висотою формувальної суміші та розраховуючи за

кінетичними кривими величину усадки, можна регулювати товщину шару від декількох міліметрів до декількох сантиметрів. Таким чином, у результаті досліджень встановлені наступні закономірності формування бронзобабітового покриття на сталевій поверхні за допомогою методу гарячого пресування:

- введення до складу формувальної суміші порошку або подрібненої стружки бабіту (50% об'ємн.) сприяє утворенню рідкої фази, під дією якої в процесі ізотермічної витримки формується покриття щільністю 7600 кг/м^3 і псевдосплавною структурою; рівномірно розташовані фази бронзи ($H_{\mu 20} = 1288 \text{ МПа}$) та бабіту ($H_{\mu 20} = 383 \text{ МПа}$) забезпечують формування його зносостійкості;
- під час гарячого пресування з тиском $0,7...1,2 \text{ МПа}$ розігрітої до температури $70...90 \text{ }^\circ\text{C}$ формувальної суміші з подальшою ізотермічною витримкою при температурі $450...600 \text{ }^\circ\text{C}$ відбуваються усадочні процеси з лінійною деформацією $55...85 \%$; формування міцного з'єднання сталь 20–бронзобабітове покриття ($\sigma_{\text{відр}} = 60 \text{ МПа}$) досягається через дифузійні процеси, які протікають у пограничному шарі олова.

Встановлені закономірності далі використовуються для практичних рекомендацій щодо виготовлення нових і відновлення зношених деталей арматури вантажних систем (рис. 7.23).

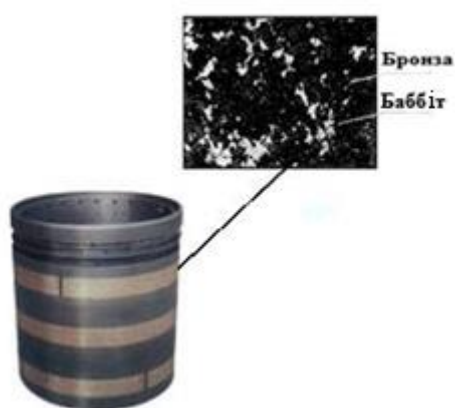


Рисунок 7.23 – Приклад деталі



Рисунок 7.24 – Мікрофотографія
($\times 150$) поверхні покриття
після корозійних випробувань

Розроблена технологія передбачає застосування вторинних металоресурсів у вигляді стружки як одного з видів утилізації відходів металургійного виробництва. Запірна арматура вантажних систем експлуатується у складних умовах, які пов'язані з хімічним складом рідких РАВ. Корозійна стійкість захисного покриття з порошків бронзи та бабіту забезпечується його хімічним складом [280]; обидва компоненти є стійкими для роботи у морському середовищі, однак розчини кислот, включаючи азотну та соляну, негативно впливають на вироби з бронзи. Експериментально досліджено тривалу корозійну стійкість покриттів у натуральному морському середовищі: зразки протягом 24 місяців витримувалися у воді озера Сиваш, яке багате на хлористі сполуки натрію, калію, магнію, бромистого магнію, сульфат магнію та інші солі; солоність води становить 87 % [148]. Проведені мікроструктурні дослідження дозволили виявити поодинокі точкові піттинги (рис. 7.24) розміром до 70 мкм, вимірювання мікротвердості складових фаз за допомогою приладу ПМТ-3 не показали змін, втрати маси не спостерігаються. Результати досліджень корозійної стійкості дають змогу рекомендувати бронзобабітове покриття для його подальшого застосування.

7.7 Висновки до розділу 7

1. В основу проектного дослідження блока біологічного захисту покладено моделювання процесів теплообміну між радіоактивними вантажами з потужністю остаточного тепловиділення $Q = 2...20$ кВт та циркулюючими у подвійному корпусі потоками повітря, для чого на прикладі геометричної моделі циліндричного бака з багатошаровою стінкою вперше для плавучої споруди сформульовано та розв'язано у тривимірній спряженій постановці задачу про тепловий стан вантажної зони, яка встановлює взаємний зв'язок між енергетичними характеристиками РАВ і геометричними розмірами моделі як проектними параметрами.

2. Результати числового моделювання конвективного теплообміну показали нерівномірність розподілу температур по об'єму вантажної зони: найбільш розігрітою є верхня частина моделі, максимально наближена до кришки бака (цистерни), де температура залежно від потужності тепловиділення ($Q = 2 \dots 20$ кВт) складає $320 \dots 690$ К; аналіз повітряних потоків уздовж вертикальної стінки цистерни для РАВ, у міжбортному просторі і просторі подвійного дна плавучої споруди, не виявив застійних зон, які можуть призвести до аварійних наслідків.

3. Встановлено вплив метал-скляного захисного шару на зниження температури з найбільш розігрітих ділянок вантажної зони плавучої споруди: облицювання склоалюмінієвими плитками товщиною 50 мм внутрішньої поверхні кришки та нанесення на внутрішню поверхню баків електродугового покриття з Св-АМг5–скло $\delta = 2$ мм знижує температуру зовні на $60 \dots 80$ К.

4. В результаті розв'язання задач у тривимірній та плоскій постановках для випадку із застосуванням розроблених метал-скляних електродугових покриттів, нанесених на внутрішню поверхню бака з РАВ та вигляді облицювання склоалюмінієвими плитками внутрішньої поверхні кришки, визначено проектні обмеження за потужністю остаточного тепловиділення на рівні $Q_{\text{пит}} = 230$ Вт/м³, що забезпечує зберігання РАВ на плавучій споруді без улаштування засобами примусового охолодження, які треба передбачати для зберігання РАВ з більшим Q .

5. Розв'язання часткових задач теплообміну у плоскій постановці (про еквівалентну теплопровідність шаруватої стінки, визначення променистої складової, коефіцієнта тепловіддачі з двошарової пластини) підтверджує результати числового моделювання. Для турбулентного режиму природної конвекції визначено температури та коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні двошарової кришки: встановлено, що при температурі навколишнього повітря 38 °С потужність тепловиділення РАВ обмежена до 8 кВт; показана доцільність зменшення товщини бетонного шару з 800 до 200 мм, що дає змогу

знизити масу блока більше ніж у два рази та зберігати вантажі підвищеної щільності, зокрема рідкі.

6. Розроблено технологічні рекомендації щодо реалізації запропонованих конструктивних рішень, які полягають у заміні матеріалу вертикального бака (цистерни) з нержавіючої сталі (12Х18Н10Т) на більш дешеву вуглецеву сталь (ВСт3) з нанесеним на внутрішню поверхню метал-скляним електродуговим покриттям, облицюванні внутрішньої поверхні кришки склоалюмінієвими плитками ($\delta = 50$ мм), зменшенні товщини бетонного шару.

7. За результатами корозійних випробувань та аналітично-графічного оцінювання напружено-деформованого стану стінки цистерни–дно доведена можливість зберігання рідких РАВ з густиною до 1140 кг/м^3 ; для захисту від корозійного пошкодження технологією нанесення метал-скляного шару на внутрішню поверхню цистерни з ВСт3 передбачено додаткове просочення рідким склом.

8. Розроблено спосіб ремонту деталей суднової запірної арматури вантажних систем (клапанів, фланців, кранів тощо) шляхом формування на сталевій поверхні покриття з псевдосплавною структурою, одержаного методом гарячого пресування ($P = 0,7 \dots 1,2 \text{ МПа}$, $t = 70 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ з ізотермічною витримкою при $t = 450 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$) суміші порошків (або здрібненої стружки) бронзи та бабіту.

Наукова значущість розділу полягає у розробці нового підходу до проектування блоків біологічного захисту, в основу якого покладено нові наукові уявлення про процеси теплообміну у вантажній зоні плавучої споруди.

Практична значущість розділу полягає у встановлених проектних обмеженнях за потужністю остаточного тепловиділення РАВ, у розроблених конструкторських рекомендаціях щодо вибору раціональних конструктивно-компонувальних рішень, які забезпечують не тільки умови теплової безпеки на плавучих спорудах, а й сприяють зниженню маси блока більше ніж у два рази.

Одержані результати викладено в роботах [108, 112, 119, 121, 126–129, 133, 135, 137, 144, 145, 232, 234, 374].

РОЗДІЛ 8

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК

8.1 Інноваційна привабливість та впровадження розробок

8.1.1 Загальна характеристика інноваційної привабливості дисертаційного дослідження

Зацікавленість зарубіжних інвесторів до суднобудівної галузі обумовлена вигідним географічним розташуванням України, наявністю фахової освіти, яка на високому кваліфікованому рівні веде підготовку інженерних і наукових кадрів як для вітчизняних проектних установ та промислових підприємств, так і для іноземних замовників. Перспективні наукові розробки у галузі водного транспорту пов'язано з новими напрямками у проектуванні і будівництві вантажних суден, які повинні відповідати сучасним проблемам суспільства і промисловості. Інноваційна привабливість проектів визначається принципами їх управління на міжнародному рівні, особливе значення мають об'єкти стратегічного значення з соціальним і економічним ефектом. Науково-практичний інтерес для зарубіжних інвесторів можуть мати судна, які призначені для транспортування радіоактивних речовин на підприємства хімічної, гірничопереробної, атомної галузі та вивезення відходів з місць їх накопичення у пункти переробки або захоронення. Актуальність створення і модернізації технічного флоту під транспортування і тимчасове зберігання радіоактивних вантажів обумовлена загальноцільовими програмами розвитку суднобудування та європейськими програмами поводження з радіоактивними відходами.

Типова структура планування інноваційної діяльності підприємств [153] безпосередньо пов'язана з проведенням наукових та дослідно-конструкторських робіт, впровадженням нового обладнання і прогресивних

технологій, заходів з економії матеріалів. Одним із напрямів підвищення конкурентоспроможності суден є зниження їх металоємкості за рахунок впровадження композиційних матеріалів.

У науково-економічних працях [153, 331, 342] пропонуються різні підходи до визначення ефективності впровадження інновацій, які визначаються економічною ефективністю у вартісному вираженні; новизною, простотою, корисністю, компактністю, естетичністю; фінансовою ефективністю діяльності підприємства; ресурсною ефективністю, яка відображає вплив інновацій на обсяг виробництва і розширене споживання; соціальною ефективністю, яка досягається через соціальні результати у суспільстві; екологічною ефективністю.

Мета розділу полягає у аналізі розвитку інноваційної привабливості будівництва суден та плавучих споруд, призначених для транспортування і зберігання РАВ, оптимальному виборі конструктивного рішення щодо біологічного захисту на основі критеріїв технологічності і економічної ефективності; розробці технологічних рекомендації щодо формування шарів конструкцій.

Об'єкт досліджень – процеси деталізації комплексних показників технологічності і економічної ефективності формування елементів біологічного захисту шляхом впровадження нових метал-скляних матеріалів і покриттів.

Предметом дослідження є теоретичні, методичні та практичні засади формування інноваційних складових проектів суден і плавучих споруд, технологій підвищення захисту їх елементів через застосування нових матеріалів і покриттів.

8.1.2 Вибір та аналіз критеріїв оцінювання інноваційного розвитку будівництва суден для радіоактивних вантажів

Сучасний погляд на розвиток інноваційних розробок у суднобудуванні зосереджений на наукоємності суднобудівних підприємств, розширенні морських і річкових перевезень та збільшенні вантажообігу портів. Головним нормативним документом стосовно оцінювання ефективності при конкурсному

порівнянні інноваційних розробок вважаються методичні рекомендації Державного інноваційного фонду України [99], згідно з якими розрізняють загальнодержавну та комерційну ефективність на рівні окремої галузі, що оцінює фінансові результати підприємств [342].

Ефективність інноваційних проектів являє собою складну систему, для оцінки комерційної та бюджетної складової якої поряд з традиційними показниками (річними витратами, рентабельністю інвестицій, терміном окупності тощо) застосовуються дисконтовані та інтегральні показники ефективності, а також оцінювання ліквідності і фінансової стійкості, ділової активності, ефективності діяльності, використання ресурсів, ризиків [331, 342]. Проте інноваційна привабливість не є виключно економічною проблемою, а регулюється впровадженням нових конструктивно-технологічних рішень, перспективність яких визначається через показники (табл. 8.1) оцінки бюджетної і комерційної складових проекту: їх використання є доцільним для розрахунків фінансових обмежень, проведення аналізу і побудови рейтингових моделей. Проте слід вважати, що ефективність оцінюється не тільки за грошовим еквівалентом, а й за такими критеріями як актуальність, значущість та багатоаспектність інновацій. Для цього введено критерії інтелектуального капіталу та соціального ефекту, які включають у себе ефективне використання нових конструктивних і технологічних рішень та обмін кваліфікованими кадрами ще на етапі навчального процесу. Нові інноваційні впровадження у традиційні методики визначення будівельної вартості судна включають у себе: зниження металоємності за рахунок застосування композиційних матеріалів; виключення необхідності у обладнанні примусовими засобами охолодження при зберіганні на плавучих спорудах РАВ з потужністю остаточного тепловиділення 230 Вт/м^3 ; зниження собівартості виготовлення елементів біологічного захисту через впровадження нових технологій і нових складів матеріалів, які одночасно поєднують у себе декілька функціональних властивостей.

Таблиця 8.1 – Критерії оцінювання інноваційної ефективності проекту

Показники	Критерії оцінювання	Корегування
Термін окупності	$T_0 = \frac{B}{D},$ де B – загальні інноваційні витрати; D – загальний результат інноваційної діяльності (дискontовані доходи)	Урахування у показнику D впровадження нових проектних і технологічних розробок з терміном дискontування 25 років
Показник зведеної вартості	$Ц = B \cdot a_t + C,$ де B – загальні інноваційні витрати; a_t – коефіцієнт дискontування, який у розрахунках береться як $a_t = 0,15 \dots 0,2$; C – поточні витрати	Показник B прирівнюється до інтелектуального капіталу
Індекс рентабельності	$I_p = \frac{\sum_{t=0}^T D_t \cdot a_t}{\sum_{t=0}^T B_t \cdot a_t},$ де B_t – загальні інноваційні витрати за певний термін часу t ; a_t – коефіцієнт дискontування; D_t – результат впровадження розробки.	Приймаючи однаковий час окупності коефіцієнт рентабельності зводиться до відношення D_t / B_t , тобто очікуваного прибутку до витрат

Інтелектуальний капітал розробок (табл. 8.2) включає у себе: скорочення коштів на проведення дороговартісних натурних випробувань за рахунок впровадження у методи проектування результатів моделювання теплового стану, термомеханічних процесів, напружено деформованого стану; виключення коштів на застосування складних вимірювальних засобів для визначення температур і швидкостей повітря; скорочення обсягу ремонтних робіт та часу праці при проведенні експертизи і профілактиці через впровадження науково-методичних принципів оцінювання технічного стану, які ґрунтуються на розроблених когнітивних моделях, причинно-наслідкових діаграмах і інформаційно-пошукової системі.

Таблиця 8.2 – Критерії інтелектуального капіталу та соціального ефекту

Критерій	Індекс	Значення показника
Інтелектуальний капітал	Індекс впровадження конструкторських розробок	Підвищення рівня проектування, зниження масогабаритних показників конструкцій
	Індекс впровадження методик, програм, технологічних рекомендацій	Економія витрат на обладнання та прилади, додаткові заходи діагностування
	Індекс енергозбережень за результатами застосування нових технологій	Економія матеріальних витрат
	Рівень освіти	Освітня структура підготовки інженерних кадрів
Соціальний ефект	Впровадження нових механізмів управління проектами у міжнародний загальноосвітній процес	Підтримка конкурентоспроможного рівня на міжнародному ринку науково-освітніх послуг
	Розвиток транспортних засобів для РАВ	Вирішення проблеми утилізації радіоактивних відходів
	Застосування заходів радіаційної безпеки на плавучих об'єктах	Підвищення безпеки суден

Приймаючи однаковий час окупності коефіцієнт рентабельності зводиться до відношення D_t/V_t , тобто очікуваного прибутку до витрат. Оскільки інноваційні витрати як інтелектуальний капітал вважається на рівні здійсненої події (результатів дисертаційного дослідження), то у всіх випадках індекс рентабельності більше за одиниці: $I_p > 1$.

Багатоаспектність інновацій включає у себе й теоретичні досягнення, впровадження яких сприяє скороченню часу та матеріальних витрат на проведення дороговартісних натурних випробувань:

- моделювання термомеханічних процесів у опроміненому метал-скляному захисному шарі, результатом якого є розробка термомеханічної моделі поведінки опроміненого захисного метал-скляного шару в умовах теплових ефектів і моделі поверхневого зміцнення метал-скляних електродугових покриттів дифузійним потоком іонізуючих випромінювань, що дає змогу прогнозувати руйнування конструкцій, які входять до складу елементів біологічного захисту, без проведення додаткових дороговартісних випробувань;
- результати досліджень напружено-деформованого стану в умовах короткочасного температурного навантаження дозволяють прогнозувати без проведення дороговартісних експериментів міцність з'єднання Ст3–метал-скляне покриття в умовах, максимально наближених до пожежонебезпечних;
- економічна ефективність від впровадження ІПС «PROTECTIVE COATINGS DATA» полягає у скороченні часу робітників на аналіз та обробку інформації про можливі дефекти, які виникають у матеріалах конструкцій в умовах випромінювання, термоциклічних навантажень, корозійного впливу хімічно активних середовищ, що виключає проведення певних ремонтних робіт. Завдяки доступу до інформації зменшуються матеріальні витрати на натурні випробування;
- розробка нових складів склоалюмінієвих гарячепресованих матеріалів, метал-скляних електродугових покриттів, клейової композиції холодного твердіння, бронзобабітового покриття для ремонту суднової запірної арматури поширює номенклатуру радіаційно захисних композиційних матеріалів і покриттів та спрямовано на ресурсозбереження за рахунок застосування відходів виробництва;
- інноваційна привабливість технологій формування метал-скляних матеріалів і покриттів пов'язана з можливістю поєднання у межах однієї композиції, нанесеної на сталеву поверхню тонким (2...10 мм) шаром,

комплексу експлуатаційних властивостей (радіаційної, хімічної, термостійкості, демпфіруючої здатності тощо), завдяки яким розроблені матеріали і покриття не поступаються відомим вітчизняним і зарубіжним аналогам, що надає їм конкурентоспроможності на світовому ринку інновацій у галузі неорганічної хімії;

- розвиток методу гарячого пресування, який включає в себе вибір технологічних параметрів, розробку установки з механічним пресуючим пристроєм і комплектом графітових прес-форм, дозволяє інтенсифікувати у низьких діапазонах тиску ($P = 0,2 \dots 1,2$ МПа) і температур ($t = 450 \dots 600$ °С) процеси утворення рідкої фази при формуванні склоалюмінієвих композиційних матеріалів, наповнених порожніми скляними мікросферами, і покриттів з порошків бронзи та бабіту на поверхні сталевих деталей суднової арматури вантажних систем. Технічний результат полягає у розробці способу отримання склоалюмінієвих матеріалів і способу формування покриття з порошку бронзи і бабіту на поверхні сталевих виробів, що поєднує у одному технологічному циклі декілька операцій, скорочуючи тим самим енергетичні витрати, що дуже важливо для одержання виробів (зокрема плиток) та ремонту деталей (у тому числі запірної арматури).

Технічну новизну отриманих результатів підтверджено патентами України на винахід № 74476, № 95378, № 111654; патентами на корисну модель № 4435, № 90580, № 97311, № 99331 (Додаток Д).

Теоретичні, методичні та практичні засади формування інноваційних складових проектів суден і плавучих споруд, призначених для транспортування та зберігання РАВ, наведено у вигляді моделі (рис. 8.1), центральні місце у якій мають наукові дослідження та їх зв'язок з навчальним процесом у вищому навчальному закладі (ВНЗ), проектними організаціями та галузевими лабораторіями.



Рисунок 8.1 – Модель інноваційного розвитку розробок

Модель відображає кількісні і якісні показники, які з різних боків висвітлюють проблему нових суден для транспортування РАВ із залученням та розробкою нових технологій неорганічного матеріалознавства, комплексна задача якого у графічному вигляді наведена на рис. 8.2.



Рисунок 8.2 – Задача створення та впровадження нових радіаційно-стійких матеріалів

Результатом виконання циклу наукових досліджень є науково-методична продукція у вигляді партії експериментальних зразків (рис. 8.3), модернізованого обладнання, комп'ютерних програм, які далі застосовані при постановці нових лабораторних робіт і підготовки магістерських робіт у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, що підтверджено відповідними актами впровадження у навчальний процес кафедр матеріалознавства і технології металів та кафедри інформаційних управляючих систем та технологій (Додаток Д).

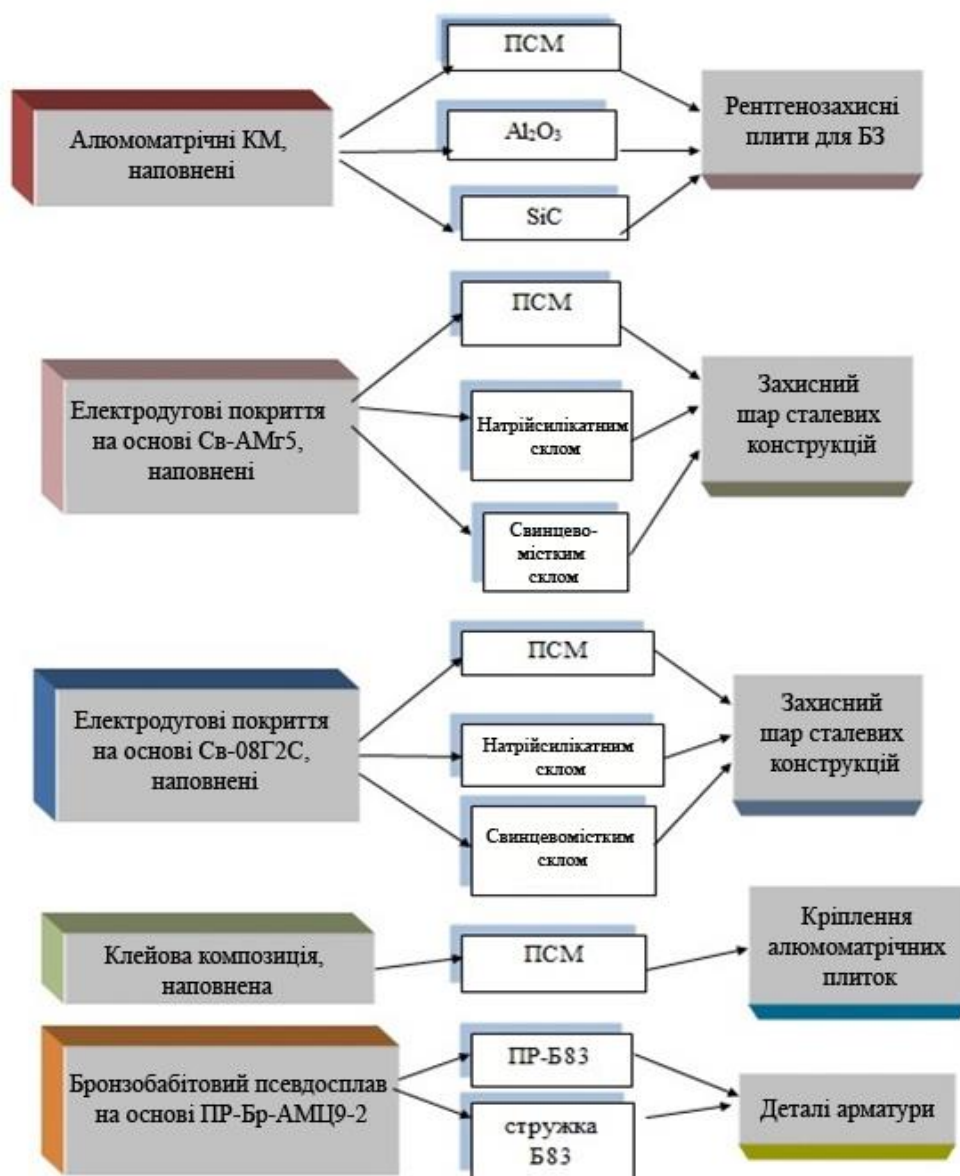


Рисунок 8.3 – Науково-методична продукція: експериментальні зразки матеріалів і покриттів

8.1.3 Впровадження результатів роботи у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Результати роботи використані у навчальному процесі кафедри матеріалознавства і технології металів при підготовці бакалаврів, спеціалістів, магістрів зі спеціальності «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» та застосовані при постановці нових лабораторних робіт з дисциплін «Неметалеві матеріали», «Дисперсні матеріали та композити», «Додаткові розділи теорії та технології порошкових і композиційних матеріалів». Результати роботи за

спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів, а саме: аналітичний огляд літератури, присвячений застосуванню неметалічних матеріалів у суднобудуванні; технологію отримання скляних порошків механічним здрібненням бою скла, практичні заходи щодо застосування скляних порошків і мікросфер в технологіях гарячого пресування і спікання викладено у наступних науково-методичних виданнях:

- Інженерне матеріалознавство: підручник для студ. вищ. навч. закл. (з грифом МОНУ) / О. М. Дубовий, **Ю. О. Казимиренко**, Н. Ю. Лебедєва та ін. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с. – автором написано частина 4: «Неметалеві матеріали», р. 12 і 13 в ч.1.
- Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія процесів формування структури і властивостей порошкових і композиційних матеріалів» / А.І. Івлєв, **Ю.О. Казимиренко**, М.Ю. Комаров. – Миколаїв : НУК, 2005. – 36 с. – автором поставлено лабораторні роботи: № 4 «Дослідження особливостей твердофазного спікання аморфних порошкових матеріалів», № 5 «Дослідження особливостей спікання сумішей металевих і скляних порошкових матеріалів», № 6 «Дослідження особливостей структури порошкових і композиційних матеріалів»;
- Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Особливості виробництва порошкових матеріалів і виробів». У двох частинах. / А.І. Івлєв, **Ю. О. Казимиренко**. – Миколаїв: НУК, 2006. – автором поставлено лабораторні роботи: № 1 «Дослідження технологічних властивостей порошків»; № 7 «Дослідження основних видів дефектів при спіканні порошкових матеріалів»;
- Методичні вказівки до виконання робіт з дисципліни «Додаткові розділи теорії та технології порошкових і композиційних матеріалів» / **Ю.О. Казимиренко**, А.І. Івлєв. – Миколаїв: НУК, 2012. – 48 с. – автором поставлено лабораторні роботи: № 1 «Визначення поверхневої щільності сітчастих та твердості електроконтактних, ущільнюючих і вуглецевих композиційних

матеріалів» і № 2 «Визначення твердості і дослідження мікроструктури твердих і надтвердих порошкових сплавів»;

- Методичні вказівки до виконання курсової і лабораторних робіт з дисципліни «Дисперсні матеріали та композити» / **Ю.О. Казимиренко**, А. А. Карпеченко. – Миколаїв : НУК, 2018. – 98 с – автором поставлено лабораторні роботи: № 2 «Дослідження стану поверхні та визначення мікротвердості неметалевих волокон»; № 3 «Визначення гранулометричного складу, ознайомлення з методами одержання і підготовки наповнювачів для композиційних матеріалів»; № 4 «Дослідження впливу попередньої обробки порошків і волокон на фізико-хімічні властивості»; № 5 «Дослідження пористої структури порошкових і композиційних матеріалів»; № 6 «Дослідження мікроструктури шаруватих і градієнтних матеріалів»; № 9 «Вибір режимів, дослідження процесів гарячого пресування порошків та їх сумішей»; № 10 «Дослідження методів активації процесу спікання порошків і їх сумішей»;
- Методичні вказівки до виконання практичних і самостійних робіт з дисципліни «Неметалеві матеріали» / **Ю.О. Казимиренко**. – Миколаїв : НУК, 2019. – 48 с.

Результати впровадження дисертаційної роботи дозволили вдосконалити навчальний процес та методичну базу кафедри матеріалознавства і технології металів за рахунок оновлення наочного матеріалу та обладнання і систематизації даних про композиційні та порошкові матеріали, покриття. Виготовлено експериментальний зразок установки для гарячого пресування (патент № 993311 на корисну модель), за допомогою якої можна виконувати спікання металевих та неметалевих порошків, а також їх сумішей під тиском і у вільному стані, здійснювати допресовку шарів при виготовленні композицій, формування покриттів на поверхні виробів, досліджувати деформаційні процеси як у холодному, так і у гарячому стані (Додаток В). Улаштовано лабораторію неметалевих і композиційних матеріалів. Студентські наукові роботи, зокрема «Дослідження особливостей структури та захисних характеристик конструкційних матеріалів технічних засобів для зберігання радіоактивних речовин», «Вибір та оптимізація складу композиційних

теплозахисних матеріалів для конструкцій суден», «Дослідження властивостей та розробка рекомендацій щодо використання композиційних матеріалів для виготовлення технічних засобів зберігання радіоактивних речовин» прийняли участь у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт 2013–2018 рр. Захищені дипломні та магістерські роботи: «Вибір та оптимізація складу композиційних теплозахисних матеріалів для конструкцій суден»; «Дослідження властивостей та розробка рекомендацій щодо використання композиційних матеріалів для виготовлення технічних засобів зберігання радіоактивних речовин»; «Дослідження впливу складу наповнювачів на структуру та властивості алюмінієвих композиційних матеріалів для захисту від іонізуючих випромінювань»; «Дослідження захисних властивостей композиційних покриттів для засобів перевезення небезпечних речовин»; «Розробка інформаційно-методичного забезпечення проектування та дослідження рентгенозахисних властивостей шаруватих композиційних матеріалів»; «Дослідження та розробка технології формування гарячепресованої рентгенозахисної композиції алюміній-мікросфери»; «Дослідження процесів руйнування та пошкоджуваності металоскляних композиційних матеріалів за допомогою комп'ютерного моделювання».

Інформаційне забезпечення (Додаток Г), розроблене у ході дисертаційного дослідження, використано у навчальному процесі кафедри інформаційних управляючих систем та технологій (ІУСТ) Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при підготовці магістрів за спеціальностями «Інформаційні управляючі системи та технології», «Інформаційні технології проектування» та викладанні «Дисципліни спецпідготовки за темою досліджень». Матеріали дисертаційної роботи застосовані при підготовці студентських наукових робіт: «Підвищення ефективності процесу проектування нових матеріалів за рахунок впровадження системи підтримки прийняття рішень», «Проектування радіаційно-стійких композиційних матеріалів та покриттів на основі експертних систем» (2015–2017 рр.).

8.1.4 Впровадження результатів роботи у проектні організації, науково-дослідні та виробничі установи

У світовій практиці результати фундаментальних наукових досліджень набувають економічної чинності, що відкриває шляхи занесення інтелектуальних розробок до статусного капіталу, який сприяє створенню позитивного іміджу та ділової репутації. У зв'язку з цим наукові результати робіт та особисті розробки автора мають не тільки теоретичне, а й певне прикладне значення. Постановка та розв'язок задач про тепловий стан у вантажній зоні плавучої споруди дає змогу без застосування складних вимірювальних пристроїв визначати температури у будь якій точці блоку біологічного захисту та аналізувати рух циркулюючого повітря для прогнозування пожежонебезпечних ситуацій. Встановлені обмеження щодо безпечного зберігання РАВ з питомою потужністю остаточного тепловиділення до 230 Вт/м^3 без додаткового облаштування плавучих споруд засобами примусового охолодження, що спрямовано на зниження вартісних показників будування суден та зберігання радіоактивних відходів. Одержані результати підвищують рівень виконаних проектних і розрахункових робіт, зокрема на етапах доескізної проробки, та використанні в роботах Морського інженерного бюро (м. Одеса) при обґрунтуванні і проектуванні суден для ВЯП і РАВ на суднах, а також при оцінюванні теплового стану у вантажній зоні (Додаток Д). Результати дисертаційного дослідження являють собою науково-практичний інтерес для впровадження на суднобудівних підприємствах, а саме використанні при проведенні маркетингових досліджень з метою напрацювання портфеля замовлень, а також у робочому процесі ТОВ «Океан – судноремонт» (Додаток Д) при вирішенні виробничих завдань, пов'язаних з удосконаленням конструкцій, розробкою технологічного устаткування та визначенням ресурсу елементів суден. Нові проектні і технологічні рішення дозволяють застосовувати на суховантажних суднах модулі біологічного захисту нового покоління, що сприяє розширенню обсягу перевезень шкідливих речовин водним та іншими видами транспорту. Актуальність роботи для сучасних напрямків суднобудування та судноремонту, пов'язаних з розробкою нових проектних і технологічних рішень, підтверджена актом впровадження у робочий процес Херсонського державного заводу «ПАЛАДА» при моделюванні проектних і технологічних ситуацій; при техніко-економічному

обґрунтуванні додаткових статей витрат, необхідних для підвищення безпеки суден. Враховуючи актуальність виконаних у роботі досліджень, розроблені технологічні і практичні рекомендації можуть бути використані при виконанні будівельних і ремонтних робіт на суднобудівному підприємстві (Додаток Д).

Результати роботи, а саме: розрахунково-експериментальна методика прогнозування механічних властивостей структурно-неоднорідних (метал-скляних) матеріалів застосована для аналізу деформаційних полів на поверхні поділу фаз, зокрема в умовах термічних навантажень. Результати досліджень усадочних процесів при спіканні формувальних сумішей із порошків Al використано у порівняльних дослідженнях при створенні дисперснозміцнених алюмокомпозитів впроваджено у науково-дослідний робочий процес відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України (Додаток Д).

8.2 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток, нанесення метал-скляних покриттів та ремонту деталей суднової запірної арматури

8.2.1 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток та клейової композиції для облицювання сталевих поверхонь

Технологічні етапи виготовлення склоалюмінієвих плиток (рис. 8.4) та рекомендоване для цього обладнання наведені у табл. 8.3.



Рисунок 8.4 – Склоалюмінієва плитка
500×500 мм, $\delta \geq 10$ мм

**Таблиця 8.3 – Обладнання і технологічні етапи виготовлення
гарячепресованих плиток**

Технологічні етапи формування	Технологічні операції	Рекомендоване обладнання та його потужність
Підготовчі операції	Дозування порошків об'ємним способом	Дозатор порошковий (наприклад, марки ДВСТ-40), $N = 0,6$ кВт
	Змішування порошків	Віброзмішувач порошковий (наприклад, марки СМВ-0,005), $N = 0,37$ кВт
	Очищення графітової прес-форми	Дерев'яні або алюмінієві ножі, марля відбілена, спирт етиловий гідролізний
Виготовлення склоалюмінієвих плиток	Засипання суміші порошків у графітову прес-форму	Дозатор порошковий (наприклад, марки ДВСТ-40), $N = 0,6$ кВт
	Нагрівання до температури $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ зі швидкістю $15\ldots 20\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$	Шахтні, камерні, муфельні печі з окисною атмосферою, обладнані механічним пресуючим пристроєм. Графітова прес-форма, улаштована штоком для передачі тиску
	Прикладання тиску пресування $P = 0,7$ МПа	
	Проміжне прогрівання протягом 30 хв	
	Вихід на режим ізотермічної витримки зі швидкістю $15\ldots 20\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$	
	Ізотермічна витримка при температурі $600\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Відключення печі і повне остигання	
	Зняття навантаження	
	Контроль якості	Штангенциркуль, візуальний огляд

Застосування метода гарячого пресування надає наступні технічні і економічні переваги:

- дає змогу отримати вироби з комплексними функціональними властивостями, об'єднуючи у однієї суміші металеві і неметалеві компоненти;
- виключає видатки на подальшу механічну обробку;
- зменшує кількість операцій у технологічному ланцюзі;

- дає змогу одержувати вироби певних розмірів май же зі 100 %-вим використанням вихідної сировини (табл. 8.4).

Для порівняннi вартiсних i технiко-економiчних показникiв у табл. 8.2 наведенi даннi щодо застосування замість ПСМ порошокiв SiC та Al₂O₃.

В табл. 8.5 наведенi витрати матерiалiв для формування клейової композиції.

Таблиця 8.4 – Витрати матерiалiв для виготовлення алюоматричних плиток

Вихідні матеріали	Розхід матеріалів на 1м ² δ = 1 мм, кг
Порожні скляні мікросфери (ТУ 6-48-108-94)	0,15
Порошок алюмінієвий марки ПА-4 (ГОСТ 6058-73)	4,2
Пудра алюмінієва марки АПС-1 (ГОСТ 5494-95)	4,0
Порошок SiC (ГОСТ 26327-84)	1,8
Порошок Al ₂ O ₃ (ГОСТ 30558-98)	0,5
Допоміжні матеріали	
Марля відбілена ГОСТ 9412-93	Для підготовчих операцій
Спирт етиловий гідролізний ГОСТ 17299-78	

Таблиця 8.5 – Витрати матерiалiв для формування клейової композиції

Вихідні матеріали	Розхід матеріалів на 1м ² δ= 1 мм, кг
Порожні скляні мікросфери (ТУ 6-48-108-94)	0,15
Епоксидна смола марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84)	9,93
Затверджувач марки УП-583Д (ТУ -6-0-241-331-82)	0,98
Допоміжні матеріали	
Перетворювач іржі (ГОСТ 30662-92)	Для підготовчих операцій і нанесення композиції
Рукавиці технічні (ГОСТ 28846-90)	
Інструмент для нанесення (ОСТ 5.0314-81)	

Техніко-економічне обґрунтування впровадження розробленої технології виготовлення склоалюмінієвих плиток у наглядному вигляді наведено у табл. 8.6, де показані переваги і недоліки у порівнянні з відомими аналогами, на підставі чого далі формується економічна ефективність матеріалів і технологій.

Таблиця 8.6 – Техніко-економічне обґрунтування впровадження технології виготовлення склоалюмінієвих плиток

Характеристики	Рекомендації
Композиції	ПСМ–Al-порошок, ПСМ–Al-пудра
Призначення	Захист від випромінювань РАВ, додатковий теплопровідний шар
Приклади виробів	Захисні плитки для модулів, у кришки суднових цистерн
Спосіб отримання	Гаряче пресування з наступною ізотермічною витримкою
Ефект	Отримання КМ щільністю 1000...1300 кг/м ³ і 2000...2300 кг/м ³ з масовим коефіцієнтом послаблення $\rho_{\text{мас}} = 14...19 \text{ см}^2/\text{г}$, коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 60...85 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Технологічний процес	Включає в себе стадії підготовки порошків, приготування формувальної суміші, проміжного прогрівання, гарячого пресування, ізотермічної витримки під тиском
Контроль якості	Здійснюється за вимірами усадочних процесів, які супроводжують гаряче пресування, візуальним оглядом плит, контролем властивостей зразків-свідків. Час ізотермічної витримки обирається, виходячи з геометричних розмірів виробів. Тиск пресування знімається після повного остигання печі.
Обладнання устаткування промислових умовах та у	Шахтні, камерні, муфельні печі з механічним пресуючим пристроєм, графітова прес-форма, дозатор порошковий, змішувач
Технологічні труднощі обмеження та	Контроль усадочних процесів у період спікання, різнотовщинність виробів, відтворюваність результатів, сегрегація порошкових компонентів. Можливість виготовлення плиток розмірами до 500 мм товщиною від 10 мм
Технологічні переваги	Застосування недорогого обладнання, у т.ч. печей з окиснювальною атмосферою, відсутність механічної обробки та відходів виробництва
Аналог 1	Синтактичне піноскло [117, 118, 121]
Відмінні особливості	До складу формувальної суміші додається порошок або пудра алюмінію в об'ємній кількості 50 %, при цьому $\approx$ на 25...27 % підвищується $\mu_{\text{мас}}$
Аналог 2	КМ типу САП і САС [86, 177, 391]
Відмінні особливості	Введення замість порошків SiC і Al ₂ O ₃ до складу формувальної суміші ПСМ в об'ємній кількості 50 % забезпечує зниження навіть удвічі уявної щільності та прирівнює значення ТКЛР до сталевих шару конструкції БЗ
Вимоги щодо техніки безпеки	Дотримання вимог з техніки безпеки при роботі з пірофорними середовищами та нагрівальним обладнанням
Економічна ефективність технологічного процесу	Порівняно низька енергоємність технологічного процесу

Виконана систематизація технологічних факторів у поєднанні з практичним досвідом великої кількості експериментальних досліджень дозволила визначити основні види дефектів та бракування (табл. 8.7).

Таблиця 8.7 – Основні види бракування при виготовленні
склоалюмінієвих виробів

Вид бракування	Технологічна причина	Способи усунення і профілактичні заходи
Розшарування компонентів (рис. 8.5, а)	Виникає у наслідок великої різниці у насипній щільності компонентів	Дефект не усувається. Дотримання умов формування
Нерівномірний розподіл ПСМ по об'єму матеріалу	Виникає у наслідок недотримання умов дозування і змішування ПСМ і порошків металів	Дефект не усувається. Дотримання умов підготовки формувальної суміші
Низька щільність матеріалу	Заниження технологічних діапазонів: тиску гарячого пресування, температури проміжного прогрівання бо ізотермічної витримки; часу ізотермічної	Усувається повторним спіканням. Термометрування робочого простору печі, тарирування пресуючого пристрою, дотримання умов швидкості підйому температури
Порушення конфігурації (рис. 8.5, б)	Порушення швидкості підйому температури, передчасне зняття тиску пресування; вдари і механічні пошкодження прес-форми	Дефект може бути усунений через механічну обробку. Дотримання умов швидкості підйому температури і прикладання тиску пресування
Неспекливість компонентів (рис. 8.5, в)	Невідповідність технологічних діапазонів технічним умовам: перевищення швидкості підйому температури, заниження тиску гарячого пресування	Дефект усувається повторним спіканням. Термометрування робочого простору печі, тарирування пресуючого пристрою
Тріщини і дефекти поверхні	Перевищення швидкості підйому температури, дефекти прес-форми, вдари та механічні пошкодження при розпресуванні	Дефект може бути усунений через механічну обробку. Дотримання умов швидкості підйому температури і прикладання тиску пресування; профілактичний огляд прес-форми



Рисунок 8.5 – Фотографії можливих видів бракування:

a – розшарування компонентів; *б* – викривлення форми;

в – неспікливість компонентів

Одержані результати для подальшого застосування у виробничих умовах.

8.2.2 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо нанесення метал-скляних електродугових покриттів

Теоретичні і експериментальні результати дисертаційного дослідження довели ефективність застосування усіх розроблених метал-скляних електродугових покриттів для захисту сталевих поверхонь від дії γ - і рентгенівських випромінювань, хімічно активних середовищ та здатність працювати в умовах термічних (зокрема термоциклічних) навантажень та механічних коливань. Проте серед асортименту покриттів практично не можливо віддати перевагу на користь тільки одного універсального покриття, яке забезпечило ефективну експлуатацію для створення біологічного захисту на суднах і плавучих спорудах при транспортуванні і зберіганні радіоактивних вантажів. Вибір того, або іншого захисного покриття повинен мати економічне обґрунтування. Розрахунок техніко-економічних показників проводиться виходячи з витрат вихідних матеріалів (сировини) для формування шару метал-скляних електродугових покриттів товщиною 1 мм при напиленні на сталевий лист площею 1 м² (табл. 8.8), придбання необхідного для нанесення покриттів і підготовки поверхні обладнання та його амортизації (табл. 8.9).

Таблиця 8.8 – Витрати вихідних матеріалів для формування метал-скляних електродугових покриттів

Вид покриття	Матеріали	Розхід матеріалів на 1 м ² покриття δ=1 мм, кг
Св-08Г2С–ПСМ	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70)	0,48
	Порожні скляні мікросфери марки МСО-А9 (ТУ 6-48-108-94)	0,15
Св-АМг5–ПСМ	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75)	0,14
	Порожні скляні мікросфери марки МСО-А9 (ТУ 6-48-108-94)	0,15
Св-08Г2С–натрійсилікатне скло	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70)	0,48
	Бій кришталю побутового призначення (ГОСТ 24315-80)	0,47
Св-АМг5–натрійсилікатне скло	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75)	0,14
	Бій кришталю побутового призначення (ГОСТ 24315-80)	0,47
Св-08Г2С–свинцевмісне скло	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70)	0,48
	Бій скла рентгенозахисного обладнання (ГОСТ 9541-75)	0,5
Св-АМг5–свинцевмісне скло	Зварювальний дріт суцільнотягнутий марки Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75)	0,14
	Бій скла рентгенозахисного обладнання (ГОСТ 9541-75)	0,5
Допоміжні матеріали		
Дріб технічний з чавуну і сталі (ГОСТ 11964-81Е)		Використовується для підготовки поверхні
Електрокорунд (ГОСТ 3647-80)		
Шкурка шліфувальна тканинна водостійка (ГОСТ 13344-79)		
Перетворювач іржі (ГОСТ 30662-99)		
Стиснуте повітря (ГОСТ 9.304-87)		Використовується для формування покриття

Таблиця 8.9 – Обладнання і технологічні етапи формування метал-скляних електродугових покриттів

Технологічні етапи формування покриття	Технологічні операції	Рекомендоване обладнання та його потужність
Підготовка поверхні конструкції	Очищення поверхні сталевих конструкцій від іржі, окалини, задирок	Шкурка шліфувальна (ГОСТ 13344-79) Піскоструминний апарат, $N = 4,5$ кВт
	Струминно-абразивна обробка поверхні	Компресор (наприклад, марки СБ4/С-50АВ360), $N = 7$ кВт
		Обладнання для струминно-абразивної обробки (наприклад, модель 0,26-7 «Ремдеталь»), $N = 7$ кВт
		Токарний верстат (наприклад, модель ІК-62), $N = 4,5$ кВт
Підготовка порошкових компонентів	Механічне здрібнення відходів скла	Кульовий млин барабанного типу, $N = 4,5$ кВт
	Класифікація порошку за фракціями	Набір сит (ГОСТ 3647-80)
		Сепараційне обладнання, $N = 0,37$ кВт
	Дозування порошку	Дозатор порошковий (наприклад, марки ДВСТ-40), $N = 0,6$ кВт
Нанесення покриття	Електродугове напилення	Компресор (наприклад, марки СБ4/С-50АВ360), $N = 7$ кВт
		Сепараційне обладнання, $N = 0,37$ кВт
		Установка для електродугового напилення (наприклад, тип КДМ-2), $N = 10$ кВт
Обробка поверхні покриття	Механічна обробка для вирівнювання поверхні покриття	Токарний верстат (наприклад, модель ІК-62), $N = 4,5$ кВт
	Контроль якості поверхні	Штангенциркуль, мікрометр

Таблиця 8.10 – Техніко-економічне обґрунтування нанесення метал-скляних електродугових покриттів на суднові конструкції

Характеристики	Рекомендації
Вид покриття	Св-08Г2С–ПСМ; Св-08Г2С–натрійсилікатне скло; Св-08Г2С–свинцевмісне скло Св-АМГ5–ПСМ; Св-АМГ5–натрійсилікатне скло; Св-АМГ5–свинцевмісне скло
Призначення покриття	Радіаційно- і корозійностійке
Приклади виробів	Суднові цистерни для транспортування РАВ, модулі біологічного захисту
Спосіб нанесення	Електродугове напилення
Ефект	Нанесення покриттів на сталеву поверхню сприяє комплексному її захисту від дії γ - і рентгенівських випромінювань, хімічно активних середовищ, здатності працювати при динамічних коливаннях
Технологічний процес	Включає в себе стадії підготовки поверхні, подачу суцільнотягнутого дроту і скляних наповнювачів у зону дуги, механічну обробку (за необхідністю)
Контроль якості	Здійснюється візуальним контролем напиленої поверхні, контролем властивостей зразків-свідків
Обладнання для нанесення покриттів	Установка для електродугового напилення (наприклад, КДМ-2), електродуговий апарат (наприклад, ЕМ-14) з модернізованою розпилювальною головкою, компресор, сепараційне обладнання
Обладнання для підготовчих операцій	Токарний верстат, обладнання для струминно-абразивної обробки, компресор, кульовий млин барабанного типу, сепараційне обладнання, дозатор порошковий
Технологічні труднощі та обмеження	Дотримання точності дозування скляних наповнювачів; формування шару покриття рівномірної товщини на великогабаритних поверхнях
Технологічні переваги	Можливість проведення робіт як в умовах цеху, так і на відкритих монтажних площадках; можливість нанесення покриттів на конструкції будь-яких габаритів та конфігурацій; можливість використання здрібнених відходів
Аналог 1	Ненаповнені електродугові покриття на основі суцільнотягнутих дротів Св-08Г2С, Св-АМГ5
Відмінні особливості	Введення до складу покриттів скляних наповнювачів приблизно у два рази підвищує $\mu_{\text{мас}}$
Вимоги щодо техніки безпеки	Дотримання вимог з техніки безпеки при роботі з сипучими матеріалами, електродуговими джерелами нагрівання, при подачі стиснутого повітря
Економічна ефективність технологічного процесу	Високий коефіцієнт використання матеріалу, зниження матеріалоемності продукції

8.2.3 Техніко-економічні показники і технологічні рекомендації щодо виготовлення та ремонту деталей суднової запірної арматури

Застосування порошкових покриттів є одним з перспективних напрямів відновлення зношених виробів. Через зростання цін на енергоносії та металопродукцію стає необхідним впровадження нових ремонтних технологій, які зможуть забезпечувати економію матеріально-технічних витрат. Розроблений спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу (патент № 97311 на корисну модель) на відміну від інших дозволяє використовувати як сировину здрібнену стружку та може бути застосований для виготовлення і ремонту одиничних деталей суднової запірної арматури (клапанів, компенсаторів, кілець, втулок тощо). У табл. 8.11 наведені дані щодо витрат вихідних матеріалів, необхідних для формування 1 м² бронзобабітового покриття товщиною 1 мм, у табл. 8.12 – технологічні етапи процесу його формування на поверхні сталевго виробу.

Таблиця 8.11 – Вихідні матеріали для формування бронзобабітових покриттів

Матеріали	Витрати матеріалів (г) на 1 м ² покриття $\delta = 1$ мм	Примітка
Основні матеріали		
Порошок бронзи марки ПР-Бр-АМц 9-2 (ГОСТ 28377-89)	297	
Порошок бабіту марки ПР-Б83 (ТУ 14-22-91-95)	293	Можна застосовувати здрібнену стружку литого бабіту марки Б83 (ГОСТ 1320-74)
Допоміжні матеріали		
Кислота сірчана технічна (ГОСТ 6-09-05-1453-94)		Для виготовлення електроліту
Клей мездровий (ГОСТ 3252-80)		
Емульгатор ОП-7 або ОП-10 (ГОСТ 8433-81)		
Олово сірчаноокисле (ГОСТ 13344-89)		
Електрокорунд (ГОСТ 28818-90)		Для очищення поверхні
Шкурка шліфувальна (ГОСТ 13344-79)		

Процес здрібнення стружки здійснюється з використанням спеціального обладнання: молоткових дробарок типу ДМ-7 та млинів типу PSKM (PS-45100) [259]. Дрібні партії можна отримувати за допомогою напилок з одинарною рисою, виготовленого з інструментальної сталі У10 (ГОСТ 1435-99, ДСТУ 3833-98).

У порівнянні з існуючими аналогами виготовлення зносостійких деталей методами порошкової металургії (зокрема пористих бронзових виробів з подальшим просоченням рідким бабітом) запропонований спосіб виготовлення деталей суднової арматури з бронзобабітового псевдосплаву (патентом № 4435 на корисну модель) через відсутність стадії проміжного прогрівання характеризується більш низькою (у 7...10 разів) енергоємністю процесу. Використання здрібненої стружки дозволяє, вирішуючи водночас проблему утилізації промислових відходів, на 25...30 % знизити матеріальні витрати.

Для порівняння у таблицях 8.11 і 8.12 наведені технологічні рекомендації щодо виготовлення деталей з бронзобабітового псевдосплаву і відновлювальних робіт методом напікання суміші порошків бронзи та бабіту.

Таблиця 8.12 – Обладнання і технологічні етапи формування покриттів з порошків бронзи та бабіту на сталевій поверхні деталі

Технологічні етапи	Технологічні операції	Обладнання
Підготовка поверхні виробу	Очищення поверхні деталі від окисної плівки, окалини, корозії, задирок	Піскоструминний апарат, шкурка шліфувальна
	Знежирення хімічне	Ванна для хімічного знежирення
	Промивка у гарячій проточній воді	Ванна для гарячої промивки
	Сушіння	Компресор для стиснутого повітря
	Ізоляція (за необхідністю)	Ванна для нанесення мастики
	Зачищування затікань та контроль ізоляції	Спеціальний ніж, візуальний огляд

продовження таблиці 8.12

Технологічні етапи	Технологічні операції	Обладнання
Підготовка поверхні виробу	Монтаж на пристосуванні	Стіл для монтажу та демонтажу, підвісні пристосування
	Знежирювання електрохімічне	Ванна електрохімічного знежирювання зі струмо-підводом
	Промивка у проточній холодній воді	Ванна для холодної промивки
	Активація	Ванна для активації
	Промивка у холодній проточній воді	Ванна для холодної промивки
	Лудіння	Ванна для лудіння зі струмопідводом
	Промивка у холодній непроточній та проточній воді	Ванна для холодної промивки
	Сушіння	Компресор для стиснутого повітря
	Проміжний контроль шару олова	Візуальний огляд
	Зняття ізоляції (для випадку нанесення)	Ванна для зняття ізоляції
	Промивка у гарячій проточній воді	Ванна для гарячої промивки
	Знежирювання хімічне	Ванна хімічного знежирювання
	Промивка у гарячій проточній воді	Ванна для гарячої промивки
	Промивка у холодній проточній воді	Ванна для холодної промивки
	Сушка	Компресор для стиснутого повітря
	Якість контролю поверхні	Візуальний огляд, вимірювання товщини олов'яного шару

продовження таблиці 8.12

Технологічні етапи	Технологічні операції	Обладнання
Підготовка порошків та пристосувань	Здрібнення стружки бабіту	Дробарка роторна (наприклад, серії G) або дробарка молоткова (наприклад, марки ДМВ-310), $N = 11$ кВт
	Дозування порошків	Дозатор порошковий (наприклад, марки ДВСТ-40), $N = 0,6$ кВт
	Змішування порошків	Виброзмішувач (наприклад, марки СМВ-0,005), $N = 0,37$ кВт
	Очищення графітової прес-форми	Дерев'яні або алюмінієві ножі, марля відбілена ГОСТ 9412-93, спирт етиловий гідролізний (ГОСТ 17299-78)
Формування бронзобабітового покриття на поверхні виробу	Засипання суміші порошків на вилуджену поверхню заготовки	Дозатор порошковий (наприклад, марки ДВСТ-40), $N = 0,6$ кВт, або ручним способом
	Нагрівання до температури 70 °С	Шахтні, камерні, муфельні печі, $N = 3,5$ кВт, обладнані механічним пресуючим пристроєм, графітова прес-форма
	Прикладання тиску пресування $P = 0,7$ МПа	
	Вихід на режим ізотермічної витримки 450 °С	
	Ізотермічна витримка при $t = 450$ °С протягом 40 хв	
	Відключення печі та повне остигання	
	Зняття навантження	
	Витягування деталі	
Контроль якості та обробка поверхні покриття	Контроль якості	Візуальний огляд, контроль товщини покриття
	Механічна обробка	Токарний, шліфувальний верстати, $N = 4,5$ кВт

Таблиця 8.13 – Технологічні рекомендації щодо виготовлення деталей суднової запірної арматури з бронзобабітового псевдосплаву

Характеристики	Рекомендації
Композиційний матеріал	Псевдосплав з порошків бронзи і бабіту (стружка бабіту)
Призначення	Виготовлення запірної арматури вантажних систем суден-хімовозів, плавучих споруд для транспортування та зберігання РРВ
Приклади виробів	Втулки, кільця, компенсатори, запірні клапани
Спосіб отримання	Гаряче пресування з наступною ізотермічною витримкою
Ефект від застосування	Одержання зносостійких виробів, які працюють у корозійних умовах
Технологічний процес	Включає в себе етапи підготовки порошків і графітової прес-форми; гарячого пресування; ізотермічної витримки і кінцевої обробки у вигляді шліфування або полірування
Контроль якості	Здійснюється за вимірюванням усадочних процесів, які супроводжують гаряче пресування
Обладнання	Шахтні, камерні, муфельні печі з окиснювальною атмосферою, обладнані механічним пресуючим пристроєм; графітова прес-форма зі штоком для передачі тиску
Обладнання для підготовчих операцій	Дозатор порошковий, змішувач, дробарка роторна або молоткова для здрібнення стружки
Технологічні труднощі та обмеження	Виготовлення виробів великих розмірів і складної конфігурації, застосування графітової прес-форми великих розмірів та складної конфігурації, необхідність врахування усадочних процесів
Технологічні переваги	Застосування недороговартісного обладнання, зокрема печей з окиснювальною атмосферою, відсутність механічної обробки та відходів виробництва, можливість застосування замість порошку бабіту здрібненої стружки
Аналоги	Пористі бронзові матеріали (наприклад, для виготовлення дисків)
Відмінні особливості	Додавання до складу суміші порошку або стружки бабіту дозволяє здійснювати процес в одну технологічну стадію, що у 7-10 разів знижує енергоємність процесу. Мікроструктура псевдосплаву характеризується рівномірним розподілом бронзи та бабіту, між якими видно чіткі межі
Переваги розробленого технологічного процесу	Можливість застосування відходів виробництва, процес спікання відбувається в одну технологічну стадію
Економічна ефективність	Зниження енергоємності процесу у 7-10 разів, можливе зниження витрат на сировину $\approx$ на 50 %

**Таблиця 8.14 – Технологічні рекомендації щодо ремонту деталей
суднової запірної арматури**

Характеристики	Рекомендації
Вид покриття	Покриття захисне з порошків бронзи та бабіту
Призначення покриття	Корозійно-захисне, зносостійке
Приклади виробів	Втулки, кільця, компенсатори, запірні клапани, які виготовлені з вуглецевої сталі
Спосіб нанесення покриття	Напікання під тиском на вилуджену поверхню сталевих виробів
Ефект від нанесення покриття	Підвищення терміну служби виробу
Технологічний процес	Включає в себе підготовку поверхні виробу, підготовку порошків та прес-форми, формування бронзобабітового покриття на поверхні виробу, контроль якості та обробку поверхні
Контроль якості процесу	Здійснюється візуально за наявністю захисного покриття, вимірюванням його товщини; необхідним є контроль усадочних процесів протягом спікання
Обладнання для формування покриттів	Шахтні, камерні, муфельні печі з окиснювальною атмосферою, обладнані механічним пресуючим пристроєм, графітова прес-форма зі штоком передачі тиску
Обладнання для підготовчих операцій	Ванни для хімічного та електрохімічного знежирювання, гарячої промивки, нанесення мастики, активації; дробарка роторна, дозатор порошковий, змішувач
Технологічні труднощі та обмеження	Нанесення покриття на вироби великих розмірів і складної конфігурації, застосування графітової прес-форми великих розмірів та складної конфігурації, необхідність врахування усадочних процесів
Технологічні переваги	Застосування недорогівартісного обладнання, зокрема печей з окиснювальною атмосферою, поєднання в одному технологічному циклі процесів нанесення покриття і формування структури бронзобабітового псевдосплаву
Аналоги покриттів	Газотермічні покриття з порошків бронзи та бабіту, напікаємі покриття з порошків бронзи
Відмінні особливості сформованих покриттів	Можливість застосування стружки бабіту, що знижує матеріальні витрати. Мікроструктура покриття характеризується рівномірним розподілом м'якої та твердої фаз, що забезпечує формування його зносостійкості
Переваги розробленого технологічного процесу	У порівнянні з напікаємими покриттями – можливість застосування печей з окиснювальною атмосферою; з газотермічними покриттями – можливість використання відходів виробництва
Економічна ефективність	Зниження витрат на сировину складає $\approx 50\%$

У порівнянні з газотермічними методами відновлення зношених виробів (зокрема плазмовим напиленням порошку бронзи) розроблений у роботі спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу (патент № 97311 на корисну модель) є більш рентабельним для дрібної партії деталей та дозволяє $\approx$ на 25 % знизити собівартість ремонтних робіт шляхом застосування більш дешевого, ніж плазмотрон, обладнання та пов'язаними з ним витратами на амортизацію, обладнання, обслуговування та електроенергію.

8.2.4 Технологічна собівартість і економічна ефективність від впровадження нових матеріалів і покриттів

Узагальнені моделі, які діють у даний час на виробничих підприємствах, визначають економічну ефективність як показник річного економічного ефекту через сумарну економію виробничих ресурсів [26]. Для цього у економічних розрахунках вживається поняття «технологічна собівартість», яку розраховано, виходячи з матеріальних витрат (вартості витрачених матеріалів, обладнання і електроенергії); нарахувань і відрахувань заробітної плати; витрат на амортизацію та ремонт обладнання.

Витрати на ремонт технологічного обладнання в собівартості продукції складає від 6 до 20 %, частка ручної праці на ремонті досягає 75...90 %, при цьому ресурс відремонтованої техніки, як правило, не досягає 40...50 % нового обладнання. Ремонтні роботи обладнання включають у себе проведення малого (поточного), середнього і капітального ремонту. В роботі прийняті затрати на амортизацію обладнання в розмірі 40 % і поточний ремонт в розмірі 5 %.

При розрахунку технологічної собівартості захисного шару не розглядалися показники вартості конструкцій, на які вони наносяться, а також вартість дослідницько-діагностичного обладнання та витрати на опалювання цеху. Технологічна собівартість формування метал-скляного захисного шару товщиною $\delta = 1$ мм на сталеву поверхню (ВСт3) площею 1 м^2 з урахуванням коефіцієнту матеріалоємності K'_m і коефіцієнту енергоємності K_e наведена у табл. 8.15. Для порівняння у таблиці також наведені техніко-економічні показники формування захисного шару шляхом облицювання поверхні

плитками композицій Al-SiC і Al-Al₂O₃ – аналогами САПів, виготовленими методом гарячого пресування.

Таблиця 8.15 – Техніко-економічні показники
формування захисного шару

Композиційний матеріал, покриття	K'_m	K_e	Щільність захисного шару, кг/м ³	Технологічна собівартість 1м ² $\delta = 1$ мм, грн
ПСМ–Al-порошок	0,82	3,24	1200	192,75
ПСМ–Al-пудра	0,85	3,24	1100	233,4
Al–SiC	0,60	3,25	2000	270
Al–Al ₂ O ₃	0,65	3,25	1720	247,68
Св-08Г2С–ПСМ	0,77	7,13	5900	594,45
Св-08Г2С– натрійсилікатне скло	0,45	7,13	7000	225
Св-08Г2С – свинцевмісне скло	0,55	7,13	7100	233,58
Св-АМг5–ПСМ	0,87	7,13	1480	285
Св-АМг5 натрійсилікатне скло	0,50	7,13	1770	237
Св-АМг5 – свинцевмісне скло	0,55	7,13	1860	274,5
Клейова композиція ЕД-20–ПСМ	0,55	2,9	60,0	210

У зв'язку з нестабільною економічною ситуацією на вітчизняному ринку енергоресурсів та сировини собівартість розроблених матеріалів і покриттів прийнята відносно вартості 1 кг сталі ВСт3 (ГОСТ 5521-93), що у вигляді гістограм наведено на рис. 8.6.

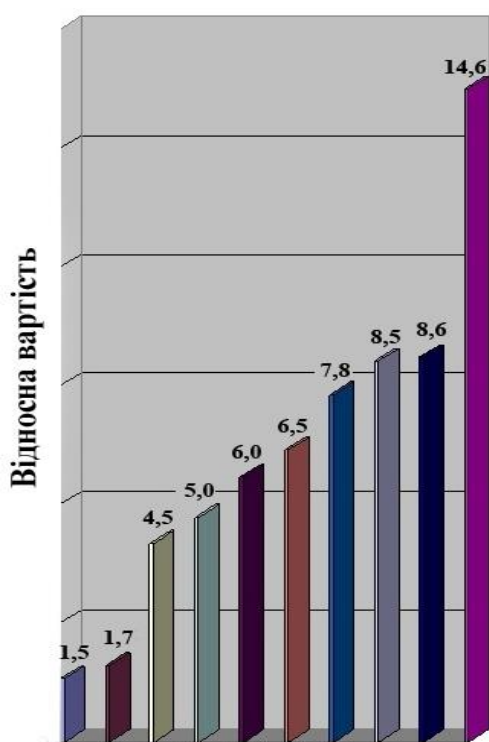


Рисунок 8.6 – Відносна вартість 1 кг продукції: 1 – Св-08Г2С–натрійсилікатне скло; 2 – Св-08Г2С–свинцевмісне скло; 3 – Св-08Г2С–PCM; 4 – Al–Al₂O₃; 5 – Al–SiC; 6 – Св-АМг5–натрійсилікатне скло; 7 – Св-АМг5–свинцевмісне скло; 8 – PCM–Al-порошок; 9 – Св-АМг5–PCM; 10 – PCM–Al-пудра

Таким чином, енергозбереження, відсутність механічної обробки, безвідходне виробництво роблять актуальним одержання склоалюмінієвих плиток методом гарячого пресування. Застосування здрібненої сировини для формування метал-скляних електродугових покриттів на 30...50 % знижує матеріальні витрати.

Розраховані техніко-економічні показники підтверджують доцільність застосування розроблених технологій та перспективність використання розроблених матеріалів і покриттів.

8.3 Оптимальний вибір конструктивного рішення щодо біологічного захисту на основі критеріїв технологічності і економічної ефективності

Процес створення нового елементу біологічного захисту: блоку – для плавучих споруд, модуля – для спеціалізованого судна є складним та багатостадійним і потребує вибору однієї із запропонованих комбінацій бетон–сталь–метал-скляний захисний шар. Застосування методики оптимального проектування дозволяє знайти найкращий із варіантів, який буде водночас задовольняти критеріям технологічності і економічної ефективності.

Вибір комбінації матеріалів при формуванні конструкції є складною багатокритеріальною задачею, розв'язання якої можливо в результаті застосування системотехнічного підходу як універсального методу проектування технічних об'єктів на основі багатокритеріальних параметрів, визначених в результаті проведення дослідницьких, розрахункових і конструкторських робіт. Системотехнічний підхід для визначення оптимального типу конструкції за технологічними критеріями успішно застосовується у будівництві [244], але для проектування елементів суден, зокрема біологічного захисту, це є новим актуальним напрямком.

Постановка дослідження включало у себе: формулювання та визначення коефіцієнтів технологічності елементів біологічного захисту, їх визначення для різних конструктивно-компонувальних рішень, розрахунки оптимізаційного критерію з побудовою номограм.

За базовий варіант (варіант 0) обрано блок біологічного захисту (рис. 4.4), який складається із цистерни для РАВ, виготовленої з нержавіючої сталі (наприклад, марки 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72), яка розміщується в середині корпусу із плакованої сталі (ГОСТ 10885-85) з товщиною листа 300...400 мм. Простір між цистерною та корпусом заповнено бетонною заливкою товщиною 800...1000 мм із радіаційно стійкого бетону (ГОСТ 25192-2012).

За допустимий (варіант 1) обрано панель модуля, який застосовано на спеціалізованих судах для перевезення ВЯП [244]. Це бетонна плита товщиною 200 мм, облицьована з двох боків нержавіючою легованою сталлю з товщиною листа 10 мм.

Конкурентоспроможною пропозицією, яка суттєво знижує матеріально-технічні витрати, є заміна листа нержавіючої сталі на більш дешеву сталь звичайної якості, наприклад, марки ВСт3 (ГОСТ 5521-93). Захист від шкідливої дії вантажів забезпечується захисним композиційним шаром, склад і технологія нанесення якого визначає вартісні показники конструкції. Варіанти, що надалі розглядаються у роботі, відрізняються один від одного матеріалом захисного шару:

- варіанти 2–4 – це метал-скляні електродугові покриття на основі Св08Г2С, відповідно наповнені ПСМ, порошками натрійсилікатного або свинцевмісного скла;
- варіанти 5–7 включають в себе шар з метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-АМг5, також наповнених ПСМ (варіант 5), порошками натрійсилікатного (варіант 6) та свинцевмісного скла (варіант 7);
- варіанти 8 і 9 – шар із склоалюмінієвих плиток, виготовлених гарячим пресуванням суміші, яка складається з ПСМ і порошку (варіант 8) або пудри (варіант 9) алюмінію, які кріпляться до сталевій поверхні за допомогою клейової композиції на основі ЕД-20;
- варіанти 10 і 11 є альтернативними (варіантам 8 і 9) за видом наповнювача, де використані порошки SiC за ГОСТ 26327-84 (варіант 10) і Al₂O₃ за ГОСТ 30558-98 (варіант 11).

Процес формування комплексного критерію оптимізації розглянуто з позицій системотехнічного підходу [225], де з метою вибору раціонального конструктивного рішення вводиться комплексна оцінка технологічності: це питання необхідно розглядати на всіх етапах життєвого циклу судна [334].

За оптимізаційний критерій обрано комплексний коефіцієнт технологічності виготовлення конструкцій K_k , який враховує мінімізацію маси, матеріальних витрат, раціональне використання матеріалів, трудомісткість виконання робіт і складність композитних конструкцій. У розрахунках використовується метод визначення коефіцієнта K_k [225], заснований на системі зменшення максимального значення і введення корегувальних коефіцієнтів:

- матеріаломісткості $K_m = \frac{M_i}{M_{ni}}$ – відношення чистої маси конструкції M_i до номінального значення маси M_{ni} i -го матеріалу для виготовлення конструкцій;
- складності конструкції

$$K_{cl} = \frac{n^{\bar{\sigma}}}{n^{n\bar{\sigma}}} \cdot K_z \quad (8.1)$$

де K_c – коефіцієнт, що враховує габарити дослідної конструкції; n^b – кількість складових елементів конструкції; n^{nb} – кількість складових елементів конструкції конкурентного аналога (традиційного виду);

- технологічності конструкції за трудомісткістю

$$K_T = 1 - \frac{T_i}{T_a}, \quad (8.2)$$

де T_i – час підготовчої обробки перед монтажем для дослідної конструкції; T_a – час підготовчої обробки перед монтажем для конкурентної конструкції аналога (традиційний вид).

При визначенні цих показників необхідно враховувати коефіцієнти технологічності за собівартістю K_c і технологічності матеріалу $K_{техн.}$; за результатами будується номограма для визначення комплексного коефіцієнта технологічності K_k , яка відображає функціональну залежність вхідних змінних.

Комплексний показник технологічності K_k залежить не тільки від технологічних факторів, а й від вартісних показників. У розрахунках використані значення вартості сталевих листів (поставка компанії «Senerstal Distribution») марки 12X18H10T (ГОСТ 5632-72) – 95000 грн/т; ВСт3 (ГОСТ 5521-93) – 19300 грн/т; плакованої сталі (ГОСТ 10885-85) – 120000 грн/т; вартість бетону марки М500 (ГОСТ 25192-2012) щільністю 2298 кг/м³ – 2850 грн/т. Товщина захисного шару для електродугових покриттів прийнята 1 мм, для алюмоматричних (склоалюмінієвих на основі ПСМ і композицій систем Al–SiC і Al–Al₂O₃) облицювальних матеріалів – 10 мм. Для варіантів 8–11 враховано вартість клейової композиції товщиною 1 мм. Вартісні показники варіантів 2–11 залежать від виду захисного композиційного шару і визначаються через коефіцієнти матеріаломісткості K'_m , енергоємності K_e і технологічну собівартість. Показник матеріаломісткості K'_m є аналогічним коефіцієнту використання матеріалу [225] і безпосередньо залежить від товщини захисного шару конструкції. Більш розширене значення цього цінного для виробництва показника розглядається авторами робіт [266, 285] і включає в

себе витрати і вартісні показники основних та додаткових матеріалів, електроенергії, використаного обладнання, амортизаційних витрат. Коефіцієнт енергоємності K_e характеризує витрати енергії на одиницю продукції. Розрахунки технологічної собівартості захисного шару виконані для квадратного метра з товщиною захисного шару 1 мм з урахуванням щільності композиційного матеріалу або покриття. Вибір і витрати матеріалів для формування алюмоматричних плиток (значення отримані для товщини 1 мм з урахуванням усадочних процесів) наведені у табл. 8.4; метал-скляних електродугових покриттів товщиною 1 мм – у табл. 8.8; клейової композиції, необхідної для кріплення плиток та закладення швів, – у табл. 8.5; обладнання та технологічні етапи виготовлення – у табл. 8.3 і 8.9.

Коефіцієнт складності K_{cl} розраховано для конструкцій з панеллю розмірами 1,5×1,5 м, що дозволяє у формулі (8.4) прирівняти коефіцієнт, який враховує габарити K_g , до одиниці. Коефіцієнт технологічності матеріалів $K_{техн}$ доцільно виразити як добуток коефіцієнтів матеріаломісткості захисного шару K'_m на коефіцієнт енергоємності K_e :

$$K_{техн} = K'_m \cdot K_e. \quad (8.3)$$

Коефіцієнт технологічності конструкції за трудомісткістю K_T безпосередньо пов'язаний з рівнем складності конструкцій і визначається штучно-калькуляційними розрахунками технологічного процесу, одночасно виконується підготовка сталеві поверхні до формування захисного шару, що поєднується в один технологічний цикл. Попередньо сталева поверхня очищується від іржі та окалини; для випадку нанесення електродугового покриття виконується струминно-абразивна обробка. Облицювання метал-скляними плитками передбачає розмітку поверхні за допомогою трафаретів, підготовку та нанесення клейової композиції для закладення та герметизації стиків. У розрахунках також береться до уваги остаточна обробка рідким склом (ГОСТ 13078-81) для підвищення корозійної стійкості захисного шару.

Вплив усіх розглянутих коефіцієнтів на комплексний показник технологічності конструкцій K_k можна представити у вигляді номограми (рис. 8.7), яка складається з шості логарифмічних шкал, кожна з яких відповідає певному показнику технологічності, а саме коефіцієнтам: технологічності по трудомісткості K_T ; по собівартості K_c , матеріаломісткості K_m , складності K_{cl} , технологічності матеріалу $K_{техн.}$, комплексної технологічності конструкції K_k . Логарифмічну номограму складено з сорокоп'ятиградусним кутовим ходом. Побудована номограма дозволяє розрахунково-графічним шляхом встановити базові показники для формування технологічних резервів виробництва. Результати розрахунків показали, що для варіантів 2–7 маса панелі розміром $1,5 \times 1,5$ м складає 2,805...2,817 т; для варіантів 8–11 – 2,825...2,870 т, що у 2...2,5 рази менше мас допустимого і базового варіантів (варіанти 0 і 1). Для всіх випадків середній коефіцієнт матеріаломісткості K_m складає 0,6...0,65. Коефіцієнт складності конструкцій K_c для варіантів 2–7 прирівнюється до одиниці; для варіантів 8–11 – до 1,3. Найвищий коефіцієнт технологічності використаних матеріалів $K_{техн.}$ мають варіанти 2 і 5 з захисним шаром у вигляді метал-скляних електродугових покриттів, наповнених порожніми скляними мікросферами ($K_{техн.} = 6,0...6,2$), у два рази нижче цей показник становить для варіантів 8–11 з облицюванням гарячепресованими плитками ($K_{техн.} = 3,0...3,2$). Коефіцієнт технологічності по собівартості K_c для всіх варіантів складає приблизно 0,025...0,07.

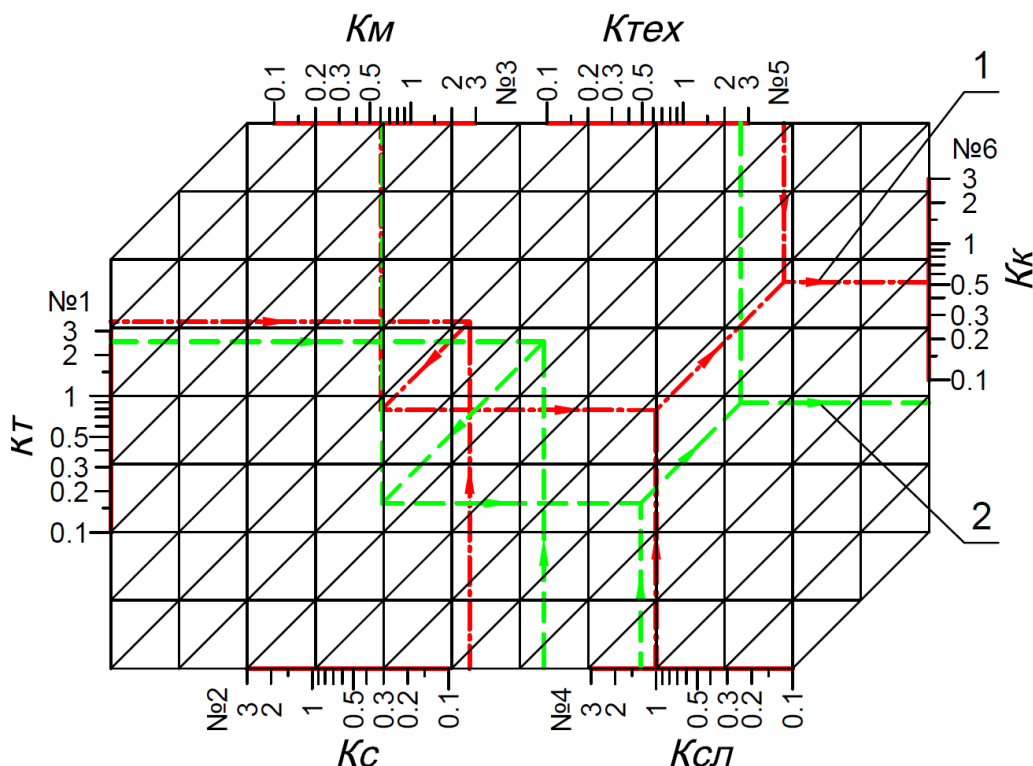


Рисунок 8.7 – Номограма для визначення комплексного коефіцієнта технологічності K_k з коефіцієнтами: K_m – матеріаломісткості; K_t – технологічності по трудомісткості; $K_{сл}$ – складності; K_c – собівартості; $K_{тех}$ – технологічності матеріалів з захисним шаром 1 – покриття Св-08Г2С–ПСМ; 2 – плитки (ПСМ– Al-порошок)

Таким чином, усім вимогам, що висуваються до технологічності конструкцій, найбільшою мірою відповідає варіант 2 з комплексним показником технологічності $K_k = 0,52$; найнижчий коефіцієнт ($K_k = 0,07$) має варіант 8, що пояснюється суттєвою різницею у заданих товщинах захисного шару. Технологічні показники цих варіантів як приклади наведено на рис. 8.7. Необхідно відмітити, що отримані результати носять суб'єктивний характер, у першу чергу враховують вартісні та масогабаритні обмеження. Незначна розбіжність результатів (до 5...7 %) свідчить про можливість застосування всіх розглянутих варіантів.

Виконані економічні розрахунки показали, що вартість базового варіанта конструкції біологічного захисту, який застосовується на плавучих спорудах, складає 1339896 грн; вартість допустимого варіанта, що використовується на

спеціалізованих суднах для ВЯП – 495087 грн. Вартість пропонованих варіантів конструкцій знаходиться у діапазоні 46155...54450 грн, що є більш ніж у 20 разів дешевше за сучасні аналоги.

Одержані результати дадуть можливості здійснювати розробку організаційно-технічних заходів і прогнозувати динаміку формування факторів економічної ефективності.

8.4 Висновки до розділу 8

1. Проаналізовано інноваційну привабливість нових технічних рішень у проектуванні і виготовленні за участю метал-скляних матеріалів і покриттів елементів біологічного захисту, розвиток і впровадження результатів яких узагальнені у вигляді моделі, яка пов'язує економічну ефективність наукових результатів дисертаційного дослідження з навчальним процесом та визначним соціальним ефектом у галузі розвитку транспортних засобів для вивезення РАВ з місць їх накопичення у пункти переробки і захоронення.

2. Практичний результат роботи включає в себе створення науково-технічної та науково-методичної продукції у вигляді експериментальних зразків матеріалів і покриттів, обладнання, програм, методик; визначення попереднього ефекту через індекс рентабельності, який враховує актуальність, значущість та багатоаспектність інновацій, показало позитивну динаміку рентабельності розробок.

3. Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри матеріалознавства і технології металів НУК імені адмірала Макарова, що дозволило вдосконалити методичну базу за рахунок систематизації даних про композиційні та порошкові матеріали, покриття; оновлення наочного матеріалу та обладнання.

4. Результати застосовано у навчальний процес кафедри Інформаційних управляючих систем та технологій при написанні студентських наукових і магістерських робіт за спеціальностями «Інформаційні управляючі системи та

технології» і «Інформаційні технології проектування», що спрямовано на розширення аспектів наукової діяльності та вміння вирішувати студентами певні прикладні завдання.

5. Результати роботи впроваджено у робочий процес Морського інженерного бюро (м. Одеса), Херсонського державного заводу «ПАЛАДА», ТОВ «Океан–Судноремонт» (м. Миколаїв), Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв) та у навчальний процес Національного університету імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), що підтверджено відповідними актами.

6. Розроблено технологічні рекомендації щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток, нанесення метал-скляних електродугових покриттів на сталеву поверхню конструкцій і елементів біологічного захисту, ремонту деталей суднової запірної арматури вантажних систем за допомогою формування бронзобабітового псевдосплаву.

7. Як критерій оптимального вибору конструктивного рішення щодо виготовлення елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд, призначених для транспортування і зберігання радіоактивних вантажів прийнято комплексний коефіцієнт технологічності K_k , який враховує мінімізацію маси, матеріальних витрат, раціональне використання матеріалів, трудомісткість виконання робіт та складність конструкцій.

8. Оптимальним за максимальним значенням комплексного показника технологічності $K_k = 0,52$ слід вважати панельну конструкцію модуля біологічного захисту, яка складається з бетонної плити (марки М500) товщиною 200 мм, облицьованої з одного боку сталевим листом (ВСт3) товщиною 10 мм, на який нанесено шар товщиною 1 мм метал-скляного покриття композиції Св-08Г2С–ПСМ.

9. Вартість пропонованих варіантів конструкцій знаходиться у діапазоні 46155...54450 грн, що є більш ніж у 20 разів дешевше за сучасні аналоги.

Наукове значення розділу полягає у розвитку теоретичних, методичних, практичних засад підвищення інноваційної привабливості нових технічних

рішень у проектуванні і виготовленні за участю метал-скляних матеріалів та покриттів елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд, призначених для транспортування та зберігання радіоактивних вантажів; оптимальному виборі конструктивного рішення на основі критеріїв технологічності і економічної ефективності.

Практичне значення розділу полягає у визначенні комплексних показників технологічності та економічної ефективності формування елементів біологічного захисту суден і плавучих споруд; розробці технологічних рекомендацій щодо виготовлення та нанесення метал-скляного захисного шару, ремонту деталей запірної арматури.

Результати досліджень викладені у роботах [105, 106, 121, 123, 144].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано, теоретично обґрунтовано та досліджено вирішення **науково-технічної проблеми** розробки принципово нового наукового підходу до проектування елементів суден і плавучих споруд для радіоактивних вантажів, в основу якого покладено дотримання умов теплової безпеки та теорію захисту конструкцій на основі фізико-хімічних процесів створення нових композицій з полі- та ультрадисперсною структурою шляхом поєднання скляних мікросфер і порошків з металами методами спікання та електродугового напилення.

У роботі отримано наступні наукові і практичні результати, що характеризують наукову новизну і практичну цінність:

1. Підвищення техніко-економічних показників експлуатації спеціалізованих суден, призначених для транспортування радіоактивних вантажів, плавучих баз, сховищ для їх зберігання вимагає створення наукового підґрунтя до проектування елементів біологічного захисту, яке повинно містити нові знання та уявлення про теплові процеси у вантажній зоні при транспортуванні РАВ з остаточною тепловиділенням, про механізми послаблення інтенсивності іонізуючих випромінювань структурними елементами матеріалів конструкцій та їх хімічний склад, а також включати в себе науково-методичний апарат для прогнозування та оцінювання технічного стану. Теоретично обґрунтовано необхідність створення нових матеріалів і покриттів з поєднанням у складі скляних порошків і мікросфер з металами шляхом застосування високотемпературних технологій спікання та електродугового напилення.

2. В основу теорії захисту елементів суден та плавучих споруд, призначених для транспортування і зберігання радіоактивних вантажів, покладено наступні фізико-хімічні процеси та закономірності створення нових матеріалів і покриттів:

- вибір складів обумовлено принципом утворення ефекту багаторазового внутрішнього відбивання потоку випромінювань у середовище

поглинання, що реалізовано через поєднання в одній композиції скляних і металевих компонентів шляхом спікання порожніх скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ з порошком або пудрою алюмінію (50 % об'ємн.) та електродугового напилення суцільнотягнутих дротів марок Св-АМг5 і Св-08Г2С з додаванням (в об'ємній кількості 10 ± 35 %) скляних мікросфер і порошків, одержаних механічним здрібненням до дисперсності 10...90 мкм бою скла кришталевого посуду та рентгенівського обладнання, які за результатами МРСА відносяться до систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$;

- розроблено теоретичні і технологічні засади формування нових склоалюмінієвих матеріалів, що полягають в обґрунтуванні технологічних параметрів ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа при $t = 375 \dots 490$ °С з наступною ізотермічною витримкою при $t = 600 \dots 700$ °С), удосконаленні експериментальної установки для спікання та дослідження термодеоформаційних процесів, встановлених закономірностях, які ґрунтуються на заповненні під дією зовнішнього тиску і капілярного ефекту ультра- і мікропор, утворених у стінках ПСМ після вигорання силанового апрету $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, та формуванні внаслідок ліквідаційних процесів локальних субмікрокристалічних областей з розміром ОКР до 90 нм, що узгоджується зі структурними перетвореннями у межах діаграм стану систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$;

- створено теоретичні передумови для технології формування по сталевій поверхні зі Ст3 електродугового метал-скляного покриття із заданими властивостями, які ґрунтуються на структурних особливостях скляних мікросфер системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ та порошків стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ і включають у себе: визначення температурних полів на їх поверхні, результати розрахунків адгезійної ($\tau = 20 \dots 25$ МПа) та когезійної ($\sigma_n = 24 \dots 28$ МПа) міцності, уявлення про накопичення склофази і описаний через ефективні пружні характеристики взаємозв'язок між структурою покриттів та їх механічними властивостями.

3. Розроблено концептуальні положення підвищення комплексного захисту блоків і модулів суден та плавучих споруд для РАВ, які включають у себе:

- механізми послаблення γ - та рентгенівських випромінювань структурними елементами (порожніми скляними мікросферами, суцільними скляними частинками, ультра- і мікропорами, субструктурними елементами) розроблених матеріалів та покриттів, які на відміну від сучасних аналогів (синтактиків, САПів) завдяки ефекту «металізації» скляних порошоків і мікросфер характеризуються структурною стабільністю та підвищеними на 30...40 % значеннями масового коефіцієнта послаблення рентгенівських випромінювань. Нанесення електродугових покриттів $\delta = 1,5...2,0$ мм або формування на поверхні Ст3 склоалюмінієвого шару, товщина якого з урахуванням технологічних вимог до виготовлення плиток повинна бути більшою за 10 мм, забезпечує такий самий захист як і облицювання свинцем товщиною 1 мм;

- вплив скляних включень на радіаційну стійкість в умовах γ -випромінювань Co^{60} електродугових покриттів ($\delta = 2$ мм), які при нанесенні на пластину Ст3 екранують її на 28...56 %, стримуючи радіаційне зміцнення та попереджаючи корозійне руйнування у 20 % розчинах HCl, H₂SO₄, HNO₃. Експериментально визначено, що нанесення метал-скляного покриття $\delta = 0,5$ мм з об'ємним вмістом ПСМ 10...40 % у 3...6 разів підвищує коефіцієнт розсіювання енергії пластини Ст3;

- руйнування в умовах термічних навантажень до 500 °С, процес якого описано через температурні деформації мікрооб'ємів за допомогою удосконаленої термомеханічної моделі, яка на відміну від існуючих моделей враховує вплив пористості (10...20 %) і дисперсність скляних включень (20...100 мкм) та визначає граничні умови експлуатації розроблених матеріалів і покриттів у складі конструкцій при транспортуванні та зберіганні РАВ з потужністю остаточного тепловиділення 2...20 кВт.

4. Розроблено нові науково-методичні засади оцінювання технічного стану композитних суднових конструкцій, які спрямовано на скорочення ремонтних робіт і надають можливості аналітичного прогнозування життєдіяльності елементів біологічного захисту на етапах їх проектування, виготовлення та експлуатації, які включають у себе:

- складання класифікації проектних, технологічних і експлуатаційних дефектів за уточненими показниками пошкоджуваності матеріалів конструкцій;
- проектування та реалізацію нової інформаційно-пошукової системи «*PROTECTIVE COATINGS DATA*»;
- встановлення за допомогою причинно-наслідкових діаграм і когнітивних моделей взаємного зв'язку між проектними, технологічними та експлуатаційними факторами.

5. Теоретично обґрунтовано та вирішено наступні конструкторські завдання:

- удосконалено конструкцію модуля біологічного захисту шляхом раціональної заміни традиційного двобічного облицювання листами нержавіючої (або плакованої) сталі бетонних панелей на облицювання їх лише з одного боку листом більш дешевої вуглецевої сталі (наприклад, ВСт3сп) з метал-скляним захисним шаром, що дає змогу більш ніж на 10 % знизити масу модуля, розширити тим самим асортимент вантажів та підвищити завантаженість судна; розроблено практичні рекомендації щодо виготовлення модуля і його монтажу на суховантажному судні;
- за допомогою числового моделювання досліджено напружено-деформований стан при короткочасному термічному навантаженні (до температур 300 і 570 °С) двошарових з'єднань Ст3– метал-скляне покриття в умовах, наближених до екстремальних при поводженні з РАВ з питомою активністю до 0,4 Бк/кг і 40 ГБк/кг, що дає змогу прогнозувати граничні умови експлуатації під час їх транспортування і зберігання, а також при виникненні на судні пожежонебезпечних ситуацій.

6. Підвищення науково-технічного рівня проектування реалізовано шляхом удосконалення та розроблення нових теоретичних підходів:

- до проектування модулів біологічного захисту, який на відміну від традиційних підходів, що включають у себе розробку моделі функціонування судна з розв'язанням оптимізаційних задач, містить удосконалення конструкції та розробку нової інформаційної системи для його ефективного розміщення як великої вантажної одиниці на суховантажному судні разом з іншими вантажами за критеріями мінімізації сталійного часу;

- до елементів біологічного захисту плавучих споруд, призначених для зберігання радіоактивних вантажів з остаточною тепловиділенням, для чого вперше сформульовано і розв'язано у тривимірній спряженій постановці на прикладі суднової цистерни з багат шаровою стінкою стаціонарну задачу про тепловий стан, яка враховує потужність тепловиділення РАВ ($Q = 2 \dots 20$ кВт), теплопровідність, товщину кожного із шарів та дозволяє визначати розподіл полів температур і потоків повітря в умовах природної конвекції, що дає змогу моделювати проектну ситуацію з позицій обмежень за потужністю остаточною тепловиділення РАВ та обирати найбільш раціональне конструктивно-компонувальне рішення, для їх безпечного зберігання на плавучих спорудах.

7. Розроблено технологічні пропозиції та рекомендації, пов'язані з ремонтними і експлуатаційними заходами на суднах та плавучих спорудах і впровадженням розроблених конструктивних рішень з використанням нових матеріалів та покриттів:

- способу ремонту деталей суднової запірної арматури вантажних систем (клапанів, фланців, кранів тощо), який полягає у формуванні на попередньо вилудженій поверхні методом гарячого пресування ($P = 0,7 \dots 1,2$ МПа) при температурі $70 \dots 90$ °С з подальшою ізотермічною витримкою при $450 \dots 500$ °С суміші порошків бронзи (Пр-Бр-9-2) та бабіту (Пр-Б83), де замість порошку можна застосовувати здрібнену стружку бабіту, що приблизно на $25 \dots 30$ % знижує собівартість ремонту та сприяє утилізації виробничих відходів;

- щодо виготовлення склоалюмінієвих плиток та формування за їх участю з використанням запропонованої клейової композиції шаруватих панелей модулів біологічного захисту для суховантажних суден та кришок баків з РАВ для плавучих споруд;
- щодо нанесення метал-скляних електродугових покриттів на сталеві поверхні панелей модулів для суховантажних суден та внутрішні поверхні цистерн для рідких РАВ, що зберігаються на плавучих спорудах;
- техніко-економічного обґрунтування з постановкою та вирішенням задачі щодо вибору оптимального конструктивного рішення з раціональним вибором матеріалів за комплексним коефіцієнтом технологічності: одержані результати свідчать про доцільність застосування усіх розглянутих конструктивних варіантів, проте оптимальним, що відповідає умовам мінімізації маси, матеріальних витрат, трудомісткості, складності конструкцій і раціонального використання матеріалів, слід вважати панельну конструкцію модуля біологічного захисту, яка складається з бетонної плити товщиною 200 мм, облицьованої з одного боку листом вуглецевої сталі $\delta = 10$ мм зі склоалюмінієвими плитками ($\delta = 10$ мм); серед метал-скляних покриттів перевага віддається композиції Св-08Г2С–ПСМ ($\delta = 1$ мм).

8. Проаналізовано інноваційну привабливість нових технічних рішень у проектуванні та виготовленні з використанням нових матеріалів і покриттів елементів суден та плавучих споруд, яку описано за допомогою моделі, що враховує індекс рентабельності інтелектуального капіталу та соціальний ефект від розвитку транспортних засобів для вивезення РАВ з місць їх накопичення у пункти переробки і захоронення. Результати роботи впроваджено у наукові, проектні і виробничі установи та використані у навчальному процесі кафедр Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алехина, С. В. Определение эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива путем решения обратной задачи / С. В. Алехина, В. А. Воронина, В. Н. Голощапов // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009. – № 4. – С. 48–51.

2. Алехина, С. В. Решение сопряженной задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 4. – С. 12–20.

3. Алехина, С. В. Тепловое состояние вентилируемого контейнера хранения отработавшего ядерного топлива в условиях натекания внешнего воздушного потока / С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков // Ядерна фізика та енергетика. – 2009. – Т. 10, № 2. – С. 171–177.

4. Алешин, Н. В. Методология инженерной и научной деятельности в морской технике : учеб. пособие / Н. В. Алешин, А. Г. Ляховецкий, Б. А. Царев. – СПб. : Изд. Центр СПбГМТУ, 2000. – 295 с.

5. Аналіз умов зберігання відпрацьованого ядерного палива на майданчику сухого сховища / С. В. Альохіна, В. М. Голощапов, А. О. Костіков // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2010. – Вип. 13. – С. 76–83.

6. Андрианов, А. Ю. Ослабление гамма-излучения многослойными полимерными дисперсно-наполненными структурами / А. Ю. Андрианов, В. А. Белоус // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – № 5. – С. 73–77.

7. Андрианов, А. Ю. Оценка прироста радиационно-защитных свойств композитов на основе полидисперсных наполнителей / А. Ю. Андрианов, Е. А. Джур, Ю. А. Крикун // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – № 2. – С. 220–225.

8. Андрианов, А. Ю. Соединение разнородных компонентов конструкционного материала контейнера для радиоактивных отходов /

А. Ю. Андрианов, А. В. Кулик, Д. А. Орлянский // Вісн. ДНУ. Сер. А. Природничі науки. – Донецьк, 2010. – Вип. 2. – С. 262–268.

9. Анисович, А. Г. Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, Н. И. Румянцева. – Минск : Беларус. Навука, 2013. – 221 с.

10. Анитропов, В. А. Конструктивные отличия судов АТО и организационно-технические системы их утилизации / В. А. Анитропов, Н. И. Александров, А. Я. Розин // Вопросы утилизации АПЛ : бюл. – 2005. – № 2/6. – С. 32.

11. Анфилов, В. Н. Силикатные расплавы : монография / В. Н. Анфилов, В. Н. Быков, А. А. Осипов. – М. : Наука, 2005. – 357 с.

12. Аппен, А. А. Химия стекла / А. А. Аппен. – Л. : Химия, 1974. – 352 с.

13. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения : учеб. пособие для вузов / В. И. Арбузов. – СПб. : СПбГУИТМО, 2008. – 284 с.

14. Артемьев, В. А. Об ослаблении рентгеновского излучения ультрадисперсными средами / В. А. Артемьев // Письма в Журн. техн. физики. – 2007. – Том 23, № 6. – С. 5–9.

15. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. А.А. Саркисова. – М. : Наука, 2011. – 375 с.

16. Бабкін, Г. В. Організаційна структура підприємства з нейтралізації підводних потенційно небезпечних об'єктів / Г. В. Бабкін, В. С. Блінцов, Ж. Ю. Буруніна // Вісн. НУК (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2011. – № 5.

17. Банных, О. А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа : справочник / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова. – М. : Metallurgia, 1986. – 860 с.

18. Баранова, Н. В. Адсорбция эпоксидной смолы на никелированных стеклянных микросферах / Н. В. Баранова // Изв. Вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47, Вып. 9. – С. 111–113.

19. Бачин, В. А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами / В. А. Бачин. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.

20. Безопасная перевозка концентратов урановой руды: отчет Всемирного Института Ядерных Перевозок (WNTI). Лондон, Великобритания [Электронный ресурс] : пер. с англ. – Режим доступа : [www:wnti.co.uk](http://www.wnti.co.uk).

21. Белоус, В. А. Защитные тонкопленочные многослойные экраны от рентгеновского гамма-излучения / В. А. Белоус, А. О. Комаров, Б. А. Шилиев // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 1. – С. 202–204.

22. Беляев, В. Н. Разработка методов одностороннего контроля внутренней структуры объектов по отраженному рентгеновскому излучению / В. Н. Беляев, А. Ю. Ставцев // Науч. сессия МИФИ–2006. – М., 2006. – Т. 5. – С. 27–28.

23. Беспалов, В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом : учеб. пособие / В. П. Беспалов. – 4-е изд. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 369 с.

24. Билым, П. А. Основные закономерности зажигания гетерогенных систем при радиационно-конвективном теплообмене / П. А. Билым, А. П. Михайлюк, К. А. Афанасенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х. : УГЗУ, 2007. – Вып. 22. – С. 48–55.

25. Безюков, О. К. Средства для контроля теплового состояния деталей остова судовых дизелей / О. К. Безюков // Журн. ун-та водных коммуникаций. – СПб. : СПГУВК, 2009. – Вып. 2. – С. 83–90.

26. Бойчик, І. М. Економіка підприємства : підручник / І. М. Бойчик. – К. : Кондор, 2016. – 378 с.

27. Бондаренко, А. В. Оценка безопасности судна на основе его проектирования / А. В. Бондаренко // Вісн. НУК (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2010. – № 4.

28. Бессмертный, В. С. Научные основы формирования потребительских свойств изделий из керамики и стекла, обработанных факелом низкотемпературной плазмы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.05 / В. С. Бессмертный. – Белгород, 2004. – 381 с.

29. Брагина Л. Л. Синтез стекол системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ для покрытий, защищающих бронзу при выплавке / Л. Л. Брагина, Ю. О. Соболев // Стекло и керамика. – 2005. – № 9. – С. 8–11.

30. Бреховских, С. М. Радиационные эффекты в стеклах / С. М. Бреховских, Ю. Н. Викторова, Л. М. Ланда. – М. : Энергоиздат, 1982. – 184 с.

31. Будов, В. В. Выбор состава стекла для получения полых стеклянных микросфер / В. В. Будов, В. Я. Стеценко // Стекло и керамика. – 1988. – № 8. – С. 15–16.

32. Будов, В. В. Физико-химические процессы в технологии полых стеклянных микросфер / В. В. Будов // Стекло и керамика. – 1990. – № 3. – С. 9–10.

33. Валянтис, К. И. Расчет коэффициента потерь металлической пластины, облицованной вибропоглощающим покрытием из высоконаполненного полиуретана [Электронный ресурс] / К. И. Валянтис, Ю. Н. Попов, С. А. Шляпочников // Материалы науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества». – Режим доступа : <http://www.ejta.org>.

34. Ванин, Г. А. Микромеханика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – К. : Наук. думка, 1985. – 304 с.

35. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник для ВТУЗов / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

36. Власюк, Р. З. Исследование процессов кристаллизации в силикатной фазе при спекании металлостеклянных материалов / Р. З. Власюк, И. Д. Радомысльский // Порошковая металлургия. – 1971. – № 7. – С. 19–27.

37. Влияние мелкодисперсных наполнителей на износ эпоксидных и эпоксидно-каучуковых полимеров / В. В. Золотарева, Т. И. Григоренко, Ю. С. Кочергин и др. // Вісн. Донбаської Нац. акад. будівництва і архітектури: Сучасні будівельні матеріали. – Д., 2013. – № 1 (99). – С. 108–114.

38. Воеводин, В. Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В. Н. Воеводин, И. М. Неклюдов. – К. : Наук. думка, 2006. – 378 с.

39. Возный, А. М. Применение когнитивного моделирования при проектировании конструкций технических средств для хранения радиоактивных веществ / А. М. Возный, Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. КНУБА. – К. : КНУБА, 2012. – № 10. – С. 37–42.

40. Возный, А. М. Применение когнитивного подхода для проектирования конструкций из радиационно-стойких композиционных материалов / А. М. Возный, Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 49–52.

41. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

42. Воробьева, Г. А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах / Г. А. Воробьева. – 3-е изд. – М. : Химия, 1975. – 816 с.

43. Гаврилюк, Л. П. Общие основы технологии монтажа судового оборудования / Л. П. Гаврилюк. – СПб. : ОАО «ЦТСС», 2012. – 248 с.

44. Гадалов, В. Н. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровым способом / В. Н. Гадалов. – М.: ИНФРА. – 2011. – 468 с.

45. Гайченя, А. В. Формирование исходных данных компьютерной грузовой программы судна / А. В. Гайченя // Водный транспорт : XXX КДАВТ. – К., 2014. – № 2. – С. 49–55.

46. Галь, А. Ф. Перспективы использования подводных аппаратов для подъема радиоактивных отходов в океанах / А. Ф. Галь, М. А. Дубина // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2006. – № 6 (411). – С. 51–56.

47. Гарькина, И. А. Композиционные материалы с позиций теории систем / И. А. Гарькина, А. М. Данилов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, вып. 4. – С. 661–652.

48. Гатауллин, Р. М. Использование перспективных технологий для решения проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами / Р. М. Гатауллин, И. А. Медеяев, Р. Б. Шарафутдинов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 68–75.

49. Гегузин, Я. Е. Физика спекания / Я. Е. Гегузин. – М. : Наука, 1967. – 360 с.

50. Геец, В. М. Специальные системы наливных судов: курс лекций : учеб. пособие / В. М. Геец. – Владивосток : МГУ, 2012. – 185 с.

51. Гелбутовский, А. С. ЗАО «ЭКОМЕТ-С». Опыт переработки металлических РАО [Электронный ресурс] : отчет о деятельности предприятия, 2012 г. / А. С. Гелбутовский. – Режим доступа : atomicexpert.com.

52. Герцбах, И. Б. Модели отказов / И. Б. Герцбах, Х. Б. Кородонский. – М. : Сов. Радио, 1966. – 166 с.

53. Гончаров, О. Ю. Оценка содержания составляющих свинцово-силикатных стекол / Ю. О. Гончаров, О. М. Канунникова // Журн. физической химии. – 2009. – Т. 83, № 12. – С. 2205–2210.

54. Горбонос В. А. Защита от коррозии корпуса судов, балластных танков и систем / В. А. Горбонос // Вологодские чтения. – Вологда, 2010. – Вып. 78. – С. 141–148.

55. Горынин, И. В. Конструкционные материалы для освоения арктического шельфа / И. В. Горынин // Вест. РАН. – М., 1999. – Т. 69, № 1. – С. 8–15.

56. Григорьев, А. Г. Основные закономерности распределения, миграции и накопления радионуклидов в донных отложениях Балтийского моря / А. Г. Григорьев, М. В. Владимиров // Единая Ред. науч. журн. БФУ им. И. Канта. – М., 2011. – № 1 (7). – С. 62–70.

57. Гришина, А. Н. Структурообразование и свойства композиции «жидкое стекло–хлорид бария» для изготовления радиационно-защитных строительных материалов / А. Н. Гришина, Е. В. Королев // Строительство и арматура : науч. вестн. ВГАСУ. – Воронеж, 2009. – № 4 (16). – С. 70–77.

58. Гулиев, Ю.М. Приближенный расчет нагрузки транспортных судов : метод. указания / Ю. М. Гулиев. – О., 1993. – 70 с.

59. Гулюян, Ю. А. Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гулюян. – Владимир : Изд-во «Транзит-Икс», 2008. – 736 с.

60. Гульбин, В. Н. Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками для радиационной защиты в атомной энергетике / В. Н. Гульбин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – № 3. – С. 272–286.

61. Гусев, А. И. Аттестация нанокристаллических материалов по размеру частиц (зерен) / А. И. Гусев, А. С. Курлов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 5. – С. 679–694.

62. Даувальтер, А. Н. Хрустальные цветные и опаловые стекла / А. Н. Даувальтер. – М. : Гизлегпром, 1985. – 235 с.

63. Долгов, Н. А. Сопротивление деформированию и разрушению материалов с функциональными покрытиями : монография / А. Н. Долгов. – Т. : Крок, 2010. – 231 с.

64. Долгушев, С. В. Обогащение природного газа гелием при нестационарных диффузионно-сорбционных процессах в слое стеклянных микросфер / С. В. Долгушев, В. М. Фомин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1, № 3. – С. 66–75.

65. Дрожжин, В.С. Процессы образования, ресурсы и основные свойства полых микросфер в золах уноса тепловых электростанций:// Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Саров, 2007 – 187 с.

66. Дрозд, О. В. Вплив управління загальноосвітнім процесом на критерії інноваційної привабливості суден для радіоактивних вантажів / О. В. Дрозд,

О. С. Рижков, Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 1 (29), vol. 1. – P. 59–65.

67. Дубовий, О. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів і сплавів / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3 (55). – С. 7–10.

68. Дубовой, А. Н. Электродуговое нанесение композиционных покрытий с повышенными физико-механическими свойствами / А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 3–4. – С. 20–25.

69. Дятченко, С. В. Исследование влияния конструкции корпуса и загрузки промышленного судна и его вибрационные характеристики / С. В. Дятченко, С. В. Тананыкин // Изв. КГТУ. – Калининград, 2007. – № 12. – С. 36–41.

70. Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (ВОПОГ). ООН. – Нью-Йорк ; Женева : Изд-во «Весь Мир», 2007. – Т. 1. – 988 с. ; Т. 2. – 519 с.

71. Егоров, В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности : учеб. пособие / В. И. Егоров. – СПб. : СПбГУИТМО, 2006. – 77 с.

72. Егоров, Г. В. Практические мероприятия по управлению риском при морских перевозках облученного ядерного топлива / Г. В. Егоров // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 3 (381). – С. 15–24.

73. Егоров, Г. В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска / Г. В. Егоров. – СПб. : Судостроение, 2007. – 384 с.

74. Ефремов, В. П. Термомеханические процессы в композиционных материалах под действием интенсивных потоков энергии / В. П. Ефремов, А. И. Потапенко // Теплофизика высоких температур, 2010. – Т. 48, № 6. – С. 924–930.

75. Жилин, П. А. Рациональная механика сплошных сред : учеб. пособие / П. А. Жилин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 584 с.

76. Жорник, В. А. Моделирование процессов спекания порошковых покрытий при тепловом и механическом воздействиях / В. А. Жорник, Ю. А. Прокопенко // Вест. ТГТУ. – Тамбов, 2010. – Т. 16, № 1. – С. 59–66.

77. Заведий, Т. Ю. Моделирование температурного поля при нагнетании технологических жидких радиоактивных отходов в пласт-коллектор / Т. Ю. Заведий // Изв. ТПУ. – Томск, 2010. – Т. 317, № 1. – С. 188–194.

78. Завод радиоактивных изотопов. Государственная корпорация по Атомной энергии «Росатом». ФГУП «Производственное объединение «Маяк» [Электронный ресурс] : кат. продукции. – 2010. – 52 с. – Режим доступа : www.ro-mayak.ru.

79. Зайцев, В. В. Суда-газовозы / В. В. Зайцев, Ю. Н. Коробанов. – Л. : Судостроение, 1990. – 304 с.

80. Заниздра, В. С. Мониторинговые исследования радиоактивности в хранилище отходов уранового производства «Днепровское» / В. С. Заниздра, Г. В. Жданова // Зб. наук. пр. СНУЯЕ та П. – Севастополь, 2013. – Вип. 2. – С. 101–110.

81. Зарубина, А. Ю. Реокинетика эпоксицианового олигомера при отверждении в присутствии твердой поверхности наполнителей / А. Ю. Зарубина, А. Н. Трофимов, И. Д. Симонов-Емельянов // Пластические массы. – 2013. – № 7. – С. 32–34.

82. Зеленский, В. Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов : монография / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. – К. : Наук. думка, 1988. – 296 с.

83. Зимин, Д. Е. Изменение прочности силикатных волокон в процессе изготовления композиционных материалов / Д. Е. Зимин, О. С. Татаринцева // Ползуновский вестн. – Барнаул, 2008. – № 3. – С. 217–219.

84. Иваненко, В. И. Сорбционная технология дезактивации радиоактивных отходов с повышенным солесодержанием и перспективы ее

использования для реабилитации загрязненных территорий / В. И. Иваненко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2006. – Т. 14, № 2. – С. 133–139.

85. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. – М. : Университетская книга : Логос, 2008. – 424 с.

86. Иванов, Д. А. Дисперсноупрочненные волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы / Д. А. Иванов, А. И. Ситников, С. Д. Шлянин. – М. : МГИУ, 2010. – 230 с.

87. Изменение структуры и сверхпластичных свойств пластин алюминиевых сплавов воздействием импульсного пучка релятивистских электронов / В. Ф. Клепиков, В. В. Брюховецкий, А. В. Пойда и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2003. – № 6 (84). – С. 86–88.

88. Ильин, А. П. Температура начала окисления нанопорошков алюминия, молибдена, вольфрама, порошка хрома и их смесей / А. П. Ильин, Л. О. Толбанова // Изв. ТПУ. – Томск, 2010. – Т. 317, № 3. – С. 19–24.

89. Ильичева, О. М. О структурном совершенстве природного и синтетического кремнезема / О. М. Ильичева, Н. И. Наумкина, Т. З. Злыгина // Вестн. КГТУ. – Казань, 2010. – № 8. – С. 459–464.

90. Импульсные линейные ускорители нейтронов серии ИЛУ производства института ядерной физики Будкера / А. С. Ауслендер, В. В. Безуглов, А. А. Брызгин и др. // Весн. НГУ. Сер. Физика. – Новосибирск, 2006. – Т. 1, вып. 2. – С. 89–97.

91. Инновационные подходы в решении некоторых экологических проблем при добыче и переработке урановых руд / С. Д. Аронбаев, А. М. Насимов, Д. М. Аронбаев и др. // Материалы IX междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности». В 2 т. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. 2. – С. 188–192.

92. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты: расчетное исследование защитных

свойств / В. И. Бойко, Д. Г. Демянюк, О. Ю. Долматов и др. // Изв. ТПУ. – Томск, 2005. – Т. 308, № 6. – С. 80–83.

93. Исследование демпфирующих свойств электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 1 (446). – С. 56–59.

94. Исследование модификации сополимеров этилена алюмосиланами методом ИК-спектроскопии НПВО / Н. Е. Техишкова, С. Н. Русанова, Ю. С. Тафеева и др. // Вестн. КТУ. – Казань, 2011. – № 19. – С. 112–124.

95. Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 2 (425). – С. 105–109.

96. Інженерне матеріалознавство : підручник для студ. вищ. навч. закл. / О. М. Дубовий, Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева та ін. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с.

97. Інноваційні технології проектування та побудови суден і засобів океанотехніки : монографія / С. С. Рижков, В. С. Блінцов, В. Ф. Квасницький та ін. – Миколаїв : НУК, 2009. – 356 с.

98. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных / К. Дж. Дейт ; пер. с англ. К. А. Птицына. – М. : Вильямс, 2005. – 1328 с.

99. Казарезов, А. Я. Теоретические основы и методы проектирования устройств снижения контактных нагрузок на судовые конструкции при операциях с плавучими объектами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.08.03 / А. Я. Казарезов. – Николаев, 1991. – 358 с.

100. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.

101. Казимиренко, Ю. О. Аналітична модель функціонування судна на основі побудови інформаційної системи завантаженості / Ю. А. Казимиренко //

ScienceRise : науч. Журн. – : науч. Журн. – Х. : Технологический центр, 2018. – № 1 (42). – С. 43–49.

102. Казимиренко, Ю. О. Вплив високотемпературних технологій на структуру порожніх мікросфер / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 5 (33), vol. 1. – Р. 41–49.

103. Казимиренко, Ю. О. Вплив температурних факторів на структурний стан дисперсних скляних наповнювачів систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 137–139.

104. Казимиренко, Ю. А. Оценка технического состояния композитных конструкций судов с использованием информационной обработки данных / Ю. А. Казимиренко // ScienceRise : науч. журн. – Х.: Технологический центр, 2015. – № 8 (18). – С. 31–37.

105. Казимиренко, Ю. А. Оценка технологичности композитных конструкций судов и плавучих сооружений на основе системотехнического подхода / Ю. А. Казимиренко, В. В. Савочкина // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 4/1 (24). – С. 65–68.

106. Казимиренко, Ю. А. Перспективные материалы, способы и технологические направления формирования конструкций биологической защиты судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2017. – № 2. – С. 39–44.

107. Казимиренко, Ю. О. Порошки систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$: переробка відходів і процеси розм'якшення / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 7 (35), vol. 2. – Р. 21–30.

108. Казимиренко Ю. А. Разработка научных основ проектирования и защиты элементов судов и плавучих сооружений для радиоактивных грузов /

Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2018. – № 2. – С. 19–24.

109. Казимиренко, Ю. А. Разработка технологии изолирования танков судов для перевозки горячих наливных грузов: дис. ... канд. техн. наук : 05.08.04 / Ю. А. Казимиренко. – Николаев, 2003. – 195 с.

110. Казимиренко, Ю. А. Структурные особенности формирования металлостеклянных композиционных материалов на основе полых стеклянных микросфер / Ю. А. Казимиренко, Г. В. Волков // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2006. – № 6 (411). – С. 81–86.

111. Казимиренко, Ю. А. Влияние структурной неоднородности полых стеклянных микросфер на физико-химические процессы формирования материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х.: Технологический центр, 2015. – № 6/7 (26). – С. 20–25.

112. Казимиренко, Ю. А. Влияние энергетических параметров радиоактивных грузов на процессы теплопереноса и прочность композитных конструкций плавучих сооружений / Ю. А. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 4 (8). – Vol. 7. – P. 58–63

113. Казимиренко, Ю. А. Закономерности формирования металлостеклянных материалов и покрытий с повышенными рентгенозащитными свойствами / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2013. – № 6/2 (14). – С. 45–55.

114. Казимиренко, Ю. А. Закономерности, процессы и механизмы взаимодействия ионизирующих излучений с металлостеклянными материалами и покрытиями / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 175–178.

115. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка оценки технического состояния конструкций судов и плавучих сооружений / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Управління розвитком складних систем : зб. наук. пр. – К. : КНУБА, 2015. – № 12. – С. 111–117.

116. Казимиренко, Ю. А. Информационная поддержка принятия решений на этапе эксплуатации судовых конструкций / Ю. А. Казимиренко // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2017. – С. 247–250.

117. Казимиренко, Ю. А. Информационные технологии в проектировании радиационно-стойких материалов и конструкций / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 51–52.

118. Казимиренко, Ю. А. Исследование возможности повышения демпфирующих свойств судовых конструкций / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК 2013. – С. 144–146.

119. Казимиренко, Ю. А. Исследование процесса получения псевдосплава из порошков бронзы и баббита / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 5 (404). – С. 29–33.

120. Казимиренко, Ю. А. Влияние радиационного облучения на фазовый состав стеклокомпозитов / Ю. А. Казимиренко, А. А. Жданов // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 30 мая–3 июня 2007 г., Ялта. – К., 2007. – С. 327.

121. Казимиренко, Ю. А. Композиционные материалы для технических и транспортных средств перевозки и хранения опасных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали I міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв, 2010. – С. 142–143.

122. Коррозионная стойкость композиционных покрытий в агрессивных средах / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали

III міжнар. наук.-практ. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 200–202.

123. Казимиренко, Ю. А. Новые металлостеклянные композиционные материалы на основе полых стеклянных микросфер / Ю. А. Казимиренко // 36. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 2 (401). – С. 40–44.

124. Казимиренко, Ю. А. Применение причинно-следственных диаграмм на этапах технологической подготовки судовых композитных конструкций / Ю. А. Казимиренко // Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами». – Миколаїв НУК, 2016. – С. 68–70.

125. Казимиренко, Ю. А. Применение отходов стекольного производства в процессах формирования покрытий для защиты от ионизирующих излучений / Ю. А. Казимиренко // Материалы XXX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности»: 7–10 июня 2010 г., Ялта. – К., 2010. – С. 429–431.

126. Казимиренко, Ю. А. Прогнозирование тепловой безопасности композитных плавучих сооружений, предназначенных для транспортировки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 32–35.

127. Казимиренко, Ю. А. Проектирование и формирование композитных конструкций плавучих сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Матеріали IV всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 22–25.

128. Казимиренко, Ю. А. Решение задач теплообмена при перевозке и хранении радиоактивных грузов на плавучих сооружениях / Ю. А. Казимиренко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – Baki : Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası, 2016. – № 2. – С. 20–26.

129. Казимиренко, Ю. А. Тепловое состояние грузовой зоны плавучих композитных сооружений, предназначенных для хранения радиоактивных

веществ / Ю. А. Казимиренко // Матеріали V всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Підводна техніка і технологія». – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 31–35.

130. Казимиренко, Ю. О. Принципи розробки багатофункціональної установки для термодетонаційних способів формування / Ю. О. Казимиренко // Матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2016. – С. 118–120.

131. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством в проектах создания радиационно-стойких композиционных материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. Вып. Интегрированное стратегическое управление, управление проектами и программами развития предприятий и территорий. – Х. : Технологический центр, 2013. – № 1/10 (61). – С. 171–179.

132. Казимиренко, Ю. А. Управление качеством новых композиционных материалов и покрытий / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова, И. Л. Михелев // Матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв, 2011. – С. 130–132.

133. Казимиренко, Ю. А. Формирование изделий судовой арматуры методом горячего прессования / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф, присвяч. 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова та III Всеукраїнська наук.-техніч. конф. студентів, аспірантів і молодих науковців. – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 46–48.

134. Казимиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2014. – № 6/5 (20). – С. 7–9.

135. Казимиренко, Ю. О. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева // Технологический аудит и резервы производства : науч. журн. – Х. : Технологический центр, 2015. – № 5/7 (25). – С. 24–27.

136. Казимиренко, Ю. О. Металоскляні матеріали і покриття захисних конструкцій суден і плавучих споруд, призначених для перевезення та зберігання радіоактивних вантажів / Ю. О. Казимиренко // Матеріали IX междунар. конф. «Матеріали и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – К. : Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, 2016. – С. 19.

137. Казимиренко, Ю. О. Корозійний захист сталевих цистерн для зберігання рідких радіоактивних речовин на плавучих спорудах / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 7 (11), vol. 2. – P. 16–21.

138. Казимиренко, Ю. О. Моделювання термомеханічних процесів у опромінених композиційних покриттях захисних конструкцій суден і плавучих споруд / Ю. О. Казимиренко // Матеріали III междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы инженерной механики». – О., 2016. – С. 84–87.

139. Казимиренко, Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин / Ю. О. Казимиренко // Вісн. ЛДУ БЖД. – Л. : ЛДУ БЖД, 2013. – № 8. – С. 134–140.

140. Казимиренко, Ю. О. Прогнозування напруженого стану двошарових захисних конструкцій в умовах короткочасних температурних навантажень / Ю. О. Казимиренко, І. А. Колесар // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми інженерної механіки». – О., 2017. – С. 48–51.

141. Казимиренко, Ю. О. Структурна неоднорідність порожніх скляних мікросфер натрійсилікатного складу / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. конф. молодих науковців «Актуальні проблеми сучасної хімії». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 28–30.

142. Казимиренко, Ю. О. Формування клейового з'єднання для виготовлення багатошарових конструкцій суден / Ю. О. Казимиренко // East

European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – № 3 (7), vol. 2. – P. 20–24.

143. Казимиренко, Ю. А. Формирование электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 1 (424). – С. 81–86.

144. Казимиренко, Ю. О. Теоретичне обґрунтування підвищення техніко-економічних і експлуатаційних показників елементів плавучих споруд для радіоактивних вантажів / Ю. О. Казимиренко // East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2018. – № 8 (36), vol. 1. – P. 38–45.

145. Казимиренко, Ю. О. Вплив енергетичних параметрів радіоактивних вантажів на проектування суднових конструкцій біологічного захисту / Ю. О. Казимиренко // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Сучасні технології проектування, побудови та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 62–64.

146. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М. : Metallurgiya, 1976. – 264 с.

147. Карпеченко, А. А. Разработка технологии электродугового напыления композиционных покрытий с использованием порошковых материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / А. А. Карпеченко. – Николаев, 2012. – 158 с.

148. Карлович, И. Я. Геологическое строение и полезные ископаемые Северной Евразии / И. Я. Карлович. – М. : Академ. проект, 2006. – 496 с.

149. Кашка, М. М. Создание регионального центра перегрузки отработанного ядерного топлива на ФГУП «Атомфлот» / М. М. Кашка, А. Н. Абрамов, И. П. Честных // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 2. – С. 72–79.

150. Кирсанов, В. В. Радиационные дефекты и связанные с ними эффекты / В. В. Кирсанов // СОРОСОВСКИЙ образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 10. – С. 88–94.

151. Киселева, Н. Н. Компьютерные информационные ресурсы неорганической химии и материаловедения / Н. Н. Киселева, В. А. Дударев, В. С. Земсков // Успехи химии. – 2010. – № 79 (2). – С. 162–188.

152. Киссам, Б. Пожарная безопасность на судах : пер. с англ. / Б. Киссам. – Л. : Судостроение, 1985. – 407 с.

153. Кириченко, О. П. Специфіка планування та організації інноваційної діяльності на суднобудівних підприємствах / О. П. Кириченко // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 6. – С. 60–68.

154. Клименко, В. П. Современные особенности развития систем компьютерной алгебры / В. П. Клименко, А. Л. Ляхов, Д. Н. Гвоздик // Математичні машини і системи. – 2011. – № 2. – С. 3–16.

155. Князин, Н. Б. Оксифторидные боросиликатные стекла / Н. Б. Князин // Вестн. ГИУА. Сер. Химические и экологические технологии. – Саранск, 2012. – Вып. 15, № 2. – С. 1–23.

156. Козляков, В. В. Анализ унифицированной методики оценки усталостной долговечности корпусов транспортных судов / В. В. Козляков, Н. Н. Сивобородченко // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – № 1. – С. 25–38.

157. Козырев, В. К. Грузоведение : учебник для ВУЗов / В. К. Козырев. – О. : Феникс ; М. : РКонсульт, 2005. – 358 с.

158. Коломейченко, А. В. Исследование топографии поверхности покрытия, сформированного МДО / А. В. Коломейченко // Вестн. ОрелГАУ. – Орел, 2011. – № 2 (29). – С. 101–103.

159. Композиционные материалы. В 8 т. Т. 1. Поверхности раздела в металлических композитах / под ред. А. Меткалфа ; пер. с англ. К. И. Портного. – М. : Мир, 1978. – 438 с.

160. Композиционные материалы для защиты от ионизирующих излучений / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат и др. // Материалы XXIX междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 1–5 июня 2009 г., Ялта. – К., 2009. – С. 339–341.

161. Кондратьева, В. В. Рентгенометрический определитель боратов / В. В. Кондратьева. – Л. : Недра, 1969. – 248 с.
162. Конструювання CNG-модуля для транспортування природного газу суднами-контейнеровозами / Є. І. Крижанівський, В. І. Артим, О. М. Мандрик, М. М. Савицький // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 1 (17). – С. 28–34.
163. Королев, В. И. Упругопластические деформации оболочек / В. И. Королев. – М. : Машиностроение, 1971. – 303 с.
164. Костогрыз, К. П. Полые микросферы. Получение, свойства и использование (Обзор) / К. П. Костогрыз // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 5. – С. 60–70.
165. Котращук, Г. К. Нові ефекти взаємодії рентгенівського випромінювання з ультрадисперсними середовищами / Ю. О. Крикун, В. І. Ткаченко // Укр. реферативний журн. – 1995. – № 4. – С. 366–367.
166. Кржечковский, П. Г. Температурные усадочные напряжения и деформации в композитах, наполненных стеклянными микросферами / П. Г. Кржечковский, В. А. Наumenко, В. И. Павлищев // Технология судостроения и сварочного производства в судостроении : сб. науч. тр. – Николаев, 1976. – С. 70–77.
167. Кулеш, В. А. Система DEFHULL – инновационная технология управления технической эксплуатацией флота [Электронный ресурс] / В. А. Кулеш, О. Э. Суров, А. В. Житников // Вестн. ДВГТУ (электрон. изд.). – Владивосток, 2010. – № 3 (5). – Режим доступа : <http://science.ru/vestnik/2010/3/>.
168. Кулинич, А. А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» / А. А. Кулинич // Программные продукты системы. – 2002. – № 3. – С. 25–28.
169. Кунаев, В. С. Экспериментальное исследование демпфирующих свойств бетона при сухом трении / В. С. Кунаев, П. Г. Потапов, Н. А. Псурцева // Коммунальное хозяйство городов. – 2015. – С. 597–605.

170. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

171. Лазарев, А. Н. Колебательные спектры и строение силикатов / А. Н. Лазарев. – Л. : Наука, 1968. – 347 с.

172. Лазарев, В. Н. Проектирование конструкций судового корпуса и вопросы прочности судов : учебник / В. Н. Лазарев, Н. В. Юношева. – Л. : Судостроение, 1989. – 320 с.

173. Лилеев, А. С. База данных микроструктур металлов: классификация микроструктур и аппаратно-программное обеспечение / А. С. Лилеев, Е. С. Милютин, В. Л. Столяров // Черные металлы. – 2007. – № 2. – С. 6–10.

174. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств при механическом легировании двойных алюминиевых композиций / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Наука и техника. – 2015. – № 1. – С. 3–12.

175. Лунев, В. М. Адгезионные характеристики и методы их измерения / В. М. Лунев, О. В. Немашкало / ФІП: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Науковий фізико-технічний центр МОНУ. – 2010. – Т. 8. – № 1. – С. 64–71.

176. Лясникова, А. В. Технология создания многофункциональных композитных покрытий / А. В. Лясникова, О. А. Дударева. – М. : Спецкнига, 2012. – 301 с.

177. Ма, Б. М. Материалы ядерных энергетических установок / Б. М. Ма ; пер. с англ. под ред. Ю. Ф. Чернилина. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.

178. Матвеев, А. В. Практикум по дозиметрии и радиационной безопасности / А. В. Матвеев, В. И. Козаченко, В. П. Котов. – СПб. : ГУАП, 2006. – 88 с.

179. Мартюшев, Н. В. Программные средства для автоматического металлографического анализа / Н. В. Мартюшев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 1–6.

180. Медведев, В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография / В.В. Медведев. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.

181. Медведев, Е. Ф. Водородная проницаемость силикатных и боросиликатных стекол. Основы феноменологии, золь-гель синтез и анализ компонентов шихт : монография / Е. Ф. Медведев. – Саров : ВНШЭФ, 2009. – 364 с.

182. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. Консолидированный текст. – Лондон : ИМО, 2001.

183. Мелконян, Р. Г. Аморфные горные породы – новое сырье для стекловарения и строительных материалов / Р. Г. Мелконян (под общ. ред. И. И. Мазура). – М. : «НИА Природа», 2002. – 388 с.

184. Меньшиков, В. И. Модель и механизмы функционирования системы управления безопасной эксплуатации судов / В. И. Меньшиков, Ф. Д. Кукин // Вестн. МГТУ. – Мурманск, 2002. – Т. 5, № 2. – С. 171–176.

185. Методология стратегического планирования при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии / А. А. Саркисов, В. С. Антипов, В. Л. Высоцкий [и др.] // Збірник наук. праць СНУЯЕтаП. – Севастополь – 2013. – № 8. – С. 44–54.

186. Методы исследования материалов : монография / А. В. Плохов, Л. И. Тушинский, В. И. Синдеев [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

187. Методы расчета сопряженных задач теплообмена : монография / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, В. В. Костюк. – М. : Машиностроение, 1983. – 232 с.

188. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія процесів формування структури і властивостей порошкових і композиційних матеріалів» / А. І. Івлієв, Ю. О. Казимиренко, М. Ю. Комаров. – Миколаїв : НУК, 2005. – 36 с.

189. Микитенко, В. А. Анализ состояния добывающих отраслей Украины и инновационный путь их развития / В. А. Микитенко // Проблемы науки. – 2003. – № 9. – С. 17–19.
190. Микоша, Н. Н. Имитационная модель транспортирования грузов трамповым судном / Н. Н. Микоша // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 1 (424). – С. 61–65.
191. Милинчук, В. К. Радиационная химия / В. К. Милинчук // СОРОСОВСКИЙ образовательный журн. – 2000. – Т. 6, № 4. – С. 24–29.
192. Модели и механизмы управления проектами морских перевозок опасных грузов / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко [и др.] // Материалы науч.-практ. конф. «Проблемы развития транспортной логистики». – О. : ОНМУ, 2012. – С. 105–108.
193. Модульне сховище для довгострокового контрольованого зберігання радіоактивних відходів низької та середньої активності / А. Ю. Андріанов, Є.О. Джур, Ю.О. Крикун [та ін.] // Наука та інновації. – 2006. – № 5. – С. 53 – 64.
194. Морские инженерные сооружения : учебник для вузов / Р. В. Борисов, В. Г. Макаров, В. В. Макаров и др. – СПб. : Судостроение, 2003. – 535 с.
195. Москаев, В. А. Методика оценки безопасности эксплуатации авиационной техники в послегарантийный период / В. А. Москаев // Изв. Самар. науч. центра РАН. – Самара, 2012. – Т. 14, № 4 (2). – С. 490–496.
196. Москаленко, М. А. Основы обеспечения конструктивной безопасности морских судов : монография / М. А. Москаленко. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – 162 с.
197. М. Зандстра. РНР-объекты, шаблоны и методики программирования / М. Зандстра ; пер. с англ. С. Н. Тригуб. – М. : Вильямс, 2011. – 528 с.
198. Мюллер, Р. Л. Электропроводность стеклообразных веществ / Р. Л. Мюллер. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1968. – 251 с.

199. Мясоедова, Г. В. Сорбционное концентрирование и разделение радионуклидов с использованием комплексообразующих сорбентов / Г. В. Мясоедова // Российский хим. журн. – 2005. – Т. XLIX, № 2. – С. 72–75.

200. Наноструктурные материалы в ядерной технике / Н. А. Азаренков, В. Н. Воеводин, В. Г. Кириченко и др. // Вісн. Харківського університету (ХНУ). – Х., 2010. – № 887. – С. 4–24.

201. Наумов, В. А. Контейнерное хранение проблемных видов отработавшего ядерного топлива судовых реакторных установок: аспекты тепловой безопасности / В. А. Наумов, С. А. Гусак // Вестн. МГТУ. – М., 2009. – Т. 12, № 4. – С. 724–730.

202. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / В. В. Нащокин. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1975. – 497 с.

203. Нейтронно-защитные свойства гидридов титана и циркония с повышенным содержанием водорода / Н. И. Власенко, М. Н. Коротенко, С. Л. Литвиненко и др. // Ядерна і радіаційна безпека. – 2009. – С. 33–35.

204. Неклюдов, И. М. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение : монография / И. М. Неклюдов, Н. В. Камышаченко, А. Н. Тихонов. – Белгород : Изд-во БелГУ, 1998. – 378 с.

205. Некрасов, В. А. Модель функционирования судна, работающего в режиме последовательных рейсов / В. А. Некрасов, О. В. Панкова // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 1 (424). – С. 57–69.

206. Нестеренко, В. Б. Оценка технического состояния судовых конструкций длительной эксплуатации / В. Б. Нестеренко, О. П. Завальнюк // Наук. вісн. ХДМА. – Херсон, 2012. – № 1 (6). – С. 102–110.

207. Никитин, А. М. Управление технической эксплуатацией судов / А. М. Никитин. – СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2006. – 360 с.

208. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 116 с.

209. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и окружающей среды. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности, № TS-R-1, 2009. – 175 с.

210. Ожован, М. И. Применение стекол при иммобилизации радиоактивных отходов / М. И. Ожован, П. П. Полуэктов // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 112–115.

211. Онищук, В. И. Принципы формирования структуры и свойства радиационно-защитного композиционного материала на основе ультрадисперсной стекольной суспензии / В. И. Онищук, В. И. Павленко, Н. А. Четвериков // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Физико-химические проблемы в технологии тугоплавких неметаллических материалов». – Х. : Каравелла, 2011. – С. 454–459.

212. Определение удельной активности металлических РАО в контейнере / А. Б. Гелбутовский, А. А. Герасименко, А. В. Трошев и др. // Безопасность окружающей среды. – 2009. – № 2. – С. 68–71.

213. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1981. – 392 с.

214. Осипов, Г. С. Теоретические основы построения интеллектуальных систем управления загрузкой судна : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.16 / Г. С. Осипов. – СПб. : ИТРАН, 1997. – 206 с.

215. Основы теории вероятности и математической статистики : учебник / К. В. Болдин, В. Н. Башлыков, А. В. Рукосуев и др. – М. : Финита : НОУВПО «МПСИ», 2010. – 488 с.

216. Основы технологии судостроения : учебник для вузов / В. Л. Александров, Г. В. Бавыкин, В. П. Доброленский и др. – СПб. : Судостроение, 1995. – 400 с.

217. Особенности утилизации судов атомного технологического обслуживания / В. А. Анитропов, Н. И. Александров, А. Я. Розинов и др. // Судостроение. – 2004. – № 3. – С. 54–58.

218. Особливості структуроутворення при спіканні багатокомпонентних залізоскляних композитів / Г. А. Баглюк, Г. А. Максимова, В. Я. Куровський [та ін.] // *Металознавство та обробка металів*. – 2016. – № 4. – С. 21–28.

219. Острик, А. В. Термомеханическое действие рентгеновского излучения на многослойные преграды в воздухе : монография / А. В. Острик. – М. : НТЦ «Информтехника», 2003. – 160 с.

220. Отходы промышленности – источник исходных материалов для порошковой металлургии / Л. А. Рябичева, Ю. Н. Никитин, Н. В. Белошицкий и др. // *MTM 07 Conf. Wastes of industry proceedings*. – Sofia, 2007. – P. 434–438.

221. Оценка влияния радиоактивных отходов атомного флота на радиационную обстановку в территориальных водах России / Н. И. Кваша, С. А. Лавковский, В. И. Кобзев и др. // *Российский хим. журн.* – 2001. – Т. XLV, № 5–6. – С. 142–148.

222. Оценка выхода техногенных радионуклидов в морскую воду из затопленных ядерных и радиационно-опасных объектов в результате коррозии защитных барьеров в Арктическом и Дальневосточном регионах / С. В. Антипов, В. Л. Высоцкий, Ю. В. Сивинцев. – М. : ИБРАЭ РАИ, 2010. – 352 с.

223. Ошуркова, Н. С. Влияние пористости газонаполненного материала на модуль упругости / Н. С. Ошуркова // *Зб. наук. пр. УДМТУ*. – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – № 4 (370). – С. 30–37.

224. Павленко, В. И. Основные аспекты разработки современных радиационно-защитных конструкционных металлокомпозитных материалов / В. И. Павленко, П. В. Матюхин // *Современные наукоемкие технологии*. – 2005. – № 6. – С. 85–86.

225. Павлов, И. Д. Системотехническая оценка комплексной технологичности проектных решений строительных конструкций бионического типа / И. Д. Павлов, М. А. Каплуновская // *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Д. : Приднестровская гос. акад. строительства и архитектуры*, 2009. – Вып. 50. – С. 232–236.

226. Павлушкин, Н. М. Стекло : справочник / под ред. Н. М. Павлушкина. – М. : Стройиздат, 1976. – С. 324–345.

227. Панкова, О. В. Особенности эксплуатации судов в режиме последовательных рейсов / О. В. Панкова, В. А. Некрасов // Наук. вісн. ХДМІ. – Херсон : Вид-во ХДМІ, 2010. – № 1 (2). – С. 50–55.

228. Пат. WO 2013100796A2 Российская Федерация, МПК⁷ B63B5/16. Способ постройки морского средства преимущественно речного или морского судна / Цырлин В. М.; заявитель и патентообладатель Рахманов Е. В. – № 2012/00093 ; заявл. 13.02.2012 ; опубл. 04.07.2013, Бюл. № 8.

229. Пат. 66841 Российская Федерация, МПК⁷ G21F7. Модуль биологической защиты / Степанов Е. М., Гавриш Г. П., Герасимов В. Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унитарное предприятие Санкт-Петербургский науч.-исслед. и проектно-конструкторский ин-т «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ». – № 2005101770 ; заявл. 13.04.2007 ; опубл. 28.12.2007, Бюл. № 12.

230. Пат. 2315379 Российская Федерация МПК⁷ G21 F5/005, G21 F5/12. Контейнер сталежелезобетонный герметичный для хранения, транспортировки и захоронения радиоактивных отходов и способ изготовления / Анитропов В. А., Мазокин В. А., Митрофанов С. А. и др. ; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения». – № 2006117664/06 ; заявл. 22.05.2006 ; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2.

231. Способ получения демпфирующего материала на основе никеля: А.с. 1687374. СССР, МКИ В 22 F 3/10, С 22 С 1/08. / В.И. Костиков, В.Ю. Лопатин, С.В. Винокуров, А.А. Таранцев, В.Н. Постнов, В.Г. Чернов (СССР). – 4655292/02; Заявлено 27.02.89; Опубл. 30.10.91; Бюл. № 40. – 2с.

232. Пат. 4435 Україна, МКІ В22F7/02, В22F3/10. Спосіб отримання високощільного пористого матеріалу з порошків кольорових сплавів / Ю. О. Казимиренко, О. О. Сушко (Україна). – Заявл. 11.05.2004 ; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1.

233. Пат. 90580 Україна, МПК C23C4/00 (2014), C 4/04 (2006). Спосіб нанесення електродугових покриттів / Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедєва, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – u № 05616 2013 ; заявл. 30.04.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

234. Пат. 97311 Україна, МПК B22F3/14. Спосіб формування порошкового покриття на поверхні виробу / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – u 2014 09819 МПК B22F3/14 ; заявл. 08.09.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

235. Пат. 99331 Україна, МПК B22F3/14. Установка для виготовлення порошкових виробів / Ю. О. Казимиренко ; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – u 2014 14197 МПК B22F3/14 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

236. Пат. 111654 Україна, МПК B63B3/00. Спосіб захисту конструкцій суден і плавучих споруд від дії іонізуючих випромінювань / Ю. О. Казимиренко; заявник і патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № a2014 09822 ; заявл. 10.02.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

237. Пат. 74476 Україна, МПК (2004) C22C1/08, B22F3/16. Спосіб одержання пористого матеріалу / Ю. О. Казимиренко. – № a 2004032111 ; заявл. 23.03.2004 ; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

238. Пат. 30382 Україна, МПК⁽⁷⁾ C23C 4/00, C23C 4/04, C23C4/06, C23C 4/10, C23C 4/12, B05B 7/24. Пристрій для електродугового напилення / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. М. Шумов. – Заявл. 29.10.2007 ; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.

239. Пат. 2527251 Российская Федерация, МПК¹³ F16M9/00, G01B5/25, B63B9/06. Способ монтажа зонального блока в отсеке судна / В. Н. Петров. – № 2013134092/11 ; заявл. 19.07.2013 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 14.

240. Пат. 2354964 Российская Федерация, МПК¹¹ G01N29/09. Способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, использующий результаты неразрушающего контроля по обнаружению дефектов типа расслоения / Францев М. Э, Сорокин А. К. ; заявитель и патентообладатель М. Э Францев, А. К. Сорокин. – № 2007138064/28 ; заявл. 16.10.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 8.

241. Пат. 2406637 Российская Федерация, МПК¹³ B63B9/00. Способ оценки технического состояния корпуса судна / Петрова Н. Е, Ефремов Л. В., Баева Л. С. ; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. учреждение высшего профессионального образования «Мурманский государственный технический университет». – № 2009140857/11 ; заявл. 03.11.2009; опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35.

242. Пат. 2475404 Российская Федерация, МПК¹³ B63B9/00. Способ оценки технического состояния корпуса / Казанов Г. Т. ; заявитель и патентообладатель Казанов Г. Т. – № 2011146274/11 ; заявл. 15.11.2011 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

243. Пат. 95678 Україна, МПК⁷ C21D 8/00, C22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, Н. Ю. Лебедєва, Ю. О. Казимиренко та ін. – Заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

244. Перевозка ОЯТ морским транспортом / М. В. Барышников, А. В. Худяков, В. М. Овсянников и др. // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 98–105.

245. Перрен, А. А. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении / А. А. Перрен, А. М. Баганик // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 3 (53). – С. 24–26.

246. Пикаев, А. К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы / А. К. Пикаев. – М. : Наука, 1985. – 375 с.

247. Пирс, А. Д. Колебания сферических включений в упругих твердых телах / А. Д. Пирс // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 1. – С. 9–22.

248. Писаренко, Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов : справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1971. – 375 с.

249. Письменецкий, С. А. Спектральные характеристики отработанного ядерного топлива ВВЭР-1000, предназначенного для сухого хранения / С. А. Письменецкий, В. Б. Пышкин, В. Г. Рудычев и др. // Вісн. ХДУ Харківського університету. Сер. фізична «Ядра, частки, поля». – Х., 2007. – № 784, вип. 4 (36). – С. 117–120.

250. Пичугин, А. Д. О развитии серобетонного судостроения / А. Д. Пичугин // Вестн. АГТУ. – Астрахань, 2007. – № 2 (37). – С. 114–117.

251. Плавающая емкость для сбора ЖРО / О. М. Салыкин, Н. Н. Куликов, С. И. Матвиенко, А. А. Данилин и др. // Труды ОАО «НИПТБ Онега». – Северодвинск, 2012. – Вып. 7. – С. 35–39. – (Сер. Конструкторские разработки).

252. Повышение качества продукции посредством использования причинно-следственной диаграммы в комплексе с информационной системой управления полупроводниковым производством / Д. Д. Зыков, В. В. Матвеев, К. А. Нечаев и др. // Докл. ТУСУР. – Томск, 2013. – № 4 (30). – С. 172–176.

253. Погребняк, А. Д. Результаты воздействия интенсивного импульсного ионного пучка на свойства углеродистой нержавеющей стали / А. Д. Погребняк, Ю. Ф. Иванов, А. Г. Лебедь // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22. – № 10. – С. 18–24.

254. Погребняк, А. Д. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц / А. Д. Погребняк, О. П. Кульментьева // ФПФИПРСЕ. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 108–136.

255. Подводные захоронения радиоактивных отходов в Арктике. Какова реальная угроза? / В. В. Кобылянский, А. Ю. Казеннов, О. Е. Кикнадзе // Материалы II всерос. науч.-техн. конф. «Научное и научно-техническое

обеспечение исследований и освоение шельфа Северного Ледовитого океана». – Новосибирск, 2012. – С. 27–46.

256. Полиметрические системы: теория и практика : монография / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко и др. – Николаев : Прокопчук Т. Ю., 2012. – 380 с.

257. Получение высокопрочных композиционных материалов путем плазменного электроискрового спекания порошков $\text{Fe}+\text{Ti}+\text{B}_4\text{C}$, синтезированных методом электроимпульсной обработки / М. С. Юрова, Е. А. Олевский, Е. Г. Григорьев и др. // Вектор науки ТГУ. – Тольятти, 2013. – № 6. – С. 297–300.

258. Получение и исследование композиционных материалов на основе алюминия методом порошковой металлургии / Дж. Б. Аминов, М. Б. Акрамов, Б. Аминов и др. // Докл. акад. наук Республики Таджикистан. – Душанбе, 2013. – Т. 56, № 2. – С. 136–138.

259. Получение металлических порошков путем механического измельчения стружки и лома, изготовления пористых изделий электроимпульсным методом [Электронный ресурс] / А. А. Краснов, К. В. Костров, А. Ю. Силин и др. // Цветные металлы. – 2010. – № 1. – Режим доступа : www.rudmet.ru/publicinghouse.

260. Полуэктов, П. П. Научные подходы и технические решения в области обращения с жидкими высокоактивными отходами / П. П. Полуэктов, Л. П. Суханов, Ю. И. Матюнин // Российский хим. журн. – 2005. – Т. XLIX, № 4. – С. 29–41.

261. Постан, М.Я. Моделирование работы двухмодальной контейнерной системы доставки груза в условиях неопределенности и риска / М. Я. Постан, И. В. Савельева // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2012. – Вип. 19. – С. 55–73.

262. Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр судноплавства України. В 4 т. – К. : Регістр судноплавства України, 2004. – Т. 1. – 69 с. ; Т. 2. – 318 с. ; Т. 3. – 204 с. ; Т. 4. – 261 с.

263. Преснов, В. А. Керамика и спай с металлами в технике / В. А. Преснов, М. Л. Любимов, В. В. Строганов. – М. : Атомиздат, 1969. – 232 с.

264. Применение методов системного анализа и когнитивного моделирования в задачах перевозки опасных грузов водным транспортом / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. «Современные порты – проблемы и решения». – О., 2012. – С. 238–240.

265. Проблемно-ориентированная фактографическая база данных по нанокompозитам [Электронный ресурс] / Е. А. Василенко, Т. В. Мещерякова, Ф. В. Бацылев и др. // Информ. ресурсы России. – 2009. – № 4. – Режим доступа : aselibrary.ru/index.html.

266. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков : монография / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий, В. Н. Коннов и др. – Николаев : НУК, 2008. – 612 с.

267. Проектная оценка технического состояния судовых конструкций с использованием информационно-поисковых систем / Ю. А. Казимиренко, Т. А. Фарионова, С. А. Казимиренко и др. // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер. Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 3 (1046) – С. 60–64.

268. Пронкин, Н. С. Классификация водоемов-хранилищ жидких радиоактивных отходов по опасности / Н. С. Пронкин, Р. Б. Шарафутдинов, О. М. Ковалевич // Атомная энергия. – 2003. – Т. 94, № 6. – С. 449–457.

269. Прудникова, В. П. Контейнер как средство перевозки грузов : учебное пособие для вузов / В. П. Прудникова. – Владивосток : МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2009. – 29 с.

270. Пышнев, С. М. Классификация технических объектов для использования подводных аппаратов в шельфовой зоне / С. М. Пышнев, И. Е. Данильченко, В. П. Сухоносков // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2008. – № 1. – С. 69–75.

271. Прямые и обратные задачи теплопереноса и их роль в исследовании тепловых процессов в объектах энергетики / Ю. М. Мацевитый, С. В. Алехина, В. Н. Голощапов и др. // Материалы Минского междунар. форума по тепломассообмену. – Минск, 2012. – Т. 1, ч. 1. – С. 308–312.

272. Радиационная стойкость некоторых полимеров и эпоксидных клеев / С. Н. Гладких, В. В. Голиков, Г. Д. Кекелидзе и др. – Дубна : Изд. отдел Объед. ин-та ядерн. исслед., 2001. – 6 с.

273. Радиационная стойкость пористого кремния / В. В. Ушаков, Н. Н. Дравин, Н. Н. Мельник и др. // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 9. – С. 1126–1129.

274. Радиационное повреждение пленок C_{60} при дозовых нагрузениях, создаваемых электронным облучением / О. П. Дмитриенко, Н. П. Кулиш, Ю. И. Прилуцкий и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 48–52.

275. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы / Е. В. Королев, А. П. Пронин, Ю. М. Баженов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Палеотип, 2006. – 272 с.

276. Радиационно-защитные свойства полимерсерного бетона / Ю. И. Орловский, А. П. Пронин, Н. Н. Жук и др. // Строительство : изв. ВУЗов. – 2004. – № 9. – С. 21–26.

277. Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України : монографія / І. М. Вішневський, Г. П. Гайдар, О. В. Коваленко та ін. – К. : Ін-т ядерних досліджень, 2014. – 176 с.

278. Радиационные центры окраски в активированных стеклах модельной системы $K_2O-Al_2O_3-PbO-P_2O_5$ / Т. В. Бочарова, Д. С. Сысоев, К. В. Щербаков и др. // Изв.е СПб ГТИ (ТУ). – СПб., 2015. – № 28. – С. 14–19.

279. Разработка алгоритма работы системы контроля и управления процессом контактной точечной сварки / Е. В. Шаповалов, Р. М. Галаган, Ф. С. Клицар и др. // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. – К., 2012. – Вип. 44. – С. 49–57.

280. Разработка установки кондиционирования ЖРО, образующихся на нефтедобывающих морских платформах и терминалах / Н. И. Александров, П. Л. Ляшин, В. В. Петухов и др. // Судостроение. – 2013. – № 2. – С. 61–64.

281. Рахимова, Н. Р. Композиционные вяжущие для иммобилизации токсичных и радиоактивных отходов / Н. Х. Рахимова, Р. З. Рахимов, О. В. Стоянов // Вестник КГТУ: Сер.: Строительство и архитектура. – Казань, 2013. – С. 175–182.

282. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках / С. А. Атрошенко, С. И. Кривошеев, А. А. Уткин и др. // Журн. техн. физики. – 2002. – Т. 72, вып. 12. – С. 54–58.

283. Расчет эффективного коэффициента Грюнейзена гетерогенного материала с полидисперсным полым сферическим наполнителем / В. П. Ефремов, А. В. Острик, А. И. Потапенко и др. // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 8. – С. 67–71.

284. Рашковский, А. С. Инновационные технологии в докостроении / А. С. Рашковский, Н. Г. Слуцкий // Вісн. НУК (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2010. – № 1.

285. Рашковский, А. С. Совершенствование расчета прочности железобетонного понтона композитного плавучего дока / А. С. Рашковский, Л. И. Коростылев, Д. В. Ермаков // Вісник НУК (електронне фахове видання). – 2014. – № 5. – С. 27 – 36.

286. Редько, О. І. Дослідження пружних властивостей та деформацій «захисне покриття – металева основа» / О. І. Редько // Вісн. Укр. матеріалознавчого товариства. – 2014. – Вип. 7. – С. 141–149.

287. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Руководство по испытаниям и критериям. (ST/SG/AC.10/1/Rev.4) ООН. – Нью-Йорк ; Женева, 2003.

288. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Типовые правила (ч. I). (ST/SG/AC.10/1/Rev.14) ООН. – Нью-Йорк ; Женева, 2005.

289. Рудницкий, А. В. Моделирование функционирования судового оборудования с позиции надежности (безотказности) / А. В. Рудницкий, В.И. Рудницкий // Вестник АГТУ. Сер. : Морская техника и технология. – Астрахань. – 2011. – № 1. – С. 63–66.

290. Румянцев, С. В. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / С. В. Румянцев. – М. : Наука, 1982. – 289 с.

291. Рыжаков, В. Н. Дезактивация радиоактивных нефтешламов / В. Н. Рыжаков. – СПб. : Недра, 2003. – 280 с.

292. Рюткянен, Е. А. Модификация поверхности твердых дисперсных наполнителей полимерными пленками : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.06 / Е. А. Рюткянен. – СПб., 2012. – 106 с.

293. Саламатников, М. С. Разработка устройства плакирования порошков стеклянных микросфер в условиях комбинированного перемешивания частиц / М. С. Саламатников // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. – Тула, 2013. – Вып. 11. – С. 146–151.

294. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 271 с.

295. Свинцевомістке скловолокно для радіаційнозахисних композитів / Л. Р. Вишняков, Т. В. Грудіна, В. Д. Горобинська та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 1. – С. 97–100.

296. Своллоу, А. Радиационная химия органических соединений / А. Своллоу ; пер. с англ. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. – 396 с.

297. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.

298. Сеттер, Р. В. Изучаем Java на примерах и задачах / Р. В. Сеттер. – М. : Наука и техника, 2016. – 240 с.

299. Синев, Л. С. Особенности применения электротехнического соединения кремния со стеклом в микросистемной технике / Л. С. Синев //

Инженерный вестник: электронный научный журнал. – 2014. – № 8. – С. 501–509 // Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/722572.html>

300. Снопков, В. И. Перевозка грузов морем : справ. пособие / В. И. Снопков. – Изд. 2-е. – М. : Транспорт, 1986. – 312 с.

301. Соломонюк, Н. С. Удосконалення конструкції підводного апарату блоками плавучості підвищеної теплостійкості : дис. ... канд. техн. наук : 05.08.03 / Н. С. Соломонюк. – Миколаїв, 2012. – 226 с.

302. Стальниченко, О. И. Материаловедение и технология металлов : учебник для вузов / О. И. Стальниченко. – К. : Вища шк., 1986. – 285 с.

303. Стекло и стекловарение / под ред. И. И. Китайгородского. – М. : Гос. изд-во лит-ры по строит. материалам, 1950. – 415 с.

304. Строительная механика корабля и основы теории упругости / В. П. Суслов, Ю. П. Качанов, В. Н. Спихтаренко. – Л. : Судостроение, 1972. – 720 с.

305. Степанчук, А. Н. Технология порошковой металлургии / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко – Киев : Выща школа, 1989. – 415 с.

306. Структура и свойства металлостеклянных материалов на основе порошка карбонильного железа / Е. С. Беляев, Т. М. Колосова, В. А. Алексеев, Н. В. Макаров, Ю. А. Гетмановский // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 22–27.

307. Суржиков, А. П. Дилатометрические исследования процессов спекания композиционной керамики из ультрадисперсных порошков системы $ZrO_2(Y)-Al_2O_3$ при различных температурно-временных режимах обжига / А. П. Суржиков, Т. С. Трангульян, С. А. Гингазов // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4 (16). – С. 93–97.

308. Сутырин, В. И. Система интегрированной информационной поддержки принятия решений при проектировании корпусных конструкций на основе методов структуризации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.08.01; 05.13.01 / В. И. Сутырин. – Н. Новгород, 2009. – 369 с.

309. Суханов, П. П. О механизме структурирования олигоэфиракрилат-сульфидных композиций в присутствии алкисилана АГМ-9 / П. П. Суханов,

Л. Р. Джанбекова, Е. П. Суханов // Вестн. Казанского технологического ун-та. – Казань, 2006. – № 4. – С. 211–222.

310. Схема классификации радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности захоронения / Н. И. Проскура, Л. И. Зинкевич, Р. М. Алексеева и др. // Ядерна та радіаційна безпека. – 2014. – № 2 (62). – С. 37–43.

311. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров при ремонтных работах / А. А. Тарасенко. – М. : Недра, 1999. – 271 с.

312. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных смесей на основе железа : монография / В. Н. Кокорин, А. И. Рудской, В. И. Филимонов и др. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 236 с.

313. Терещенко, Н. Н. Барьерная роль Черного моря в отношении $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr - основных техногенных дозообразующих радионуклидов в постчернобыльский период / Н. Н. Терещенко, Г. Г. Поликарпов, Т. А. Крылова // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2012. – № 7. – С. 243–250.

314. Технология судостроительных материалов / В. И. Васильев, А. Д. Гармашев, А. Д. Озерский и др. – Л. : Судостроение, 1990. – 301 с.

315. Термостойкость облученных металлостеклянных покрытий / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Матеріали II всеукр. наук.-техн. конф. студ., асп. і молодих науковців «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 82–83.

316. Технология упаковочного производства / Т. И. Аксенова, В. В. Аганьев, Н. М. Дворецкая и др. ; под ред. Г. Розанцева. – М. : Колос, 2002. – 184 с.

317. Тимошенко, С. П. Теория упругости : пер. с англ. / сост.: С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – С. 435–488.

318. Торопов, Н. А. Диаграммы состояния силикатных систем : справочник. Вып. 1. Двойные диаграммы / Н. А. Торопов, В. П. Борзаковский, В. В. Лапин. – М. ; Л. : Наука, 1965. – 545 с.

319. Транспортный пакет для перевозки упаковок ТУК-19 / О. П. Баринков, Б. А. Канашов, К. В. Голубкин и др. // Безопасность окружающей среды. – 2009. – № 1. – С. 42–43.

320. Тригуб, С. Н. Оценка показателей пожарной опасности полимерных композиционных материалов в судостроении / С. Н. Тригуб // Наук. вісн. ХДМА. – Херсон, 2012. – № 1 (6). – С. 322–331.

321. Тряскин, В. Н. Структура модели данных в автоматизированных системах для оценки технического состояния корпуса судна / В. Н. Тряскин, Ханг Минь Шон // Вестн. АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2012. – № 1. – С. 41–45.

322. Универсальный крупнотоннажный транспортный контейнер УКТН-24000 для низкоактивных РАО / Д. Е. Андреев, А. Б. Гелбутовский, А. В. Трошев и др. // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность ядерных технологий: обеспечение безопасности при транспортировании ядерных материалов и при обращении с ядерными отходами». – СПб., 2006. – С. 19–30.

323. Управление утилизацией радиоактивных отходов в Олкиоуото (Teollisuuden Voima Oy) [Электронный ресурс] : пер с. финск. // Режим доступа : www.tvons.fi.

324. Фарионова, Т. А. Выбор состава композиционных материалов и покрытий технических средств для перевозки опасных грузов на основе экспертных оценок / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вісн. НУК (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2010. – № 5.

325. Фарионова, Т. А. Информационно-поисковые системы для проектирования и оценки технического состояния композитных конструкций судов / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2015. – С. 31–35.

326. Фарионова, Т. А. Когнитивное моделирование в проектировании композиционных материалов и покрытий / Т. А. Фарионова,

Ю. А. Казимиренко // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. Вып. Интегрированное стратегическое управление, управление проектами и программами развития предприятий и территорий. – Х. : Технологический центр, 2011. – № 1/6 (49). – С. 36–39.

327. Фарионова, Т. А. Механизмы управления свойствами защитных конструкций технических средств для перевозки опасных грузов / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. Вып. Интегрированное стратегическое управление проектами и программами развития предприятий и территорий. – Х. : Технологический центр, 2012. – № 1/11 (55). – С. 35–37.

328. Фарионова, Т. А. Применение метода анализа иерархий в задачах проектирования композиционных материалов / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Вестн. ХНТУ. – Херсон, 2009. – № 34. – С. 373–377.

329. Фарионова, Т. А. Системный подход к управлению качеством на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации судовых конструкций / Т. А. Фарионова, Ю. А. Казимиренко // Матеріали ІХ міжнар. наук.-практ. конф. «Управління проектами: стан та перспективи». – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 301–304.

330. Фізико-хімічні системи, фазові рівноваги, термодинаміка, ресурсо- та енергозбереження в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник. Ч. 2 / О. Ю. Федоренко та ін. ; ред. М. І. Рищенко. – Х. : ХПІ, 2015. – 336 с.

331. Федулова, Л. І. Інноваційна економіка : підручник / Л. І. Федулова. – К. : Либідь, 2006. – 480 с.

332. Физические основы рентгеноструктурного исследования кристаллических материалов : монография / А. А. Клопотов, Ю. А. Абзаев, А. И. Потекаев и др. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – 263 с.

333. Формирование ультрадисперсной структуры в композиционных электродуговых покрытиях, наполненных полыми стеклянными

микросферами / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, А. А. Жданов и др. // Вісн. НУК (електрон. вид.). – Миколаїв : НУК, 2012. – № 3.

334. Формирование наноразмерной полигонизационной структуры в напыленных электродуговых покрытиях / А. Н. Дубовой, А. А. Карпеченко, М.Н. Бобров [и др.] // Автоматическая сварка. – 2017. – № 3. – С. 40–43.

335. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – № 41, ч. 1. – С. 117–121.

336. Францев, И. Р. Методические основы процессов управления техническим обеспечением судов на основе информационных технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / И. Р. Францев. – СПб., 2003. – 235 с.

337. Францев, М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов / М. Э. Францев // Вестн. АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2011. – № 3. – С. 37–46.

338. Францевич, И. И. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов : справочник / И. И. Францевич. – К. : Наук. думка, 1982. – 286 с.

339. Хвостова, М. С. Обращение с радиоактивными отходами на предприятиях судостроительной отрасли / М. С. Хвостова // Вестн. АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2012. – № 1. – С. 53–60.

340. Хмелевская, В. Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами. В 3 т. Т. 3. Восстановление и упрочнение деталей / В. Б. Хмелевская, Л. Б. Леонтьев. – Владивосток : МГУ : Дальнаука, 2003. – 356 с.

341. Чебаков, Е. А. Техническая диагностика и опыт ее применения на кораблях и судах Черноморского флота / Е. А. Чебаков // Морской сборник. – 2003. – № 4. – С. 63–67.

342. Череп, А. В. Методи оцінки ефективності управління інноваційною діяльністю підприємств машинобудування / А. В. Череп, М. М. Лизуненко //

Економічні науки : зб. наук. пр. ТДАТУ. – Мелітополь, 2014. – № 3 (27). – С. 113–119.

343. Черепанов, А. И. Расчет линейной усадки алюминиевых сплавов и композиционных материалов / А. И. Черепанов, В. Г. Бабкин // Технология машиностроения : обзорно-аналит., науч.-техн. и производственный журн. – 2008. – № 9. – С. 12–14.

344. Чистик, О. В. Общая и радиационная экология : монография / О. В. Чистик, С. Е. Головатый, С. С. Позняк. – Минск : МНЭУ, 2012. – 313 с.

345. Чурилин, А. С. Проектирование демпфирующих конструкций виброактивных элементов механизмов сервиса / А. С. Чурилин, С. В. Асеев // Техничко-економічна проблема сервиса. – 2009. – № 3 (9). – С. 35–38.

346. Шалаев, А. М. Свойства облученных металлов и сплавов : справочник / А. М. Шалаев. – К. : Наук. думка, 1985. – 308 с.

347. Шапилова, М. В. Экологические проблемы в производстве сортовых стекол и хрусталя / М. В. Шапилова, С. И. Акимова // Стекло мира. – № 4. – С. 81–82.

348. Шатров, Г. Н. О регламентации применения радиационной обработки пищевых продуктов в международном законодательстве / Г. Н. Шатров, О. В. Багрянцева // Вопросы питания. – 2012. – № 1. – С. 49–56.

349. Шведов, Л. И. Исследование демпфирующей способности марганцево-медных сплавов / Л. И. Шведов, Н. Ю. Лебедева // Технология судостроения и сварочного производства : сб. науч. тр. УГМТУ. – Николаев : УГМТУ, 1996. – С. 3–6.

350. Шеремет, М. Сопряженные задачи естественной конвекции : монография / М. Шеремет. – Берлин : LAPLAMBERT Academic Publischsng, 2011. – 176 с.

351. Ширококов, А. Д. Метод конечных элементов третьего порядка точности на треугольной сетке / А. Д. Широков // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2011. – том 51. – № 10. – С. 1918 – 1930.

352. Шлапацька, В. В. Проблеми та потреби поширення радіаційних технологій для композиційних матеріалів в Україні / В. В. Шлапацька, Д. П. Шевчук / Матеріали ХХХ междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности», 7–10 июня 2010 г., Ялта. – К., 2010. – С. 264–266.

353. Шостак, А. К. Анализ расчета мощности дозы гамма-излучения при проектировании биологической защиты / А. К. Шостак, А. В. Сахно // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 79–85.

354. Шувалов, Г. В. Метрологическое обеспечение измерений термохимических параметров нанопорошков металлов [Электронный ресурс] / Г. В. Шувалов, А. П. Ильин, И. В. Кляковкин // ИНТЭРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – Т. 2, № 4. – Режим доступа : [http:// cyberleninka.ru](http://cyberleninka.ru).

355. Шутиков, А. Н. Нестационарная задача теплопроводности в трехмерной постановке для многослойных цилиндрических оболочек сложной формы: теория и эксперимент / А. Н. Шутиков, Е. В. Свет // Вестн. НТУ «ХПИ». – Х., 2014. – № 58 (1100). – С. 161–168.

356. Электродуговая металлизация – перспективный метод нанесения электродуговых покрытий / И. Л. Куприянов, В. С. Ивашко, Г. И. Литко и др. – Минск : Бел. НИИ НТИ, 1988. – 170 с.

357. Экспериментальные исследования нейтронно-защитных свойств гидридов с повышенным содержанием водорода / Н. И. Власенко, М. И. Коротенко, С. Л. Литвиненко и др. // Ядерна та радіаційна безпека. – 2010. – № 3 (47). – С. 16–17.

358. Юреско, Т. А. Сферопластик как тепловая изоляция обитаемых подводных технических средств / Т. А. Юреско // Вестн. АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2014. – № 2. – С. 21–26.

359. Явления ликвации в стеклах / Н. С. Андреев и др. – Л. : Наука, 1974. – 220 с.

360. Яковчук, Р. С. Исследование огнезащитной эффективности наполненных кремнийорганических покрытий для бетона / Р. С. Яковчук, Р. Б. Веселивский // ВІТР. – 2014. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 59–64.

361. Ялховских, Д. С. К вопросу повышения энергоэффективности производства полых стеклянных микросфер / Д. С. Ялховских, В. А. Горбунов // Вестн. ИГЭУ. – Иваново, 2012. – Вып. 1. – С. 1–3.

362. An, Z. Glass/Ni–P/Co–Fe–P three layer hollow microspheres: Controlled fabrication and magnetic properties / Z. An, J. Zhang // Materials Letters. – 2012. – № 85. – P. 95–97.

363. Brachert, Y. Transnucleare's experience in ship adaptation / Y. Brachert, M. Vallette-fontaine // Proc. Of Intern. Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans – N'ocaen 2000. – Tokyo, 2000. – P. 182–183.

364. Bronsart, R. Collabotaratorien design and production in shipbuilding networks / R. Bronsart, S. Gau // Proc of Second Intern. Conf. «Navy and shipbuilding Nowadays» (NSN'2001). – SPb : KSRI, 2001. – P. 35–42.

365. Beauliev, A. Learning SQL / A. Beauliev // Copyright 2009: O'Reilly Media. Printed in the United States of America – 335 p.

366. Brandon, C. Bloss. Esmination of frequency-averaged loss factors by the power injection and the impulse response decay methods / C. Bloss Brandon, D. RaoJ. // Mofand Acoust. Soc. Am. 117 (1), January, 2005.

367. Brewin, P. R. Modellin of Powder Die Compaction / P. R. Brewin, O. Coube. – London : Springer, 2008. – 347 p.

368. Chittineni, K. Energy Absorption of Integrated Functionally Gradient Syntactic Foam / K. Chittineni, E. Woldesenbet // Journal of Cellular Plastics. – 2010. – № 46 (4). – P. 295–319.

369. Evaporation of PbO–SiO₂ and K₂O–PbO–SiO₂ melts / J. Matoser, T. Janu and other // Ceramirs. – Silikaty 2001. – № 45 (4). – P. 137–141.

370. Hill R The structure and mechanical properties of composite materials // Mech. Phis. Soc. – 1963. – V. 11, № 5. – P. 357–382.

371. Höhne, T. CFD Simulation of Thermal-Hydraulic Benchmark V1000CT-2 Using Flowision. / T. Höhne // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2009. – P. 1–7.

372. Geller, R. F. The system $K_2O-PbO-SiO_2$ / R. F. Geller, E. N. Bunting // Part of Journal of Research the National Bureau of Standards. – august 1936. – Vol. 17. – P. 277–289.

373. Ishikawa, K. Introduction to Quality Control: 3rd ed / K. Ishikawa, J. H. Loftus. – Tokyo : 3A Corp, 1990. – 435 p.

374. Kazimirenko, J. Innovative projects of radioactive substances transportation and storage hardware creation / J. Kazimirenko, T. Farionova, I. Mihelev // Матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 576–577.

375. Kazimirenko, Y. A. Radiation resistance of metal-glass coatings for floating composite structures / Y. A. Kazimirenko, V. V. Schlapatskaya // Shipbuilding & marine infrastructure. – 2015. – № 1 (3). – P. 111–121.

376. Kazimirenko, Y. A. The use new informational-search systems for assessing technical conditions of ship constructions / Y. A. Kazimirenko, T. A. Farionova // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології». – О. : ОНМУ, 2014. – С. 54–56.

377. Kazymyrenko, Y. Patterns and mechanisms of interaction of radioactive cargo radiation with metal-glass layer of watercrafts structure / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2014. – Iss. 12. – P. 45–48.

378. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2016. – Iss. 1. – P. 90–94.

379. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo / Y. Kazymyrenko // The advanced science. – 2016. – Iss. 2. – P. 38–44.

380. Keller, D. V. Adhesion between solids metals / D. V. Keller // Wear. – 1963. – V. 6. – P. 64–68.

381. Khismatullin, D. B. Radial oscillation of encapsulated in viscoelastic liquids / D. V. Khismatullin, A. Nadim // *Phys. Fluids*. – 2002. – V. 14. – P. 3534–3557.
382. Kitamura, O. Collision Simulation of an Exclusive ship of Spent Nuclear Fuels / O. Kitamura, H. Tndo // *Proc. of Intern. Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans (N' Ocean 2000)*. – Tokyo, 2000. – P. 213–222.
383. Kozlovski, V. Radiation Defect Engineering. «World Scietific» / V. Kozlovski, V. Abrosimova. – Singapore, 2005. – 253 p.
384. Statys of food irradiation in the world / T. Kume, M. Furuta, S. Todorikis, N. Uenoyama, Y. Kobayashi // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2009. – V. 78, № 3. – P. 222–226.
385. Chengi, K. Safety Management and its Maritime Application / K. Chengi. – London : Nautical Institute, 2007. – 288 p.
386. Landau, L. D. Teorija uprugosti / L. D. Landau, E. M. Livshic. – Moskva : Fizmatiz, 2007. – 264 p.
387. Li, G. A crumb rubber modified syntactic foam / G. Li, M. John // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – : ISS. 474 (1–2). – P. 390–399.
388. Librescu, L. Thin-Walled Composite Beams: Theory and Application / L. Librescu, O. Song. – Berlin : Springer, 2006. – 600 p.
389. Luna, R. Development of international guidelines for shipment security of radioactive materials / R. Luna // *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*. – 2004. – № 15 (1). – P. 15–19.
390. Matoušek, J. Evaporation of PbO-SiO_2 and $\text{K}_2\text{O-PbO-SiO}_2$ melts / J. Matoušek, J. Tomáš // *Ceramics – Silikáty*. – 2001. – № 45 (4). – P. 137–141.
391. Overview of Fluid-Structure Coupling in Flowision / F. Menter, P. Sharkey, S. Yakubov, M. Kuntz // Vol. 4. Terry Jones Pipeline Technology; Ocean Space Utilization; CFD and VIV Symposium, 2006. – 283 p.
392. Mochen, Hossein-Zaden. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced heat treated particles / Mochen Hossein-Zaden, Omid Mirzaee, Peyman Saidid // *Materials and Design*. – 2014. – № 54. – P. 245–250.

393. Mühlbauer, A. Innovative induction melting technologies: a historical review / A. Mühlbauer // Proceeding of the 4th Intern. scientific colloquium «Modelling for material processing». – Riga, 2006. – P. 13–20.

394. Ngai, K. L. Relaxation and Diffusion in Complex Systems Springer / K. L. Ngai. – New York : Springer, 2011. – 835 p.

395. Permeation of helium and hydrogen from glass-microsphere laser targets / P. T. Tsugawa, J. Moem, P. E. Roberts, P. G. Souers // J. Appl. Phys. – 1976. – V. 47, № 5. – P. 1987–1993.

396. Powder Diffraction File Inorganic Phases Published by International Carters for Diffraction Data / E. Rodriguez, F. Poineau, A. Lobel [and other] // Inorganic Chemistry. – 2008. – № 47 (14). – P. 6281–6288.

397. Change of radioactive waste characteristics at their processing and storage at nuclear power plants / V. G. Ruduchev, I. O. Girka, Y. U. Ruduchev and others // Problems of atomic science and technology. – 2015. – № 3 (97). – P. 83–88.

398. Sannen, H. Shipment of radioactive materials: historical overview of IAEA regulations – a personal perception / H. Sannen // Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material. – 2007. – № 18 (1). – P. 19–20.

399. Trofimov, A. Hollow glass microspheres for high strength composite cores / A. Trofimov, L. Pleshkov, H. Back // Reinforced Plastics. – 2006. – № 50 (7). – P. 44–50.

400. Vieru, G. Safety considerations during transport of radioactive material. / G. Vieru, R. Mihailescu // Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material. – 2012. – № 23 (3/4). – P. 137–143.

401. Wagoner, R. H. Metal forming analysis / R. H. Wagoner, J. L. Chenot. – Cambridge University Press, 2001. – 376 p.

402. Was, G. Fundamentals of radiation materials science / G. Was. – Berlin : Springer, 2007. – 546 p.

403. Wawryk, R. Heat transfer in microsphere insulation / R. Wawryk, J. Wawryk // Journal of Thermal Analysis. – 1988. – № 34 (1). – P. 249–257.

404. Zhang, Q. Electroless nickel plating on hollow glass microspheres / Q. Zhang, M. Wu, W. Zhao // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – № 192 (2–3). – P. 213–219.

405. Heat transfer coefficient calculation for analysis of ITER shield block using CFX and ANSYS / X. Zhang, J. Chen, W. Kang and others // *Fusion Engineering and Design*. – 2011. – № 86 (4–5). – P. 312–317.

406. Zhu, W. A new iterative-doubling Greedy-Lookahead algorithm for the single container loading problem / W. Zhu, A. Lim // *European Journal of Operational Research*. – 2012. – Vol. 222, Iss. 3. – P. 408–417.

407. Zinoviev, P. A. Energi dissipation in Composite Materials / P. A. Zinoviev, Y. N. Ermakov. // *Application of Plastic Materials in Machine-Building*. – 1994. – № 21. – P. 37–54.