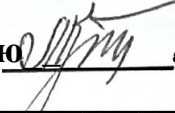


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала МАКАРОВА
Кораблебудівний навчально-науковий інститут
Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

“Допущений до захисту ДЕК”

Завідуючий кафедрою  Л.І. Коростильов
“ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Тема роботи: Дослідження напружено-деформованого стану блоків плавучості на основі керамічних оболонок у блоці плавучості зі сферопластику методом скінченних елементів

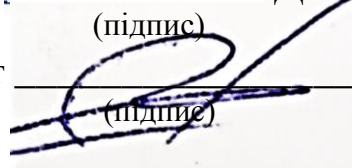
Виконав: студент групи 6161м .



Довженко О. В.

(підпис)

Керівник роботи: к. т. н., доцент



Гейко С. П.

(підпис)

Миколаїв 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут(факультет) *Кораблебудівний навчально-науковий інститут*

Кафедра *Будівельної механіки та конструкції корпусу корабля*

Спеціальність 135 Суднобудування

(шифр і назва)

Освітня програма *Проектування та виробництво судових конструкцій із композиційних матеріалів*

(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти магістра

Студенту *Довженко Олександра В'ячеславівна*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Дослідження напружено-деформованого стану блоків плавучості на основі керамічних оболонок у блоці плавучості зі сферопластику методом скінченних елементів*

Керівник роботи **К.т.н Гейко С.П.**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № _____ від “ _____ ” _____ 20__ року

2. Термін подання роботи *11.12.2023*

3. Вихідні дані по роботі: *Модель блока плавучості для глибоководної техніки - тонкостінна оболонка виготовлена із технічного фарфору діаметром 100 мм в масиві епоксидного сферопластика густиною 700 кг/м³.*

4. Перелік питань, що належать до розробки

- Інформаційний пошук за темою досліджень: Матеріали, та конструкції, що використовуються для забезпечення позитивної плавучості підводних засобів.

Обумовленість використання керамічних сферичних оболонок.

- Напружено-деформований стан керамічної (фарфорової) оболонки біля поверхні в напівбезкінечному масиві сферопластика.

- Напружено-деформований стан близько розташованих керамічних оболонок в безкінечному масиві сферопластика.

- Напрацювання рекомендацій для створення блоків плавучості на основі керамічних сферичних оболонок

5. Перелік презентаційних матеріалів

- розрахункові схеми досліджуваних об'єктів - граничні умови та зовнішні навантаження.

- епюри, що демонструють розподіл компонент напружено-деформованого стану.

- графіки залежності компонент напружено-деформованого стану від відстані до поверхні (відстані між оболонками) та товщини оболонок.

- висновки по дослідженням з рекомендаціями.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Гейко С.П. доц. НУК	15.09.2023	
2	Гейко С.П. доц. НУК	1.10.2023	
3	Гейко С.П. доц. НУК	15.10.2023	

7. Дата видачі завдання 1.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційний пошук за темою досліджень. Постановка задач	15.09.2023	
2	Створення геометричної та фізичної моделей	1.10.2023	
3	Проведення розрахунків в середовищі ANSYS student	1.11.2023	
4	Побудова графіків залежності компонент НДС від геометричних параметрів моделі	20.11.2023	
5	Напрацювання висновків та практичних рекомендацій.	1.12.2023	
6	Підготовка звіту. Підготовка презентаційного матеріалу	15.12.2023	

Студент
(підпис)

Довженко О.В.
(ПІБ)

Керівник роботи
(підпис)

Гейко С.П.
(ПІБ)

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПЛАВУЧІСТЬ.....	9
1.1. Матеріали та конструкції, що використовуються для забезпечення позитивної плавучості підводних засобів	11
1.1.1. Позитивна плавучість	12
1.1.2. Конструкції, які використовуються для забезпечення плавучості ...	16
1.1.3. Матеріали плавучості та вимоги для використання на глибині.....	18
1.2. Обумовленість використання керамічних сферичних оболонок	19
1.2.1. Керамічні наповнювачі.....	20
1.2.2. Характеристики керамічні сфер	20
1.2.3. Обумовленість використання керамічних сфер у складі блоків плавучості	22
1.3. Приклади застосування керамічних оболонок	24
1.4. Сферопластики, огляд компонентів та властивостей	26
1.4.1. Фізико-механічні властивості сферопластиків	29
1.4.2. Переваги та недоліки використання сферопластиків у конструкціях. Сфери застосування.....	30
1.4.3. Обумовленість використання складових частин	33
1.4.4. Технологічні прийоми виготовлення блоків плавучості на основі сферопластика	34
1.5. Постановка задачі	35
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ КОНЦЕПЦІЇ ФОРМУВАННЯ ОБСЯГІВ ПЛАВУЧОСТІ НА ОСНОВІ КЕРАМІЧНИХ СФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК.....	36

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

5

2.1. Вибір структурних схем формування обсягів плавучості на основі сферичних оболонок	36
2.2. Типи упаковок.....	37
2.3. Вагові характеристики композитів на основі керамічних оболонок	41
2.4. Висновки.....	42

**РОЗДІЛ 3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КЕРАМІЧНОЇ
ОБОЛОНКИ БІЛЯ ПОВЕРХНІ У НАПІВБЕЗКІНЕЧНОМУ МАСИВІ
СФЕРОПЛАСТИКА.....**

3.1. Розташування оболонок близько до поверхні сферопластика	44
3.2. Обрана модель, граничні умови та зовнішні навантаження	45
3.3. Результати розрахунків	47
3.3.1. Мінімальні головні напруження в оболонці.....	51
3.3.2. Максимальні головні напруження в оболонці	53
3.3.3. Мінімальні головні напруження у сферопластику	55
3.3.4. Інтенсивність напружень у сферопластику	57
3.4. Висновки.....	58

**РОЗДІЛ 4. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЛИЗЬКО
РОЗТАШОВАНИХ КЕРАМІЧНИХ ОБОЛОНОК У
НАПІВБЕЗКІНЕЧНОМУ МАСИВІ СФЕРОПЛАСТИКА.....**

4.1. Обрана модель, граничні умови та зовнішні навантаження	62
4.2. Результати розрахунків	63
4.2.1. Напруження в оболонці	64
4.2.2. Напруження у сферопластику.....	66
4.3. Висновки.....	69

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

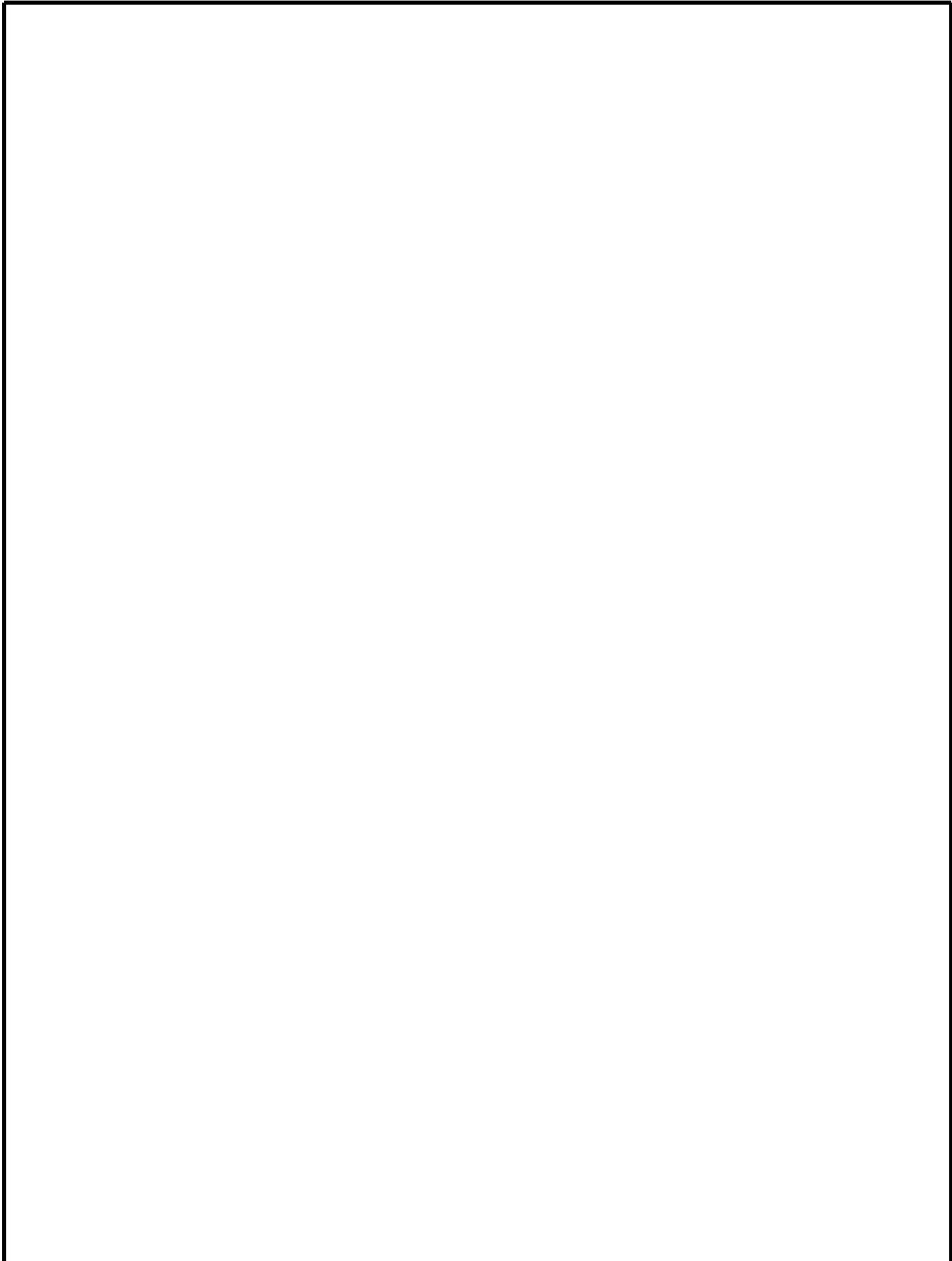
Мета роботи – дослідження напружено-деформованого стану сферопластика з керамічними оболонками в якості блока плавучості для глибоководних підводних апаратів методом скінчених елементів.

В першому розділі розглядаються матеріали та конструкції, що забезпечують плавучість підводних пристроїв, розглядається сферопластик як матеріал, визначається обумовленість використання керамічних оболонок у складі сферопластика для використання у вигляді матеріалу блоків плавучості.

В другому розділі розглядаються структурно-технологічні концепції формування об'ємів плавучості на основі керамічних оболонок, структурні схеми і види упаковок.

У третьому розділі проводяться розрахунки напружено-деформованого стану оболонки біля поверхні у безкінечному масиві сферопластику під дією гідростатичного тиску в залежності від варіювання параметрів товщини та відстані від поверхні, наводяться графіки та епюри отриманих напружень, визначаються безпечні та небезпечні варіанти розміщення сфери.

В четвертому розділі проводяться розрахунки напружено-деформованого стану близько розташованих оболонок у безкінечному масиві сферопластику під дією гідростатичного тиску в залежності від варіювання параметрів товщини та відстані між оболонками, наводяться графіки та епюри отриманих напружень, визначаються безпечні та небезпечні варіанти розміщення сфери.



					135.6161м.01.ДР			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Студент	Довженко				РОЗДІЛ 1	Літ.	Аркуш	Аркушів
	О.В.							
Викладач	Гейко					НУК		
	С.П.							

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПЛАВУЧИСТЬ

Підводні апарати вважаються край необхідними в різних галузях через їхню здатність працювати у водному середовищі, яке є недоступним для людей безпосередньо, особливо на значних глибинах. Необхідність підводних суден та пристроїв виникає через потребу отримати доступ до підводного середовища та вивчити його для наукових відкриттів, збереження навколишнього середовища, промислового застосування чи безпеки. З розвитком технологій можливості підводних апаратів продовжують розширюватися, що робить їх все більш незамінними для широкого спектра підводних заходів і досліджень.

Унікальні можливості знаходження у товщі води приносять користь для багатьох сфер людської діяльності, наприклад, підводні апарати незамінні для:

- наукових досліджень та океанографії,
- геологічної розвідки та екологічного моніторингу,
- промислового рибальства та комерційної діяльності (підводний огляд і технічне обслуговування в нафтовій і газовій промисловості, у морській інфраструктурі),
- підводного будівництва,
- оборони під час військово-морських операцій,
- пошуково-рятувальних операцій,
- відпочинку і туризму тощо.

Існують різні види підводних суден і пристроїв, призначених для настільки широкого спектра застосувань, розглянемо найбільш поширені типи:

– Підводні човни – в основному використовуються військово-морськими силами для оборонних і стратегічних цілей, але також можуть застосовуватися для наукових розвідок і дослідження глибин океану;

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		9

– Дистанційно керовані транспортні засоби – безпілотні підводні пристрої з дистанційним керуванням, прив’язані до надводного судна, які зазвичай використовуються для наукових досліджень, глибоководної зйомки та перевірки підводних структур, таких як трубопроводи та кабелі;

– Автономні підводні апарати – безпілотні транспортні засоби без прив’язки, які працюють автономно, використовуються для різноманітних завдань, включаючи океанографічні дослідження, підводне картографування, моніторинг навколишнього середовища та підводні дослідження;

– Пілотовані підводні апарати – невеликі підводні човни, призначені для наукових досліджень і дослідження океанських глибин, часто використовуються для збору проб;

– Підводні дрони – дистанційно керовані або автономні пристрої, які використовуються для таких завдань, як підводна фотографія, відеозапис, перевірка підводної інфраструктури та моніторинг навколишнього середовища;

– Водолазні дзвони – камери з відкритим дном, які можна опустити у воду, щоб дайвери могли спускатися та працювати на помірних глибинах;

– Занурювальні системи середовища проживання – підводні споруди, які забезпечують середовище для життя та роботи для дайверів або дослідників, використовуються для тривалих підводних досліджень і спостережень;

– Підводні планери (глайдери) – автономні транспортні засоби, які пересуваються у воді, регулюючи свою плавучість, використовуються для довгострокового моніторингу океану, збору даних про температуру, солоність та інші параметри океану;

– Підводні скутери – портативні або буксирні пристрої, які допомагають дайверам ефективніше пересуватися у воді, використовуються для рекреаційного дайвінгу та підводного дослідження;

– Підводні камери та датчики – пристрої, які використовуються для захоплення візуальних або навколишніх даних у підводному середовищі для досліджень, моніторингу та спостереження;

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		10

– Підводні земснаряди та екскаватори – використовуються для підводних розкопок, днопоглиблення та будівництва, задіяні в таких проектах, як технічне обслуговування гавані, підводна археологія та встановлення трубопроводів.

Ці підводні судна та пристрої відіграють вирішальну роль у вдосконаленні нашого розуміння океанів, проведенні наукових досліджень, дослідженні морських глибин, підтримці підводної інфраструктури, різноманітної промислової та комерційної діяльності. Технологія та можливості цих підводних систем продовжують розвиватися, створюючи більш складні та різноманітні пристрої.

1.1. Матеріали та конструкції, що використовуються для забезпечення позитивної плавучості підводних засобів

Плавучість є критичним параметром у розробці та експлуатації надводних та підводних засобів, оскільки це те, що дозволяє судну плавати у товщі води та залишатися на плаву на поверхні. Без плавучості судно зануриться і не зможе виконувати свої передбачувані функції.

Окрім функції підтримання на воді, плавучість має вирішальну роль у виконанні низки інших задач:

– Контроль глибини. Регулюючи свою плавучість, підводні пристрої можуть контролювати глибину свого знаходження у товщі води. Ця здатність критично важлива для різних застосувань, таких як наукові дослідження, військові операції та підводне будівництво. Завдяки регулюванню плавучості ці судна можуть підійматися або опускатися за потреби.

– Безпека. Плавучість є критичним фактором безпеки для підводних апаратів. У разі надзвичайної ситуації або відмови обладнання, регулювання плавучості може допомогти судну піднятися на поверхню або опуститися на більш безпечну глибину. Ця функція забезпечує безпеку екіпажу або обладнання та вантажів.

– Розподіл ваги. Матеріали, що використовуються в будівництві суден, як правило, щільніші за густину води. Форма та розміщення блоків плавучості ретельно розроблені для розподілу ваги таким чином, щоб врівноважувати сили тяжіння.

– Транспортування вантажу та обладнання. Плавучість має важливе значення для визначення вантажопідйомності судна. Розрахунки плавучості та стійкості засобу мають також важливе значення для визначення його безпечної потужності. Здатність контролювати плавучість дозволяє перевозити корисні вантажі та регулювати свою плавучу силу відповідно до змін ваги вантажу.

– Порятунк і підйом. Підводні пристрої з контролем плавучості часто використовуються для рятувальних та підйомних операцій, таких як підймання затонулих кораблів, цінного вантажу або порятунк осіб, які зазнали лиха.

Плавучість – це фундаментальний принцип, який дозволяє надводним та підводним засобам плавати та ефективно працювати на поверхні та у товщі води. Правильний вибір елементів та матеріалів для елементів плавучості є важливими для розробки, будівництва та експлуатації суден для забезпечення їхньої безпеки та функціональності.

1.1.1. Позитивна плавучість

Під плавучістю плавального засобу розуміють його здатність залишатися на плаву, несучи при цьому всі необхідні вантажі, а для підводних засобів – додатково плавати у підводному положенні по задану ватерлінію на глибинах, що не перевищують граничну.

На судно у цьому випадку діють дві системи сил: сили тяжіння та сили підтримки.

1. Сили тяжіння. Їх рівнодіюча P , спрямована вертикально вниз і прикладена до центра мас (ЦМ), так званого центра тяжіння судна G . Сама рівнодіюча дорівнює сумі ваги порожнього судна та ваги вантажів, прийнятих на судно.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		12

$$P = P_{\text{порожнього}} + P_{\text{вант 1}} + P_{\text{вант 2}} + \dots + P_{\text{вант } n} = m_{\text{повн}} g \quad (1.1)$$

2. Сили підтримання (або сили виштовхування). Виштовхувальна сила є рівнодією сил тиску води, які спрямовані за нормаллю до зовнішньої поверхні човна та пропорційні глибині занурення H (рис. 1.1). Ці сили, що стискають підводний човен, можна розкласти на горизонтальні та вертикальні складові. Горизонтальні взаємно компенсуються, а різниця вертикальних сил визначає величину сили, що виштовхує, або сили плавучості D . Іноді цю силу ще називають і силою підтримки.

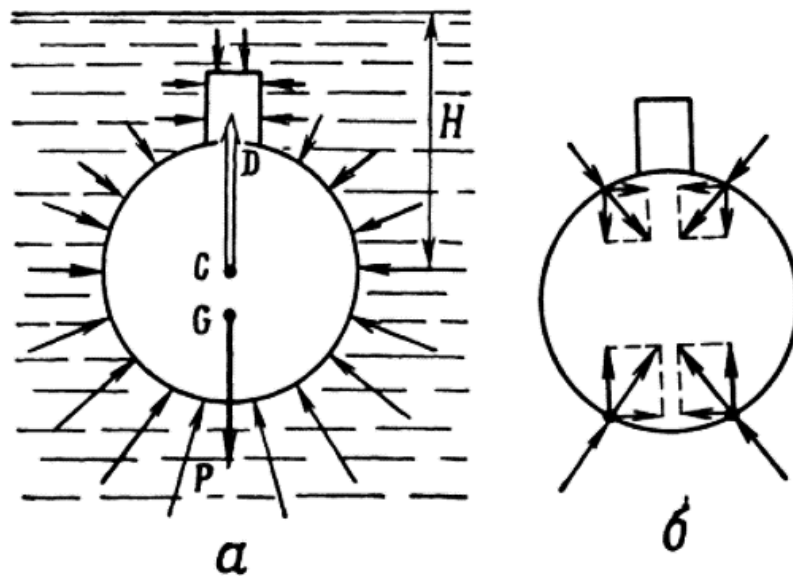


Рис. 1.1. Дія гідростатичних сил на підводний засіб: а – схема дії гідростатичних сил; б – розкладання гідростатичних сил, спрямованих під кутом до горизонту, на складові.

Сила плавучості завжди спрямована вертикально вгору і прикладена до підводного засобу в точці C , званої центром величини (ЦВ), який розташований у центрі мас води, витісненої зануреним об'ємом корпусу підводного човна. Зважаючи на однорідність води, центром величини можна вважати також і геометричний центр зануреного обсягу підводного човна. Тому за зміни величини зануреного обсягу чи його форми буде змінюватися і положення центру величини. Переміщення ЦВ підводного човна, що знаходиться в

надводному положенні, коли він не має крену (C_0) і при нахиленні (C_1) показано на рис. 1.2.

Сила плавучості чисельно дорівнює вазі витісненим човном води, і визначається за формулою:

$$D = m_b g = \rho g V = \gamma V \quad (1.2), \text{ де}$$

m_b – маса води, що була витіснена судном, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ – густина води, кг/м³;

V – об'єм води, що був витіснений судном, м³;

γ – питома вага води, кН/м³.

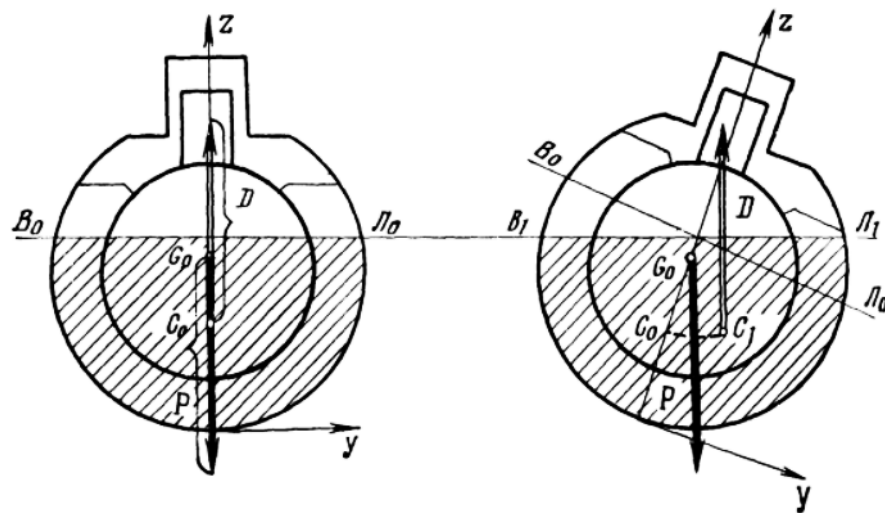


Рис. 1.2. Переміщення центру величини C_0 в точку C_1 при нахиленні підводного човна.

Розрізняють три види плавучості:

– позитивна плавучість, коли обсяг прийнятої води менший за запас плавучості судна, засіб плаває на поверхні води ($D > P$);

– нейтральна плавучість – обсяг прийнятої води дорівнює запасу плавучості судна. І тут вважається, що для надводних засобів плавучість втрачена, тобто запас плавучості становить 0%: у цей момент плавзасіб занурюється по головну палубу і знаходиться в нестійкому стані, тому будь-яка зовнішня дія може спричинити повне затоплення. Для підводних засобів –

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

14

характеризує стан, коли човен переміщується в товщі води на глибинах, що не перевищують критичної ($D = P$);

– негативна плавучість – при прийомі обсягу води, більшого, ніж запас плавучості (або будь-якого вантажу, більшого за вагою) вважається, що судно отримує негативну плавучість, у цьому випадку воно не здатне плавати, не здатне самостійно піднятися на поверхню, а може лише тонути ($D < P$).

Для підводних засобів система контролю плавучості повинна забезпечувати:

- позитивну плавучість на поверхні;
- контрольований спуск на глибину;
- підтримку нейтральної плавучості на глибині;
- підйом на поверхню.

Будь-яке порушення непроникності веде до зниження запасу плавучості. Фізичний сенс запасу плавучості (ЗП) – це обсяг води, яке судно може прийняти (при затопленні відсіків), залишаючись ще на плаву. Тому для судна встановлюється обов'язковий запас плавучості, який він повинен мати у неушкодженому стані для безпечного плавання.

Запас плавучості судна забезпечується величиною водонепроникного об'єму, розташованим вище діючої ватерлінії. Його можна виразити в кубічних метрах, у тонах, у відсотках від повної водотоннажності судна.

Кожне судно має мати певний запас плавучості, тому що має велике значення при плаванні в штормових умовах, при зледенінні, при пошкодженні корпусу та повному (або частковому) затопленні відсіків судна тощо.

Зазвичай ЗП для надводних суден становить: для пасажирських суден, великих промислових баз, криголамів 80–100% повної водотоннажності судна; для транспортних суховантажних суден, рибальських, промислових, буксирних суден 25–50%; для наливних суден 10–25% повної водотоннажності судна.

Запас плавучості забезпечує для підводного засобу спливання і занурення, непотоплюваність і мореплавання у надводному положенні. У той же час

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		15

зростання запасу плавучості покращує непотоплюваність, але збільшує час занурення, призводить до погіршення ходових якостей та зменшення дальності плавання. Тому сучасний підводний човен для забезпечення непотоплюваності має мінімальний запас плавучості близько 11–35% від крейсерської водотоннажності човна.

1.1.2. Конструкції, які використовуються для забезпечення плавучості

Створення корпусів підводних апаратів пов'язано з великими труднощами через необхідність задоволення багатьох вимог. Одним із таких є забезпечення величини відносної ваги міцного корпусу (відношення ваги корпусу до його об'єму) в межах 4 - 6 кН/м³, при якому, на думку фахівців, можливе створення працездатних апаратів. При глибині занурення до 1000 м їх плавучість забезпечується міцним корпусом. Зі збільшенням робочої глибини виникає також необхідність урахування обтиснення корпусу (зменшення об'єму водозміщення) і обтиснення морської води. Ці фактори приводять до значної втрати плавучості глибоководного апарату. [4, с. 7]

Забезпечення плавучості на більших глибинах може бути досягнуто шляхом зменшення об'єму міцного корпусу, винесенням максимально можливої кількості обладнання за його межі та урівноваженням негативної плавучості легковаговими поплавками, густина яких менше за густину води.

Щоб досягти та підтримувати контроль плавучості, підводні човни та підводні пристрої часто використовують баластні цистерни або інші механізми для регулювання своєї ваги та плавучості. Вони можуть або додавати воду, щоб отримати більш негативну плавучість для спуску, або викидати воду, щоб стати більш позитивною плавучістю для підйому. У таких механізмах регулятором плавучості є співвідношення стиснутого повітря та води.

На відміну від систем плавучості, які забезпечують спуск-підйом, елементи плавучості використовуються, щоб підтримувати позитивну плавучість як для підводних, так і надводних суден.

Найбільш поширеною конструкцією, які використовуються загалом для плавучих засобів як надводних, так і підводних є блоки плавучості.

Блоком плавучості можна назвати будь-який елемент плавучості, при виготовленні якого використовується матеріал з найменшою щільністю, наприклад, пінопласт.

Традиційно, для надводних суден та підводних, розрахованих на невеликі глибини, непотоплюваність забезпечується шляхом встановлення в корпусі блоків плавучості з пінопласту, так як він є стійким до дії олії та бензину, не вбирає воду і не руйнується від вібрації, тряски або коливань температури. Значення плавучості залежить від товщини та матеріалу заповнювача. Додатково, пінопластові блоки підвищують звуко- та теплоізоляційні якості.

Однак піноматеріали не підходять для глибоководного використання. Для збільшення міцнісних характеристик, у склад блоків плавучості почали додавати різні наповнювачі, у тому числі й дисперсні, з метою отримати можливість спуску підводних апаратів на значно більші глибини.

Наступним кроком удосконалення об'ємів плавучості було створення композитного матеріалу на основі матриці та легковагового наповнювача у вигляді порожнистих мікросфер діаметром 50 – 200 мкм. Саме сферична оболонка є найбільш раціональною конструкцією для роботи в умовах гідростатичного обтиснення, що створює максимальну підйомну силу при мінімумі витрат матеріалу.

Через використання у складі сферичних оболонок, даний вид матеріалу називається сферопластиком. Він має величезні переваги – об'ємну стисливість, близьку до характеристик води, високу питому плавучість (3300 – 4500 Н/м³), високу технологічність (можливість заливання у простори будь-якої форми, гарну оброблюваність). [4, с. 8]

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		17

У глибоководних апаратах обсяги плавучості розміщуються зазвичай у вільних від основних несучих конструкцій та обладнання об'ємах. Природно, що вони можуть мати найрізноманітнішу конфігурацію і складаються з окремих, дуже неправильних форм блоків. У свою чергу, блоки виготовляються методом виливки в індивідуально спроектованих для даного апарату формах.

В даний час глибоководна техніка виготовляється не серійно, у зв'язку з чим собівартість елементів плавучості значно зростає у зв'язку з необхідністю виготовляти індивідуальне оснащення для виливки блоків.

Можливий також спосіб формування обсягів плавучості з уніфікованих модулів (на кшталт цегли) різної конфігурації.

Модулем плавучості в даній роботі будемо називати уніфікований блок сферопластика, що містить одну або декілька оболонок, з яких формуються об'єми плавучості глибоководного технічного засобу.

Наступним кроком на шляху збільшення питомої плавучості стало застосування оболонок різних типорозмірів, що дозволило більш ефективно заповнювати простір сферичними порожнинами.

1.1.3. Матеріали плавучості та вимоги для використання на глибині

Матеріали, що використовуються для отримання сферичних оболонок, для застосування в глибоководних технічних засобах повинні відповідати наступним вимогам:

- висока питома міцність;
- корозійна стійкість;
- стійкість до атмосферних впливів та впливів морської води.

Перша вимога обумовлена тим, що деякі матеріали, що мають високу міцність, неефективні за ваговими характеристиками.

Рівень реалізації міцнісних якостей матеріалу визначається наступними факторами:

- наявністю або відсутністю технологічних нерегулярностей поверхні;
- модулем пружності та відносною товщиною оболонки, які визначають стійкість оболонки при гідростатичному обтисненні;
- однорідністю властивостей матеріалу оболонки;
- ступенем досконалості геометрії (відхиленням від сферичності, рівності);
- наявністю залишкових напружень різного походження.

Якщо оболонка виконана з двох напівсфер, на перший план виходить якість сполучних елементів: їх конструкція, правильний вибір матеріалу клейового складу, поєднання механічних властивостей. А якщо оболонка суцільна – це викликає певні труднощі для підбору технологічних процесів та прийомів і також контролю якості, адже оболонка повинна бути скрізь однаковою за товщиною і не містити повітряних включень та інших домішок.

1.2. Обумовленість використання керамічних сферичних оболонок

Традиційні матеріали – сталь і алюміній не раціонально використовувати як матеріал для сферичних оболонок через високу густину. Граничні глибини використання титану – 3000 м, а термопластів – до 1000 м. Гарні перспективи застосування у склопластику, граничні глибини застосування яких 4000 м. [4, с. 10]

За питомою міцністю, в даний час немає традиційних і доступних матеріалів, що перевершують скло та кераміку. Крім того, для вищевказаних металічних матеріалів не існує технології виготовлення суцільномонолітних оболонок без сполучних елементів або зварних швів, які значно знижують ресурс їхньої несучої здатності. А для керамічних оболонок така технологія була створена. [1]

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		19

1.2.1. Керамічні наповнювачі

Загалом керамічні дисперсні наповнювачі, які включають до складу композитів, бувають трьох видів:

- суцільні керамічні кульки, або технічний бісер;
- пустотілі керамічні сфери;
- пористі керамічні сфери, які є оболонкою з додатковими отворами.

Керамічний бісер не підходить для використання у блоках плавучості, так як він суцільний і має значно вищу вагу за порожнисті оболонки. Сфери з додатковими порами також не підходять для високих навантажень, так як отвори стають концентраторами напружень, тому такі вироби використовуються у деяких технологічних процесах для збирання домішок у ці порожнини.

Тобто, з усіх представлених варіантів керамічних дисперсних виробів для високонавантажених умов використання на глибині підходять тільки пустотілі керамічні оболонки.

1.2.2. Характеристики керамічні сфер

Керамічні сфери мають ряд характеристик, які вигідно відрізняють їх від інших матеріалів:

+ довговічність – керамічні матеріали прослужать багато десятиліть, зберігаючи свої функції;

+ морозостійкість – кераміка відрізняється стійкістю до перепадів температур, що дозволяє використовувати її в районах із різкими змінами температури протягом року;

+ високі теплоізоляційні властивості – наповнювачі з керамічними домішками зберігають та підтримують комфортну температуру всередині приміщення за рахунок своєї низької теплопровідності, не дивлячись, що за межами відсіку – холодна вода або розігрітий двигун;

+ екологічно чистий матеріал, що містить у собі лише природні та неорганічні компоненти;

+ висока жорсткість та міцність – керамічні кульки мають достатні механічні характеристики стійкості та хороші показники жорсткості, щоб демонструвати найкращі параметри стійкості до корозії та зношування;

+ висока якість відтворення – завдяки особливому способу виробництва в цих кульках практично повністю відсутні повітряні пори та усадкові раковини. Більш дорогі технології дозволяють отримувати керамічні оболонки без швів та склеювань;

+ стійкість до хімічних речовин – часто доводиться розміщувати тіла в досить агресивному середовищі, де вони зазнають впливу одночасно тиску, кислот, хімічних агентів, високих температур, з цим завданням керамічні сфери відмінно справляються, маючи мінімальну корозію та велику опірність до кислотної корозії, лугу та органічного розчинника;

+ стійкість до високих температур – керамічні вироби не горять, вогнетривкі, можуть працювати до 1400 – 1900 °С;

+ мають великий спектр від електропровідних до електроізоляційних властивостей, в залежності від виду кераміки;

+ низьке водопоглинання – дозволяє використовувати керамічні вироби безпосередньо у воді без зміни властивостей.

Також існують і недоліки:

– занадто висока твердість може бути недоліком, коли еластична матриця руйнується о твердий наповнювач під час деяких видів прикладаних зусиль;

– крихкість у випадках недотримання якісної сферичної форми, великої кількості поверхневих дефектів;

– доволі висока вартість.

Введення у склад заповнювача керамічних оболонок дозволяє значно покращити показники плавучості, механічної міцності, зменшити масу, збільшити звуко- та теплоізоляційні властивості.

1.2.3. Обумовленість використання керамічних сфер у складі блоків плавучості

Задля відтворення найкращих властивостей для матеріалу, який би міг використовуватися у блоках плавучості, проводився пошук найкращої комбінації варіантів складу цього матеріалу.

Так, першими у склад в якості наповнювачів спробували ввести мікросфери з полівініліденхлориду (ПВХД) через їхню низьку вартість та поширеність. Але у цього сферопластика був дуже низький опір тиску, тому як матеріал плавучості його перестали використовувати, але замість почали додавати для ізоляції трубопроводів у суміші з поліуретановою смолою. [14, с. 309]

Потім були спроби використовувати сфери з силікату алюмінія та навіть пилу камінного вугілля, але густина отриманого матеріалу вийшла зовеликою, тому не вдалося його використовувати для плавучості. Зараз цей матеріал використовується як домішка до бетонних конструкцій для підвищення міцності. [14, с. 309]

Наразі поширено використовуються скляні сфери. Такий сферопластик має гарну міцність на стискання, низьку густину, доволі високу хімічну стійкість, та, за деякими даними, можуть не змінювати своїх характеристик навіть на глибинах до 3000 м. Тобто на даний час використовується як матеріал плавучості для невеликих глибин занурення. [14, с. 309-311]

Також проводилися дослідження композитів на основі епоксидної смоли зі скляними сферами, де було доведено, що така комбінація має гарні питомі характеристики міцності, а також мале водопоглинання (близько 0,74-0,75%), що дозволяє використання у безпосередній близькості до води. [10, с. 610-614]

Для використання для надвисоких глибин були спроби використовувати алюмо-керамічні оболонки. Дослідження показують, що теоретичним можливе їх використання на найбільшій глибині на Землі – Маріанської западини, що становить 11 000 м. Але розрахунки проводились для малих автоматичних пристроїв, що передбачає відсутність людини на борту, тому розміри виробу, а значить і об'ємів плавучості значно менші ніж у населених апаратах, а також менші вимоги для межі та запасу міцності. Кількість циклів спуску-підйому, а також часу навантаження також обмежена. [16, с. 2-6; 17, с. 1-8; 18 с. 1-6]

Для встановлення раціонального співвідношення міцнісних властивостей, глибини занурення та ціни використовуються керамічні сфери та проводяться різні випробування у складі матеріалів плавучості. Наприклад є дані, що такі матеріали можуть використовуватися у підводних апаратах на глибинах до 5000 м, тобто є вже доступними для глибоководних пристроїв. [8, с. 1-13]

На даний момент проводяться дослідження поведінки керамічних сфер різних розмірів у сполученні з різними матрицями, наприклад, вінілефірною смолою [5, с. 221-227], фенолформальдегідною смолою [11, с. 741-753; 12, с. 2783-2792], поліамідною [15, с. 1-7], епоксидною смолами [8, с. 1-13].

Але різні висновки цих робіт можна узагальнити тезисом, що додавання керамічних сфер позитивно впливає на міцнісні, пружні, звуко- та теплопоглинаючі властивості, а вже самі цифри відрізняються в залежності від умов проведення цих експериментів та становлять конкретні фізичні характеристики для кожного конкретного випадку.

Таким чином, стає питання щодо виділення саме відносних характеристик напружено-деформованого стану блоків плавучості під дією гідростатичного тиску на глибині, щоб об'єднати цілу групу матеріалів. схожих за складом, але різних за фізичними розмірами наповнювача.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		23

1.3. Приклади застосування керамічних оболонок

Керамічні оболонки зазвичай використовуються як наповнювачі для блоків плавучості. Проте вигляд та склад блоків суттєво відрізняються, як і діапазон варіантів підводних пристроїв, для яких вони виготовляються.

Для населених апаратів, наприклад, підводних човнів, використовуються блоки плавучості, де керамічні сфери заливаються у масив сферопластику. Причому оболонки можуть бути як макросферами, так і мікросферами. На рисунку 1.3. показані модулі плавучості для глибоководних апаратів, де видно керамічну макросферу, такий варіант може використовуватися в апаратах, де перебувають люди.



Рис. 1.3. Блок плавучості з керамічними макросферами. [20]

Окрім використання в населених човнах, автономно чи дистанційно керовані пристрої також потребують модулі плавучості, та глибини, на які здатні проникати такі пристрої значно більші. Для малих за габаритами ненаселених апаратів часто використовують не з'єднані матрицею сфери, а просто посудини, в які вкладають оболонки. Такий варіант використання показаний на рисунку 1.4.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

24



Рис. 1.4. Керамічні сфери, вкладені у відсік плавучості. [20]

Для керованих глибоководних пристроїв, які припускають проведення океанографічних досліджень, сканувань поверхні, а також забір зразків ґрунту, води тощо, характерна наступна конструкція (рисунки 1.5 та 1.6): центр керування, маніпулятор, камери тощо знаходяться по центру апарата, а з боків розташовані два конструкційних елемента, де знизу знаходяться запаси пального, акумулятори та інше, а зверху – блоки плавучості, що містять у своєму складі керамічні макросфери.

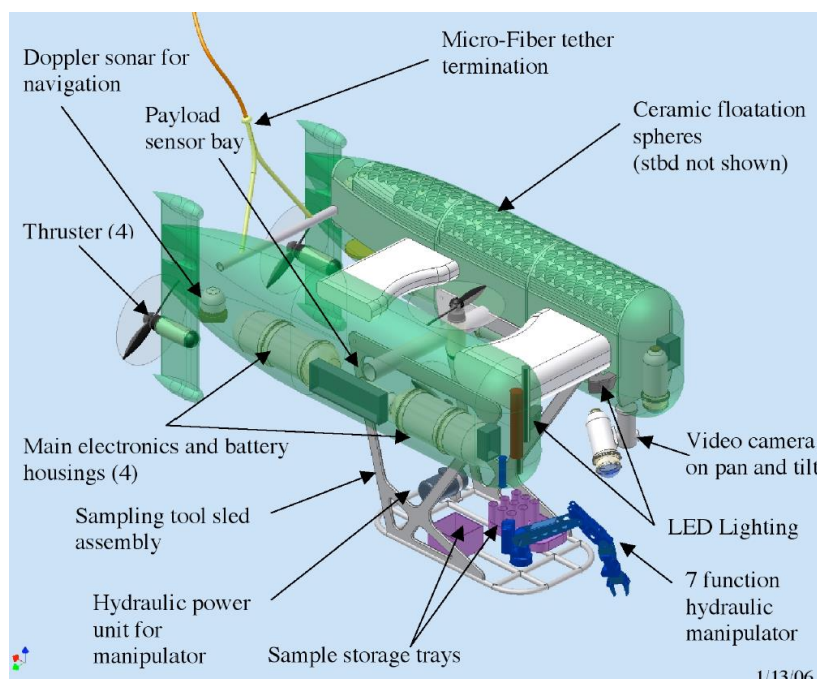


Рис. 1.5. Складові частини глибоководних керованих апаратів. [20]

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

25

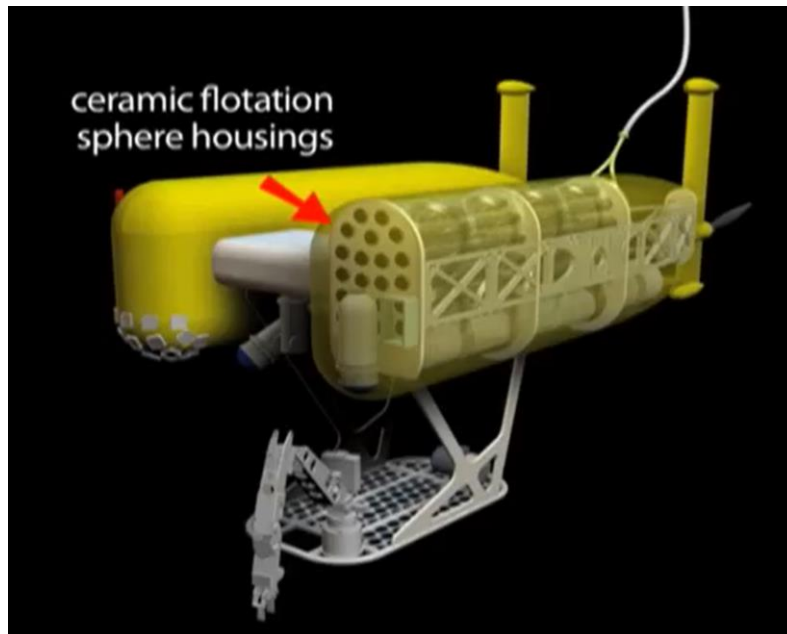


Рис. 1.6. Розташування блоків плавучості. [20]

Таким чином:

1. Введення керамічних макросфер у склад сферопластика на сьогодні є дієвим методом збільшення підйомної сили для глибоководних технічних засобів.
2. Керамічні макросфери використовуються як самостійно, так і у комбінації з іншими матеріалами плавучості.
3. Практично не вивчена можливість отримання блоків плавучості на основі сферопластика, що розміщуються в масиві з адгезійним контактом.

1.4. Сферопластики, огляд компонентів та властивостей

Термін «сферопластик» загалом відноситься до композитного матеріалу, який містить у своїй структурі порожнисті сфери: мікро- або макросфери.

Сферопластик зазвичай складається з двох основних компонентів: матриці та порожнистих сфер в якості наповнювача. Вибір матеріалів для обох компонентів залежить від бажаних властивостей композиту та конкретних вимог застосування. [6, с. 207-212]

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

26

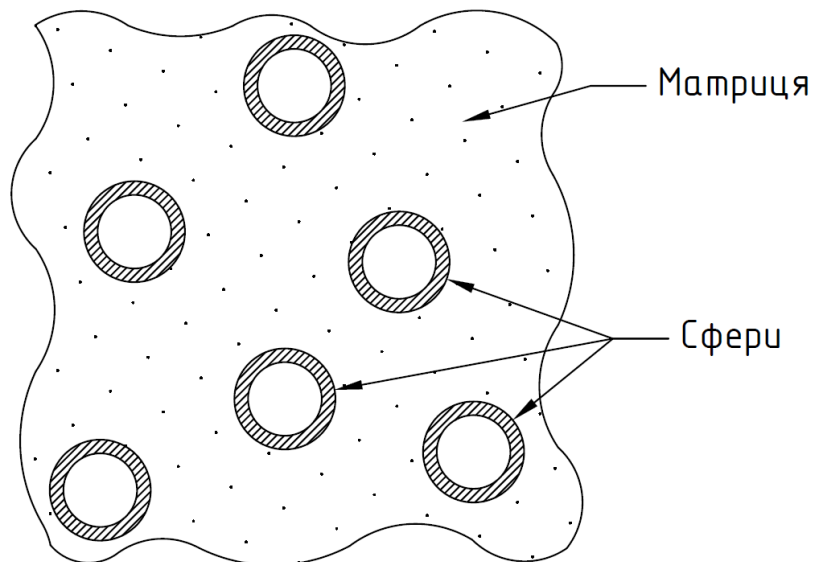


Рис. 1.7. Компоненти у складі сферопластику.

Розглянемо детальніше компоненти обраного матеріалу.

Матриця – використовується як сполучник у складі сферопластика, частіше за все може бути полімерною, або металевою:

- Полімерною матрицею можуть виступати такі полімери, як епоксидна смола, поліефірна, вінілефірна, поліамідна, фенолформальдегідна або термопласти. Полімерна матриця забезпечує загальну структуру та зв'язує інші компоненти. Вона легка, має гарну адгезію, але також характерні невисокі механічні властивості, середня стійкість до агресивних середовищ та невисокі температурні діапазони робочого стану.

- Металеву матрицю, зазвичай алюмінієві або магнієві сплави, використовують для певних конструкцій, особливо там, де висока міцність і теплопровідність є вирішальними, а велика вага не є критичним параметром.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

27

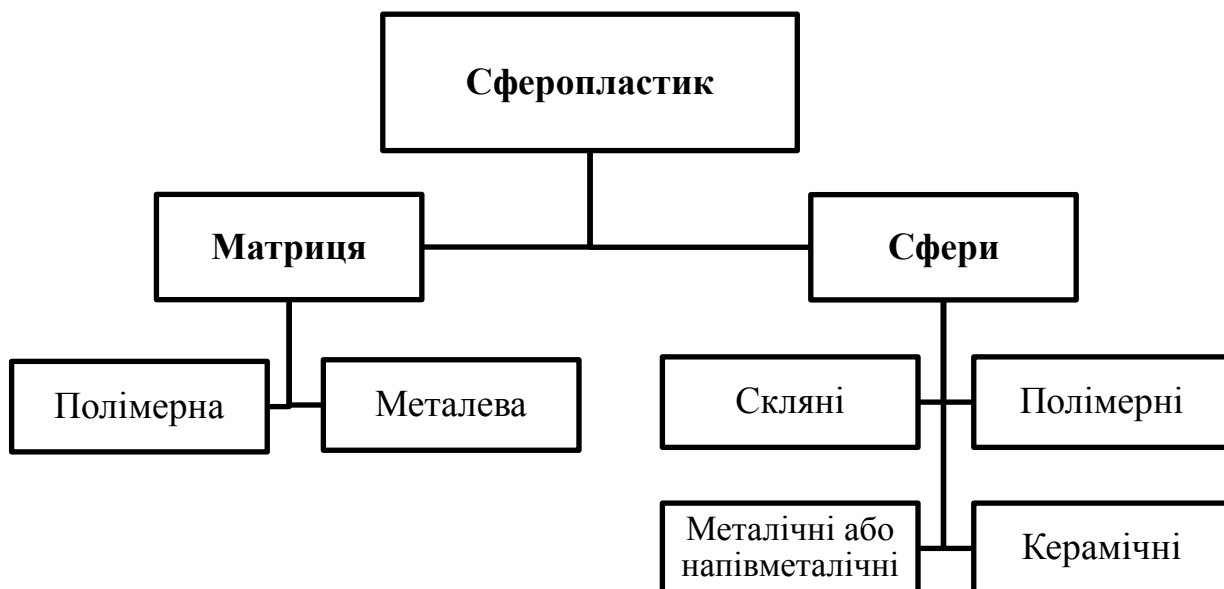


Рис. 1.8. Різновиди складових частин сферопластику.

Порожністі сфери – наповнювач у складі сферопластика. Можуть поділятися за розмірами на макросфери та мікросфери, а також відрізняються матеріалами оболонок:

- Скляні сфери – порожністі оболонки, які зазвичай виготовляються з Е-скла, але можливе використання інших видів, наприклад, хімічно стійкого скла. Вони легкі та мають переваги для теплоізоляції та плавучості для невеликих глибин. [10; 11; 17]
- Полімерні сфери можуть бути виготовлені з будь-якого полімеру, який відповідає вимогам бажаного сферопластика, але найчастіше застосовуються поліетилен (ПНТ), полівінілхлорид (ПВХ) або полівініліденфторид (ПВДФ). Мають невелику вагу, гарну адгезію до полімерної матриці, але характерні невеликі температурні режими. [14]
- Металеві або напівметалеві сфери гарно витримують навантаження стискання та також високі температурні навантаження, характеризуються значно більшою вагою. Здебільшого поширені алюмо-керамічні оболонки. [16; 19; 20]
- Керамічні сфери часто виготовлені з таких матеріалів, як оксид алюмінію або кремнезем, фарфор та інші види кераміки. Застосовуються через

високу міцність, жорсткість та стійкість до високих температур і відносно невисоку вагу. [5; 8; 12; 14; 18]

1.4.1. Фізико-механічні властивості сферопластиків

Для сферопластиків характерні наступні властивості:

- Невисока вага – використання сферичних оболонок значно зменшує щільність композиту, роблячи його легким, особливо у комбінації з полімерною матрицею. Ця властивість є цінною у сферах застосування, де економія ваги є критичною; [6; 7]

- Високі теплоізоляційні властивості – досягаються за рахунок наявності повітря або інших газів, які знаходяться всередині порожнистих сфер, що робить ці композити придатними для застосування, де потрібна термостійкість або ізоляція; [18]

- Міцність і жорсткість: вибір матеріалу матриці, розмір і розподіл порожнистих сфер впливають на механічні властивості композиту. Конструкцію можна адаптувати для забезпечення оптимального балансу міцності та жорсткості, високі фізико-механічні характеристики досягаються за рахунок використання керамічних оболонок; [12; 13; 14]

- Гарні акустичні властивості – заповнені повітрям або іншими газами порожнини в оболонках впливають на акустичні характеристики композиту, що робить його корисним у застосуваннях, де важливе звукопоглинання або демпфування. [9]

Важливо відзначити, що конкретні характеристики порожнистого сферичного композиту залежать від комбінації матеріалів, процесу виробництва та передбачуваного застосування. Визначення оптимального складу, розмірів та особливостей розміщування наповнювача у сферопластику проводиться для кожного конкретного застосування та характерного навантаження, тому характеристики сферопластиків будуть різними в кожному окремому випадку.

У цій роботі буде розглядатися сферопластик з керамічними сферами, виготовленими з фарфору в якості наповнювача та матрицею, виготовленою із сферопластика. Для обраних складових частин визначені наступні механічні властивості.

Таблиця 1.1.

Фізико-механічні властивості компонентів сферопластика та макросфери (фарфор).

Характеристика	Фарфор	Сферопластик
Густина $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$	2400	600-800
Міцність на стискання $\sigma_T, \text{МПа}$	400-600	60-80
Модуль пружності $E, \text{ГПа}$	60-70	6-8

1.4.2. Переваги та недоліки використання сферопластиків у конструкціях. Сфери застосування

Специфічні властивості та робочі характеристики композиту з порожнистими сферами можуть змінюватись залежно від використовуваних матеріалів, розміру та розподілу порожнистих сфер, а також застосованого процесу виробництва.

При раціональному використанні можна досягти конструкції з наступними перевагами:

+ Суттєве зменшення ваги готового виробу – порожниста структура сфер сприяє загальній легкості композиту;

+ Теплоізоляція та звукопоглинання – порожнини оболонок, заповнені повітрям або іншими газами, які виділяються в залежності від технологічних особливостей, підвищують вказані властивості, тому сферопластик може використовуватися як ізоляційний матеріал;

+ Міцнісні характеристики – високі показники жорсткості, міцності та стійкості можна досягти за рахунок вдалої комбінації розмірів та складу мікросфер та матриці;

+ Ударостійкість – порожниста структура сфер може підвищити ударостійкість композиту, що робить його придатним для застосування, де стійкість до ударів або вібрації мають вирішальне значення;

+ Плавучість – у деяких сферах застосування, таких як надводні або підводні конструкції, порожнисті сферичні композити можуть бути розроблені для забезпечення плавучості. Повітря, захоплене всередині порожнистих сфер, сприяє загальній виштовхувальній силі; [8; 16]

+ Економічна ефективність – у деяких випадках використання порожнистих оболонок може зменшити загальну вартість матеріалу композиту, зберігаючи при цьому бажані властивості.

Також для сферопластиків характерні наступні недоліки:

– Обмеження щодо міцності – хоча сферопластики можуть бути розроблені міцними та жорсткими, у порівнянні з твердими матеріалами можуть бути обмеження. Загальна міцність залежить від таких факторів, як матеріал матриці, розмір та розміщення оболонок;

– Обмежена високотемпературна продуктивність – деякі порожнисті сферичні матеріали можуть мати обмеження у високотемпературних застосуваннях. У певних середовищах слід враховувати вибір матеріалів і можливість руйнування при підвищених температурах; [18]

– Сумісність матеріалу – сумісність матеріалу матриці з порожнистими сферами має вирішальне значення, та іноді її нелегко досягнути. Невідповідність властивостей або взаємодії матеріалу може вплинути на загальну продуктивність композиту;

– Можливість обтиснення – за певних умов може існувати ризик стиснення або колапсу порожнистих сфер, що впливає на структурну цілісність

композиту. Це особливо важливо для застосувань конструкцій, розрахованих на високі навантаження стискання; [8]

– Технологічна складність – процес виробництва порожнистих композиційних матеріалів може бути складнішим за традиційні композити. Досягнення рівномірного розподілу оболонок і збереження рівного розподілу властивостей може стати складною задачею;

– Додаткові окремі вимоги до проектування – ефективне використання сфер у складі композита може вимагати ретельного проектування, щоб одночасно оптимізувати розташування, розміри і товщини порожнистих сфер. Це може бути більш складним, ніж робота зі звичайними композитними матеріалами.

Важливо відзначити, що переваги та недоліки сферопластиків можуть відрізнятись залежно від конкретного застосування, конструкції та обраних матеріалів. Уважний розгляд цих факторів є важливим при виборі матеріалів для конкретного випадку використання. Крім того, прогрес у виробничих процесах може з часом вирішити деякі проблеми, пов'язані з виготовленням композитів з порожнистими сферами.

Сферопластики використовуються в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну, морську, будівництво, виробництво спортивних товарів тощо.

Але найбільшого поширення сферопластики набули у будівництві надводних та підводних споруд, завдяки гарним показникам, в першу чергу, плавучості. [8; 15] Також, завдяки малому водопоглинанню та стійкості до агресивних середовищ, вони чудово працюють протягом десятків років у морській та прісній воді, у середовищі нафтопродуктів, олій.

Тобто зараз деталі, виготовлені зі сферопластиків використовуються як основні блоки плавучості та елементи додаткової плавучості для надводних та глибоководних технічних засобів, виготовлення буїв, поплавків, а також

заповнювач підводних апаратів одночасно як блок плавучості, звуко- та теплоізолятор.

1.4.3. Обумовленість використання складових частин

Враховуючи, що основна мета використання виробів – забезпечення плавучості на значних глибинах, форма наповнювача обрана не випадково. Як відомо, кулеподібна форма найкраще витримує гідростатичне обтиснення, так як однакова в усіх напрямках, має симетрію та не припускає різку зміну форми.

Але для того, щоб облегшити вагу матеріалу плавучості, раціональним буде використання порожнистих оболонок, а не суцільних куль, крім того – тонкостінних сфер.

Далі встає питання закріплення або фіксації цих оболонок у вільних просторах між корпусами підводного судна. Так як найпростішим варіантом було б використання просто сфер, які сприйматимуть зовнішній тиск, але під час такого варіанту очевидним буде переміщення цих сфер у секціях підводного апарату, а також взаємне тертя та удари сфер між собою.

З цього виникає питання: який сполучник варто використати для фіксації оболонок. Сполучник, зазвичай, обирається епоксидний. Можна використовувати як просто смолу, так і його похідні, наприклад, бітум. Основні причини використання епоксидної матриці – гарна адгезія, достатні фізико-механічні властивості, висока хімічну стійкість та густина, прийнятна ціна.

Для сполучника важливим критерієм становиться густина близька до густини води – таким чином відсутність різкої зміни щільності дозволяє передавати вихідні навантаження: гідростатичний тиск на глибині рівномірно діє на весь масив сферопластика, а вже сам сферопластик передає це обтиснення на сфери, роблячи можливими умови для відтворення гідростатичного обтиснення саме для оболонок.

Також з метою покращення щільності упаковки та вмісту оболонок у складі сферопластика рекомендується одразу використовувати сфери декількох

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		33

розмірів, тоді менші оболонки будуть розташовуватися у просторах між більш великими.

1.4.4. Технологічні прийоми виготовлення блоків плавучості на основі сферопластика

Для виготовлення блоків сферопластика можливе використання двох технологічних прийомів: заливка та інжекція.

Під час заливки керамічні мікросфери змішуються із сполучником, отриману суміш заливають до форми, де вона проходить процес отвердження. Перевагами цього методу стають можливість заливки у форми будь-якої конфігурації, та навіть безпосередньо у простори між секціями підводних апаратів, а також невелика ціна устаткування та кваліфікація робітників. Проте, вагомими недоліками є низький процент вмісту сфер, великі відстані між мікросферами, нерівномірний масив сферопластика, а також є велика ймовірність появи усадки, та якщо вона буде завеликою – це може спричинити пошкодження або повне руйнування самих сфер.

Під час інжекції сфери засипаються до форми, трішки утрамбовуються, далі закривається вакуумний мішок і під тиском знизу починає просочуватися смола чи інший сполучник. Такий метод дозволяє отримувати щільну упаковку, але водночас із забезпеченням прошарку сполучника між сферами, низьку усадку, непошкоджені сфери, менші залишкові напруження та і через це – більш стабільні фізико-механічні властивості. До недоліків можна віднести обмеження блоків за формою та за габаритами, довший час виконання та більші витрати на оснащення та витратні частини.

При невеликих габаритах використання декількох типорозмірів сфер також викликає проблему нерівномірного розташування. Заливка ніяк не може гарантувати рівномірність, та може статися ситуація, коли великі оболонки будуть скупчені в одному місці, а менші – в іншому. Під час інжекція також може більшість маленьких сфер опинитися унизу блока під час утрамбовки, але

у таких ситуаціях можливо використовувати пошарове укладання та трамбування.

1.5. Постановка задачі

Розглянувши основні характеристики, переваги та недоліки використання сферопластика та керамічних сфер, як основного матеріалу блока плавучості, виникає наступна задача:

– Визначення можливості впровадження керамічних макросфер у склад сферопластика для його подальшого удосконалення – зменшення питомої ваги та збільшення підйомної сили.

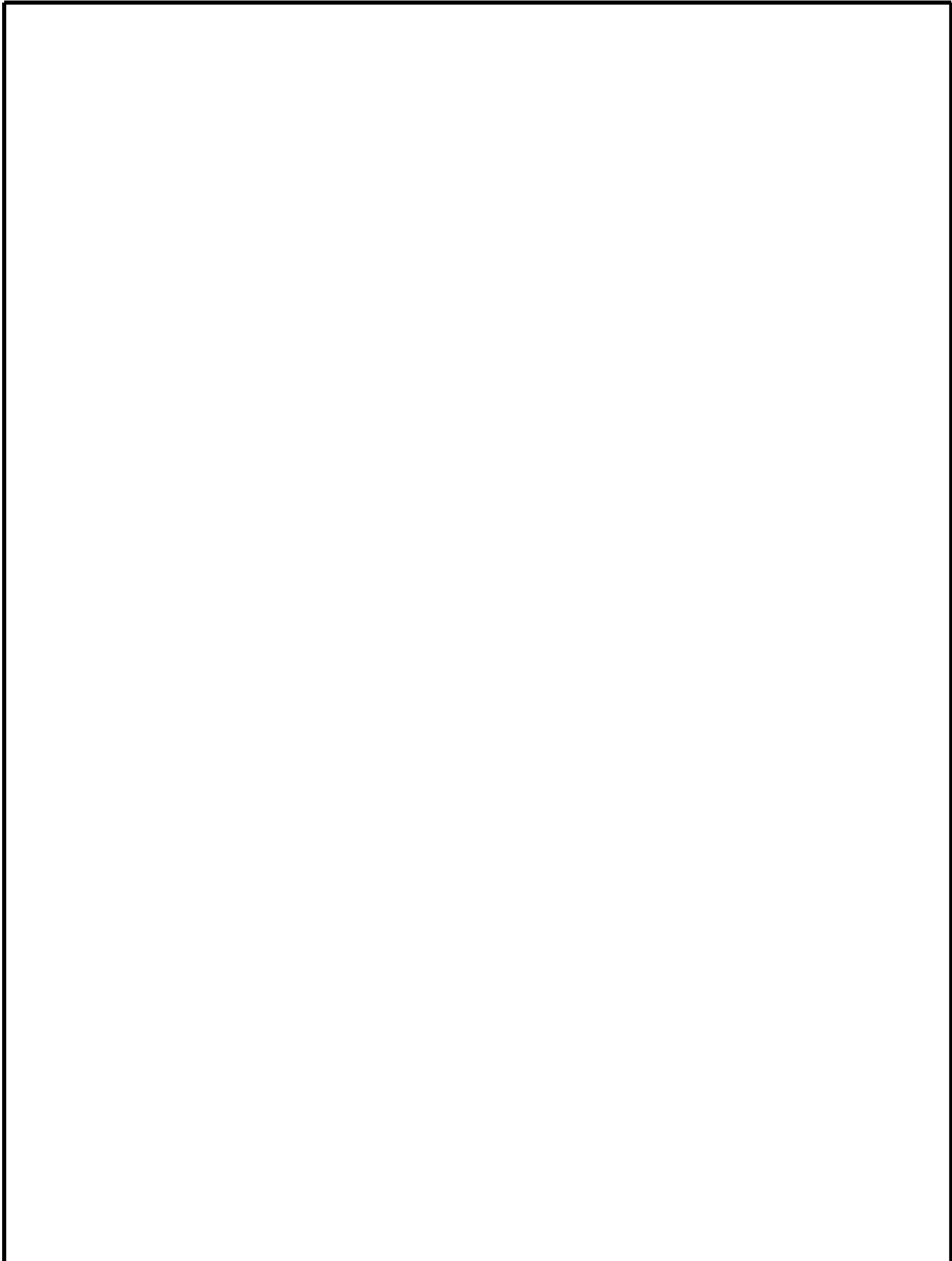
У зв'язку з цим виникають супутні задачі:

1. Визначити, чи впливає розміщення сфер близько до поверхні сферопластика на напружено-деформований стан блока плавучості на значній глибині.

2. Визначити, чи впливає розміщення сфер близько одна до одної в масиві сферопластика на напружено-деформований стан блока плавучості на значній глибині

3. Надати рекомендації щодо вибору співвідношення розмірів сфер та їх розташування у складі сферопластику для блоків плавучості.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		35



					135.6161м.01.ДР			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Студент	Довженко				РОЗДІЛ 2	Літ.	Аркуш	Аркушів
	О.В.							
Викладач	Гейко					НУК		
	С.П.							

РОЗДІЛ 2.

СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ КОНЦЕПЦІЇ ФОРМУВАННЯ ОБСЯГІВ ПЛАВУЧОСТІ НА ОСНОВІ КЕРАМІЧНИХ СФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК

2.1. Вибір структурних схем формування обсягів плавучості на основі сферичних оболонок

Відомо, що у глибоководній техніці обсяги плавучості розміщуються у вільний від основного обладнання простір. Як правило, вони мають складну форму, і від ефективності їх заповнення сферичними оболонками залежать маса та габарити підводно-технічного засобу. Тому питання формування обсягів плавучості має вирішуватись у кожному конкретному випадку з урахуванням геометрії вільного простору підводного апарату. У свою чергу, ефективність заповнення залежить від цілого ряду факторів:

- типу упаковки (взаємної орієнтації оболонок);
- співвідношення між діаметрами оболонок;
- співвідношення між габаритами обсягів плавучості і розмірами оболонок, що їх заповнюють.

Як параметр, що характеризує ефективність упаковки об'єму плавучості, зазвичай приймається коефіцієнт заповнення об'єму:

$$\alpha = \frac{V_{\text{сф}}}{V_{\text{заг}}} \quad (2.1), \text{ де}$$

$V_{\text{сф}}$ – обсяг, що займають сфери;

$V_{\text{заг}}$ – загальний обсяг поплавця.

Очевидно, що найбільш ефективними є щільноупаковані композиції, коли кожна оболонка контактує із сусідніми. Саме такі схеми упаковок розглядатимемо надалі.

Обсяги плавучості можуть виготовлятися як у вигляді монолітних блоків, так і з окремих уніфікованих модулів.

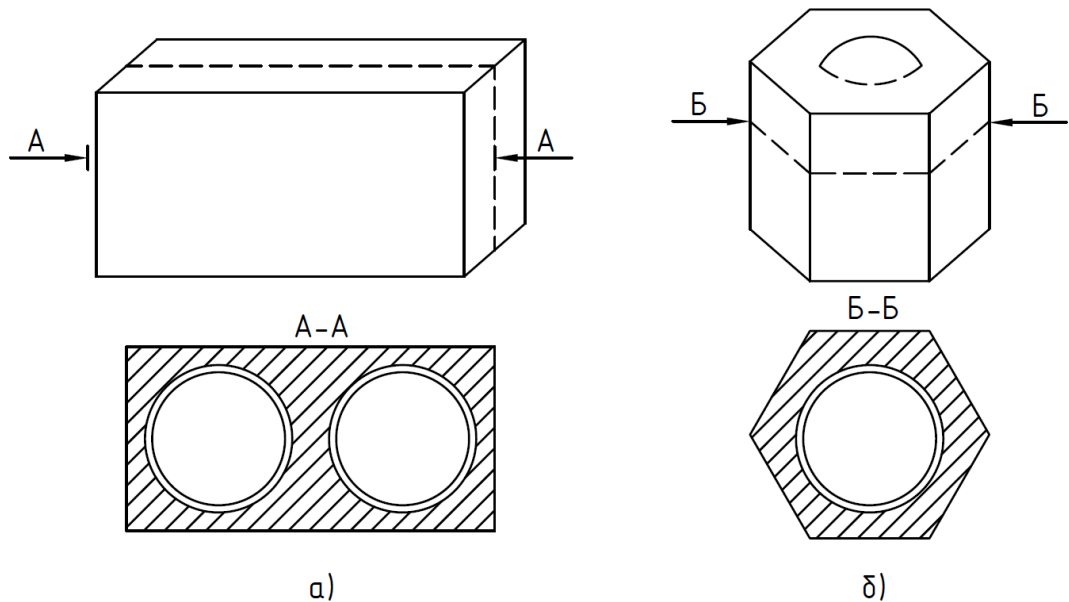


Рис. 2.1. Приклади уніфікованих модулів плавучості: а – прямокутний модуль у вигляді цегли з двома сферами, розташованими із зазором сферопластика; б – шестигранний модуль плавучості з однією сферою, що сполучається з забортною водою.

2.2. Типи упаковок

Основою будь-якого типу щільних упаковок служить шар, від розташування оболонок у якому і від взаємної орієнтації самих шарів залежить ефективність упаковки.

Залежно від розташування сфер у шарі розрізняють ортогональну та ромбічну схему. При ортогональній схемі центри оболонок утворюють прямокутну систему. При ромбічній – осі, що з'єднують центри оболонок, перетинаються під кутом 60° .

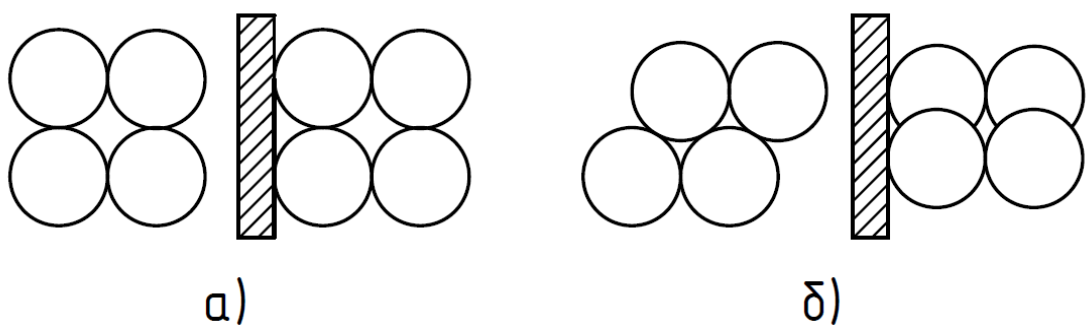


Рис. 2.2. Типи упаковок: а – ортогональна, б – ромбічна.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

37

Якщо кілька ортогональних шарів розташувати так, щоб оболонки розташувалися на одній вертикалі, отримаємо кубічну упаковку. При розташуванні сфер у шарі у поглибленні між двома оболонками сусіднього шару утворюється орторомбічна упаковка. У тому ж випадку, коли вони знаходяться в поглибленні між чотирма оболонками отримуємо подвійну кубічну упаковку.

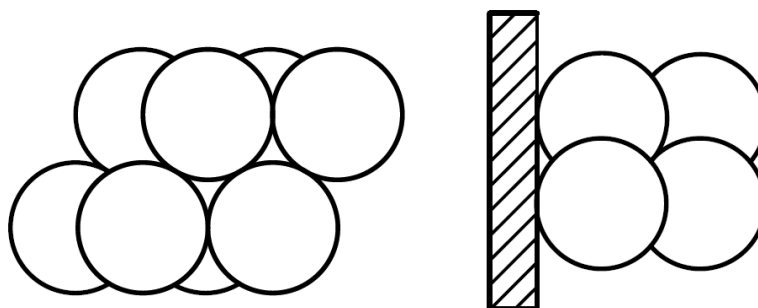


Рис. 2.3. Подвійна кубічна упаковка.

Ще кілька типів упаковок можна одержати при комбінуванні ромбічних шарів. При такому їх розташуванні, коли оболонки в сусідніх шарах знаходяться на одній вертикалі, отримаємо вже згадану орторомбічну упаковку; при зміщенні сусідніх шарів уздовж осі розташування оболонок у поглибленні між двома оболонками одержуємо подвійну ромбічну. Найбільшу ефективність має гексагональна упаковка, утворена розташуванням ромбічних шарів у поглибленні між трьома оболонками сусідніх шарів. Значення коефіцієнтів заповнення обсягу для різних типів упаковки наведено у таблиці 2.1.

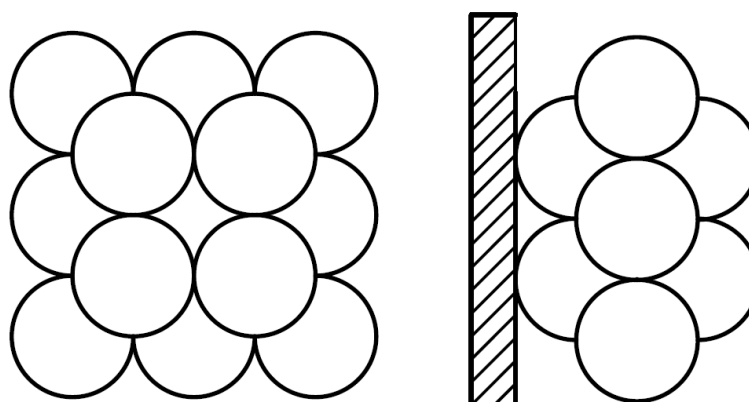


Рис. 2.4. Подвійна ромбічна упаковка.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

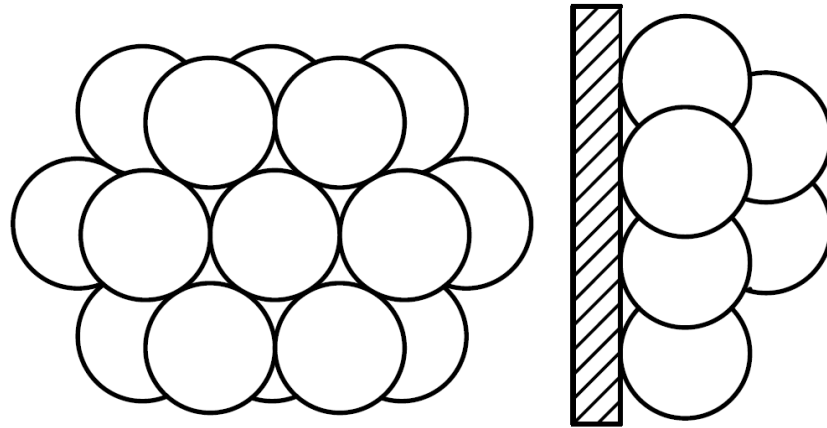


Рис. 2.5. Гексагональна упаковка.

Таблиця 2.1.

Значення коефіцієнтів заповнення об'єму різних типів упаковки

Тип упаковки	Коефіцієнт заповнення об'єму
Кубічна	0,523
Орторомбічна	0,605
Подвійна кубічна	0,74
Подвійна ромбічна	0,693
Гексагональна	0,741

[3, с. 107]

Наведені значення коефіцієнта заповнення об'єму є дійсними для випадків, коли розміри оболонок малі порівняно з розмірами об'єму ними заповненого. Пов'язано це з тим, що на межі упаковки утворюються порожнини, в які не можуть поміститися оболонки даного діаметру.

Значного збільшення ефективності упаковки можна досягти, використовуючи оболонки різних діаметрів. Сфери меншого діаметра містяться в порожнині, утворені сферами більшого діаметра. Так, якщо в якості вихідної упаковки використовувати кубічну, то між вісьмома контактуючими оболонками, розміром можна помістити оболонку діаметром $0,73D$ між чотирма

з граничною стінкою діаметром $0,5D$. Природно, що збільшити коефіцієнт можна шляхом заповнення порожнин ще меншого порядку (між оболонками першого та другого рівня). Проте вигаш при цьому незначний. Наприклад, використання сфер діаметром $0,3D$ збільшує ефективність упаковки на 2,7%. Використовуючи як вихідну схему гексагональну та оболонку для заповнення порожнин діаметром $0,4D$ та $0,22D$ можна отримати коефіцієнт заповнення об'єму $\alpha = 0,82$. При цьому застосування оболонок тільки першого і другого рівня дає значення $\alpha = 0,81$, що знову ж таки свідчить про низьку ефективність третього рівня.

Усі наведені вище типи упаковок є нестійкими і їх неможливо отримати шляхом безпосереднього засипання, оскільки засипка дає досить певне значення коефіцієнта $\alpha = 0,60 - 0,62$. В утворені при цьому порожнини можуть просипатися оболонки меншого діаметра і якщо їх розміри менше у 8...10 разів, можна отримати коефіцієнт заповнення об'єму $\alpha = 0,84 - 0,86$. Третій рівень оболонок діаметром, знову ж таки в 8...10 разів менший за діаметр оболонок другого рівня, може забезпечити значення параметра $\alpha = 0,9 - 0,93$. Для реалізації такого варіанту потрібний великий вибір типорозмірів оболонок.

Об'єми плавучості можуть формуватися з уніфікованих модулів, своєрідних цеглин. Вони повинні мати просту геометричну форму і здатність утворювати складні форми. У світовій практиці є приклади використання призматичних модулів із шестигранником у основі. Коефіцієнт заповнення такого модуля $\alpha = 0,6$. Він дуже простий у виготовленні та досить універсальний.

Пропонується також використовувати прямокутну призму з однією, двома, чотирма або вісьма оболонками двох або трьох типорозмірів.

Для буїв різного призначення можливе застосування циліндричних модулів з легкового матеріалу з вертикальним розташуванням оболонок у вигляді гірлянди. Коефіцієнт заповнення об'єму такого модуля $\alpha = 0,67$.

2.3. Вагові характеристики композитів на основі керамічних оболонок

Керамічні сферичні оболонки як елементи плавучості глибоководної техніки пропонується використовувати в наступних варіантах.

1. Керамічні оболонки у масиві бітуму, або іншого матеріалу, що має властивості не передавати напруження зсуву та ведуть себе як рідина при високих тисках тобто передає на сфери тільки гідростатичну складову навантаження. Масив у таких композиції практично є захисним кожухом для сфер, а сам по собі не створює додаткової плавучості. Такий масив має властивість запобігати імплізії – явищу лавиноподібного руйнування всіх сфер від ударної хвилі, що виникає при руйнуванні одної.

2. Керамічні оболонки в масиві сфероластику у варіанті спільної роботи на всебічне стиснення (композиція виготовляється шляхом безпосереднього заливання оболонок сфероластиком).

3. Керамічні оболонки в масиві сфероластика у варіанті роздільної роботи на всебічне стиснення (між оболонкою та сфероластиком передбачений зазор, що сполучається із забортною водою (рисунок 2.6).

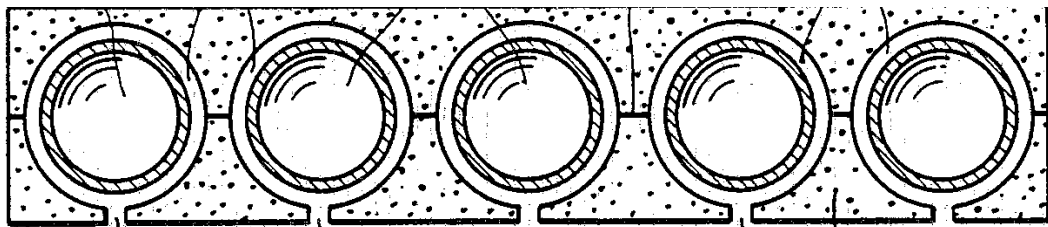


Рис. 2.6. Оболонки, розташовані у масиві сфероластика із зазором, що сполучається з забортною водою.

Обидва компоненти таким чином працюють в ідеальних для себе умовах навантаження, в масиві та оболонці не виникають збурення напружено-деформованого стану.

4. Керамічні оболонки у захисних кожухах (позитивна плавучість глибоководних буїв).

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

41

Щільність композиту залежить від наступних факторів:

- Коефіцієнт запасу міцності;
- Коефіцієнт заповнення об'єму оболонками;
- Гранична глибина експлуатації.

Коефіцієнт запасу міцності встановлюється в кожному конкретному випадку конструкторами глибоководної техніки. Зокрема, для сферопластиків руйнівний тиск встановлюється на рівні в 1,5 рази вище тиску на граничній глибині експлуатації.

Коефіцієнт заповнення об'єму залежить від форми об'єму плавучості та обмежень за масою та обсягом підводного апарату.

Таким чином застосування оболонок дозволяє варіювати вагові характеристики об'ємів плавучості в залежності від глибин експлуатації.

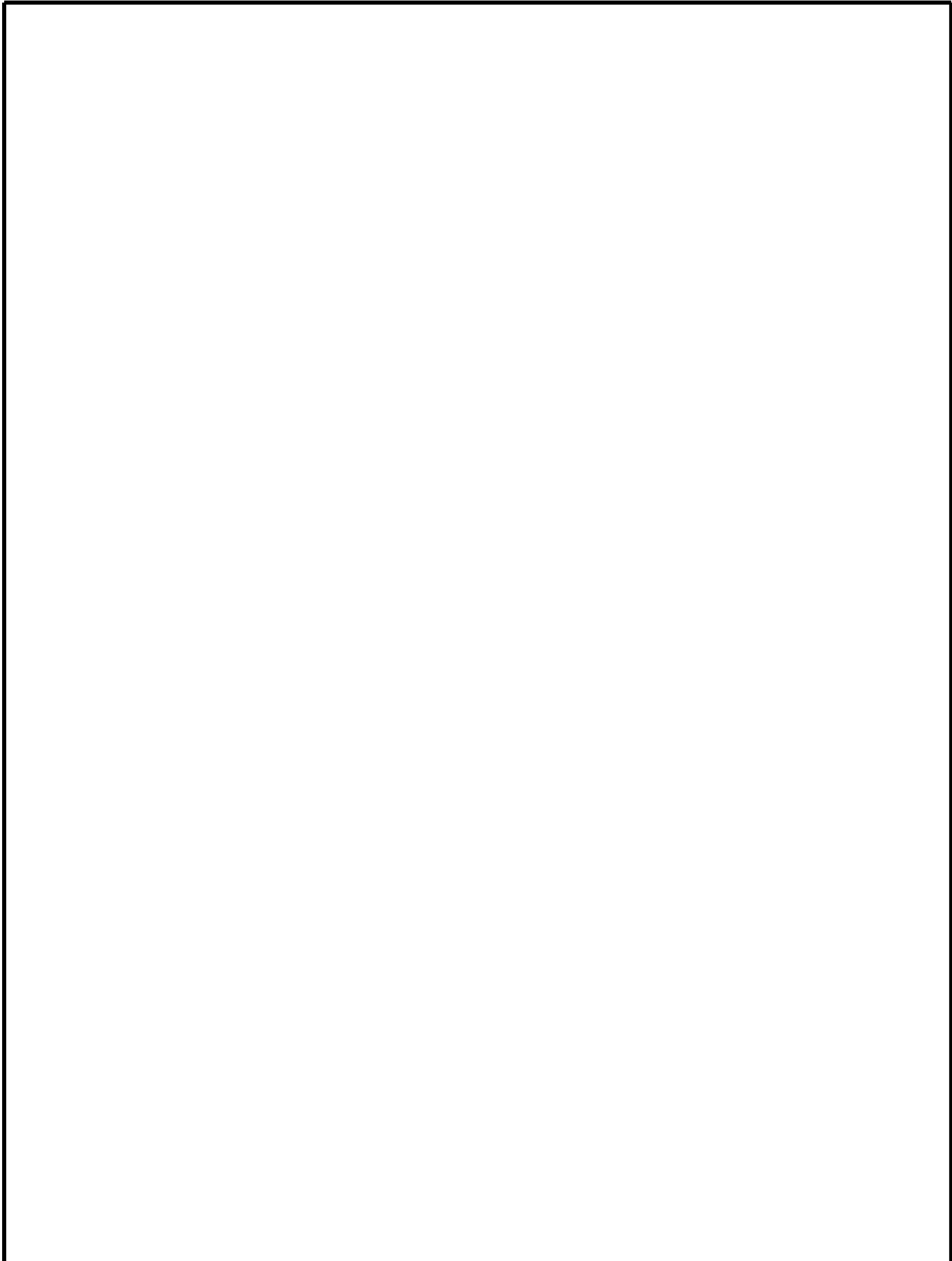
2.4. Висновки

1. Ефективність застосування керамічних оболонок в масиві сферопластика у значній мірі залежать від щільності пакування. Навіть незначне розведення оболонок значно знижує позитивну плавучість блоків

2. Застосування оболонок декількох розмірів в проміжках між основними дає деякий приріст плавучості проте значно ускладнює технологічний процес.

3. Об'єми плавучості мають формуватися з уніфікованих модулів, своєрідних цеглин. Вони повинні мати просту геометричну форму і здатність утворювати складні форми.

4. Керамічні сфери можуть застосовуватись як самостійна плавучість, так і в комбінації з іншими матеріалами, що мають захисну функцію, і створювати додаткову плавучість.



					135.6161м.01.ДР			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Студент		Довженко			РОЗДІЛ 3	Літ.	Аркуш	Аркушів
		О.В.						
Викладач		Гейко				НУК		
		С.П.						

РОЗДІЛ 3.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КЕРАМІЧНОЇ ОБОЛОНКИ БІЛЯ ПОВЕРХНІ У НАПІВБЕЗКІНЕЧНОМУ МАСИВІ СФЕРОПЛАСТИКА

3.1. Розташування оболонок близько до поверхні сферопластика

Оболонки, що знаходяться біля поверхні блоку плавучості, більш вразливі до руйнування, ніж ті, що знаходяться в об'ємі сферопластику, через те, що знаходяться на межі розподілу матеріалів, що є концентратором напруження. Чим ближче до поверхні, тим більші навантаження, тому необхідно визначити оптимальну відстань від поверхні задля уникнення додаткового руйнування оболонок та досягти оптимальної навантаженості матеріалу.

Знаходячись під дією гідростатичного тиску, теоретично, оболонка рівномірно стискується з усіх боків, але на практиці, знаходячись у масиві сферопластику, можливий варіант виникнення місцевих розтягуючих навантажень. Для кераміки міцність на розтягування значно менша, ніж міцність на стискання, тому поява розтягуючих навантажень недопустима, виходячи з цього, розташування сфер треба також враховувати під час проектування.

Під час нерівномірних навантажень з'являються деформації самої оболонки, схожі на зминання. Деформована оболонка втрачає початкову жорсткість, тому підвержена до руйнування «схлопування» або імплізії. Продовжуючи знаходитись під дією рівномірного тиску, оболонка обжимається, зменшується в об'ємі. Під час досягнення критичного відношення зруйнованих оболонок до працюючих, підводний засіб втрачає первинну плавучість та змогу піднятися на поверхню.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		44

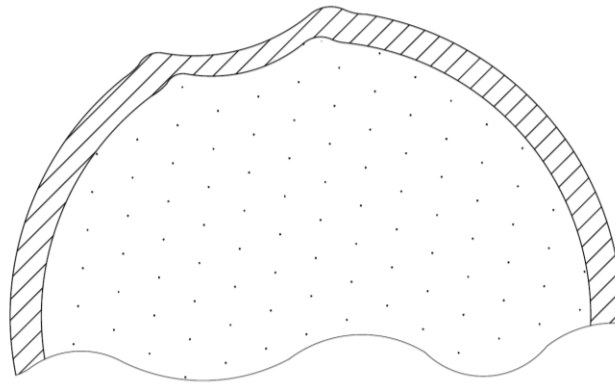


Рис. 3.1. Критична деформація оболонки під час нерівномірних навантажень, яка спричиняє схлопування.

Деформації можуть виникати від наявності домішок у складі сфери, мікротріщин, повітряних включень, порушення цілісності оболонки тощо.

Відповідно, ситуація, коли шар керамічних сфер, розташованих найближче до поверхні, буде зруйнований імплозією, а навантаження буде розподілене на наступні шари та викликатиме додаткові напруження, а згодом призведе до виникнення аварійної ситуації, є недопустимим.

3.2. Обрана модель, граничні умови та зовнішні навантаження

Розглядається ситуація, коли одна сфера розташована близько до поверхні сферопластика, перебуваючи в умовах гідростатичного тиску.

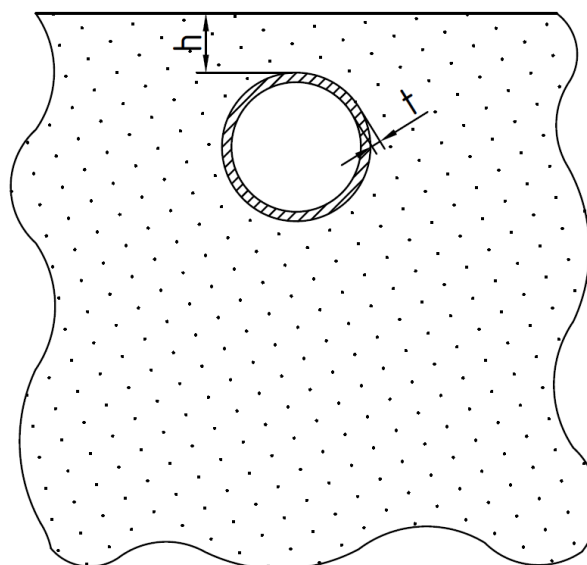


Рис. 3.2. Керамічна оболонка у масиві сферопластика, розташована близько до поверхні.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

45

Для відтворення властивостей сфероластику в заданих умовах обрана наступна фізична модель:

- масив сфероластику – куб з розмірами 300x300 мм;
- порожниста керамічна сфера – суцільна сферична оболонка з технічної кераміки, діаметром 100 мм.

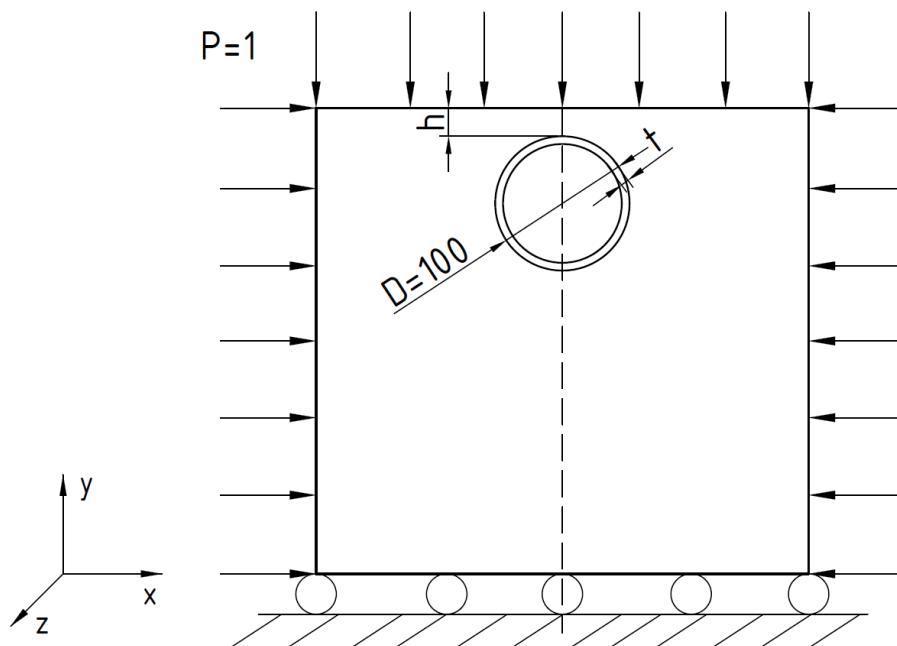


Рис. 3.3. Розрахункова модель оболонки в масиві сфероластику.

Для збереження властивостей масиву сфероластику та доречного існування моделі у межах цього сфероластику, обрані наступні граничні умови: на нижній границі наявне шарнірно рухоме закріплення, обмежені переміщення по вертикалі Z , переміщення у площині XU дозволені, також наявна вертикальна симетрія, яка проходить через центр оболонки.

Обраний тип контакту – Bonded – свідчить про те, що у даній моделі представлений адгезійний тип контакту між сфероластиком та оболонкою, тобто всі переміщення на границі між сферо за масивом сфероластику є спільними, а значить однаковими.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

46

Фізико-механічні властивості компонентів моделі: сферопластика та макросфери (фарфор)

Характеристика	Фарфор	Сферопластик
Густина $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$	2500	600
Міцність на стискання $\sigma_T, \text{МПа}$	410	60
Модуль пружності $E, \text{ГПа}$	60	7

Зовнішні навантаження становлять собою зовнішній гідростатичний тиск $P = 1$, який прикладений до усіх граней куба, окрім нижньої, де визначена шарнірна опора. Одиничний тиск обрано для узагальнення досліджень. Адже існує велике різноманіття сферопластиків з властивостями у дуже широкому діапазоні. Тому конкретні рекомендації можуть бути надані лише при підстановці конкретних фізико-механічних властивостей застосовуваних компонентів – сферопластику та кераміки.

Для визначення небезпечних та оптимальних варіантів навантаження обрані наступні параметри варіювання факторів:

- товщина керамічної оболонки t у діапазоні 0,25 – 1,5 мм (0,0025D – 0,015D);
- відстань від оболонки до поверхні сферопластика h у діапазоні 0,1–20мм (0,001D – 0,2D).

3.3. Результати розрахунків

Для проведення розрахунків була застосована студентська версія програмного забезпечення ANSYS. Побудована модель, створена сітка для об'єктів, задані зовнішні навантаження та граничні умови, проведені розрахунки із варіюванням товщини та відстані оболонки від поверхні.

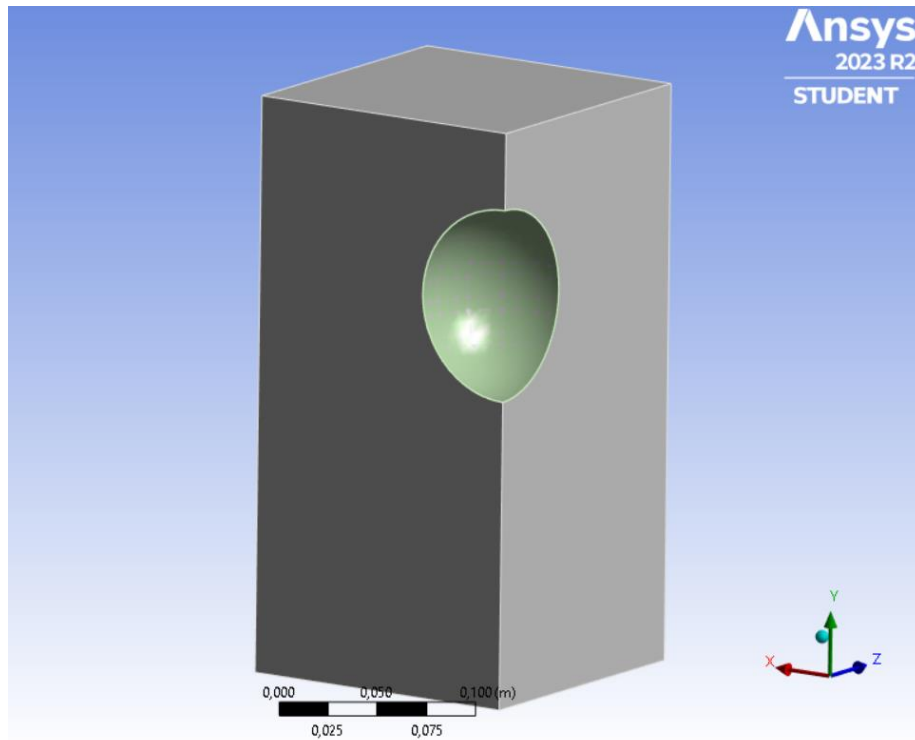


Рис. 3.4. Модель сферопластика та оболонки у ПЗ ANSYS.

Для моделі побудована програмно контрольована сітка, але призначено ущільнення сітки самої оболонки та місця контакту, тобто розмір елементів сітки був значно менший ніж елементів масиву, щоб збільшити точність розрахунків.

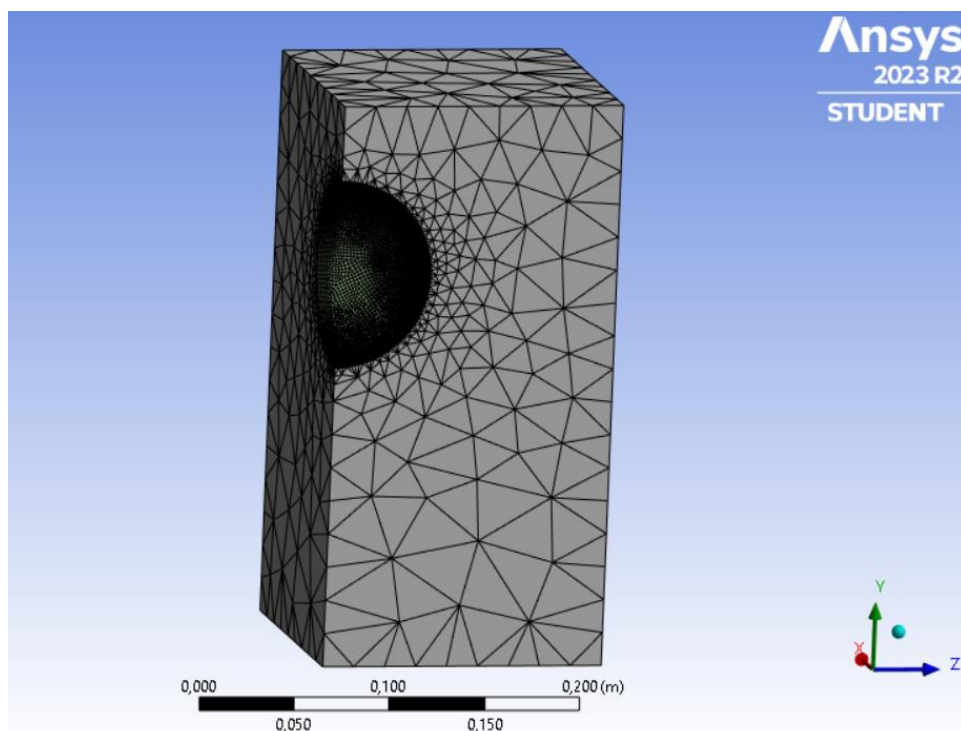


Рис. 3.5. Сітка, побудована для сферопластика.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

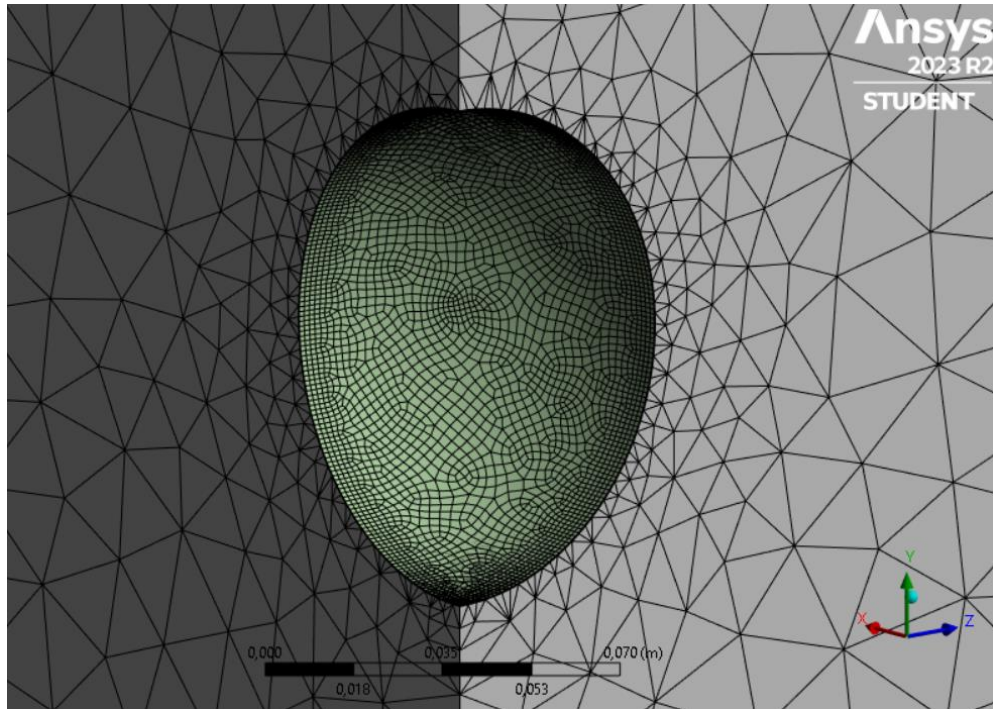


Рис. 3.6. Сітка у сфері та біля місця контакту сфери та сфероластика.

Обрана форма елементів сітки:

- тетраедр для сфероластика (через наявність сферичної виїмки у масиві кубічна форма елементів неможлива та має низьку точність);
- гексаедр у формі паралелепіпеда для оболонки.

Розподіл головних напружень у тетраедрі та гексаедрі як основних форм елементів сітки даної конструкції зображений на рисунках 3.7 та 3.8.

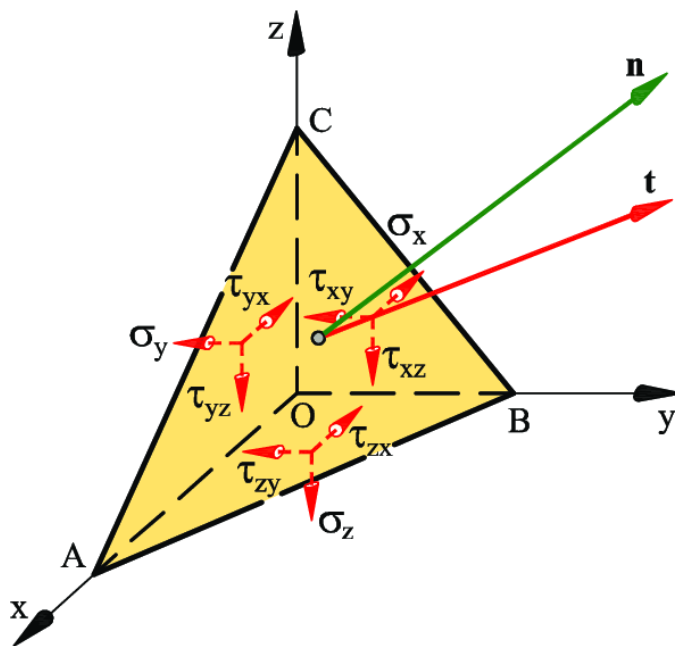


Рис. 3.7. Головні напруження у тетраедричному елементі сітки.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

49

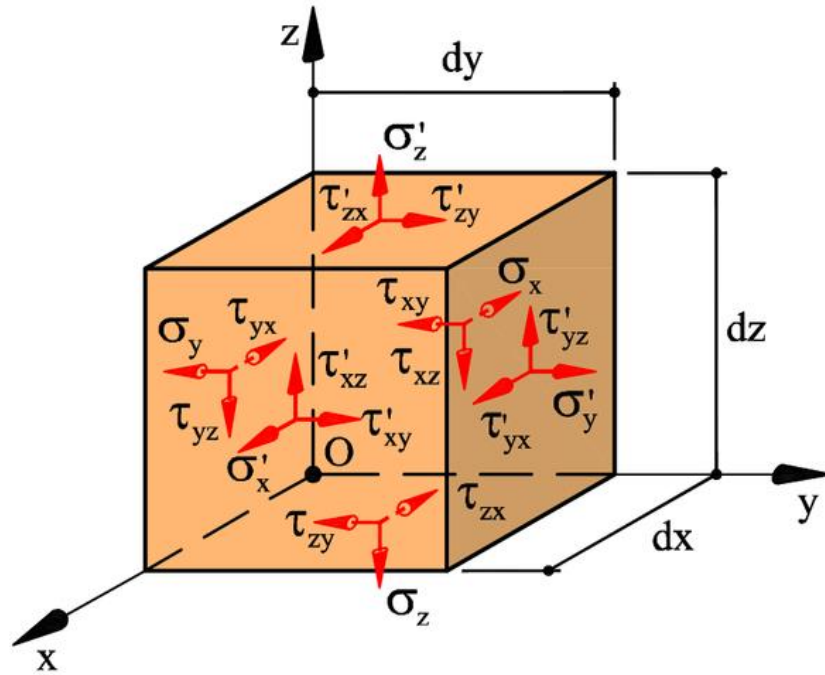


Рис. 3.8. Головні напруження у гексаедричному елементі сітки.

Задля аналізу поведінки сфероластика та керамічної оболонки при заданих навантаженнях були проаналізовані наступні компоненти напружено-деформованого стану:

- мінімальні головні напруження в оболонці;
- максимальні головні напруження в оболонці;
- мінімальні головні напруження у сфероластику;
- інтенсивність напружень у сфероластику.

Оскільки при використанні методу скінчених елементів результати розрахунків біля поверхні дещо спотворюються через сингулярність, надалі результати графіків будуть розбиті на два діапазони: з відстанню до поверхні від 0,1 до 15 мм та від 20 до 40 мм задля більш вдалого відображення результатів та уникнення скупчення схожих результатів при замалому масштабуванні.

3.3.1. Мінімальні головні напруження в оболонці

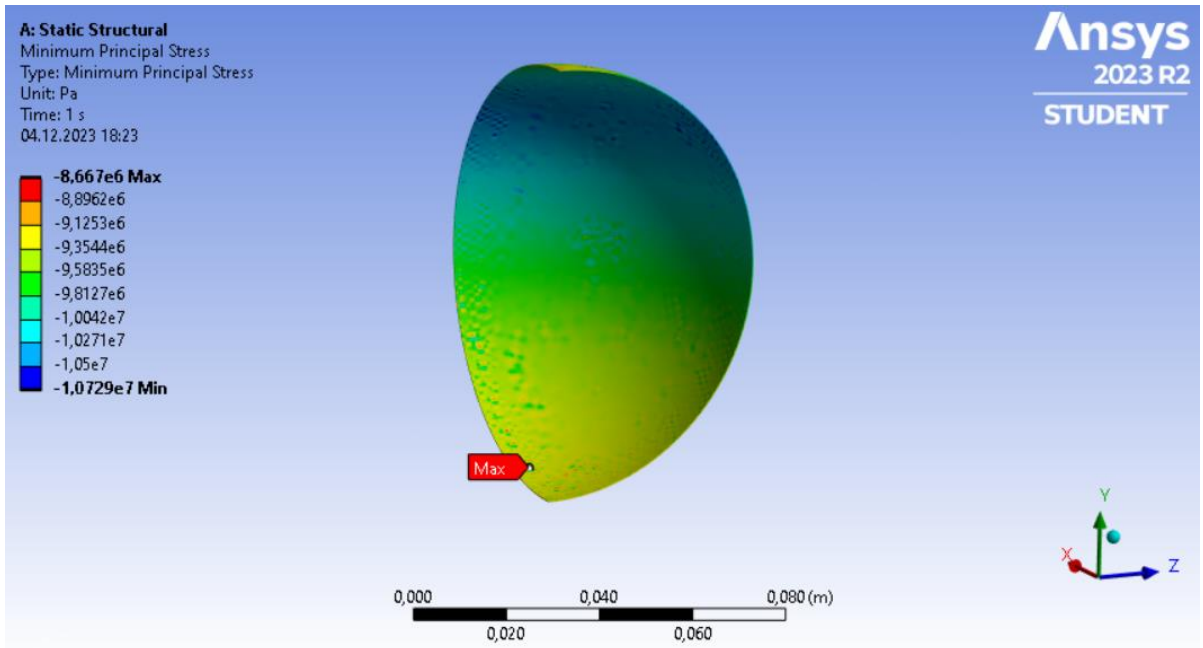


Рис. 3.9. Епюра мінімальних головних напружень у керамічній оболонці.

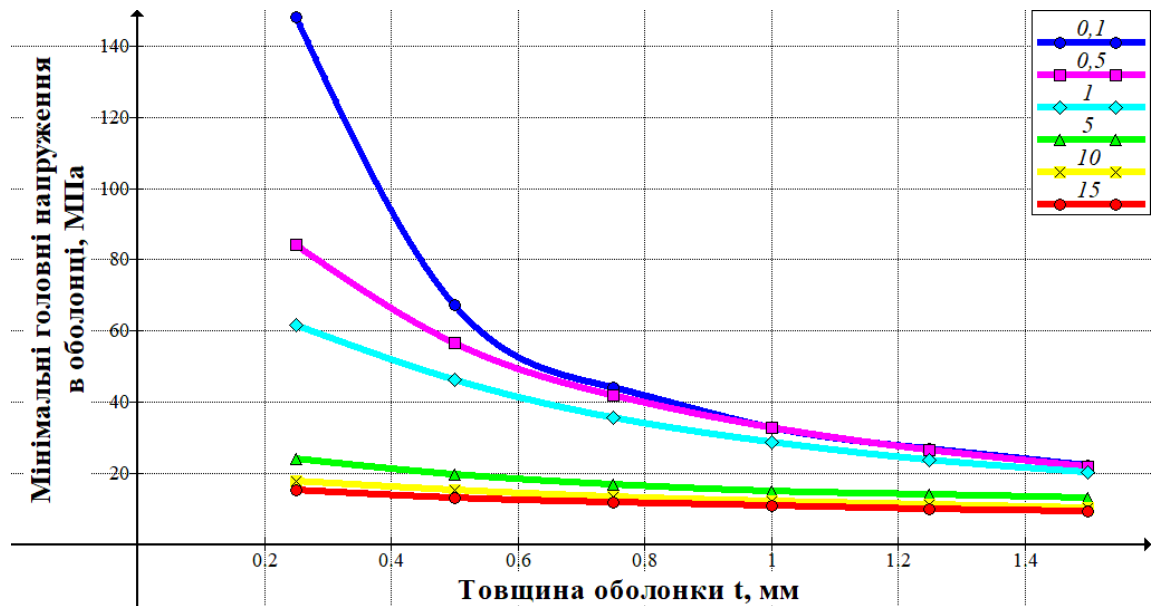


Рис. 3.10. Графік залежності мінімальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 0,1 до 15 мм.

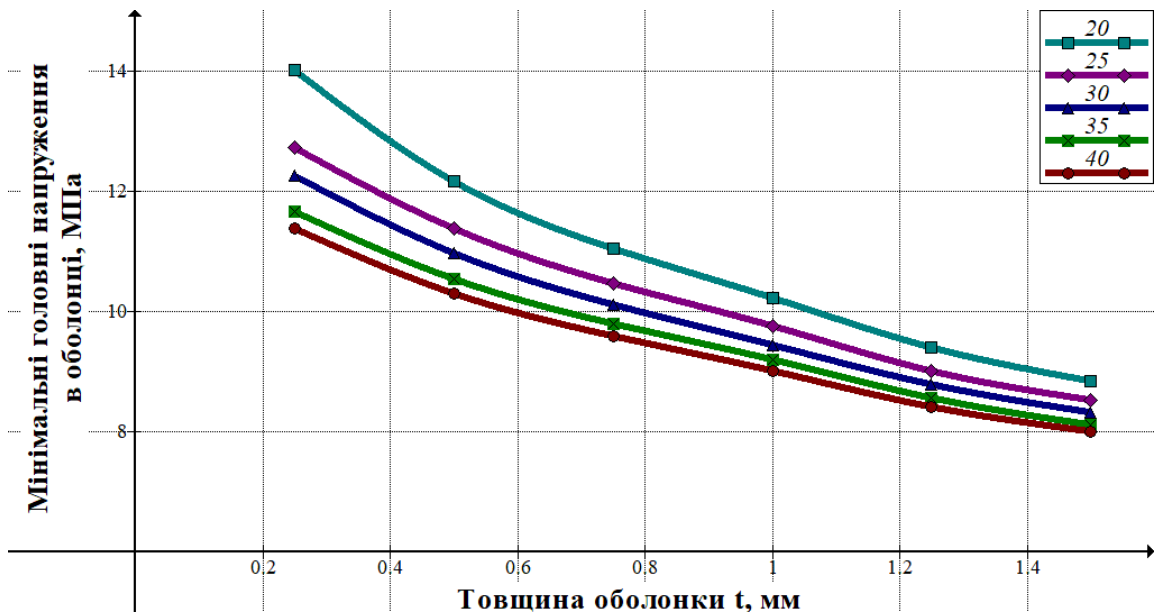


Рис. 3.11. Графік залежності мінімальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 20 до 40 мм.

З результатів цього графіку можна зробити висновок, що для мінімальних головних напружень в оболонці характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані від поверхні.

Найбільші напруження виникають при розміщенні оболонки на відстані $0,001D$, $0,005D$ та $0,01D$, тобто майже впритул до поверхні, але через сингулярність теоретичні напруження можуть збільшуватися до безкінечності, тому мають низьку точність.

Починаючи з відстані $0,05D$ характер кривої стає схожим, а з відстані $0,2D$ напруження змінюються не суттєво. Починаючи з товщини оболонки $0,0075D$ криві також мають схожий характер і невеликі розбіжності у напруженнях.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,001D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,4D$.

3.3.2. Максимальні головні напруження в оболонці

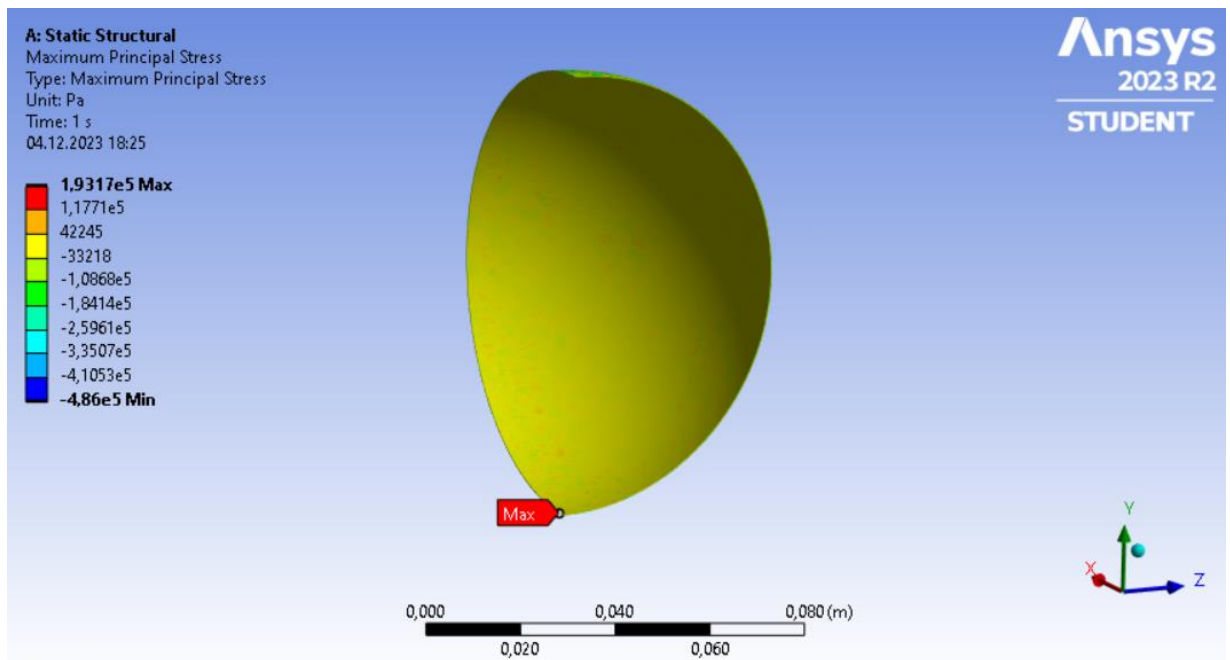


Рис. 3.12. Епюра максимальних головних напружень у керамічній оболонці.

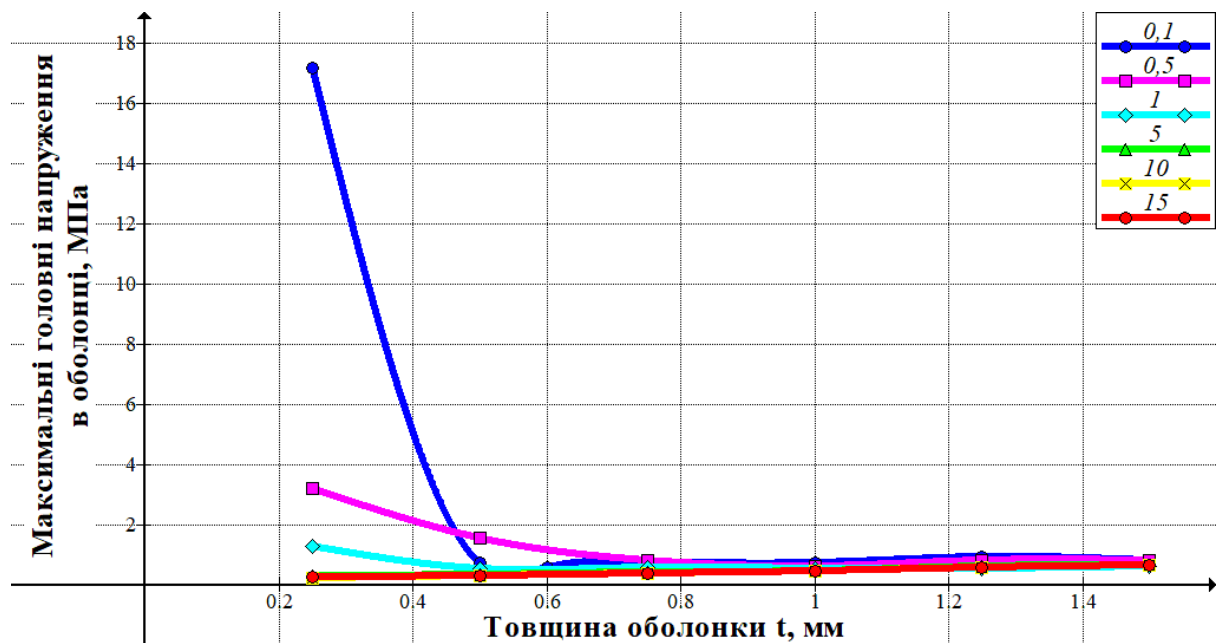


Рис. 3.13. Графік залежності максимальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 0,1 до 15 мм.

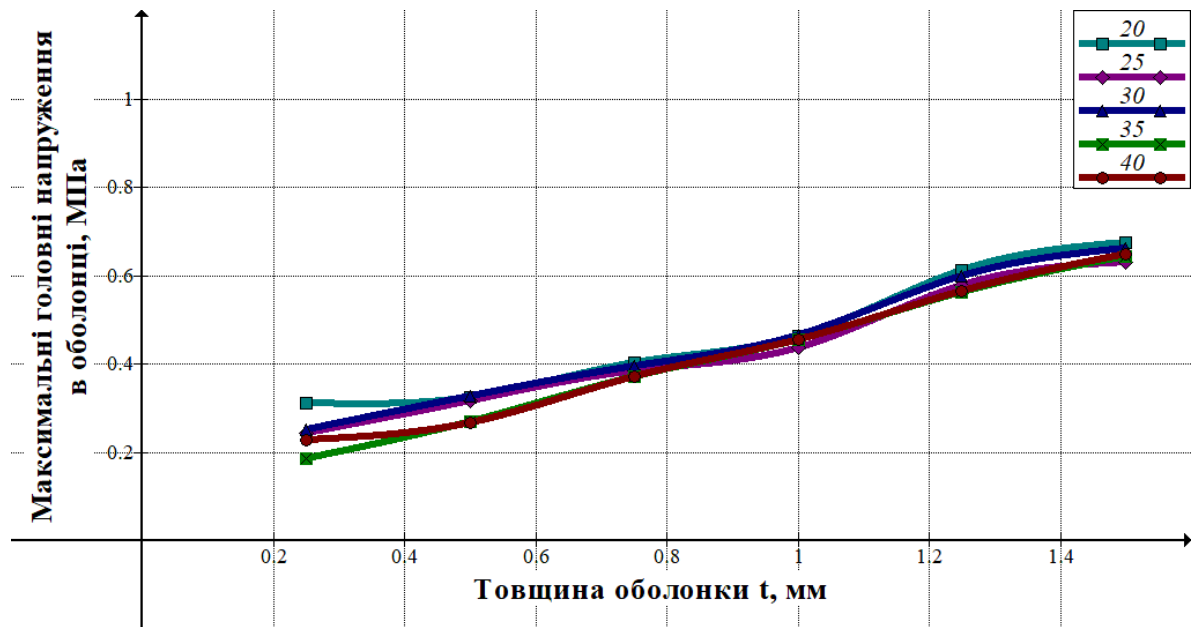


Рис. 3.14. Графік залежності максимальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 20 до 40 мм.

Проаналізувавши графік залежності максимальних головних напружень у керамічній оболонці, можна зробити висновок, що для максимальних головних напружень в оболонці характерна прямо-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані від поверхні, але починаючи з товщини $0,05D$.

Найбільші напруження характерні для найближчого розміщення – $0,001D$. З відстані у $0,05D$ і більше характер кривої не змінюється, а при товщині $0,0075D$ і далі – значення майже збігаються.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,001D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,4D$.

3.3.3. Мінімальні головні напруження у сферопластику

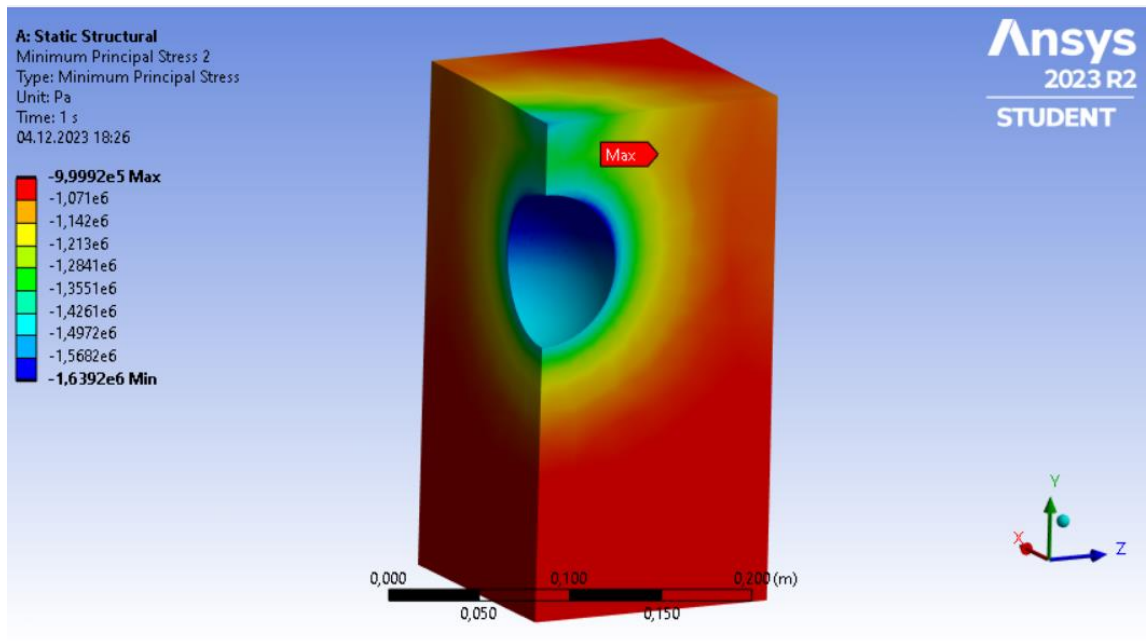


Рис. 3.15. Епюра мінімальних головних напружень у сферопластику.

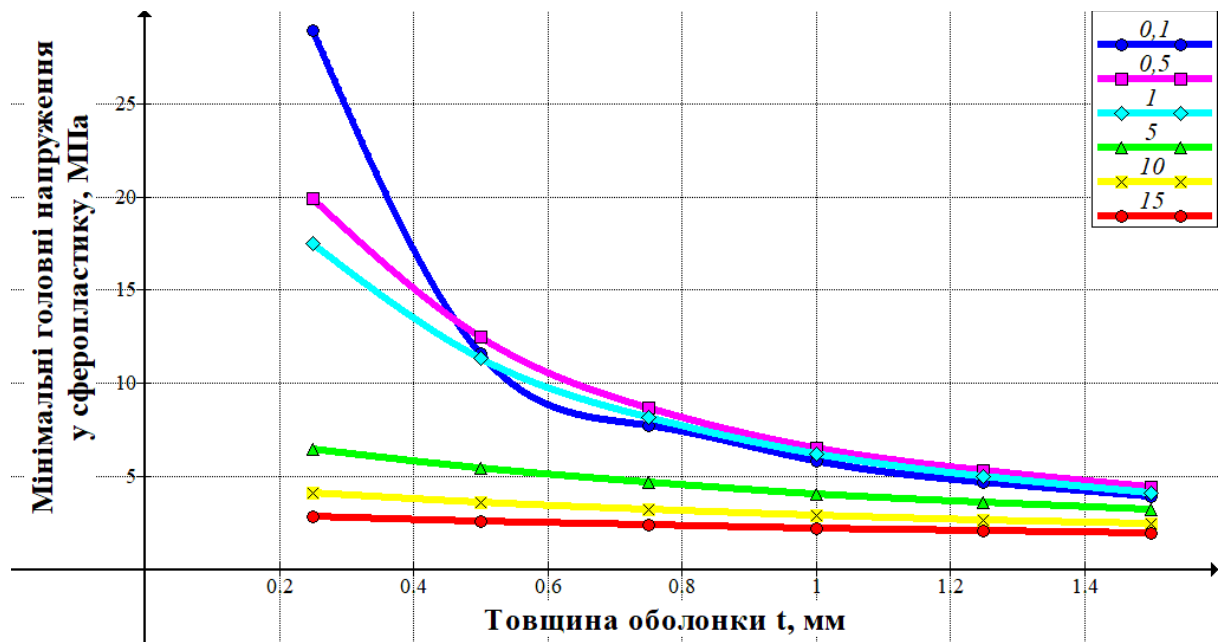


Рис. 3.16. Графік залежності мінімальних головних напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 0,1 до 15 мм.

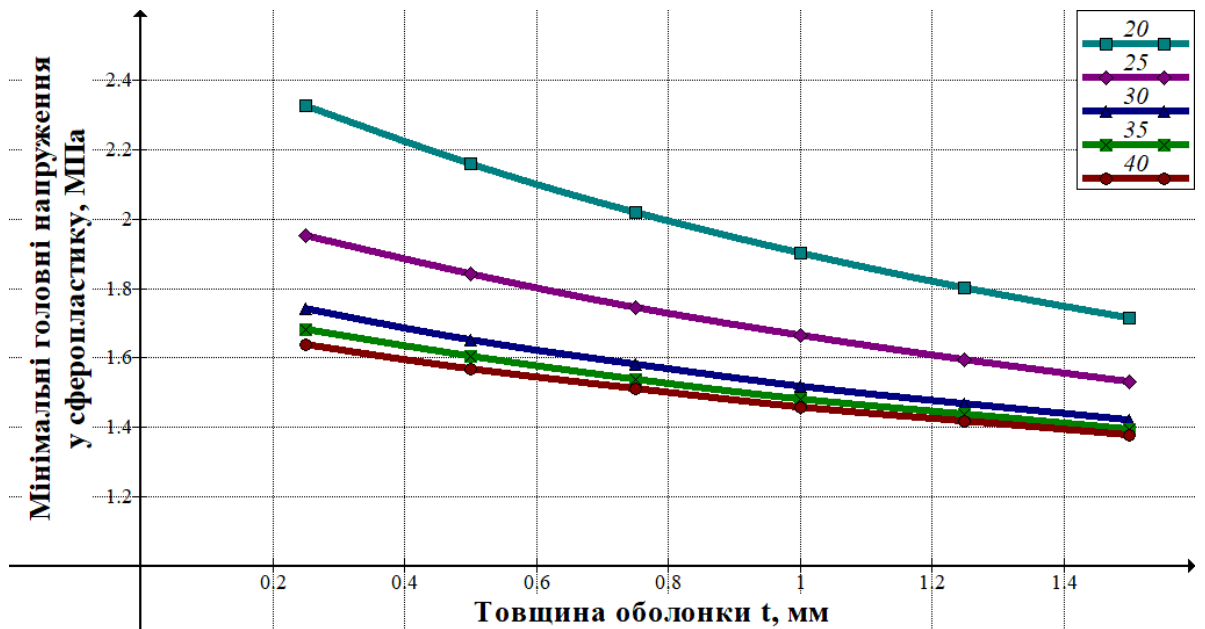


Рис. 3.17. Графік залежності мінімальних головних напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 20 до 40 мм.

Для мінімальних головних напружень у сферопластику також характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані від поверхні.

Найбільші напруження та різниця значень виникають при розміщенні оболонки на відстані до $0,05D$. Починаючи з $0,05D$ відстані та $0,01D$ товщини крива стає схожою, напруження змінюються не суттєво.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,001D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,4D$.

3.3.4. Інтенсивність напружень у сферопластику

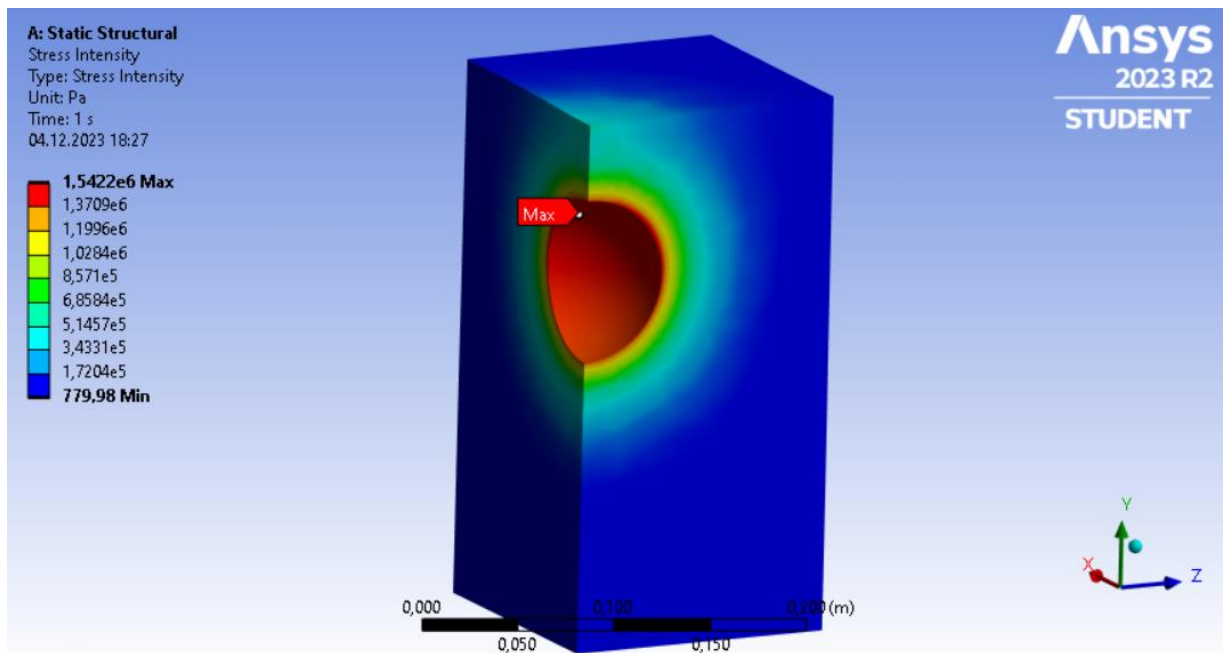


Рис. 3.18. Епюра інтенсивності напружень у сферопластику.

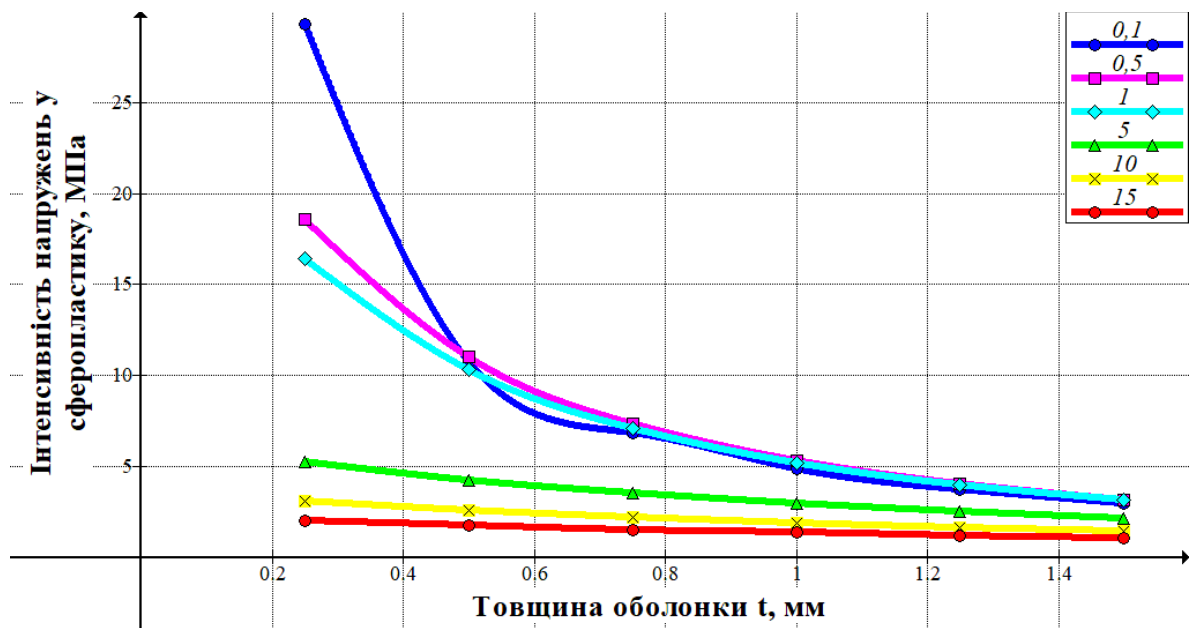


Рис. 3.19. Графік залежності інтенсивності напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 0,1 до 15 мм.

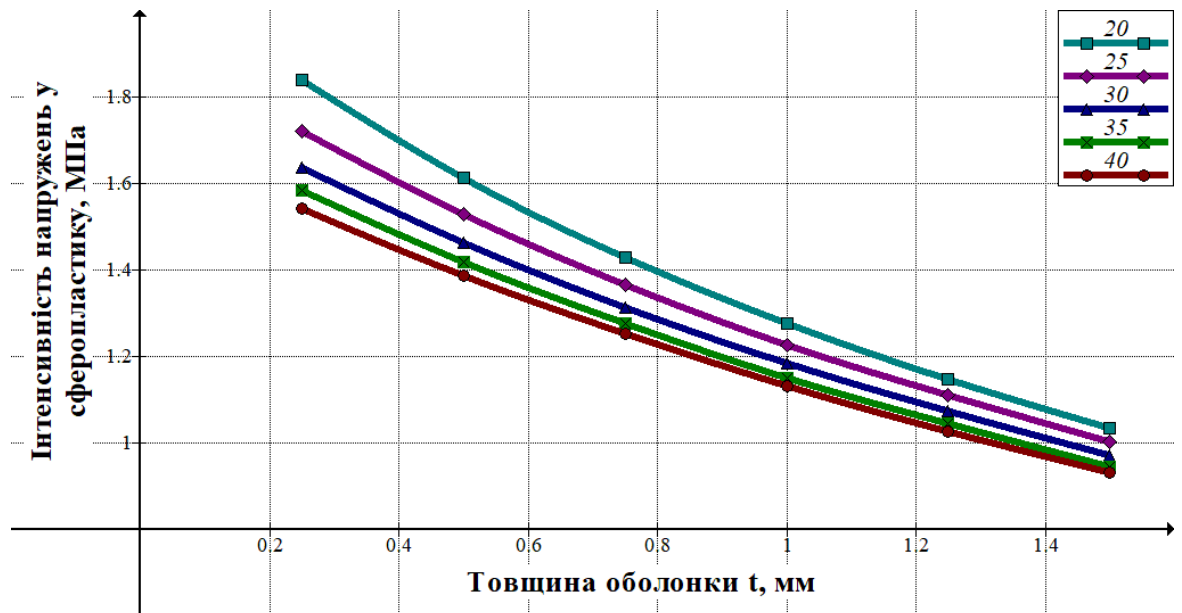


Рис. 3.20. Графік залежності інтенсивності напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані до поверхні від 20 до 40 мм.

Для інтенсивності напружень у сферопластику також характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані від поверхні.

Найбільші значення напружень характерні для відстані $0,001D$ – $0,01D$. Починаючи з $0,05D$ відстані та $0,01D$ товщини характер кривої не змінюються, значення напружень схожі.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,001D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,4D$.

3.4. Висновки

Проаналізувавши графіки на рисунках, поданих у цьому розділі, можна помітити наступні закономірності.

Найбільші концентрації напружень наявні при мінімальних товщинах оболонки. При товщині оболонки $0,01D$ і більше значення напружень змінюється не суттєво.

На глибині приблизно $0,2D$ напруження стають майже рівномірними за всією поверхнею керамічної оболонки, тобто оболонка знаходиться в умовах, близьких до гідростатичного обтиснення.

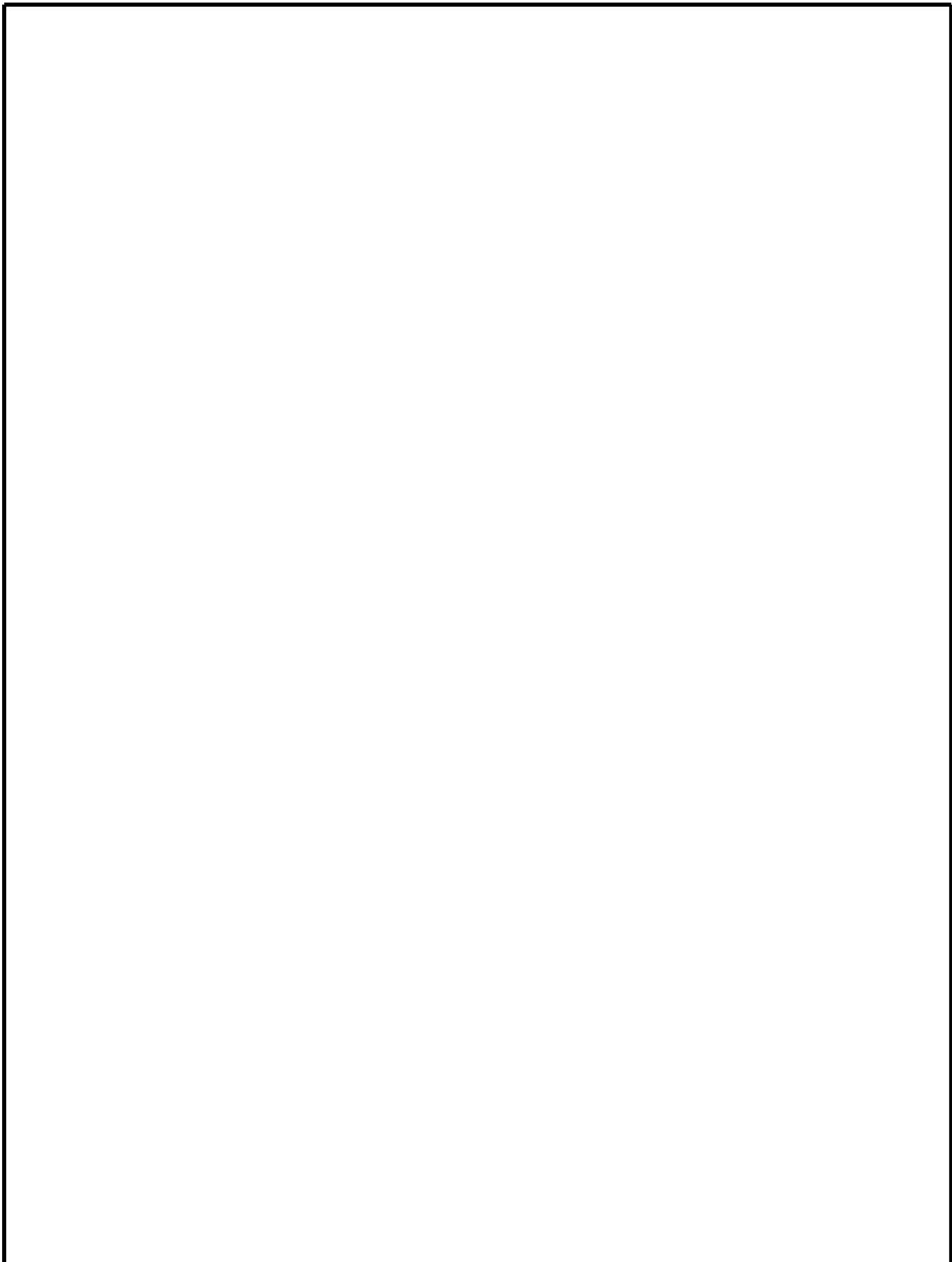
Виходячи з тих же графіків, для більш товстостінних оболонок, відстань до поверхні є менш впливовим фактором, навіть розташування близько до поверхні дає менші концентрації напружень. Для тонких оболонок з товщиною менше ніж $0,008D$ відстань до поверхні суттєво впливає на концентрації напруги, причому найбільш небезпечним буде варіант розташування близько до поверхні.

Таким чином з проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Глибина залягання оболонок суттєво впливає на напружено-деформований стан блоку плавучості. Концентрації напружень у масиві сферопластика у полюсі досить значні і досягають 30 одиниць в дослідженому діапазоні. При розташуванні оболонки на поверхні ($h = 0$) метод скінчених елементів не застосовний через утворену сингулярність в точці дотику оболонки та поверхні. Форма кінцевого елемента стає неприйнятною для аналізу тобто результат буде недостовірний.

2. Руйнування блоку плавучості, що містить керамічні макросфери, таким чином, починається з поверхні, при значно менших глибинах занурення монолітного блоку сферопластику. Для того, щоб поле напруг було близьким до незбуреного, макросфери мають бути занурені у блок на глибину від $0,2D$. При цьому втрачається ефективність блоку з точки зору плавучості.

3. Використання блоків плавучості з керамічними сферами, де вони знаходяться у адгезійному контакті зі сферопластиком не раціонально, через суттєві концентрації напружень, що виникають біля сфер, що розташовані біля поверхні блоку. Більш життєздатною є модель блока плавучості, де керамічні сфери укладаються з зазором до сферопластику, який сполучається із забортною водою.



					135.6161м.01.ДР			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Студент	Довженко				РОЗДІЛ 4	Літ.	Аркуш	Аркушів
	О.В.							
Викладач	Гейко					НУК		
	С.П.							

РОЗДІЛ 4.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЛИЗЬКО РОЗТАШОВАНИХ КЕРАМІЧНИХ ОБОЛОНОК У НАПІВБЕЗКІНЕЧНОМУ МАСИВІ СФЕРОПЛАСТИКА

Небезпека лавиноподібного руйнування і необхідність максимальної реалізації міцнісних властивостей компонентів призводить до наступної структурної концепції блоку плавучості: окремі модулі сферопластика (які містять оболонку із зазором, що сполучається із забортною водою), з'єднані між собою податливим клейовим з'єднанням. [3]

Таким чином стало очевидним, що запропоноване конструктивне рішення компоновки блоків плавучості неприйнятно до використання на рівні навантаження тестування оболонок. Виявилось, що зазори між оболонкою і сферопластиком, а також клеєві прошарки між модулями не гарантують запобігання лавиноподібного руйнування. [3]

Було створено припущення, що оболонки повинні володіти запасом несучої здатності, яка дозволила б чимось протистояти ударним впливам, викликаним випадковими руйнуваннями сусідніх сфер на максимальних глибинах експлуатації. Отже, необхідно тестувати перед використанням тиском, що перевершує граничне експлуатаційне. Задача складалася в тому, щоб встановити у скільки разів воно повинно бути більше і чи буде даний коефіцієнт реальним (чи призведе це до неприпустимого обтяження оболонок). [3]

З точки зору плавучості краще коли сфер багато (вони в контакті), бо вони більш легкі ніж сферопластик і блок плавучості стає легким. Але при цьому міцність значно нижча, ніж якби був один сферопластик без сфер. Задача полягає у визначенні кількісно, наскільки нижча, і наскільки меншою стає гранична глибина застосування. Тобто сам блок плавучості не стає гіршим, просто не може бути застосований на максимальних глибинах, як без сфер. При розведенні сфер облегшення блоку плавучості сферами стає мало ефективним.

4.1. Обрана модель, граничні умови та зовнішні навантаження

Розглядається ситуація, коли дві сфери близько розташовані одна до одної у масиві сферопластика, перебуваючи в умовах гідростатичного тиску.

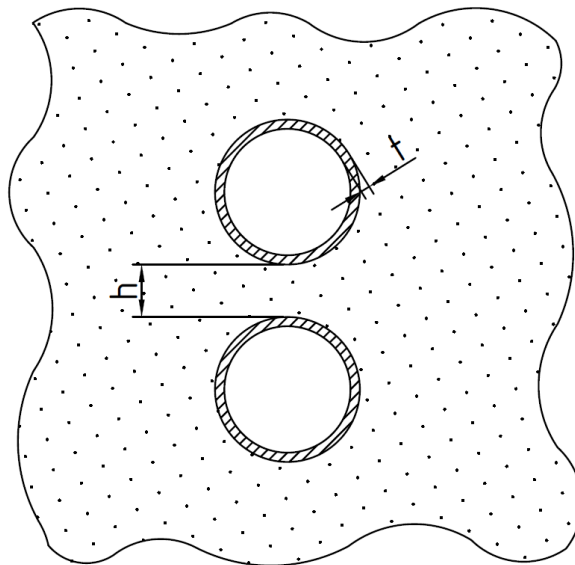


Рис. 4.1. Керамічна оболонка у масиві сферопластика, розташована близько до поверхні.

Для відтворення властивостей сферопластику в заданих умовах обрана наступна фізична модель: масив сферопластику – куб з розмірами 300x300 мм, порожниста керамічна сфера – суцільна оболонка діаметром 100 мм. Розмір блоку вибрано таким чином, щоб на границях був однорідний напружено-деформований стан – всі нормальні напруження дорівнювали зовнішньому тиску, а дотичні напруження відсутні. Тоді це є моделлю безкінечного масиву. У безкінечному масиві, що навантажений гідростатичним тиском всі точки навантажені однаково і в них всі нормальні напруження ($S_1 S_2 S_3$) рівні зовнішньому тиску а дотичні напруження відсутні.

Обраний тип контакту – Bonded – свідчить про те, що у даній моделі представлений адгезійний тип контакту між сферопластиком та оболонкою, тобто всі переміщення на границі між сферо за масивом сферопластику є спільними, а значить однаковими.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

62

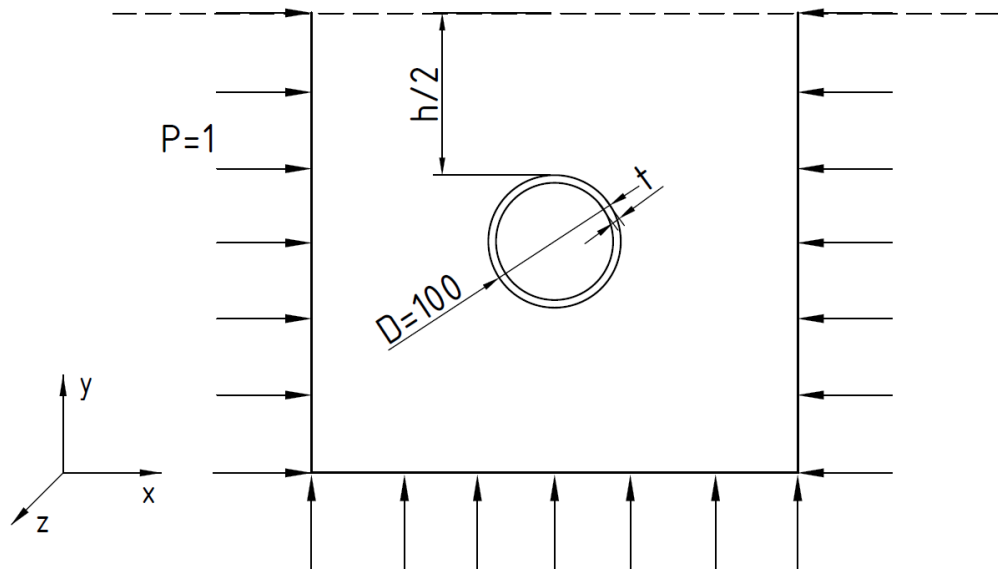


Рис. 4.2. Розрахункова модель оболонки в масиві сфероластику.

Через те, що оболонки однакові, була застосована горизонтальна симетрія, проведена між оболонками, а також вертикальна симетрія, що проходить через центр оболонки. Таким чином обрані наступні граничні умови: закріплення відсутні, але обмежені переміщення по осі X . Зовнішні навантаження представляють собою зовнішній гідростатичний тиск $P = 1$, який прикладений до усіх граней куба. (Тиск 1 МПа це занурення на глибину 100 м)

Для визначення небезпечних та оптимальних варіантів навантаження обрані наступні параметри варіювання факторів:

– товщина керамічної оболонки t у діапазоні 0,25 – 1,5 мм ($0,0025D - 0,015D$);

– відстань між оболонками $2h$ у діапазоні 0,2 – 80мм ($0,002D - 0,8D$).

4.2. Результати розрахунків

Задля аналізу поведінки двох сфер у масиві сфероластика були проаналізовані такі ж компоненти напружено-деформованого стану: мінімальні головні напруження в оболонці, максимальні головні напруження в оболонці, мінімальні головні напруження у сфероластику (це тому що кераміка має значні відмінності у міцності на стискання та розтягування. Розтягуючі

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

63

напруження для кераміки не бажані, бо міцність на розтягування невелика у порівнянні зі стисканням), інтенсивність напружень у сфероластику.

4.2.1. Напруження в оболонці

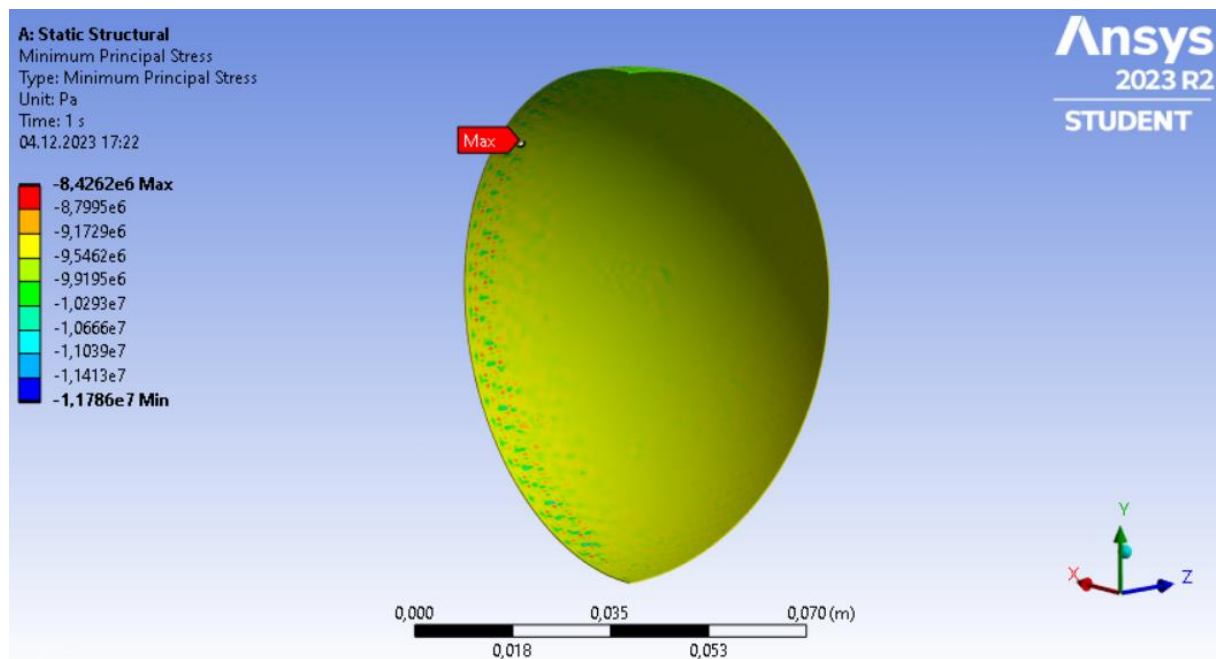


Рис. 4.3. Епюра мінімальних головних напружень у керамічній оболонці.

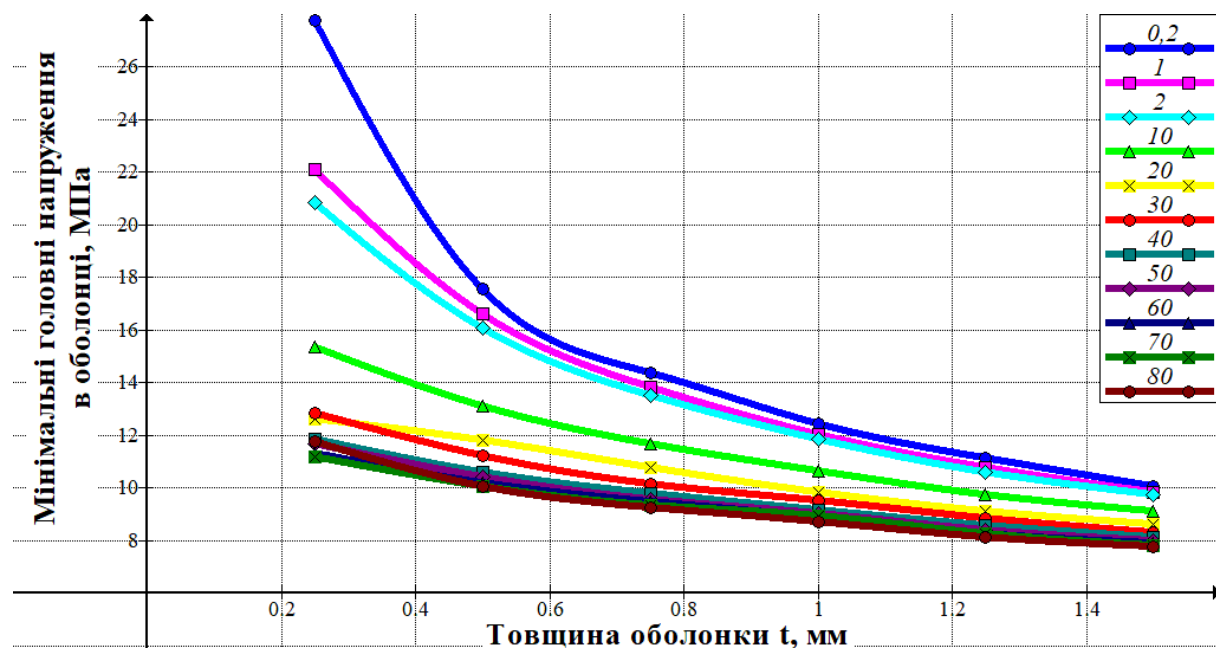


Рис. 4.4. Графік залежності мінімальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані між сферами від 0,2 до 80 мм.

З результатів цього графіку можна зробити висновок, що при розташуванні двох сфер для мінімальних головних напружень в оболонці також характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані до іншої сфери.

Найбільші напруження виникають при розміщенні оболонки на відстані до $0,1D$ включно, починаючи з відстані $0,2D$ характер кривої стає схожим, а з відстані $0,4D$ напруження змінюються не суттєво. Починаючи з товщини оболонки $0,001D$ криві також мають схожий характер і невеликі розбіжності у напруженнях.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,002D$ (фактично контакт).
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,8D$.

Максимальні головні напруження у випадку навантаження керамічних оболонок у масиві мають сенс напружень розтягування, поява яких може свідчити про те, що оболонки від рівномірного стискання по товщині переходять до згинального напруженого стану. Наявність напружень розтягування в оболонці не бажане, через низьку міцність кераміки при такому напруженому стані.

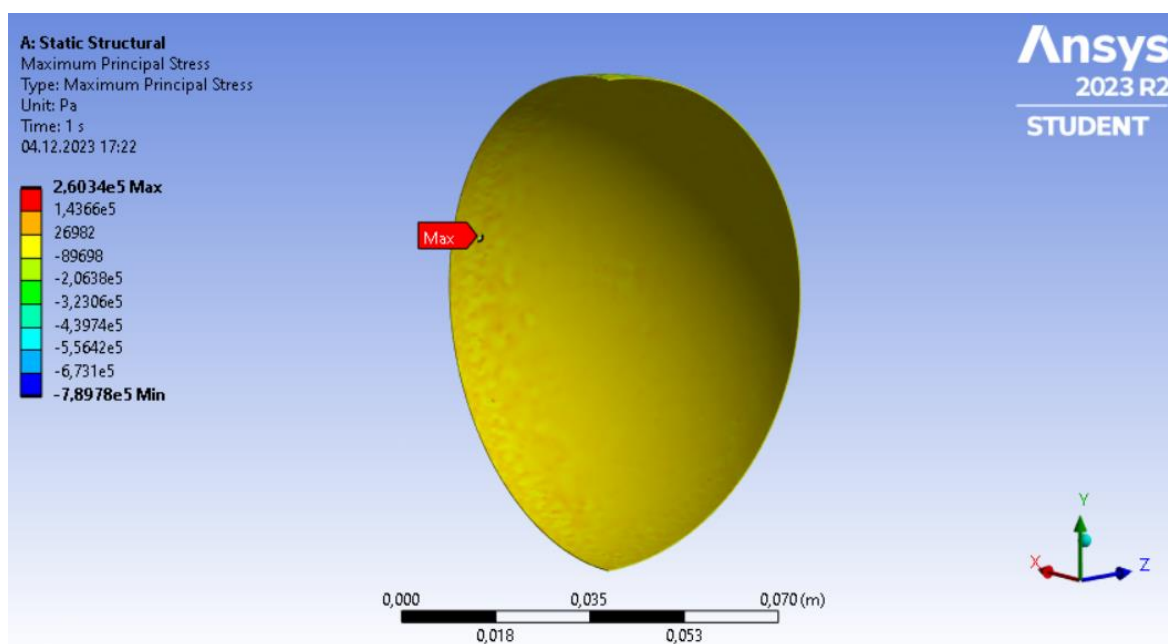


Рис. 4.5. Епюра максимальних головних напружень у оболонці.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

65

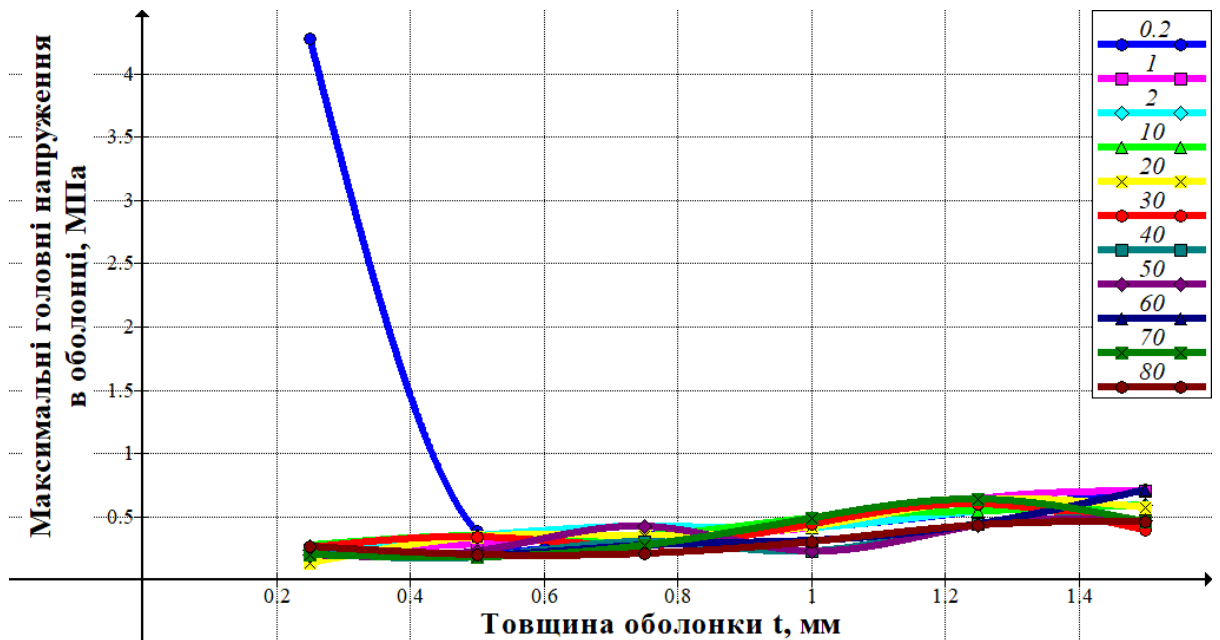


Рис. 4.6. Графік залежності максимальних головних напружень у керамічній оболонці від товщини оболонки при варіюванні відстані між сферами від 0,2 до 80 мм.

Проаналізувавши графік залежності максимальних головних напружень у керамічній оболонці, можна зробити висновок, що для максимальних головних напружень в оболонці характерна прямо-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані між сферами, виключаючи варіант відстані у $0,002D$.

Найбільші напруження характерні для найближчого розміщення – $0,002D$. Всі наступні варіанти і для товщини, і для глибини залягання мають різні характери кривої, але відхилення незначні, а значення напружень – майже збігаються.

Загалом, видно, що при зближенні сфер відбувається значне спотворення рівномірного навантаження оболонок, що мало б місце при далекому розташуванні оболонок. Вони таким чином втрачають несучу спроможність майже у 5 разів.

4.2.2. Напруження у сферопластику

При зануренні на глибину у масиві сферопластика діють напруження стискання. В цих умовах для оцінки міцності можна застосувати критерій мінімальних напружень.

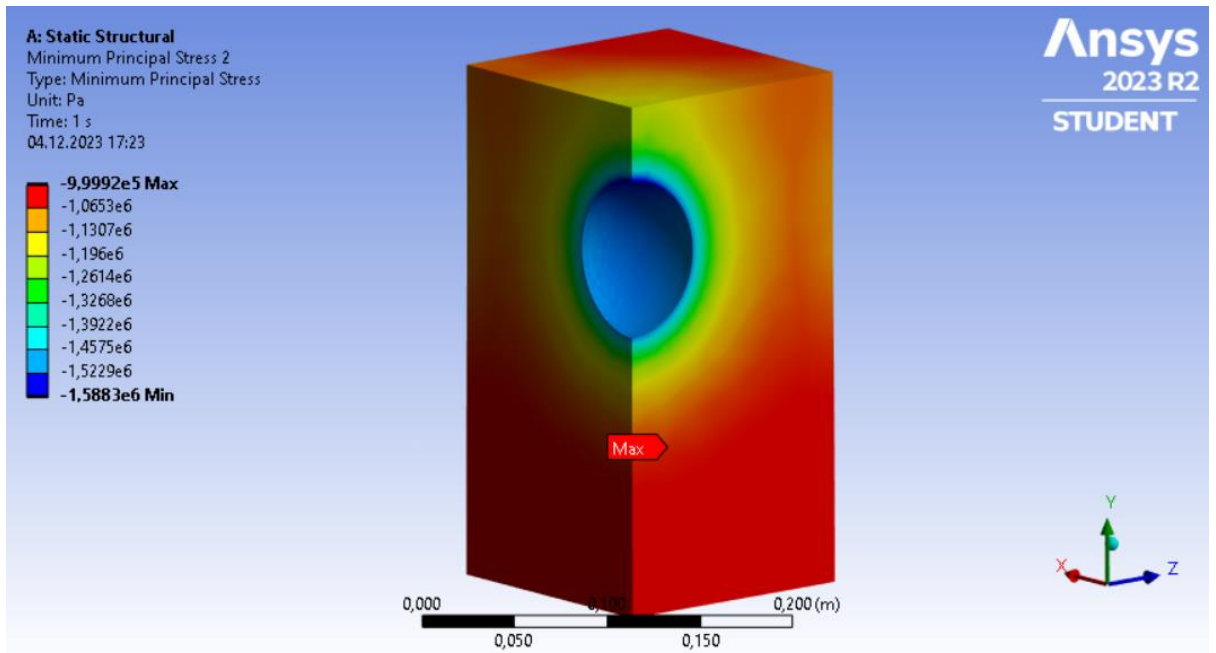


Рис. 4.7. Епюра мінімальних головних напружень у сферопластику.

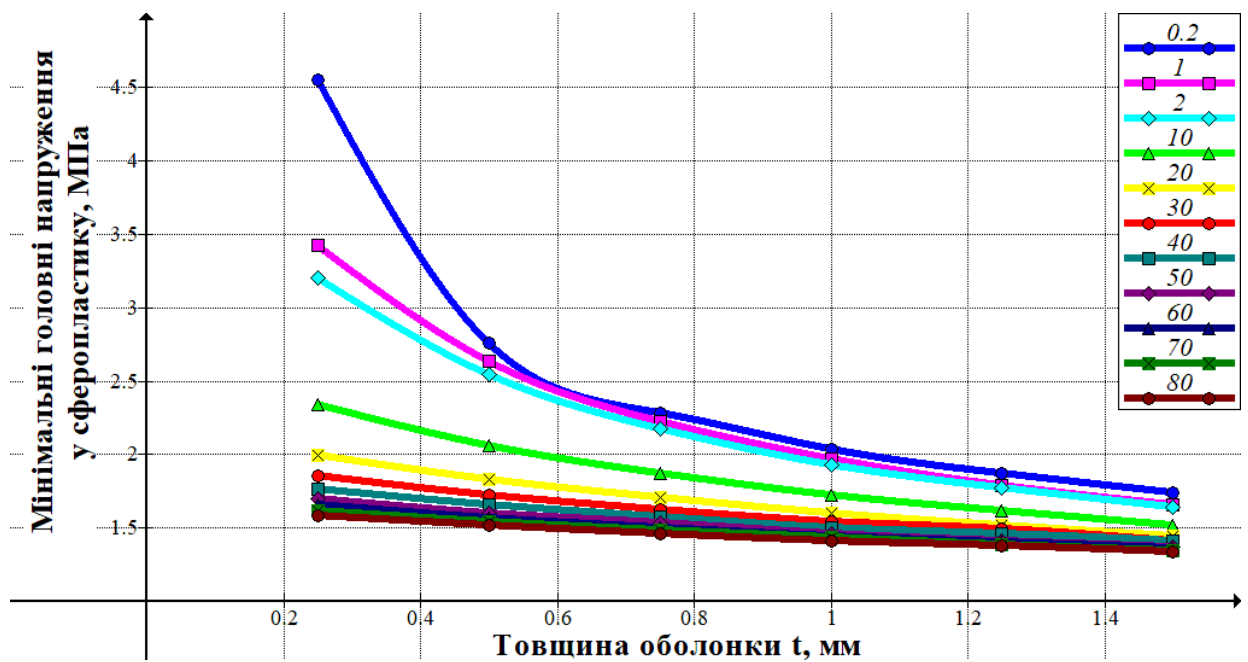


Рис. 4.8. Графік залежності мінімальних головних напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані між сферами від 0,2 до 80 мм.

Для мінімальних головних напружень у сферопластику також характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані між оболонками.

Найбільші напруження та різниця значень виникають при розміщенні оболонок на відстані до $0,1D$ включно. Починаючи з $0,2D$ відстані та $0,001D$ товщини крива стає схожою, значення напружень змінюються не суттєво.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,002D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,8D$.

Таким чином при контакті сфер виникають концентрації напружень приблизно від 1,6 до 4,5 для тонких оболонок і від 1 до 1,8 для товстостінних. Великі відстані між оболонками неприйнятні через низьку додаткову плавучість, що вони надають підводним засобам. При тісному розташуванні сфер маємо значну втрату міцності сферопластика і його використання стає нераціональним при будь-якій щільності пакування оболонок.

Інтенсивність напружень у сферопластику

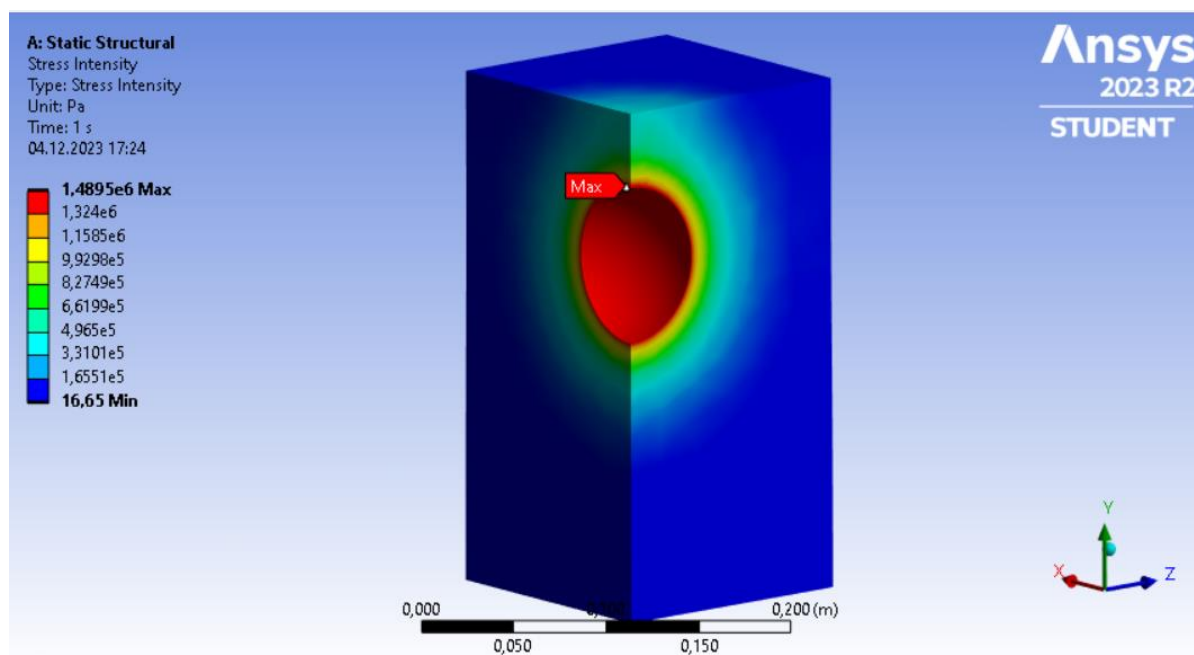


Рис. 4.9. Епюра інтенсивності напружень у сферопластику.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

135.6161м.01.ДР

Арк.

68

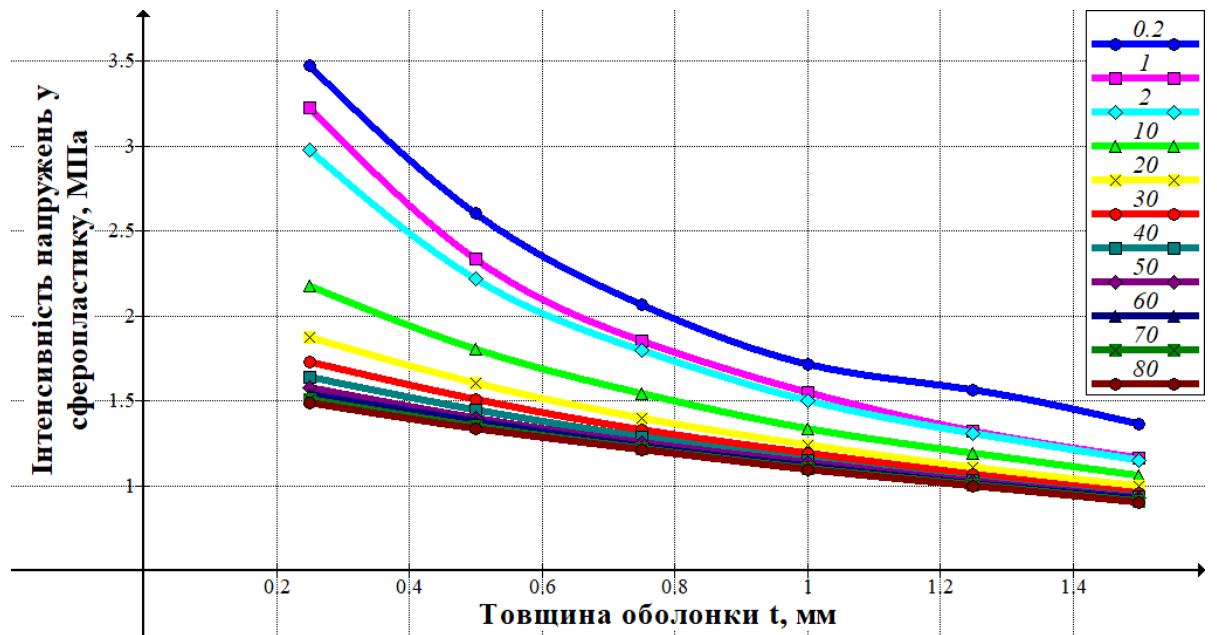


Рис. 4.10. Графік залежності інтенсивності напружень у сферопластику від товщини оболонки при варіюванні відстані між сферами від 0,2 до 80 мм.

Для інтенсивності напружень у сферопластику також характерна зворотно-пропорційна залежність від товщини оболонки та відстані між оболонками.

Найбільші значення напружень характерні для відстані $0,002D - 0,1D$. Починаючи з $0,3D$ відстані та $0,0075D$ товщини характер кривої не змінюються, значення напружень схожі.

- Найбільші напруження – сфера товщиною $0,0025D$ та відстанню $0,002D$.
- Найменші напруження – сфера товщиною $0,015D$ та відстанню $0,8D$.

4.3. Висновки

Проаналізувавши графіки на рисунках 4.4 – 4.8 можна помітити наступні закономірності.

Найбільші концентрації напружень наявні при мінімальних товщинах оболонки. При товщині оболонки 1 мм і більше значення напружень змінюється не суттєво.

На відстані приблизно $0,4D$ і далі між сферами напруження стають майже рівномірними за всією поверхнею керамічної оболонки, тобто оболонки знаходяться в умовах, близьких до гідростатичного обтиснення.

Для товстостінних оболонок, відстань між сферами не є досить впливовим фактором, також незначні зміни характерні і при варіюванні товщини оболонок. Для тонких оболонок з товщиною менше ніж 1 мм відстань до поверхні суттєво впливає на концентрації напруги, причому найбільш небезпечним буде варіант розташування близько до іншої сфери.

Таким чином з проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Відстань між сферами не суттєво впливає на напружено-деформований стан блоку плавучості. Концентрації напружень у масиві сферопластика незначні і досягають 3,5 одиниць при найгіршому варіанті розташування і 0,8 одиниць при найліпшому варіанті розташування в дослідженому діапазоні. При розташуванні оболонок впритул одна до одної ($h = 0$) метод скінчених елементів має низьку точність через утворену сингулярність в точці дотику оболонок.

2. Руйнування блоку плавучості буде відбуватися у місці близько розташованих макросфер. Для створення поля напруг, близького до незбуреного, сфери мають знаходитися на відстані не менш $0,3D$ одна від одної, і чим далі, тим більше навантаження будуть ближчі за характером до гідростатичного обтиснення. Для ефективності блоку з точки зору плавучості можна розміщувати сфери на максимальній відстані з дослідженого діапазону – $0,8D$, але при цьому варіанті буде досягнений незначний ефект збільшення плавучості за рахунок використання макросфер.

3. Використання блоків плавучості з керамічними сферами, де оболонки знаходяться у механічному контакті між собою, не раціональне через суттєві концентрації напружень, що виникають біля сфер, та критичному збільшенні

ваги вихідного матеріалу. Більш вдалою є модель блока плавучості, де керамічні сфери укладаються з зазором одна до одної.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		71

ВИСНОВКИ

1. Проаналізована доцільність використання сферопластика як матеріала плавучості, доведена обумовленість використання керамічних сферичних оболонок для блоків плавучості глибоководних апаратів.

2. Керамічні сфери можуть застосовуватись у вигляді самостійної плавучості, а також і в комбінації з іншими матеріалами, що мають захисну функцію, і створюють додаткову плавучість.

3. Ефективність застосування керамічних оболонок в масиві сферопластика у значній мірі залежать від щільності пакування – навіть незначне розведення оболонок значно знижує позитивну плавучість блоків. Застосування оболонок декількох розмірів в проміжках між основними дає деякий приріст плавучості проте значно ускладнює технологічний процес.

4. Об'єми плавучості мають формуватися з уніфікованих модулів, своєрідних цеглин. Вони повинні мати просту геометричну форму і здатність утворювати складні форми.

5. Глибина залягання оболонок суттєво впливає на напружено-деформований стан блоку плавучості. Руйнування блоку плавучості, що містить керамічні макросфери, таким чином, починається з поверхні, при значно менших глибинах занурення монолітного блоку сферопластику. Для того, щоб поле напруг було близьким до незбуреного, макросфери мають бути занурені у блок на глибину від $0,2D$. При цьому втрачається ефективність блоку з точки зору плавучості.

6. Використання блоків плавучості з керамічними сферами, де вони знаходяться у адгезійному контакті зі сферопластиком не раціонально, через суттєві концентрації напружень, що виникають біля сфер, що розташовані біля поверхні блоку. Більш життєздатною є модель блока плавучості, де керамічні сфери укладаються з зазором до сферопластику, який сполучається із забортною водою.

7. Відстань між сферами не суттєво впливає на напружено-деформований стан блоку плавучості. Для створення поля напруг, близького до незбуреного, сфери мають знаходитися на відстані не менш $0,3D$ одна від одної, і чим далі, тим більше навантаження будуть ближчі за характером до гідростатичного обтиснення. Для ефективності блоку з точки зору плавучості можна розміщувати сфери на максимальній відстані з дослідженого діапазону – $0,8D$, але при цьому варіанті буде досягнений незначний ефект збільшення плавучості за рахунок використання макросфер.

8. Використання блоків плавучості з керамічними сферами, де оболонки знаходяться у механічному контакті між собою, не раціональне через суттєві концентрації напружень, що виникають біля сфер, та критичному збільшенні ваги вихідного матеріалу. Більш вдалою є модель блока плавучості, де керамічні сфери укладаються з зазором одна до одної.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		73

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурдун Е.Т., Гейко С.П., Артемьев И.Я., Белоус К.П., Козырь В.М. Способ отливки полых замкнутых сферических оболочек и устройство для его осуществления./Авторское свидетельство СССР на изобретение. - №176053 от 1.06.92г.
2. Головченко Ю.Б. Напряженное состояние системы шаровое включение-матрица, спаянной по поверхности контакта. Технология судостроения и сварочного производства. Сборник научных трудов. Николаев. 1984 г. стр.20-36.
3. Головченко Ю.Б. Концентрации напряжений в неоднородных средах со сферическими включениями при всестороннем равномерном сжатии. Диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук. Киев. 1984 г.
4. Гейко С.П. Технологія виготовлення керамічних сферичних оболонок та елементів плавучості на їх основі для глибоководної техніки. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук, УДМТУ. Миколаїв, 1994.
5. Ayers S., Van Erp G. "Characterization of new structural core materials based on vinyl ester and hollow ceramic microspheres", Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part L: J. Materials: Design and Applications, 2003.
6. Baumeister E., Klaeger S., Kaldos A. "Characterization and application of hollow-sphere-composite lightweight materials", Proc. IMechE Vol. 219 Part L: J. Materials: Design and Applications, 2005.
7. Fiedler T., Öchsner A., Grácio J. "Numerical Investigations on the Mechanical Properties of Adhesively Bonded Hollow Sphere Structures", Journal of Composite Materials, Vol. 44, No. 10, 2009.
8. Jiang B., Blugan S., Sturzenegger N., Gonzenbach U., Misson M., Thornberry J. "Ceramic Spheres—A Novel Solution to Deep Sea Buoyancy Modules", Materials 9 (529), 2016.

9. Ji-Zhao L., Bo Zhu. “Estimation of sound transmission loss of polymer/hollow microsphere composites”, Journal of Composite Materials, Vol. 50, No. 15, 2016.

10. Kim J., Chang S., SangWon L. “Fabrication and characterization of hollow glass beads-filled thermoplastic composite filament developed for material extrusion additive manufacturing”, Journal of Composite Materials, Vol. 54, No. 05, 2020.

11. Ku H., Cardona F., Pattarachaiyakoo N., Trada M. “Fracture Toughness of Phenol Formaldehyde Composites Reinforced with E-spheres”, Journal of Composite Materials, Vol. 43, No. 07, 2009.

12. Ku H., Jacobson W., Trada M., Cardona F. “Tensile Tests of Phenol Formaldehyde SLG Reinforced Composites: Pilot Study”, Journal of Composite Materials, Vol. 42, No. 26, 2008.

13. Lee K., Westmann R. “Elastic Properties of Hollow-Sphere-Reinforced Composites”, Journal of Composite Materials, Vol. 4, 1970.

14. Seamark M. “Use of Syntactic Foams for Subsea Buoyancy”, Materials of Cellular Polymers Conference on 20th-22nd March, 1991.

15. Soner S., Hilal P., Lemiye A., Dogan M. “Mechanical and tribological performances of ceramic microsphere reinforced polyamide 6 composites”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 0(0), 2023.

16. Stachiw J.D. “Alumina Ceramic 10 in Flotation Spheres for Deep Submergence ROV/AUV Systems,” by, Oceans 2005 Conference, September 2005, Washington, D.C.

17. Tagliavia G., Porfiri M., Gupta N. “Vinyl Ester–Glass Hollow Particle Composites: Dynamic Mechanical Properties at High Inclusion Volume Fraction”, Journal of Composite Materials, Vol. 43, No. 05, 2009.

18. Volkov D., Zarichnyak Yu., Marova A. “The structure and thermal conductivity of multicomponent polymer composites filled with hollow ceramic and silicone microspheres”, International Polymer Science and Technology, Vol. 44, No. 7, 2017.

19. Weston S., Stachiw J., Merewether R., Olsson M., Jemmott G. “Alumina ceramic 3.6 in flotation spheres for 11 km rov/auv systems”, Woods Hole Oceanographic Institution, 2008.

20. Yoerger D., Bowen A., Whitcomb L., Fletcher B. “11,000 Meter HROV Development Program and its Relation to Oceanographic and Commercial Undersea Use”, Woods Hole Oceanographic Institution, 2006.

					135.6161м.01.ДР	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		76