

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут
Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



к.т.н., доц. М.В. Матвієнко

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему:

Дослідження властивостей покриттів при відновленні валопроводів

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
спеціальності 132 Матеріалознавство за
освітньо-професійною програмою Інжині-
ринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Шевченко Геннадій Павлович

(прізвище та ініціали)

Керівник Лебедєв Володимир Олександрович

(прізвище та ініціали)

Рецензент Лой Сергій Анатолійович

(прізвище та ініціали)

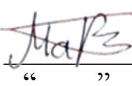


Миколаїв - 2024 р.

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут**

Факультет суднобудівний
Кафедра зварювання
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва)

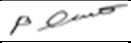
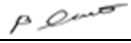
ЗАТВЕРДЖУЮ


Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. М.В. Матвієнко
“ ” 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
студенту Шевченку Геннадію Павловичу**
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження властивостей покриттів при відновленні валопроводів
керівник проекту Лебедєв Володимир Олександрович, д.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені розпорядженням ХННІ НУК від “17” жовтня 2024 року № 10
2. Строк подання студентом проекту 13 грудня 2024р.
3. Вихідні дані до проекту Креслення виробу, матеріал сталь 18 ХНВА, річна програма 300 валів
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз матеріалів за темою досліджень. 2. Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на міцність зчеплення. 3. Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження структури покриттів. 4. Розробка технологічного процесу відновлення валопроводів 5. Економічна оцінка проектних розробок.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Тема роботи. 2. Мета роботи, завдання. 3. Вал. 4. Зразок та його комп'ютерна модель для випробувань на відрив. 5. Поля осьових та дотичних напружень при випробуванні на відрив напиленого шару різної жорсткості. 6. Епюри осьових та дотичних напружень в зоні зародження руйнування при випробуванні на відрив напиленого шару різної жорсткості. 7. Поля осьових та дотичних напружень при випробуванні на відрив напиленого шару різної товщини. 8. Епюри осьових та дотичних напружень в зоні зародження руйнування при випробуванні на відрив напиленого шару різної товщини. 9. Розрахунок потужності плазмотрону. 10. Дослідження структури покриттів. 11. Висновки.

6. Консультанти розділів проекту

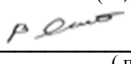
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Лебедєв В.О., професор		
2	Лебедєв В.О., професор		
3	Лебедєв В.О., професор		
4	Лебедєв В.О., професор		
5	Лебедєв В.О., професор		

7. Дата видачі завдання 16.10.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз матеріалів за темою досліджень.	26.10.2024	
2.	Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на міцність зчеплення.	10.11.2024	
3.	Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження структури покриттів.	20.11.2024	
4.	Розробка технологічного процесу відновлення валопроводів	30.11.2024	
5.	Економічна оцінка проектних розробок.	10.12.2024	
6.	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2024	

Студент  Шевченко Г.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)  Лебедєв В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Магістерська робота присвячена дослідженню та розробці технології відновлення проміжних валів суднових валопроводів із застосуванням плазмового напилення покриттів. Актуальність роботи обумовлена інтенсивним зношуванням шийок валів, які працюють у парі з бабітовими підшипниками, що призводить до значних матеріальних і фінансових витрат під час експлуатації та ремонту суднових механізмів.

У роботі розглянуто особливості застосування газотермічних технологій для відновлення зношених поверхонь валів. Обґрунтовано доцільність використання плазмового напилення покриттів, що дозволяє підвищити ресурс роботи валопроводів та зменшити витрати матеріальних і трудових ресурсів. Проведено аналіз напружено-деформованого стану напиленого покриття та зони його з'єднання з основним металом за допомогою методів комп'ютерного моделювання.

Визначено оптимальний склад порошкового матеріалу для нанесення покриття (чавун + 20 % міді), а також розраховано параметри плазмового напилення, зокрема потужність плазмотрона та витрату порошку. Розроблено технологічний процес відновлення валопроводів, який включає підготовку поверхні, плазмове напилення, термічну обробку та контроль якості покриття.

Проведений аналіз напруженого стану показав розташування найбільш навантажених зон у покритті та на межі його з основним металом. Виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованої технології, яке підтвердило її ефективність та доцільність впровадження у виробництво.

Ключові слова: плазмове напилення, відновлення валів, судновий валопровід, газотермічні покриття, напружено-деформований стан, порошкові матеріали, комп'ютерне моделювання, зносостійкі покриття, економічна ефективність.

Abstract

The master's thesis is devoted to the study and development of a technology for restoring intermediate shafts of marine shaft lines using plasma spraying coatings. The relevance of the work is determined by the intensive wear of shaft journals operating in contact with babbitt bearings, which leads to significant material and financial costs during the operation and repair of marine mechanisms.

The study considers the application of thermal spraying technologies for restoring worn shaft surfaces. The feasibility of using plasma spraying coatings is substantiated, as it allows increasing the service life of shaft lines and reducing the consumption of materials and labor resources. The stress-strain state of the sprayed

coating and the interface with the base metal was analyzed using computer modeling methods.

The optimal composition of the powder material for coating deposition (cast iron + 20% copper) was determined, and the parameters of the plasma spraying process, including plasma torch power and powder consumption, were calculated. A technological process for restoring shaft lines was developed, including surface preparation, plasma spraying, heat treatment, and coating quality control.

The stress analysis identified the most loaded zones in the coating and at the coating–substrate interface. A technical and economic assessment of the proposed technology confirmed its efficiency and feasibility for industrial implementation.

Keywords: plasma spraying, shaft restoration, marine shaft line, thermal spray coatings, stress–strain state, powder materials, computer modeling, wear-resistant coatings, economic efficiency.

Магістерська робота присвячена розробці технології відновлення проміжних валів суднових валопроводів із використанням плазмового напилення покриттів. У роботі обґрунтовано доцільність застосування газотермічних технологій для підвищення ресурсу роботи валів та зменшення витрат на їх ремонт.

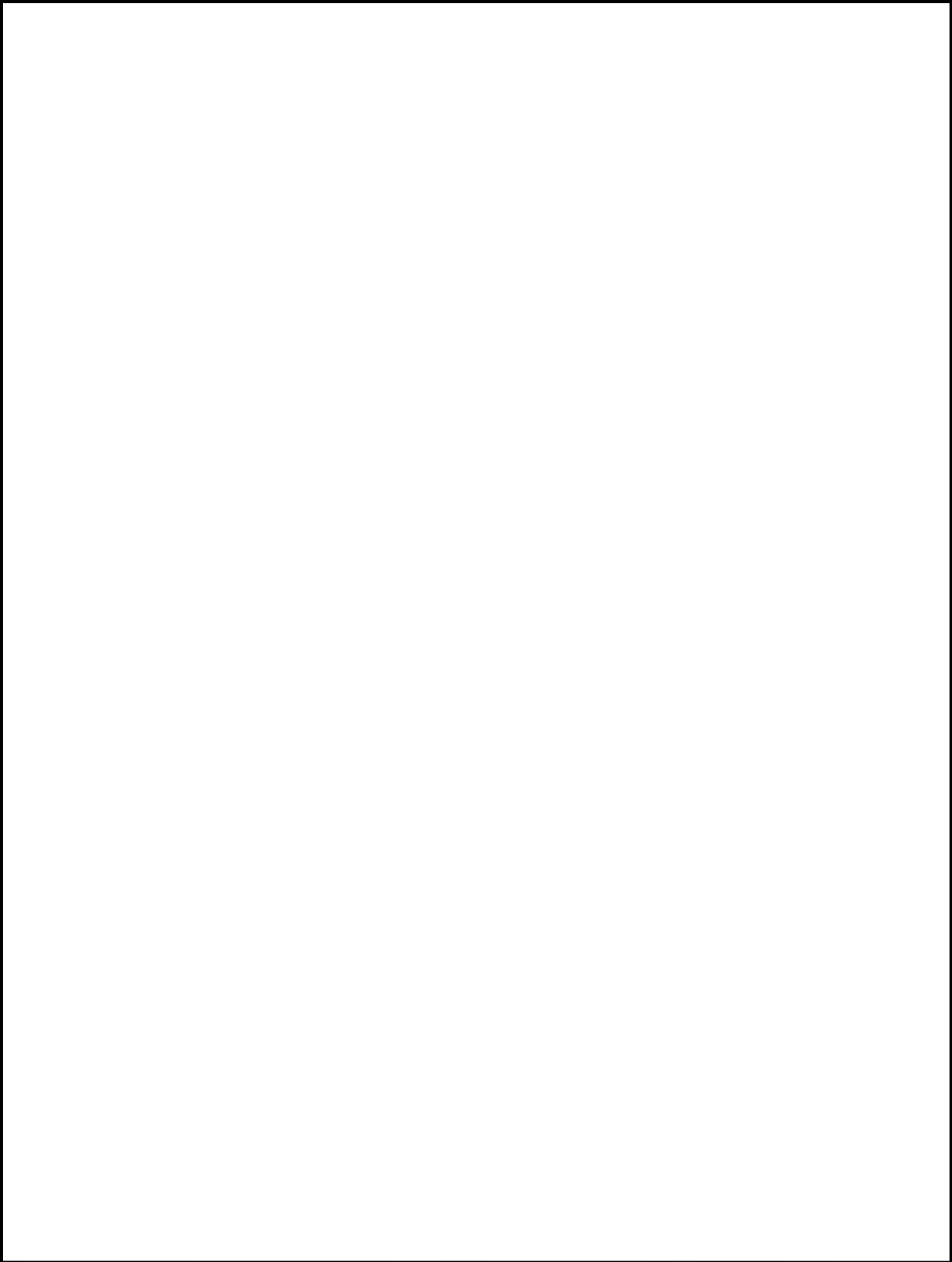
Визначено склад порошкового матеріалу для напилення, розраховано параметри процесу та розроблено технологічний процес відновлення поверхонь валів. За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено напружено-деформований стан покриття та встановлено найбільш навантажені зони. Проведено техніко-економічну оцінку, яка підтвердила ефективність запропонованої технології.

Вступ.....	
1. Аналіз матеріалів за темою досліджень.....	
1.1 Характеристика валопроводу та умови експлуатації.....	
1.3.1 Газополум'яне напилення (Combustion Flame Spraying).....	
1.3.2 Детонаційне напилення (Detonation Gun, D-Gun).....	
1.3.3 Високошвидкісне напилення (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF).....	
1.3.4 Електродугове напилення (Arc Spraying).....	
1.3.5 Плазмове напилення (Plasma Spraying).....	
2. Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на міцність зчеплення.....	
2.1 Суть методу скінчених елементів.....	
2.2 Програмний комплекс ANSYS та його можливості.....	
2.3 Моделі для випробування міцності зчеплення покриття з підкладкою.....	
2.4 Дослідження впливу жорсткості покриття на напружено-деформований стан	
2.5 Вплив товщини покриття на напружено-деформований стан.....	
3. Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження структури покриттів.....	
3.1 Розрахунок необхідної потужності плазмотрону.....	
3.2 Розрахунок продуктивності напилення.....	
3.3 Дослідження структури покриттів.....	
4. Розробка технологічного процесу відновлення валопроводів.....	
4.1 Послідовність при відновленні валів.....	
4.2 Обґрунтування вибору порошку.....	
4.3 Обґрунтування вибору обладнання.....	
4.4 Напилення покриттів.....	
4.5 Контроль якості напилених покриттів.....	
5 Економічна оцінка проектних розробок.....	
5.1 Розрахунок вартості основних матеріалів.....	

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 00. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

5.2	Розрахунок витрат на електроенергію.....
5.3	Визначення трудомісткості.....
5.4	Розрахунок витрат на основну заробітну плату виробничих робітників.....
5.5	Розрахунок строку окупності додаткових капітальних витрат.....
	Загальні висновки.....
	Список джерел інформації.....

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 00. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7



					МР. 132. 6121м. 05. 05. 00. ПЗ.								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент	Шевченко Г.П.				Вступ				Літ.	Арк.	Акрушіє		
Керівник	Лебедев В.О.										6	2	
Конс.	Лебедев В.О.								ХННІ НУК				
Н. Контр.	Лебедев В.О.												
Зав. каф.	Матвієнко М.В.												

ВСТУП

Найчастіше, саме вали обмежують ресурс вузлів і агрегатів. Зносу найбільш схильні посадкові поверхні - шийки валів під підшипники і різьбові поверхні, місця під маточини коліс зі шпонковими пазами і самі шпонкові пази, поверхні зубів. Крім того, можливе зношування центрових отворів, вигин і скручування валу.

Для суднових валопроводів, які працюють тривалий час в умовах зношування, особливо гостро стоять ці питання. Шийка валу, яка працює в парі з бабітовим вкладишем є одним із найбільш швидко зношуваних вузлів проміжних валів. Її зношування приводить до невиправданих втрат матеріальних, трудових і фінансових ресурсів. Шийки валів піддаються азотуванню на невелику товщину, яка сягає 0,03 мм протягом 50...60 годин або хромуванню. Однак ці методи не є ефективними. Знос має місце у виді дифузійного розсіювання захисного слою.

Залежно від значення зносів шийки валів обробляють на токарних верстатах і шліфують до ремонтного розміру або піддають механічній обробці після відновлення ділянок валу. Геометричні розміри шийок валів при незначному зносі відновлюють шліфуванням. Метал на зношені поверхні наплавляють після попереднього ретельного огляду та виконання перевірного розрахунку валу на міцність. При наплавленні за допомогою зварювальних автоматів або напівавтоматів шийки валів попередньо підігрівають до 250...300 °С.

Для рішення проблеми можна застосувати плазмове напилювання покриття, яке забезпечує підвищення ресурсу роботи валопроводу та економію матеріальних, сировинних, трудових ресурсів.

Газотермічне нанесення покриття в теперішній час є високотехнологічною галуззю світової економіки з річним обсягом біля 5 млрд. доларів.

Запровадження методів нанесення покриття активно розвивається в авіації, машинобудуванні енергетиці, будівництві, нафтопереробці, металургії, електроніці. В розвинених державах (США, Німеччина, Франція, Японія,

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 00. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Скандинавські країни) темп зростання цих методів складає 5...7%, в Індії – 15...17%, у Китаї - 20% [2].

Структуру і властивості основного металу при напилюванні покриттів мало змінюються. Однак в покриттях виникають напруження, що може призвести до їх руйнування. За рахунок різних коефіцієнтів термічного розширення при зміні температури в покриттях та на границі з основою виникає напружено-деформований стан дослідження якого представляє науковий інтерес.

В магістерської роботі продовжується та розвивається тема, яка розглядалася в бакалаврської атестаційної роботі [1]. Методом математичного модулювання розглядається напружено-деформований стан в плазмових покриттях для отримання ущільнень газотурбінних двигунів.

Для досягнення найбільшого ефекту використання ущільнюючих покриттів, необхідно надати особливу увагу вибору матеріалу, підготовці поверхні виробу, режиму напилювання.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 00. ПЗ.	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матвієнко М.В.
Матвієнко М.В.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Студент		Шевченко Г.П.			Аналіз матеріалів за темою досліджень		Літ.	Арк.	Акрушів	
Керівник		Лебедєв В.О.							11	12
Конс.		Лебедєв В.О.					ХННІ НУК			
Н. Контр.		Лебедєв В.О.								
Зав. каф.		Матвієнко М.В.								

1.1 Характеристика валопроводу та умови експлуатації

Головне призначення валопроводу - передавати крутний момент від головного двигуна гребному гвинту (рушю), а також сприймати і передавати корпусу судна упор, створюваний гребним гвинтом. Кількість валопроводів на судах може бути від одного до трьох. Для кращої роботи гребного гвинта валопровід встановлюють із нахилом у корму (до 5°). У трьох вальних установках, а іноді і двох вальних, вали правого і лівого бортів можуть бути встановлені під кутом до 2° і до діаметральної площини судна.

Довжина валопроводу залежить від розмірів судна та місця розташування головних двигунів. Валопровід зазвичай складається з кількох частин, жорстко з'єднаних між собою та покладених на опорні підшипники. Кожна з цих частин, залежно від призначення, має свою назву.

Суднові проміжні вали призначені для безпосередньої передачі крутного моменту і осьових навантажень. Вони мають шийки для установки підшипників.

Призначення опорних підшипників - сприймати навантаження від маси валопроводу, забезпечувати правильне розташування валопроводу до корпусу судна, а також тривале і надійне обертання валопроводу на всіх режимах роботи головного двигуна. Зазвичай застосовують опорні підшипники ковзання для довгих валопроводів та роликові підшипники кочення для коротких.

Проміжні вали виготовляються зазвичай пустотілими разом із сполучними фланцями; їх з'єднують між собою болтами. Кожен проміжний вал, як правило, лежить на одному опорному підшипнику. Під час монтажу встановлюють так званий підшипник. Для опорного та монтажного підшипників на кожному валу передбачені шийки, оброблені з великою точністю. Коли як опори застосовують роликові підшипники, то вали мають

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знімні муфти для з'єднання між собою. Це дозволяє пресувати роликові підшипники на вали.

При експлуатації необхідно перевірити геометрію посадочних місць валу під підшипники. Іншою причиною, що стала особливо актуальною в останні роки, може бути неякісний матеріал валу.

У валах, виготовлених з неякісного м'якого матеріалу може зустрічатися вигин. Тому необхідно виконувати перевірку валу на вигин. При обертанні валу за допомогою індикатора перевіряється прогин осі валу.

Знос шийок валів відбувається внаслідок дії на них робочих навантажень. Руйнування поверхонь тертя можна представити у вигляді окремих елементарних процесів, сполучення яких залежить від матеріалів профілюючої й зміцнювальної технології, видів і умов тертя [3].

Основні з цих процесів: мікрорізання (абразивом, часткою продуктів зносу), дряпання (пластичне відтискування матеріалу), відшаровування часток матеріалу, що вичерпали пластичні властивості зміцненого шару, слабо зв'язаного з підкладкою, викришування твердого складового матеріалу після зносу м'якого компонента, часток білого вуглецевого шару, твердих окисних плівок, поверхневого шару внаслідок контактної втоми, глибинне виривання (приварювання ділянок поверхні тіла і контртіла та руйнування по основному матеріалу в глибині одного з тіл), виборчий перенос (утворення на поверхні тертя, руйнування і знову утворення плівок металу, що служить твердим змащенням у процесі тертя)

Частинки бруду у маслі в результаті попадання в підшипник призводять к зносу шийки валу. Вони мають малий розмір та не можуть бути відфільтровані і проводяться маслом всередину підшипника де забиваються в одну з більш м'яких робочих поверхонь. Цій поверхнею є метал підшипника.. Виступаючи з білого металу частинки бруду, проходячи крізь масляний шар, вони будуть затирати шийку валу. Ступінь зносу шийки буде залежати від товщини масляного шару, крізь який, частки бруду повинні проникнути. Для

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення зносу шийки потрібно, щоб твердості двох робочих поверхонь підшипника і валу відрізнялись.

Валопровід виготовлений зі сталі 18ХНВА, яка має наступний склад, представлений в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Хімічний склад сталі 18ХНВА

Елементи	C	Si	Mn	Cr	Ni	W
Зміст, %	0,15	0,17–0,37	0,30–0,60	0,60–0,90	1,25–1,65	0,5–0,8

Хромонікельвольфрамова сталь 18ХНВА застосовується для виготовлення найбільш відповідальних та найбільш навантажених деталей двигунів (колінчасті вали, вали компресора). Сталь мартенситного класу, має гарне прожарювання і загартовується на мартенсит навіть при великих перерізах заготовок. Цементация деталей проводиться за нормальної температури 900...920 °С. На діаграмі ізотермічного перетворення аустеніту сталі 18ХНВА відсутня зона перлітно-трититного розпаду. Аустеніт розпадається або на голчастий тростит, або мартенсит. Пом'якшувальною обробкою для цієї сталі є висока відпустка при 650...670 °. Структура після такої термічної обробки - сорбіт з карбідами [1].

Попередня термічна обробка: нормалізація при 920...980 °С і відпуск (для поковок і прутків). Цементация при 900...920 °С. Остаточна термічна обробка: загартування з 950 °С на повітрі, гартується з 850...860 °С на повітрі і відпуску при 150...170 °С, гартується з 860...870 °С в маслі і відпуску при 525...575 °С. Механічні властивості сталі представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Механічні властивості сталі 18ХНВА

Матеріал	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	НВ
18ХНВА	1300	1100	14	55	310

Валопровід піддається загартуванню при температурі 950 °С і низькому відпуску при 200 °С. Після гарту і низького відпуску сталь набуває високі механічні властивості. Це обумовлено їх застосуванням не тільки в цементованому вигляді, але і без цементації (для деталей від яких не потрібна висока зносостійкість, а потрібна висока міцність).

1.3. Способи напилювання покриттів для відновлювання валів

Газотермічне напилення це комплекс сучасних, добре відпрацьованих методів нанесення функціональних, відновлювальних та декоративних покриттів із найширшого спектру матеріалів. Область їх застосування надзвичайно велика – від реактивних двигунів та колінчастих валів до медичних імплантантів та ободів велосипедних коліс.

Під газотермічним напиленням (Thermal Spray Coating) розуміють сукупність процесів, при яких напилювання матеріал розплавляється, диспергується (розпорошується) і переноситься на оброблювану поверхню за допомогою газової струмені. При ударі об поверхню, частка напилюваного матеріалу миттєво охлажується (швидкості охолодження можуть сягати мільйона градусів за секунду) і деформується, щільно зчеплені з нею. Через це газотермічні покриття мають стрічкову або планарну ультрадрібнозернисту мікроструктуру. Покриття також може містити пори, а у разі напилення металів – частинки їх оксидів та нітридів.

Напилюватися можуть як метали та сплави, так і неметалеві сполуки, карбіди, оксиди, стекла, кераміки та полімери, а також композиційні матеріали. В принципі, цим способом можна напилити будь-який матеріал, який не розкладається при нагріванні до температури плавлення. У ролі підкладки можуть виступати метали, кераміка, деревина чи пластмаси.

Нанесення газотермічних покриттів практикується в промисловості близько 100 років, проте за останні 20 років у цій області відбулися суттєві

					<i>МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.</i>	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зміни, що висунули ці технології на новий рівень можливостей. Подібні зміни були викликані удосконаленням технологічного обладнання та технології виробництва вихідних матеріалів для напилення, впровадженням нових систем автоматизації та контролю якості.

Винахідником газотермічного методу напилення був Макс Ульріх Шооп. Розпорошуючи свинець за допомогою стаціонарної тигельної установки, він отримував покриття на різних матеріалах. На основі його технології у Цюриху у 1909 р. був відкритий завод із металізації. У 1913р. Ульріх Шооп удосконалив і запатентував конструкцію газоплам'яного розпилювача, де матеріал для розпилення подавався у плом'я газової горелки у вигляді проволочки. Щільність покриттів, отриманих Шоопом становила 85-90 % щільності компактного матеріалу. У 1918р. він з співробітниками розробив електродуговий розпилювач, що дозволяє ефективно наносити покриття з металу. Метод нанесення покриттів через розпорошення стали назвали на ім'я винахідника технології шоопуванням. У 1921р. Ульріх Шооп запатентував технологію металопорошкового газоплам'яного розпилення.

Джерела тепла: хімічна реакція горіння, електрична дуга. Існує газополум'яне напилення, високошвидкісне напилення, детонаційне напилення, електродугова металізація, плазмове напилення.

Процеси газотермічного напилення прийнято класифікувати за природою джерела теплової енергії. У процесах електродугового та плазмового напилення, джерелом енергії є електрична дуга. Розглянемо докладніше кожний із методів газотермічного напилення.

1.3.1 Газополум'яне напилення (Combustion Flame Spraying)

Газополум'яне напилення здійснюється за допомогою спеціальної пальника, в яку вдувається повітря (або кисень) і горючий газ (ацетилен, пропан, водород або ін.). на оброблювану поверхню. Процеси газополум'яного

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напилення створюють покриття з відносно високою пористістю (5-12 %) та невисокою адгезією до підкладки. Це зумовлено малою швидкістю газової струмені (близько 50 м/с). Температура полум'я обмежує спектр матеріалів, які можуть бути напилені газополум'яним способом.

Напилюваний матеріал може подаватися в розпилювач у вигляді стрижня, проволочи, порошку або шнура. Металеві матеріали, як правило, використовують у вигляді гнучких дротів, що дуже зручно і забезпечує безперервність процесу. Керамічні матеріали – у вигляді порошоків чи спеціальних спечених прутків. Суттєвим недоліком при використанні прутків є порушення безперервності процесу.

При використанні для напилення багатокомпонентних порошоків, можливе порушення однорідності властивостей покриття, викликане сегрегацією (розшаруванням) порошоків. Дана проблема усувається використанням гнучких шнурових матеріалів, що складаються з того ж порошку, утримуваного гнучкої зв'язкою. При розпиленні матеріал зв'язки повністю випаровується і на підкладку осідає тільки матеріал порошку.

Основними достоїнствами газополум'яного напилення, що забезпечили йому широке поширення, є простота і надійність обладнання, а також мобільність. Даний метод може використовуватися в польових умовах (на трасі). Технології газополум'яного напилення з успіхом застосовуються для ремонту і відновлення геометрії деталей, не зазнають серйозних навантажень.

1.3.2 Детонаційне напилення (Detonation Gun, D-Gun)

Установка для детонаційного напилення нагадує кулемет, стріляючий порціями розігрітого порошку. У відкриту камеру згорання, до якої прикріплюється стовбур, подається суміш кисню і пального газу, стовбур направляють на напыляемую поверхню. Через завантажувальний отвір в камеру подається порошок. Суміш підпалюється електричною іскрою і

					МП. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибухає. Розжарені частинки разом з продуктами згоряння вилітають на оброблювану поверхню. Температура частинок у момент удару досягає 4000 °С. Частота пострілів – 3...4 в секунду.

З-за високої швидкості вильоту частинок, покриття, отримані детонаційним напиленням, володіють високою міцністю, твердістю і зносостійкістю. Детонаційним напиленням створюють покриття з металокераміки: карбідів вольфраму, титану і кобальту, нітридів титану і бору, окису алюмінію.

Недоліком методу є неоднорідність одержуваного покриття та складність технологічного обладнання.

1.3.3 Високошвидкісне напилення (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF)

Технології високошвидкісного напилення по праву вважаються найбільш сучасними газотермічними методами.

Принципово, методи HVOF нічим не відрізняються від газополум'яних, проте, завдяки особливостям конструкції пальника, у них досягаються дуже високі швидкості розпилення.

Існують різноманітні реалізації ідеї високошвидкісного напилення. Наприклад, один з варіантів включає камеру згоряння і довге циліндричне сопло, охолоджувані водою. В камеру під високим тиском вдуваються кисень і горючий газ. Строго по осі пальника подається порошок напилюваного матеріалу. Суміш розплавлених частинок порошку і продуктів згоряння газів, проходячи через сопло, розганяється до надзвукової швидкості і вилітає в напрямку підкладки. У систем HVOF першого покоління, тиск у камері згоряння становило 0,3-0,5 МПа, швидкість вильоту частинок досягала 450 м/с. Для подальшого прискорення вилітають частинок, тиск в камері підвищують до 1-1,5 МПа, в конструкцію гармати вводять сопло Лавалю. Швидкості вильоту частинок при цьому перевищують 1000 м/с.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Покриття, отримані високошвидкісним методом характеризуються значеннями щільності, що сягають 99 % щільності компактного матеріалу, і низьким рівнем залишкових напружень. Оскільки наявність останніх є головним чинником, що обмежує товщину покриття, HVOF напилення дозволяє отримувати покриття значно більшої товщини в порівнянні з газополуменевим напиленням. За експлуатаційними характеристиками високошвидкісні покриття перевершують покриття, отримані детонаційним напиленням. В ряді програм, процеси HVOF поступово витісняють плазмове напилення.

Зважаючи на те, що падаючі частинки володіють дуже великою кінетичною енергією, для формування високоякісних покриттів не потрібно їх розплавлення, що робить даний процес єдино прийнятним у ряді випадків, наприклад, при напиленні металокераміки.

Технології HVOF напилення є неперевершеними для відновлення і продовження ресурсів деталей, що випробовують високий корозійно-ерозійний знос, кавітацію, завдяки високій щільності і зносостійкості одержуваних покриттів.

У розвинених країнах, високошвидкісне напилення практично повністю витіснило методи вакуумного напилення і дозволило відмовитися від вкрай неекологічних гальванічних покриттів.

1.3.4 Електродугове напилення (Arc Spraying)

Електродугове напилення – один з найбільш економічних методів напилювання покриттів, що характеризується низьким енергоспоживанням і високими швидкостями напилення. Джерелом нагрівання, як і у випадку плазмового напилення, є електрична дуга. В даному випадку, дуга запалюється між двома дротами з напилюваного матеріалу, які подаються в зону розпилення з постійною швидкістю. Температура у зоні дуги може перевищувати 5000°C.

					MP. 132. 6121m. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Диспергування розплавленого матеріалу і доставка його на оброблювану поверхню здійснюється струменем стисненого газу, як правило повітря [4].

Так як напилюваний матеріал виступає в ролі електрода, цим методом можна розпорошувати тільки електропровідні матеріали (метали і сплави), тому його іноді називають електродуговою металізацією.

Достоїнствами електродугового напилення є його простота, економічність і висока продуктивність (до 45 кг/годину).

Цей процес широко використовується для напилення антикорозійних цинкових і алюмінієвих покриттів, застосовуваних у суднобудуванні, інфраструктурі міст, обладнанні сільськогосподарських підприємств.

Існують також сучасні електродугові гармати, які працюють в інертних середовищах і використовують в якості розпилюючої газу азот або аргон. У цих установках отримують покриття з активних металів, таких як титан і цирконій, для антикорозійного захисту в хімічній промисловості.

Велике значення при завданні будь-яких типів газотермічних покриттів має попередня обробка напилюваної поверхні, що включає операції мийки, знежирювальні та абразивні струминної обробки. Попередня обробка впливає на міцність зчеплення напилюваного покриття з підкладкою. У ряді випадків, газотермічні покриття після напилення піддають додатковій обробці – оплавке, механічній або фізико-хімічній обробки та ін., що дозволяє поліпшити адгезію та експлуатаційні характеристики виробу. Хороші результати дає застосування газотермічних покриттів поверх основних наплавлених шарів, що мають, як правило, грубий поверхневий рельєф.

1.3.5 Плазмове напилення (Plasma Spraying)

При даному способі напилення, джерелом енергії є електрична дуга, яка горить між двома електродами. Через область горіння дуги продувається інертний газ (як правило, аргон з домішками азоту або водню), який іонізується і утворює плазму. Температура плазми в області дуги досягає 15000°C. В

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмінь плазми подається порошок напилюваного матеріалу, який розплавляється і переноситься на оброблювану поверхню. Незважаючи на високі температури в зоні горіння дуги, оброблювана поверхня не відчуває сильного нагріву, так як при виході з області дуги температура різко падає.

Плазмовим напиленням отримують покриття з нікелевих і залізних сплавів, карбідів, нітридів, боридів. Надзвичайно висока температура плазми дозволяє напилювати даними способом вогнетривкі кераміки, що містять оксиди алюмінію та цирконію, та інші тугоплавкі матеріали, що не піддаються розпорошення іншими способами.

До достоїнств плазмового розпилення відносяться також гнучкість, можливість регулювання фізико-механічних властивостей одержуваного покриття і універсальність, що дозволяє напилювати практично будь-які матеріали і їх поєднання, в тому числі і одержувати багат шарові композиційні покриття.

Обладнання для плазмового напилення складніше, ніж для газополум'яного, так як включає в себе газову і електроапаратуру. В даний час інтенсивно досліджуються і розробляються нові методи плазмового напилення. У особливо відповідальних випадках для досягнення високої адгезії і щільності покриттів, плазмовий процес проводять у вакуумній камері при зниженому тиску або в атмосфері інертного газу. Зменшення тиску призводить до збільшення швидкості частинок, що дозволяє отримувати більш щільні покриття. Проведення процесу в атмосфері інертного газу виключає взаємодію розпорошується матеріалу з киснем, що дає можливість напилювати хімічно активні матеріали, наприклад, дисилицид молібдену, інтерметаліди. Такі покриття можуть мати високу твердість і хімічну стійкість при підвищених температурах.

Ще однією перспективною модифікацією плазмового методу є процес, при якому струмінь напилюваного матеріалу оточується струменем інертного

					<i>МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.</i>	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

газу з метою виключення взаємодії напилюваних частинок з киснем. Переваги даного методу ті самі, що й при проведенні процесу в інертній атмосфері.

Процеси плазмового напилення застосовуються для створення високоякісних функціональних покриттів в самих різноманітних областях техніки – в машинобудуванні, аерокосмічній техніці, електротехнічній та хімічній промисловості, у виробництві медичної і побутової техніки [4].

У потоці плазми частинки порошку нагріваються приблизно до 10000 К. Передача теплоти від плазми до порошкових частинок здійснюється в основному теплопровідністю і конвекцією.

Слід зазначити, що швидкість частинок, падаючих на деталь по перетину плями напилення, розподіляється у край нерівномірно і на периферії може бути в 3...4 рази менше, ніж в центрі плями.

Під дією поверхневого натягу розплавлені частинки набувають форми сфери. Сферичні частинки на шляху до підложки остигають і, падаючи на поверхню деталі, розтікаються і кристалізуються. Чергові порції розплавлених частинок падають на частинки покриття, що вже закристалізувались, тобто розплавлені частинки практично за весь час напилення падають на затверділу поверхню і утворюють пластинчасту структуру. Покриття формується шляхом послідовного укладання частинок, що деформуються. Процес супроводжується утворенням мікропорожнин, які заповнюються газом. Для зменшення пористості і підвищення однорідності напилюваних покриттів зменшують розмір напилюваних частинок. Проте дуже дрібні частинки (розмір фракції менше 10...20 мкм) часто виявляються непридатними.

Швидка кристалізація частинок на поверхні деталі дозволяє одержувати покриття із структурою пересичених твердих розчинів. Якість покриття залежить від процесів, що протікають при взаємодії частинок з плазмою, і від процесів при формуванні покриття на поверхні деталі (якість контактів між частинками, швидка кристалізація і деформація частинок, взаємодія напилюваної речовини із зовнішнім середовищем). Найважливіше значення

					MP. 132. 6121m. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

має середовище, в якому здійснюється процес осадження тих або інших покриттів [5-7].

Найважливіше значення в технології плазмового напилення має розробка і підготовка порошкових матеріалів [8]. Керамічний або металевий порошок нагнітається у високотемпературну швидкісну плазмову дугу, в якій відбувається плавлення частинок порошку, що летить до деталі. Рідкі частинки ударяються об поверхню деталі, і формується покриття. Для отримання якісного покриття проводять оптимізацію великої кількості параметрів, які ретельно контролюються і регулюються за допомогою автоматичних систем, які істотно ускладнюють технологічний процес. До параметрів відносяться діаметр сопла для управління плазмовим факелом, місце введення порошку, кут розпилювання порошку. Ці параметри контролюють структуру плазмового факела. Стійкість роботи плазмової дуги регулюється і контролюється її потужністю, відстанню до підложки, складом первинного і вторинного газу, що подається, швидкістю потоку газу в дузі, швидкістю потоку несучого газу, також швидкістю подачі, витратою матеріалу порошку тобто частинки розподіляються за розмірами, формою і кристалографічними фазами [9].

1.4 Методи визначення міцності зчеплення покриттів

Для визначення міцності зчеплення використовують якісні і кількісні методи. Кількісні методи вимірювання в порівнянні з якісними мають переваги, так як вимірюють абсолютні величини. Труднощі застосування цих способів полягає в складності і дорожнечі виготовлення спеціальних зразків. Якісні методи засновані на розходженні фізико-механічних властивостей напилюваних покриттів і підкладки. Метод контролю обирають залежно від властивостей покриття, виду і призначення деталі.

Метод гарцювання застосовують для м'яких покриттів типу срібних. Поверхня покриття гарцюють не менше 15...20 с. Для гарцювання

					МП. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовують латунні або сталеві щітки з діаметром дроту 0,15...0,25 мм. Швидкість обертання щіток 1800...2500 об/хв. Після гарцювання на контрольованій поверхні не повинно спостерігатися здуття і відшаровування покриттів. Метод нанесення сітки подряпин. На напилену поверхню гострим ножом наносять кілька паралельних ліній, глибиною до основного металу підкладки на відстані 2...3 мм один від одного і стільки ж паралельних ліній, перпендикулярних до них. На поверхні покриття не повинно спостерігатися відшарувань.

Метод вигину. Напилені платівки піддають вигину в обидві сторони під кутом 90° до зламу. У місці зламу покриття не повинно відшаровуватися.

Метод нагрівання. Нагрівають напилені деталі протягом години при температурі залежно від матеріалу покриття до 300° С з подальшим охолодженням на повітрі. Внаслідок відмінності коефіцієнтів термічного розширення при слабкій міцності зчеплення покриття спучується і частково відшаровується.

Кількісні методи випробування на міцність зчеплення засновані на визначенні сили, необхідної для відриву покриття від підкладки або для його зрізання.

Міцність зв'язку покриття з підкладкою визначають двома методами: випробуванням на розрив та випробуванням на зріз.

Випробування на зріз застосовне в тому випадку, коли міцність зчеплення покриття з підкладкою на зріз вище, ніж на розрив.

Випробування на розрив здійснюють двома способами: при першому розтягувальну силу докладають до поверхні розділу через покриття, а при другому - безпосередньо до поверхні розділу. При випробуванні першим способом до покриттів приклеюють за допомогою різних клеїв або епоксидної смоли другу половину зразка. Методика випробувань зводиться до безпосереднього поділу підкладки і напиляного шару.

					МП. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для випробування міцності зчеплення покриттів з підкладкою приміняють також методику витягування штифта. Недоліком цього методу випробування є наявність вільної ділянки покриття між штифтом і основою, на якій відбувається концентрація напружень, що призводить до руйнування покриття. Цей метод визначення міцності зчеплення дає занижені значення. Для усунення зазору між матрицею і штифтом використовують конічні пробки.

1.5 Мета і завдання кваліфікаційної роботи

Метою роботи є: розробка технологічного процесу відновлення валопроводів, дослідження методом комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану напилених покриттів при визначенні їх міцності зчеплення, дослідження структури покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести вибір обладнання та матеріалів, які найбільш задовольняють усім вимогам, а також розробити технологічний процес відновлення валопроводів;
- виконати аналіз літератури за методиками оцінки напружено-деформованого стану та вибрати метод дослідження;
- побудувати СЄ моделі для комп'ютерного моделювання;
- виконати аналіз результатів розрахунку напруженого стану при визначенні міцності зчеплення покриттів;
- дати рекомендації з обґрунтуванням вибору розмірів зразків для випробування;
- розрахувати економічні показники технологічного процесу відновлення валопроводів;
- проілюструвати вищезгадані розрахунки, розробки та вибране обладнання кресленнями, графіками та таблицями.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 01. ПЗ.	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент	Шевченко Г.П.				Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на міцність зчеплення				Літ.	Арк.	Акрушів		
Керівник	Лебедєв В.О.										23	43	
Конс.	Лебедєв В.О.								ХННІ НУК				
Н. Контр.	Лебедєв В.О.												
Зав. каф.	Матвієнко М.В.												

2.1 Суть методу скінчених елементів

Метод скінчених елементів (МСЕ) - чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з приватними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення задач механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки та електродинаміки.

Суть методу впливає з його назви. Область, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеве кількість під областей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції. У найпростішому випадку це поліном першого ступеня. Поза своїм елементом апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на кордонах елементів (у вузлах) є вирішенням завдання і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності значення сусідніх функцій на кордонах між елементами (у вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких шукається рішення вихідної системи, прямо пропорційно кількості елементів і обмежується тільки можливостями ЕОМ. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь має розріджений вигляд, що істотно спрощує її рішення.

З точки зору обчислювальної математики, ідея методу скінчених елементів полягає в тому, що мінімізація функціоналу варіаційної задачі здійснюється на сукупності функцій, кожна з яких визначена на своїй під області, для чисельного аналізу системи дозволяє розглядати його як одну з конкретних гілок діакоптики - загального методу дослідження систем шляхом їх розчленування. Швидкий розвиток МСЕ пов'язано, в першу чергу, зі створенням високопродуктивних обчислювальних машин і вирішенням проблем аерокосмічної техніки [10].

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Переваги та недоліки методу:

Метод скінчених елементів складніше методу кінцевих різниць в реалізації. У МСЕ, однак, є ряд переваг, що виявляються на реальних завданнях: довільна форма оброблюваної області; сітку можна зробити більш рідкісною в тих місцях, де особлива точність не потрібна.

Довгий час широкому поширенню МСЕ заважала відсутність алгоритмів автоматичного розбиття області на «майже рівносторонні» трикутники (похибка, залежно від варіації методу, обернено пропорційна синусу або самого гострого, або самого тупого кута в розбитті). Втім, це завдання вдалося успішно вирішити (алгоритми засновані на тріангуляції Делоне), що дало можливість створювати повністю автоматичні скінчено-елементні САПР.

2.2 Програмний комплекс ANSYS та його можливості

Програмний комплекс ANSYS - універсальна програмна система скінчено елементного (МСЕ) аналізу, існує і розвивається протягом останніх 30 років, є досить популярною у фахівців у сфері автоматичних інженерних розрахунків (CAE, Computer-Aided Engineering) і CE рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла і механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), задач механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів. Моделювання і аналіз в деяких областях промисловості дозволяє уникнути дорогих і тривалих циклів розробки типу «проектування - виготовлення - випробування». Система працює на основі геометричного ядра Parasolid [11].

Програмна система KE аналізу ANSYS розробляється американською компанією ANSYS Inc. Компанія також випустила інші системи KE моделювання, у тому числі DesignSpace, AI Solutions (NASTRAN, ICEM CFD); призначені для використання в більш специфічних галузях виробництва.

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В якості стратегічного партнера фірма співпрацює з багатьма компаніями, допомагаючи їм провести необхідні зміни. Пропоновані фірмою ANSYS Inc. засоби чисельного моделювання та аналізу сумісні з деякими іншими пакетами, працюють на різних ОС. Програмна система ANSYS сполучається з відомими CAD-системами Unigraphics, CATIA, Pro/ENGINEER, SolidEdge, SolidWorks, Autodesk Inventor та деякими іншими.

Програмна система ANSYS є досить відомою CAE-системою, яка використовується на таких відомих підприємствах, як ABB, BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, Exxon, FIAT, Ford, БелАЗ, General Electric, Lockheed Martin, MeyerWerft, Mitsubishi, Siemens, Shell, Volkswagen-Audi та інші, а також застосовується на багатьох провідних підприємствах промисловості.

ANSYS – єдина скінчено-елементна система з таким повним охопленням явищ різної фізичної природи: міцність, теплофізика, гідрогазодинаміка і електромагнетизм з можливістю вирішення пов'язаних завдань, які об'єднують всі перераховані види.

Серед безлічі скінчено-елементних програмних комплексів ANSYS - перший і єдиний, розроблений та сертифікований відповідно до міжнародних стандартів ISO 9000 та ISO 9001.

Препроцесор ANSYS дозволяє не тільки створювати геометричні моделі власними коштами, але імпортувати вже готові, створені засобами CAD-систем. Треба зазначити, що геометрична модель в подальшому може бути модифікована будь-яким чином, оскільки при імпорті здійснюється перетрансляція даних в геометричний формат ANSYS, і деталь не підміняється «недоторканною» кінцево-елементної сіткою. Користувач може видаляти несуттєві дрібні подробиці, добудовувати певні деталі, проводити згущення/розрідження сітки та інші найважливіші операції, без яких подальший рішення може бути абсолютно некоректно або взагалі виявиться недосяжним.

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Як вже зазначалося, ANSYS дозволяє вирішувати проблеми міцності, теплофізики, гідрогазодинаміки, електромагнетизму спільно з розрахунком втомних характеристик і процедурами оптимізації. Єдина система команд і єдина база даних повністю виключають проблеми інтеграції та взаємного обміну між зазначеними сферами. Більш того, в програмі використані спеціалізовані кінцеві елементи, що мають крім переміщень і поворотів у вузлах, ступеня свободи по температурі, напрузі та ін, а також перемикання типу елемента, наприклад, електромагнітного на міцнісний. Завдяки цьому в програмі реалізовані унікальні можливості проведення пов'язаного аналізу. Оптимізація конструкції, таким чином, може вестися з урахуванням усього різноманіття фізичних впливів на неї.

2.3 Моделі для випробування міцності зчеплення покриття з підкладкою

Моделі для випробувань обрали на основі статті [12]. Загальний вигляд зразка для випробувань міцності зчеплення напиляного шару з підкладкою методом витягування штока показаний на рисунку 2.1. Дослідження напруженого стану виконувались в невеликій зоні, що безпосередньо примикає до місця з'єднання торця штока з покриттям (область 4 на рис. 2.1). Саме в цій зоні зосереджені напруження при навантаженні штока.

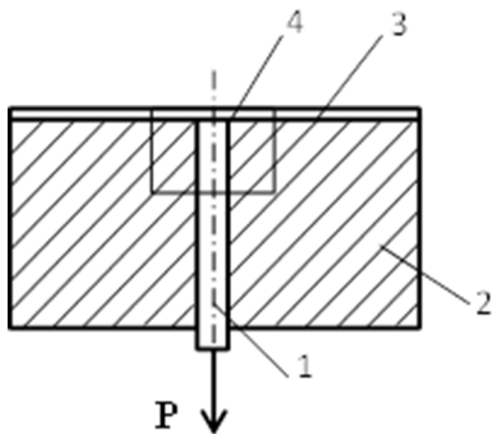


Рис. 2.1. Конструкція зразка для випробування міцності зчеплення покриття методом витягування штока. 1 – шток, 2 – втулка, 3 – напилений шар, 4 – область моделювання напруженого стану при навантаженні

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

27

Для цієї зони будувалася фізична модель (рис. 2.2) для подальшого дослідження. Внаслідок симетрії напружено-деформованого стану щодо вертикальної осі СЕ модель будувалася для її правої половини (рис. 2.3).

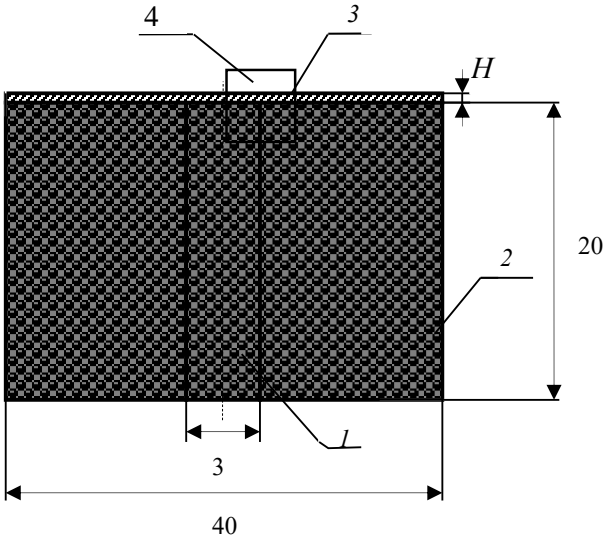


Рисунок 2.2 Фізична модель досліджуваної області: 1-стрижень, 2 – втулка, 3 – напиляний шар, 4 - область моделювання

Це дозволило при тих же витратах машинного часу і пам'яті значно збільшити точність розрахунку.

Товщина напиляного шару в моделях змінювалася від 0,3 до 1,0 мм. Досліджувалися варіанти з різною жорсткістю (модулями пружності E) матеріалу напиляного шару: малої ($1 \cdot 10^5$ МПа), середньої ($2 \cdot 10^5$ МПа) і великий ($3 \cdot 10^5$ МПа). Модуль пружності основного матеріалу (штока і втулки) у всіх варіантах залишався незмінним ($2 \cdot 10^5$ МПа). Варіанти моделей наведені в таблиці 2.1.

3	2	3
1	2	1

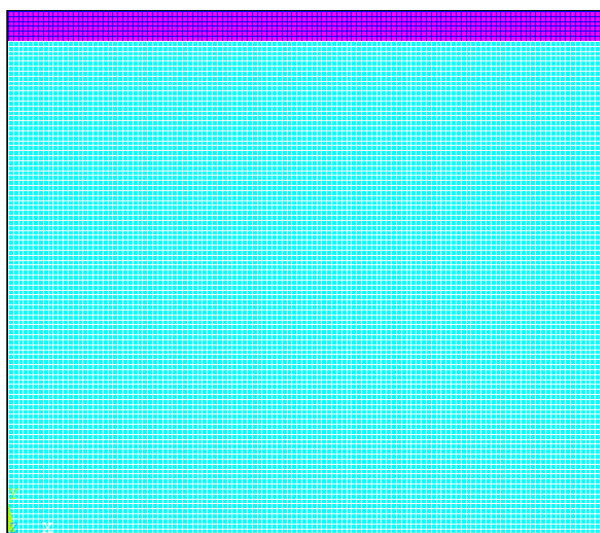


Рисунок 2.3 Скінченно-елементна модель та шляхи 1-1, 2-2 та 3-3 побудови епюр напружень

Таблиця 2.1- Варіанти співвідношення товщини та жорсткостей шарів

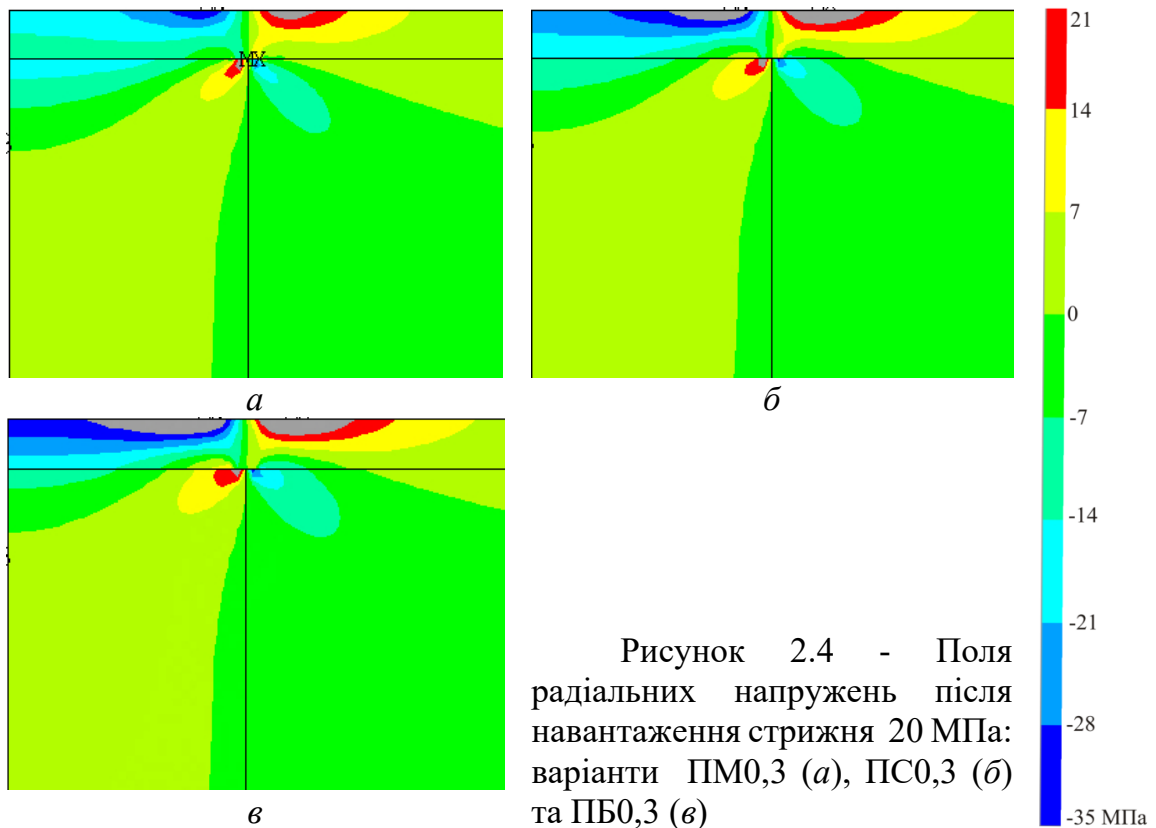
№ варіанта	Товщина, мм	Модуль пружності, 10^5 МПа
ПМ0,3	0,3	1,0
ПМ0,4	0,4	1,0
ПМ0,5	0,5	1,0
ПМ1,0	1,0	1,0
ПС0,3	0,3	2,0
ПС0,4	0,4	2,0
ПС0,5	0,5	2,0
ПС1,0	1,0	2,0
ПБ0,3	0,3	3,0
ПБ0,4	0,4	3,0
ПБ0,5	0,5	3,0
ПБ1,0	1,0	3,0

Коефіцієнт Пуассона у всіх варіантах та для усіх матеріалів прийнятий 0,3. Навантаження на стрижень в усіх варіантах задач дорівнює 20МПа.

2.4 Дослідження впливу жорсткості покриття на напружено-деформований стан

Результати моделювання полів напружень (поздовжніх, поперечних, окружних, дотичних та еквівалентних) в вузлах з напиленим шаром товщиною 0,3 мм при різній жорсткості матеріалу покриття (малої ПМ0,3, середній ПС0,3, великої ПБ0,3) наведені на рисунках 2.4...2.8.

Аналіз полів показує, що характер розподілу напружень практично не залежить від жорсткості матеріалу покриття. Найбільш завантажена ділянка поблизу точки сполучення штока, втулки і покриття. Радіальні та окружні напруження досягають великої величини також на верхній зовнішній поверхні напиляного шару (рис. 2.4 и 2.6).

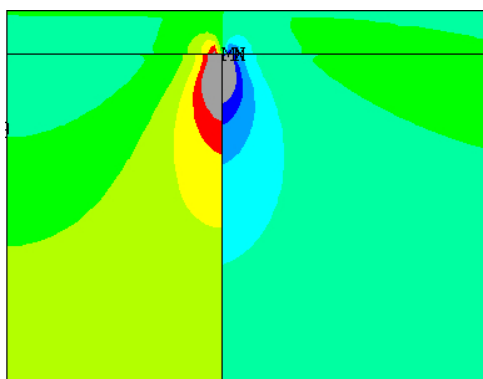


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

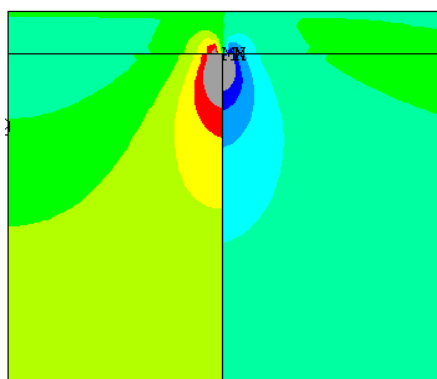
МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

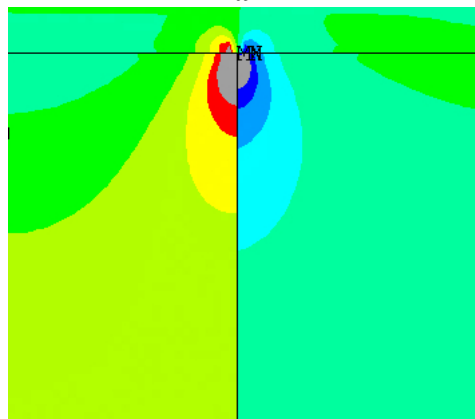
30



a

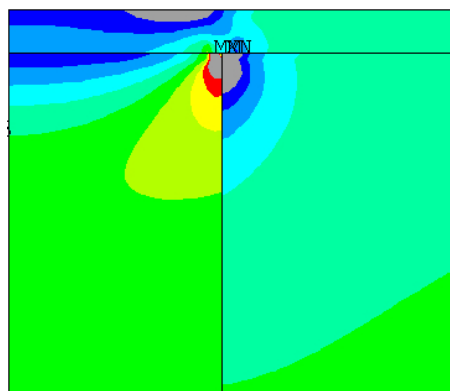
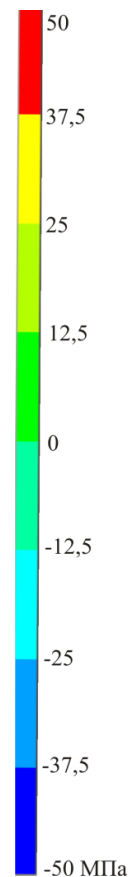


б

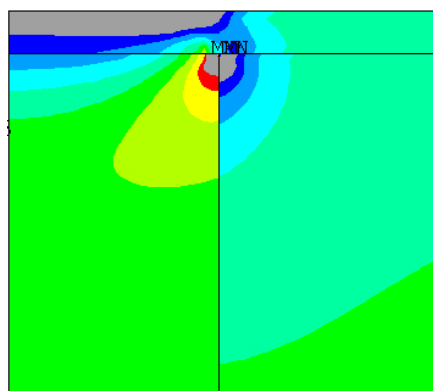


в

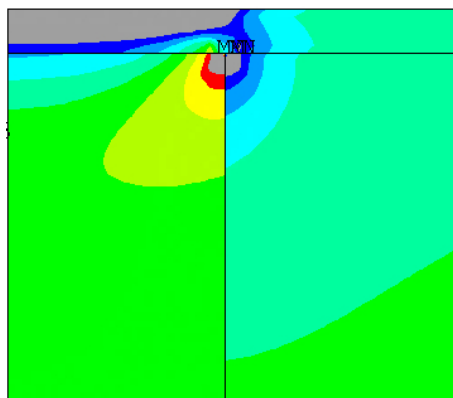
Рисунок 2.5 - Поля осевих напружень після напруження стержня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



a

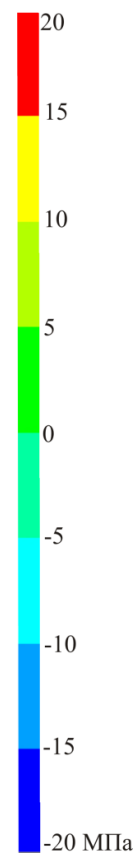


б



в

Рисунок 2.6 - Поля окружних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)

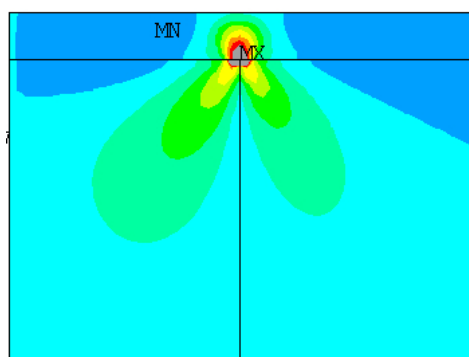


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

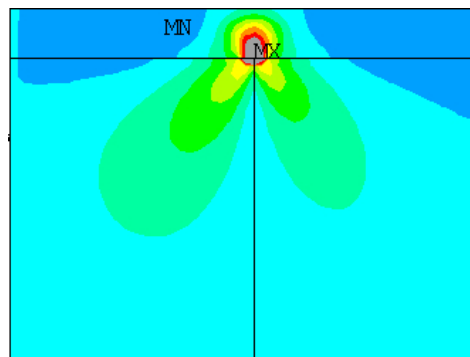
МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

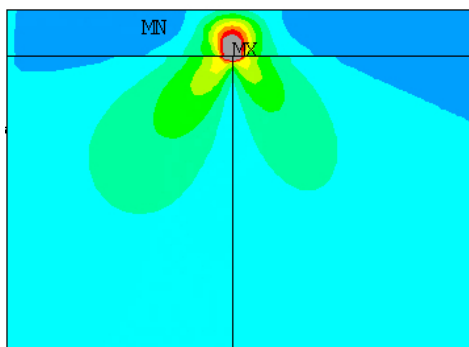
31



а

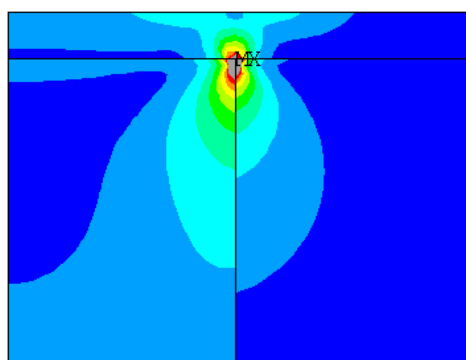
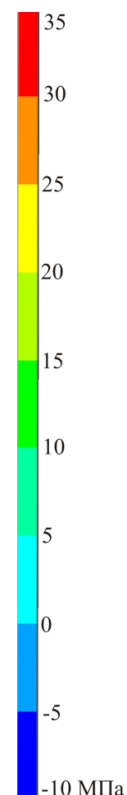


б

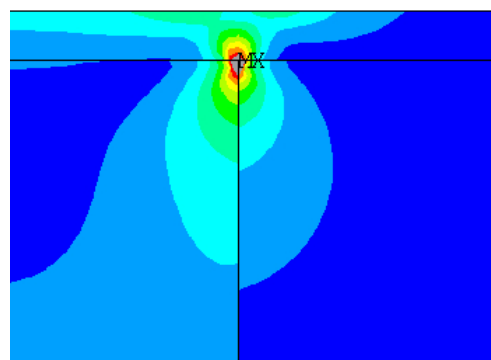


в

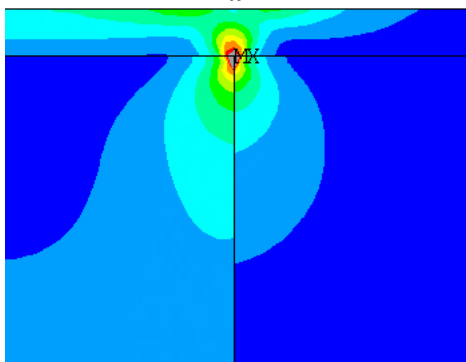
Рисунок 2.7 - Поля дотичних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



а

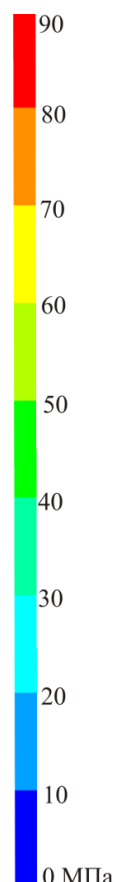


б



в

Рисунок 2.8 - Поля еквівалентних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

32

Для зручності кількісної оцінки рівня та характеру розподілу напружень в найбільш завантажених перерізах моделі на рис. 2.9 ... 2.20 наведені епюри.

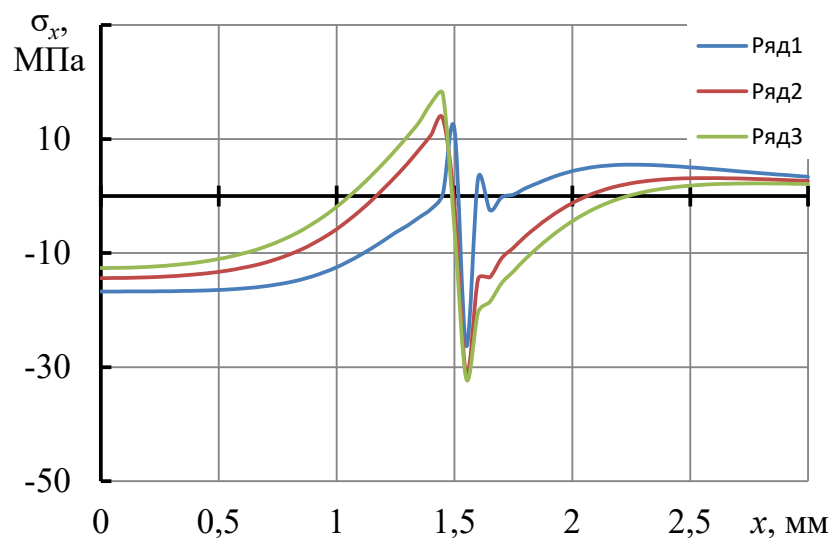


Рисунок 2.9 – Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

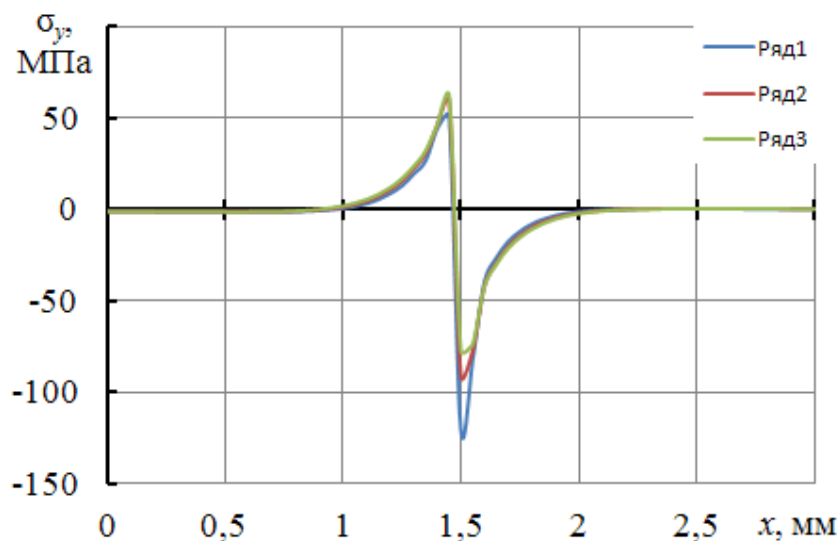


Рисунок 2.10 – Епюри осьових напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

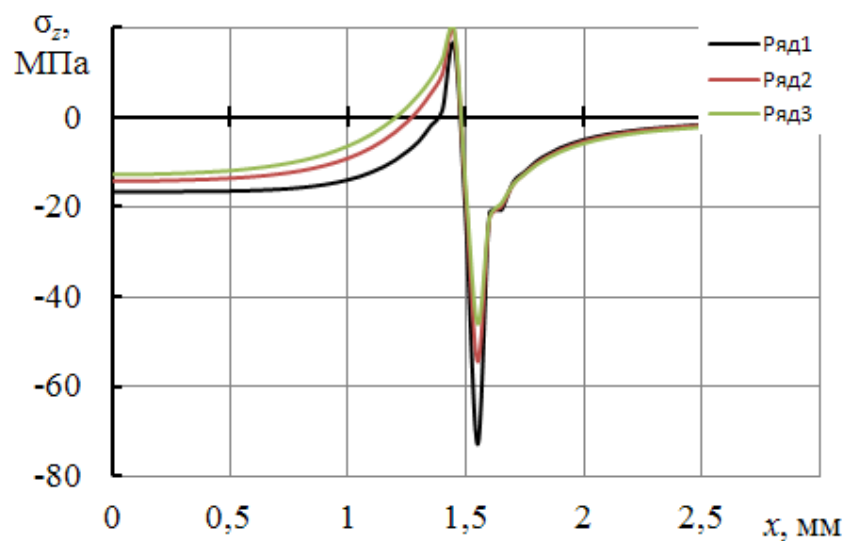


Рисунок 2.11 – Епюри окружних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

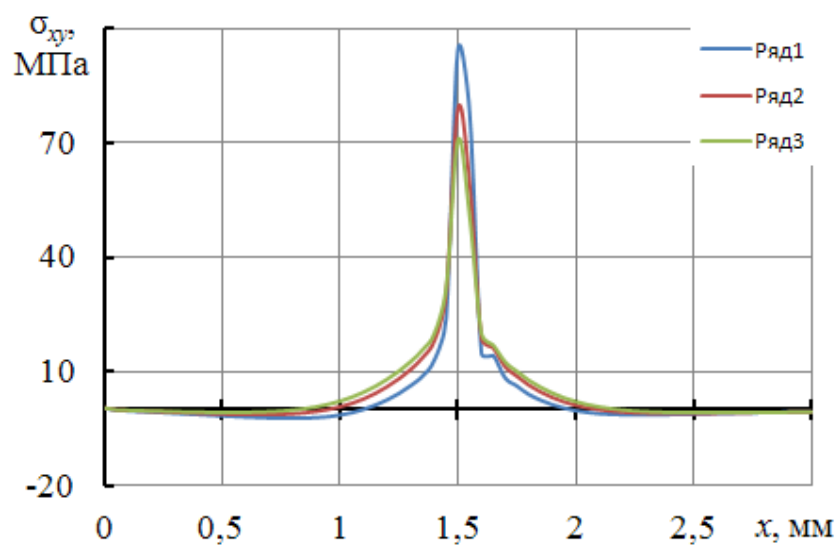


Рисунок 2.12 – Епюри дотичних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

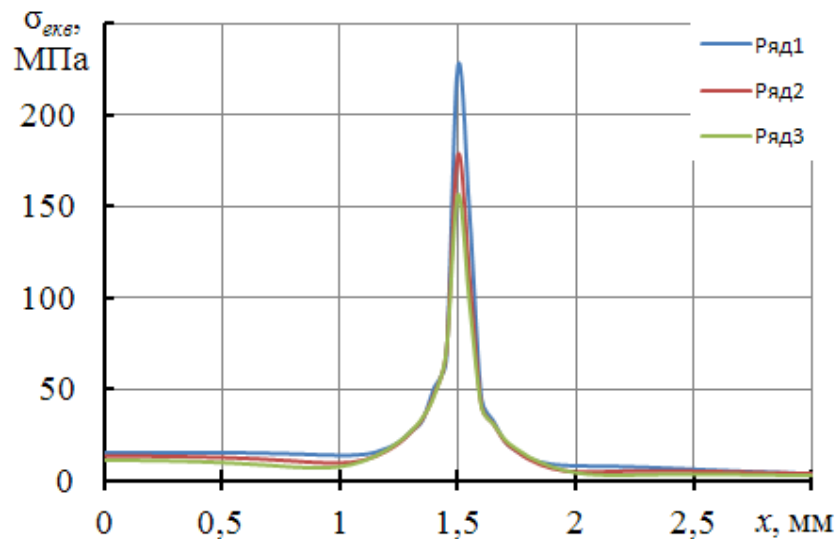


Рисунок 2.13 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Аналіз епюр (рис. 2.9...2.13) показує, що характер розподілу напружень по межі розділу напилений шар - підкладка (переріз 1-1) при зміні жорсткості матеріалу напиляного шару в досить широких межах (в 3 рази) змінюється мало.

Найбільшою мірою зміна помітна для радіальних (рис. 3.6) напружень. Із збільшенням жорсткості в 3 рази рівень максимальних радіальних напружень на ділянці штока (розтягу) збільшується до 1,5 разів, наближаючись до рівня прикладеного до штоку навантаження 20МПа. Точки максимуму при цьому декілька віддаляються від точки сполучення втулки і штока. На ділянці втулки радіальні напруження (стиску) збільшуються в меншому ступені, досягаючи 30МПа .

У міру віддалення від точки максимуму напруження зменшуються до нуля, тим швидше, чим менше жорсткість матеріалу напиляного шару. При подальшому видаленні вони змінюють знак і знову збільшуються.

Таким чином, найбільш сприятливі умови для утворення тріщини (руйнування) в напиленому шарі створюються в безпосередній близькості від точки сполучення шток-втулка. При цьому ймовірність руйнування

напиляного шару збільшується зі збільшенням жорсткості напиляного матеріалу.

Аналогічно змінюються і окружні напруження (рис. 2.11), але рівень максимумів змінюється меншою мірою (не більш 10%), залишаєсь на рівні близько 20 МПа. Положення їх відносно точки сполучення шток - втулка залишається незмінним для всіх варіантів жорсткостей напиляного матеріалу.

Епюри осьових (рис. 2.10) , дотичних (рис. 2.12) та еквівалентних (рис. 2.13) напружень при зміні жорсткості напиляного шару практично не змінюються , змінюється лише рівень максимуму - в найменшій мірі осьових (в межах 10%), в дещо більшому ступені дотичних (до 30%) та еквівалентних (до 50%). При цьому рівень максимальних напружень значно перевищує напруження в штоку 20 МПа: осьових в 2,5 рази, дотичних від 3,5 до 4,5 разів, еквівалентних від 7 до 11 разів. Зі збільшенням жорсткості напиляного шару максимумами дотичних і еквівалентних напружень зменшуються.

У напрямку товщини напиляного шару (по перерізу 2-2) все напруження швидко зменшуються в міру віддалення від межі розділу основного металу і напиляного шару (рис. 2.14 ... 2.18).

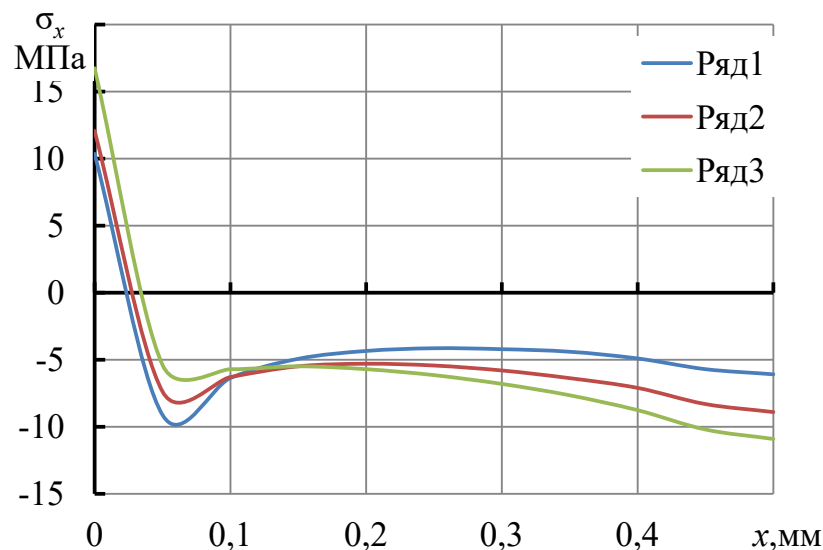


Рисунок 2.14– Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

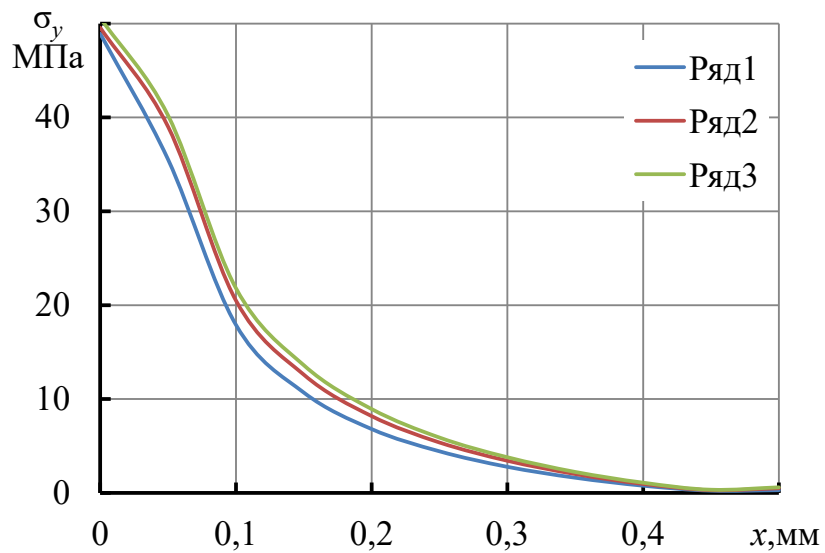


Рисунок 2.15 – Епюри осьових напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

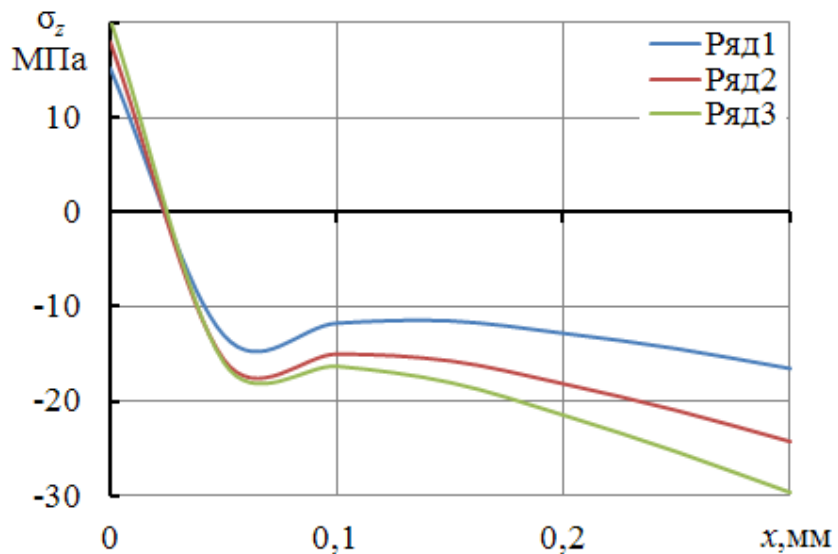


Рисунок 2.16 – Епюри окружних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Радіальні та окружні напруження розтягу (рис. 2.14 і 2.16) зменшуючись, вже на відстані менше 0,05 мм від поверхні розділу досягають нуля і міняють знак на зворотний (стиск).

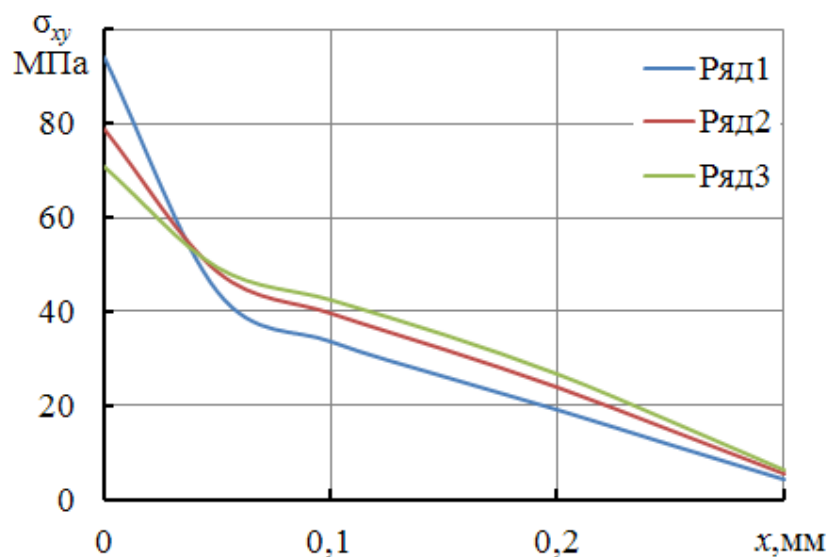


Рисунок 2.17 – Епюри дотичних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

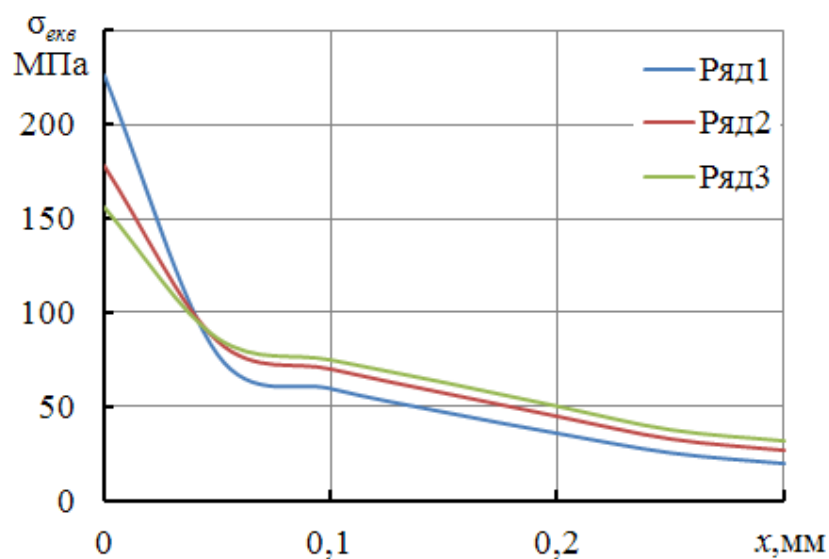


Рисунок 2.18 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Як показав аналіз полів напружень великі напруження розтягу виникають також на поверхні напиляного шару в радіальному напрямку. Вони зосереджені за межами діаметра штока (рис. 2.19), збільшуючись від 0 до 25 ... 40 МПа на невеликій відстані (0,2 мм) від точки його сполучення з втулкою. При цьому рівень цих напружень зростає із збільшенням жорсткості напиляного шару.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

38

Відповідно розподілені і еквівалентні напруження на зовнішній поверхні напиляного шару (рис. 2.20). Їх максимуми розташовуються по обидві сторони від точки сполучення шток-втулка, збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару і становлять від 20 до 50 МПа.

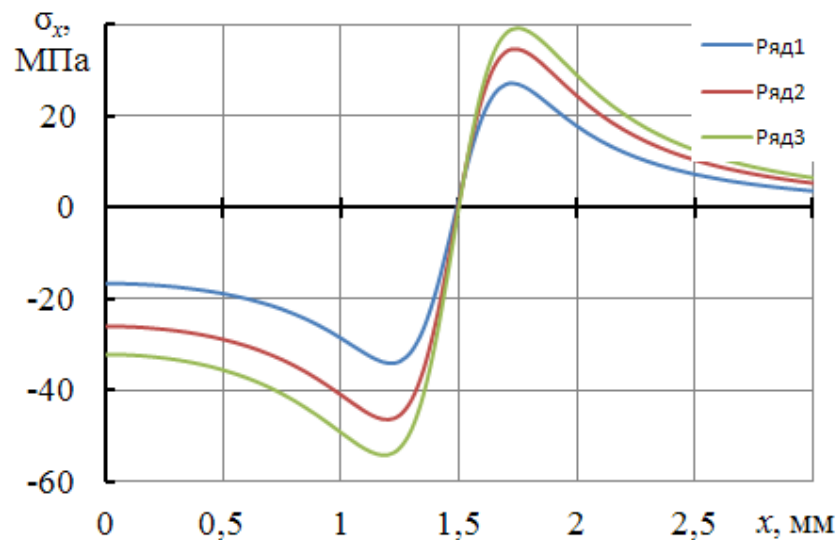


Рисунок 2.19 – Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 3-3. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

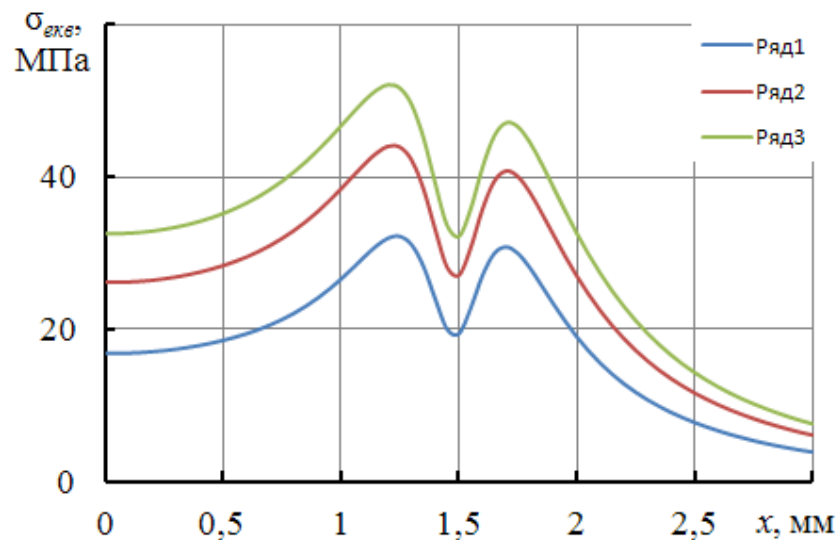


Рисунок 2.20 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 3-3. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Таким чином, найбільш завантажена зона, а отже, і зона найбільш ймовірного зародження руйнування напиляного шару розташована поблизу точки сполучення шток-втулка у поверхні розділу напиляного шару і підкладки. Тут найбільші напруження відриву збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару від 50 до 60 МПа, тобто в 2,5 ... 3 рази перевищують навантаження на штоку (20МПа).

У цій же зоні максимальні дотичні та еквівалентні напруження зменшуються зі збільшенням жорсткості з 90 до 70МПа і з 230 до 160МПа відповідно, значно перевищуючи навантаження на штоку .

Тобто, при випробуванні таких зразків з тонким напиленим шаром руйнування відривом можливо тільки при дуже малій силі зчеплення (міцності на відрив), або великій міцності напиляного шару на зріз.

При цьому зі збільшенням жорсткості матеріалу напиляного шару збільшується ймовірність руйнування відривом штока від напиляного шару і зменшується ймовірність руйнування виризом штока разом з напиленим шаром.

2.5. Вплив товщини покриття на напружено-деформований стан

На рисунках 2.21...2.25 наведені результати моделювання полів напружень (радіальних, осьових, окружних, дотичних та еквівалентних) у вузлах з напиленим шаром товщинами 0,3, 0,4, 0,5 та 1 мм при однакової середньої жорсткості матеріалу покриття ($E=2 \cdot 10^5$ МПа).

Аналіз полів показує, що в цілому характер полів всіх напружень при зміні товщини покриття в досить широких межах (від 0,3 до 1мм) не змінюється. Найбільш завантаженою залишається зона поблизу точки сполучення шток-втулка та покриття. При цьому помітно розвантажується верхня (зовнішня) поверхня покриття.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

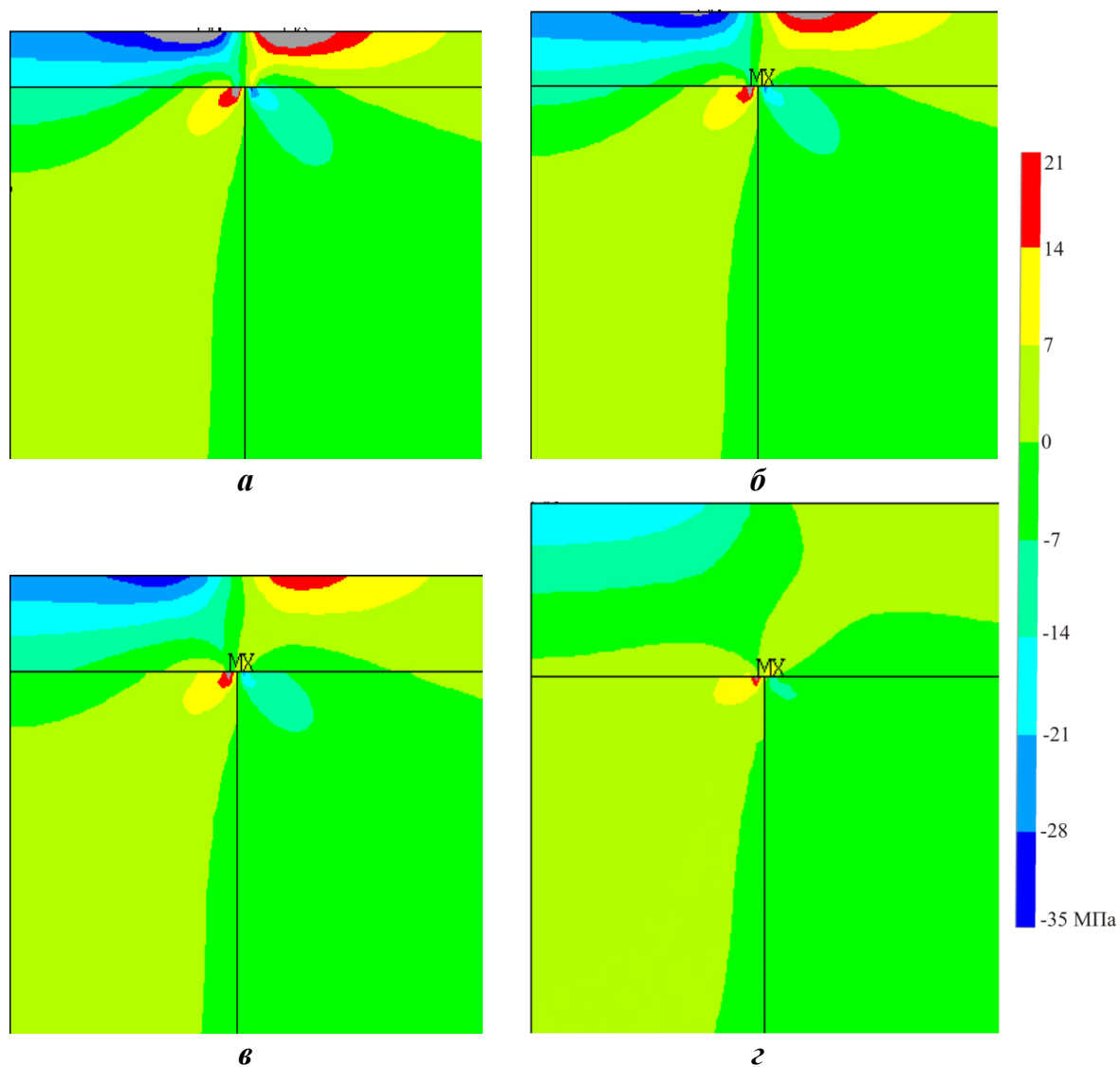


Рисунок 2.21 - Поля радіальних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

41

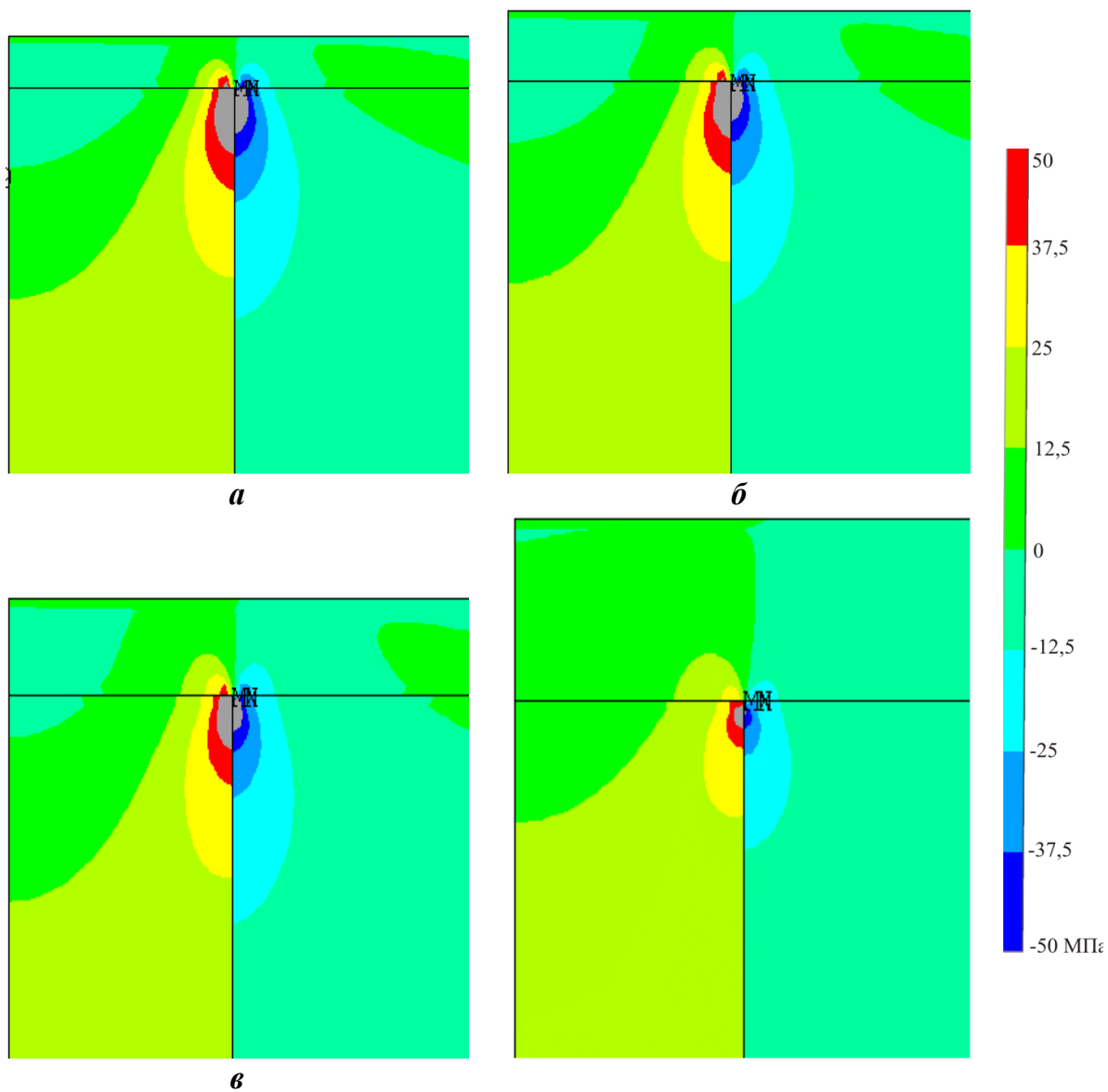


Рисунок 2.22 - Поля осевих напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

42

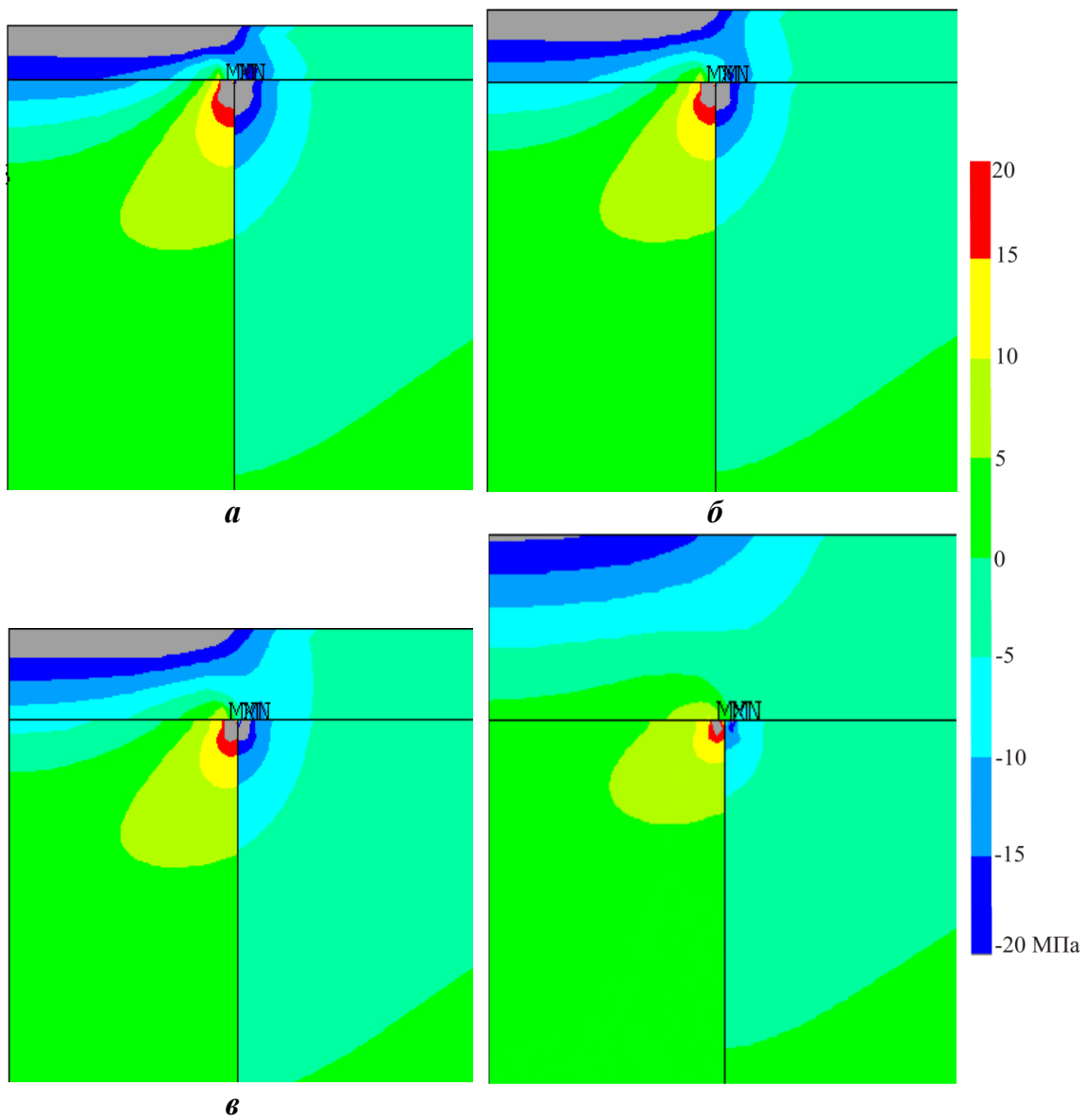


Рисунок 2.23 - Поля окружних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

43

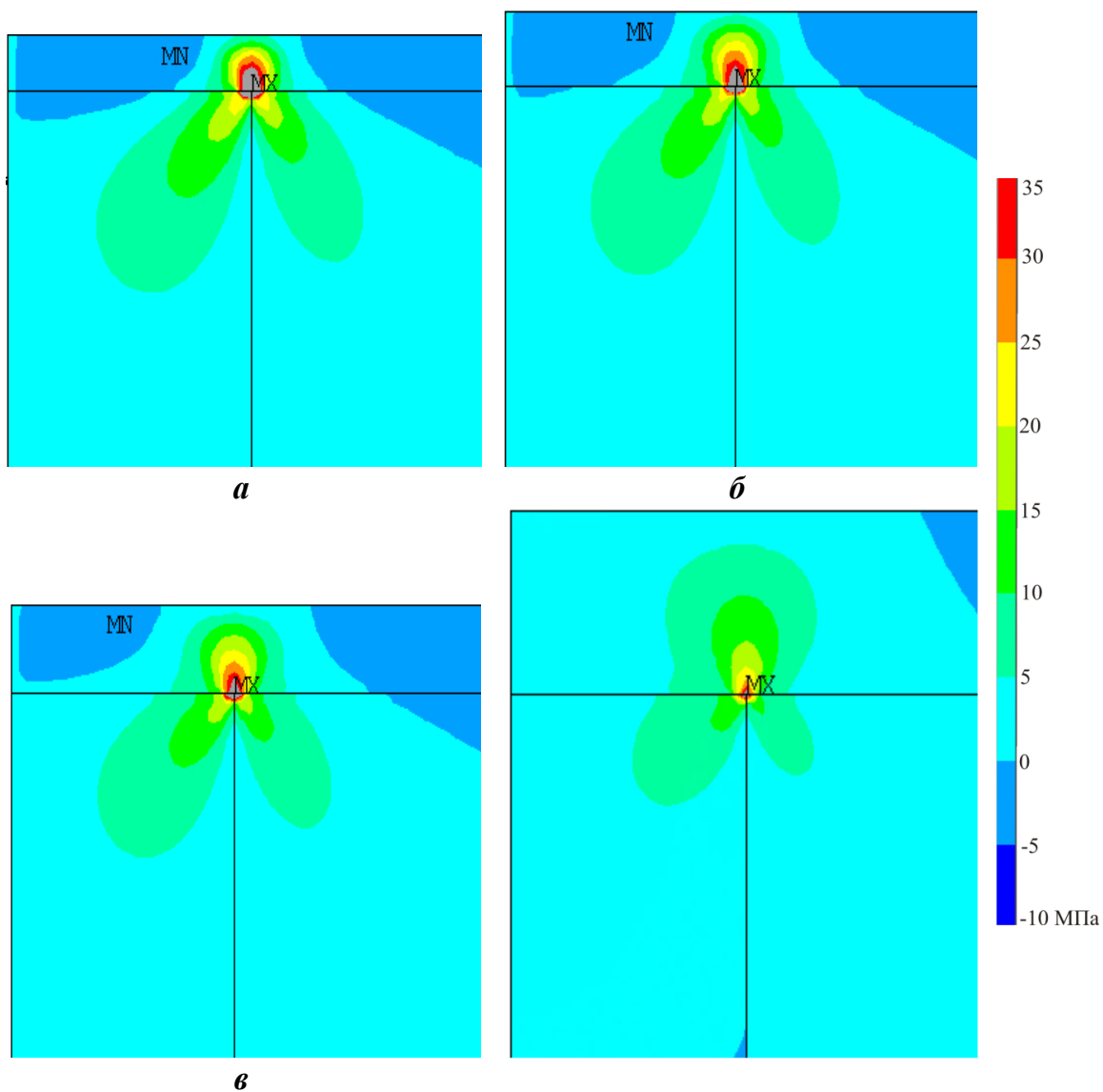


Рисунок 2.24 - Поля дотичних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

44

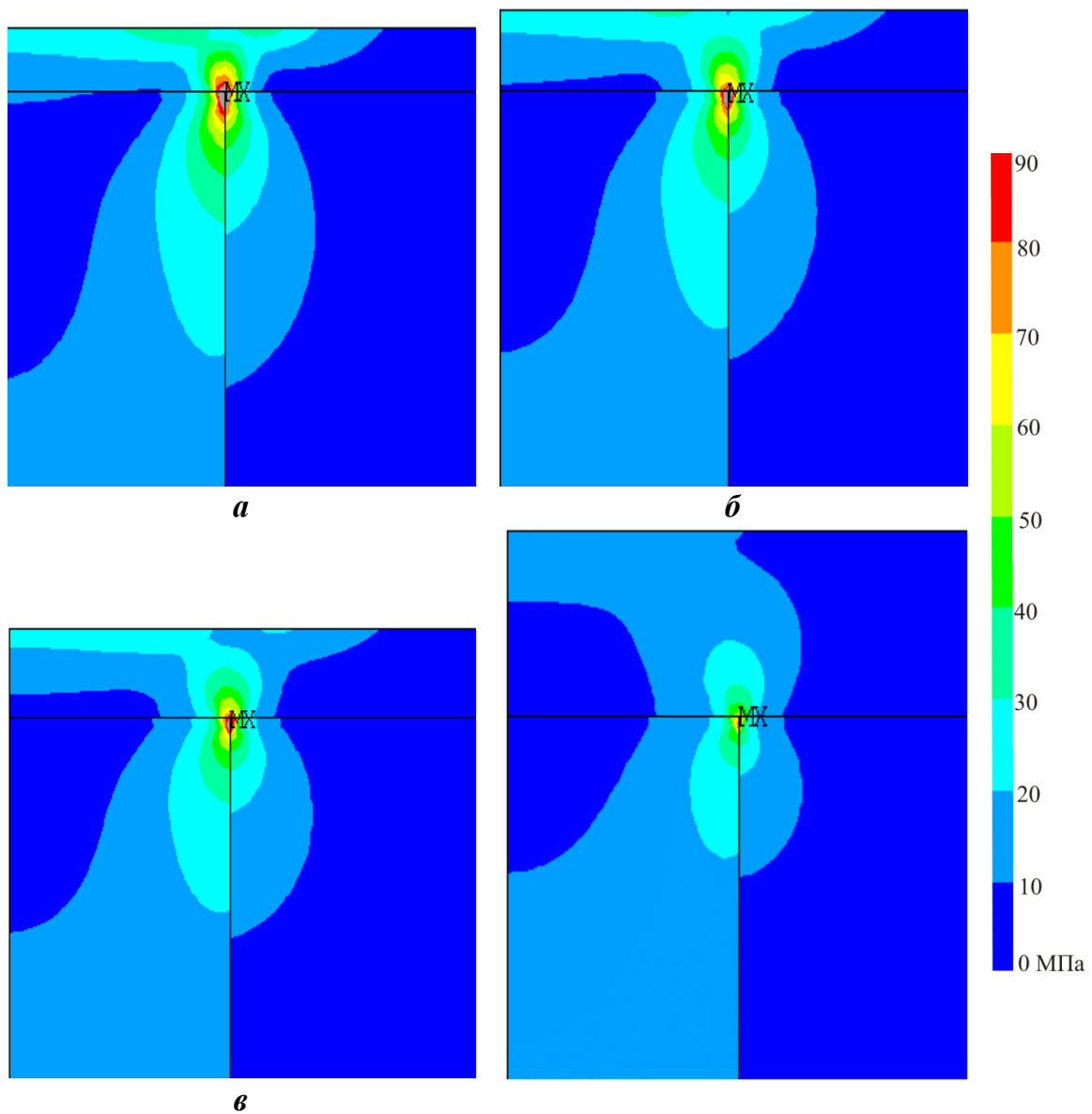


Рисунок 2.25 - Поля еквівалентних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (а), ПС0,4 (б), ПС0,5 (в) та ПС1,0 (г)

Для зручності кількісної оцінки рівня напружень на рисунках 2.26... 2.37 наведені епюри розподілу напружень в напиленому шарі по межі розділу (переріз 1-1), в зоні сполучення шток-втулка (переріз 2-2) і вздовж верхньої (зовнішньої) поверхні (переріз 3-3) напиляного шару.

Аналіз епюр показує, що характер розподілу всіх напружень при зміні товщини напиляного шару від 0,3 до 1 мм зберігається при всіх досліджених жорсткостях матеріалу цього шару (E від $1 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$ МПа).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

45

При цьому рівень максимальних радіальних та окружних напружень розтягу (рис. 2.26 та 2.28) при збільшенні товщини майже не змінюється, залишаючись на рівні 14 МПа радіальних та 16...20 МПа окружних. За межами точки максимуму епюра із збільшенням товщини стає більш пологою, в результаті напруження розтягу ростуть, а стиску зменшуються, переходячи в напруження розтягу. Таким чином, ступінь концентрації радіальних та окружних напружень вздовж границі розділу з ростом товщини зменшується.

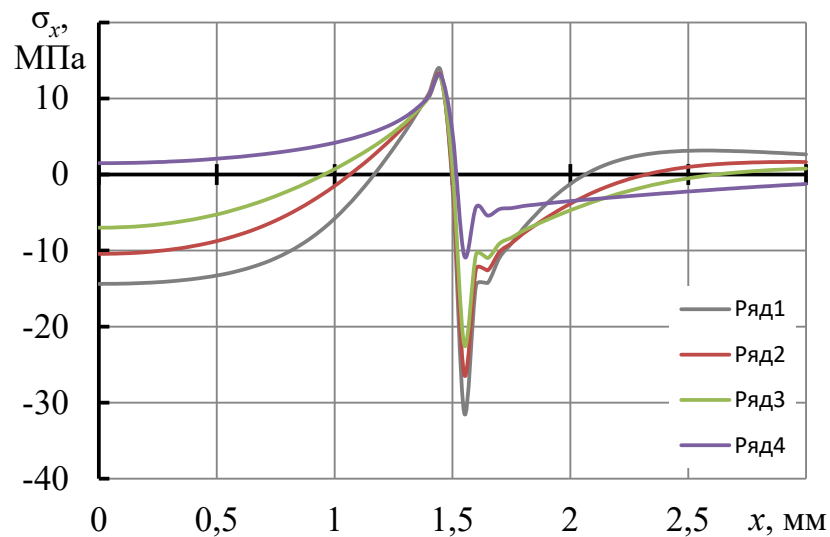


Рисунок 2.26 - Епюри радіальних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Рівень максимальних осьових напружень розтягу (рис. 2.27) із збільшенням товщини зменшується з 59 МПа (0,3 мм) до 37 МПа (1,0мм). За межами точки максимальних напружень вони практично не змінюються. Тобто, ступінь концентрації осьових напружень розтягу вздовж границі розділу з ростом товщини також зменшується.

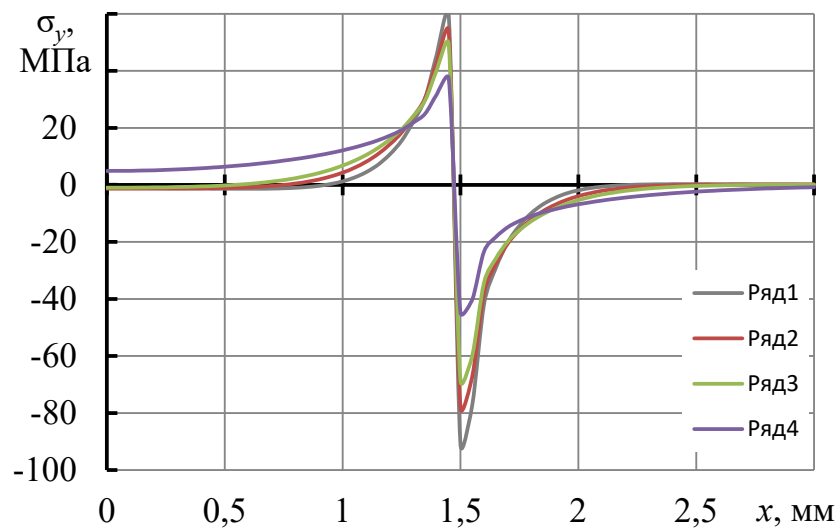


Рисунок 2.27 - Епюри осьових напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

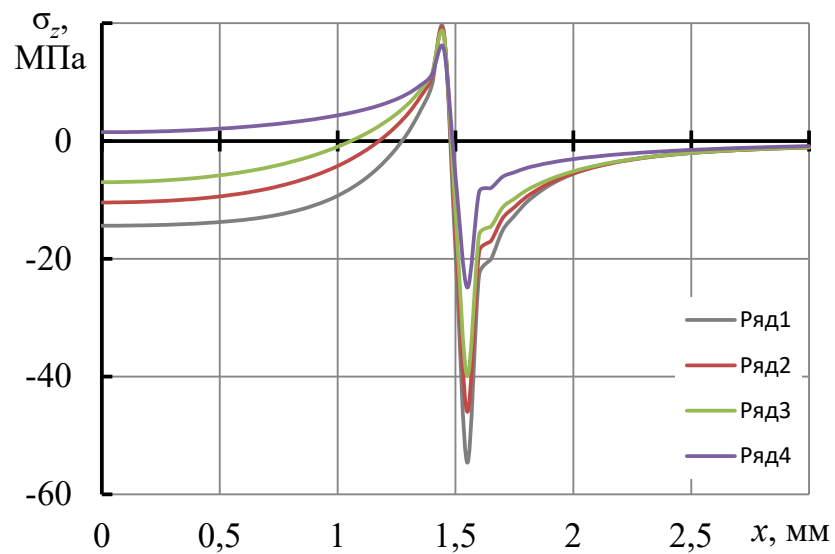


Рисунок 2.28 - Епюри окружних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

47

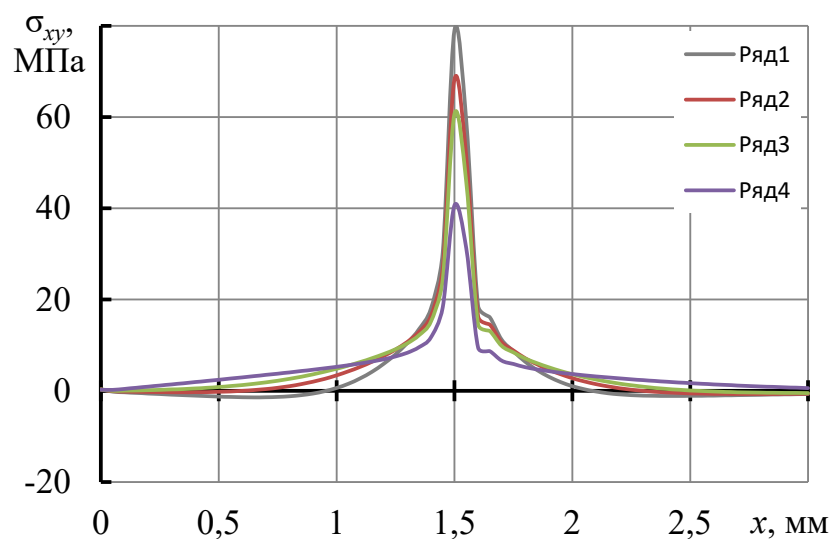


Рисунок 2.29 - Епюри дотичних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

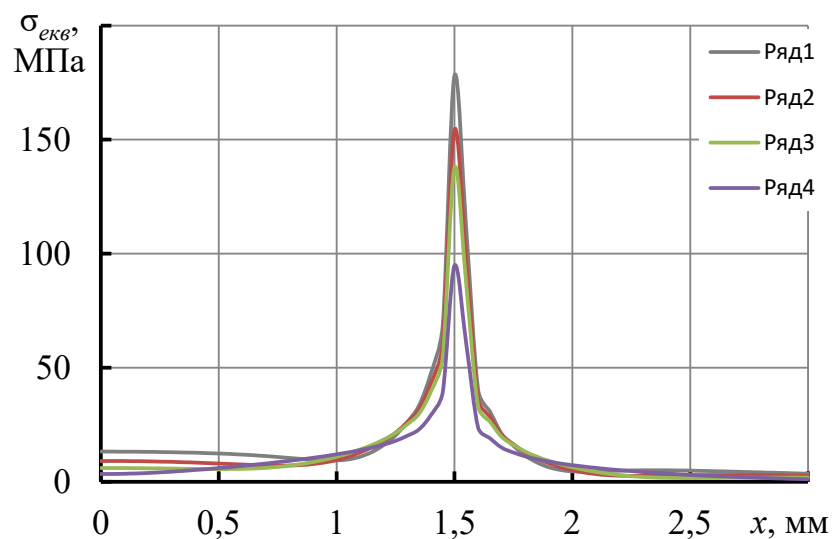


Рисунок 2.30 - Епюри еквівалентних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Рівень максимальних дотичних напружень (рис. 2.29) із збільшенням товщини зменшується з 79 МПа (0,3 мм) до 40 МПа (1,0 мм), тобто в 2 рази. За межами точки концентрації вони змінюються в меншій мірі і в бік

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

48

збільшення. Тобто, ступінь концентрації і цих напружень вздовж границі розділу із збільшенням товщини також зменшується.

Відповідно до змін складових змінюються і еквівалентні напруження (рис. 2.30). Їх максимальні значення 178 МПа при товщині напиленого шару 0,3 мм зменшуються до 95 МПа при товщині 1мм. За межами точки концентрації вони міняються мало. Тобто, коефіцієнт концентрації еквівалентних напружень на межі розділу з збільшенням товщини шару зменшується практично в 2 рази.

У напрямку товщини радіальні напруження розтягу в міру віддалення від межі розділу різко зменшуються, переходять в стискаючи, продовжують наростати на вузькій ділянці шириною близько 0,5 мм, а потім практично стабілізуються і змінюються в межах близько 5МПа (рис. 2. 31).

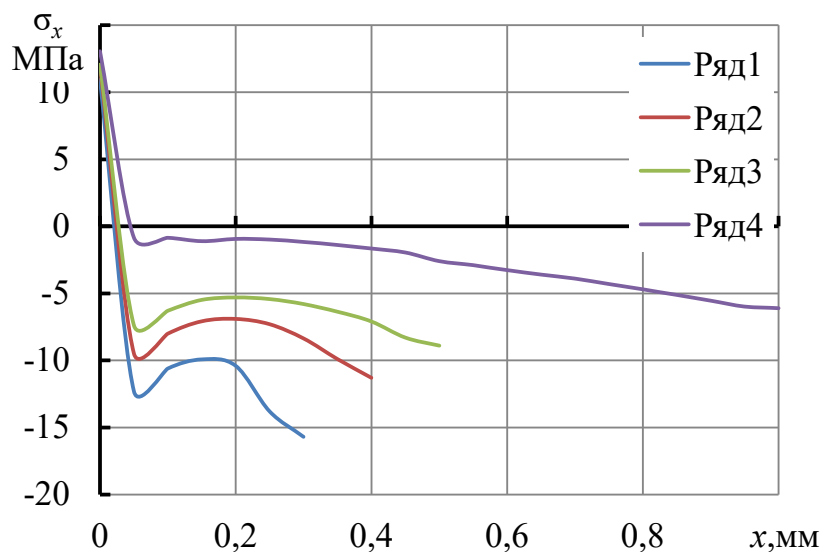


Рисунок 2.31 - Епюри радіальних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Осьові напруження в міру віддалення від межі розділу швидко зменшуються до нуля, тим швидше, чим менше товщина напиляного шару (рис. 2.32).

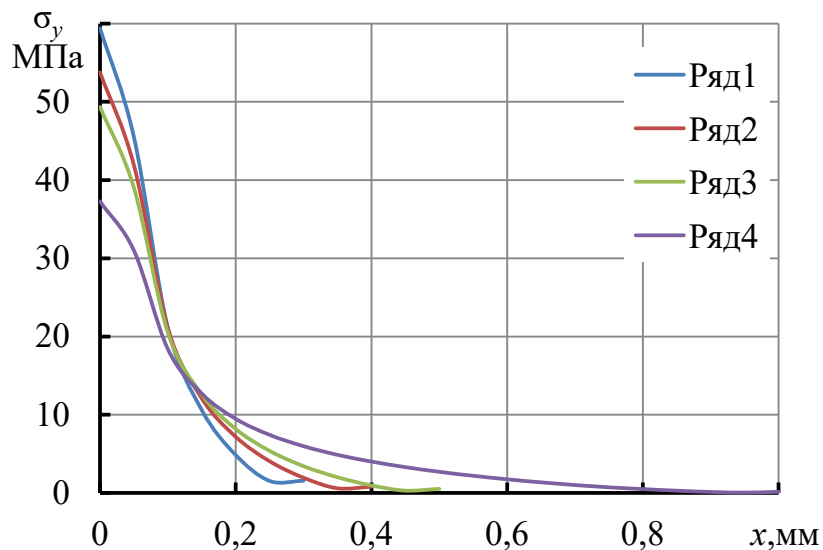


Рисунок 2.32 - Епюри осьових напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

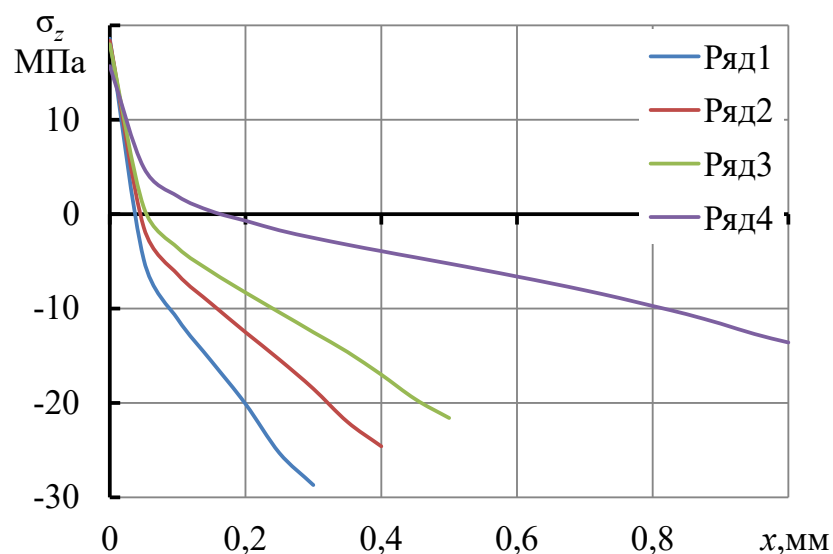


Рисунок 2.33 - Епюри окружних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Окружні напруження розтягу в міру віддалення від межі розділу різко зменшуються, переходять в стискаючи і продовжують наростати до верхньої поверхні напиляного шару (рис. 3. 30).

Дотичні та еквівалентні напруження в міру віддалення від межі розділу також різко зменшуються і продовжують спадати до верхньої поверхні напиляного шару (рис. 2. 34 и 2.35).

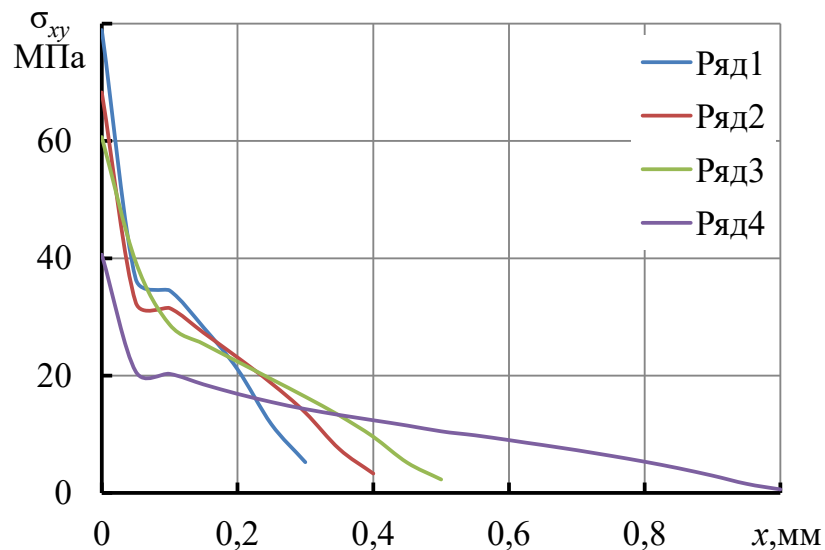


Рисунок 2.34 - Епюри дотичних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

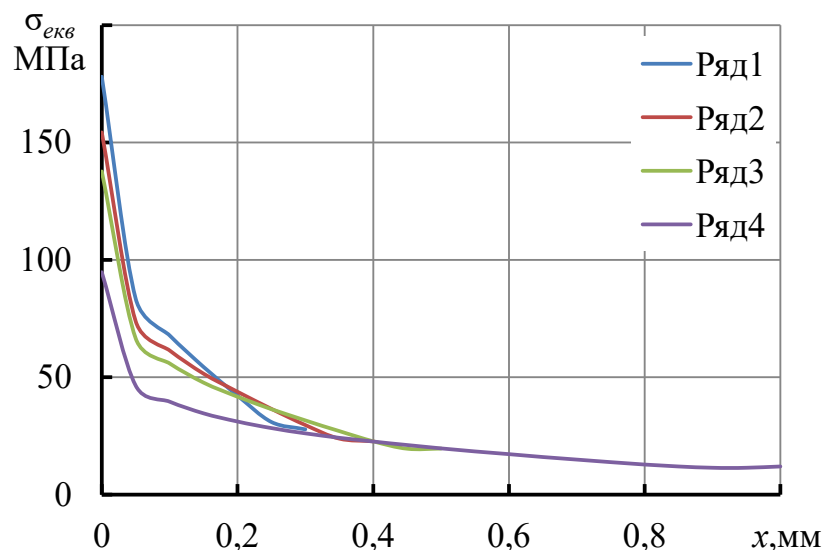


Рисунок 2.35 - Епюри еквівалентних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

На зовнішній поверхні напиляного шару в межах діаметра штока радіальні напруження - стискаючи (рис. 2.36). Вони поступово нарастають у міру віддалення від осі і різко знижуються до нуля в точці сполучення штока і втулки. За межами діаметра штока ці напруження – розтягу, спочатку зростають у міру віддалення від точки сполучення, а потім знову

зменшуються, поступово наближаючись до нуля. Ступінь зростання тим більше, чим менше товщина напиляного шару.

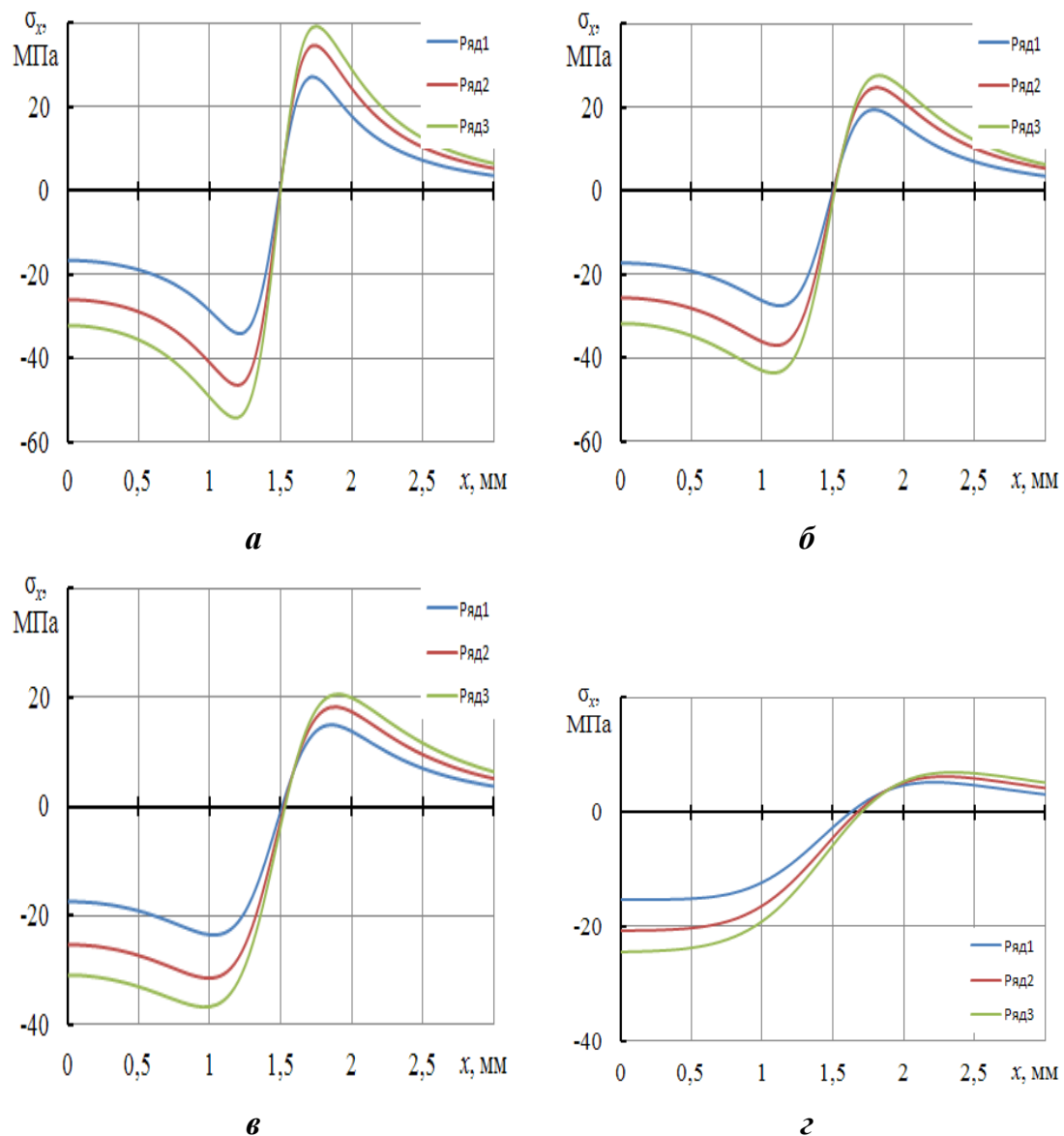


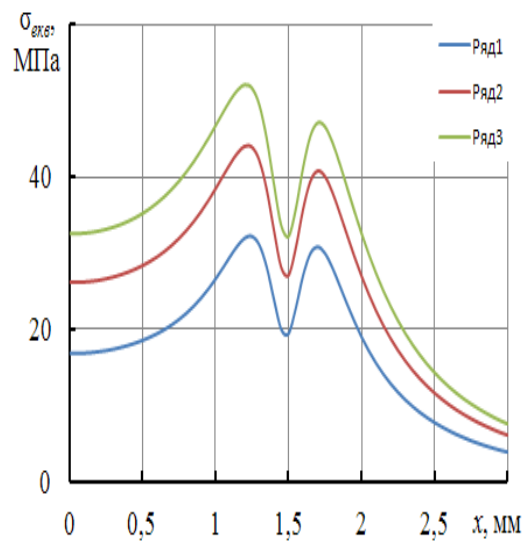
Рисунок 2.36 - Епюри радіальних напружень в перерізі 3-3 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

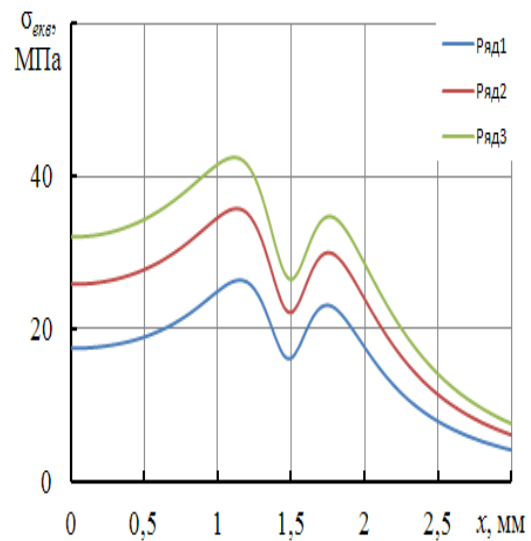
МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

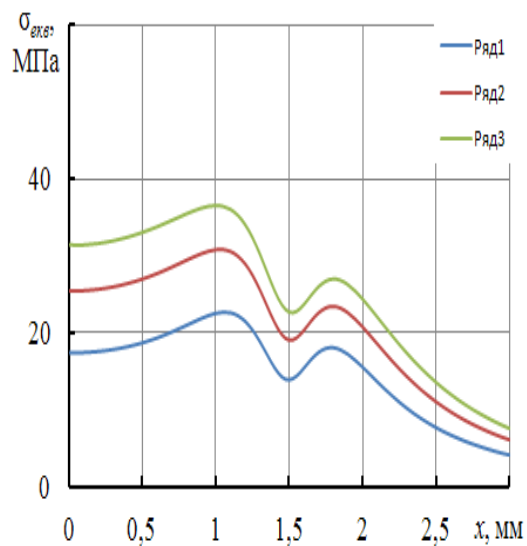
52



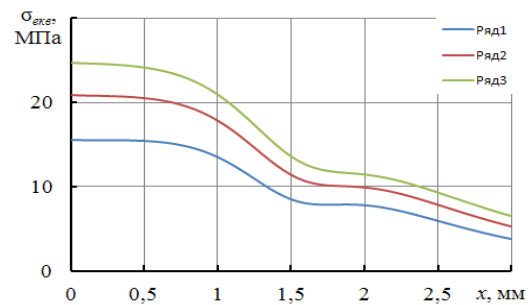
a



б



в



г

Рисунок 2.37 - Епюри еквівалентних напружень в перерізі 3-3 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Висновки

1. В якості методу дослідження обрано один з найбільш ефективних чисельних методів вирішення інженерних задач на ЕОМ - метод скінчених елементів.
2. Для реалізації цього методу обраний сучасний універсальний програмний комплекс ANSYS.

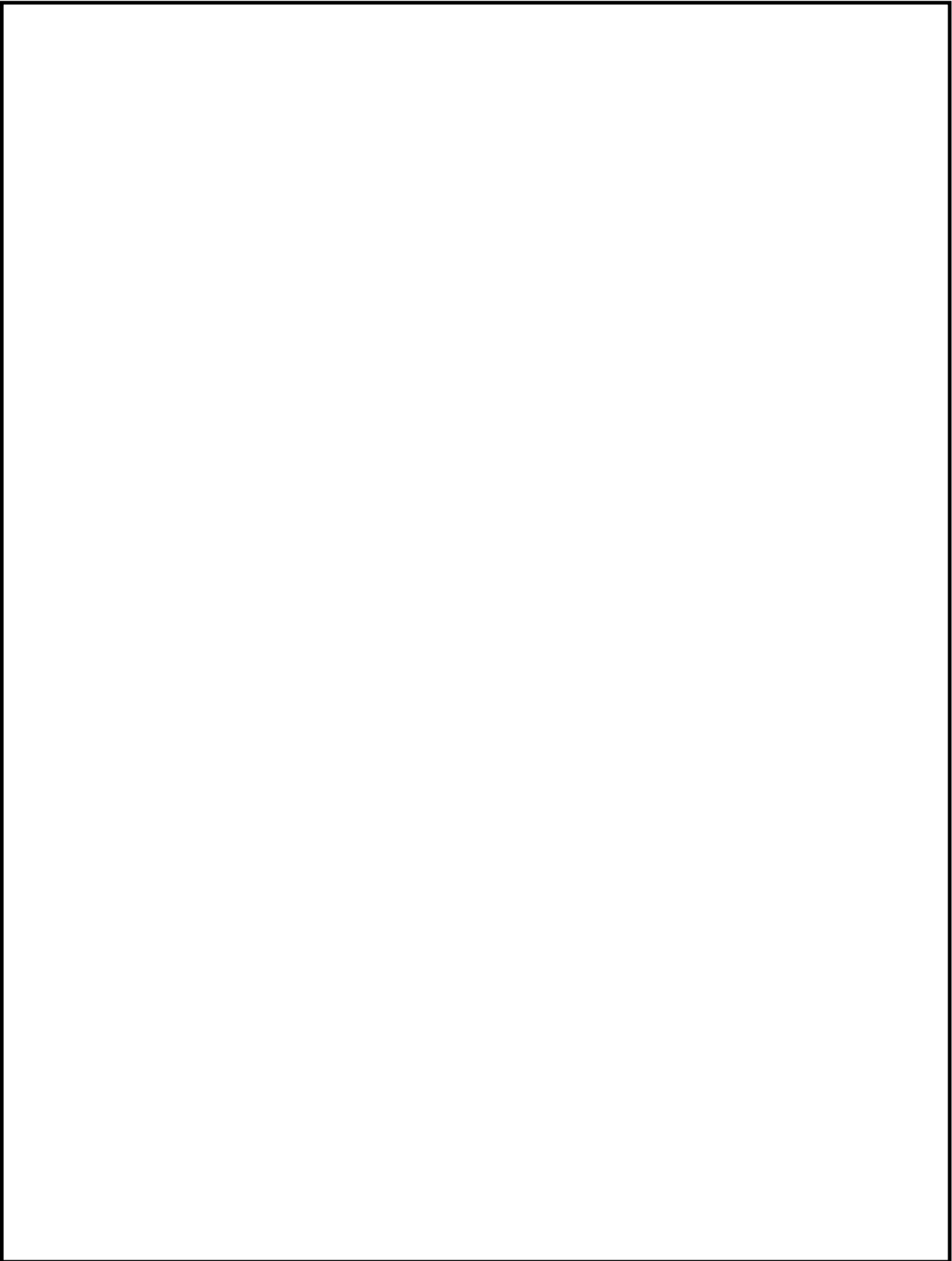
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 05. 05. 02. ПЗ.

Арк.

53

3. Побудовано фізичні і СЕ моделі зразків для випробувань міцності напиляного шару при силовому навантаженні. Обрані варіанти товщин і модулів пружності матеріалу напиляного шару.
4. Зі збільшенням жорсткості матеріалу напиляного шару збільшується ймовірність руйнування відривом штока від напиляного шару і зменшується ймовірність руйнування виривом штока разом з напиленим шаром.
5. При випробування міцності напиляного шару найбільш завантажена зона розташована поблизу точки сполучення шток-втулка у поверхні розділу напиляного шару і підкладки.
6. Напруження відриву збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару від 52 до 62МПа, тобто в 2,5...3 рази перевищують навантаження на штоку (20МПа).
7. Максимальні дотичні та еквівалентні напруження зменшуються зі збільшенням жорсткості покриття з 91 до 72МПа і з 232 до 162МПа відповідно, значно перевищуючи навантаження на штоку.
8. Зразки з тонким напиленим шаром руйнуються відривом тільки при малій силі зчеплення (міцності на відрив) та великій міцності напиляного шару на зріз.



					МР. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження структури покривів				Літ.	Арк.	Акрушів
Студент		Шевченко Г.П..									
Керівник		Лебедев В.О.								55	10
Конс.		Лебедев В.О.							ХННІ НУК		
Н. Контр.		Лебедев В.О.									
Зав. каф.		Матвієнко М.В.									

3.1 Розрахунок необхідної потужності плазмотрона

Ефективність нагріву газу в плазмотроні залежить від його взаємодії з дугою, його параметрів та геометричних розмірів.

При цьому повинні виконуватися дві вимоги. Велика частина газу, що нагрівається повинна взаємодіяти з дуговим розрядом. Ресурс роботи плазмотрона повинен бути достатньо великий.

При нагріві газу дугою в одному випадку він весь нагрівається проходячи через дугу.

Для отримання якісного покриття, необхідно, щоб частинки порошку в плазмовому струмені встигали повністю розплавитись. Запропонована спрощена модель поведінки конденсуючої частинки в плазмовому струмені для визначення умов оптимального проплавлення частинок порошку і максимального зростання товщини покриття, за допомогою якої встановлено зв'язок між її газодинамічними параметрами і теплофізичними властивостями матеріалів, що напильються. Що дає можливість визначити необхідну потужність плазмотрона.

Теплову потужність плазмотрона, яка необхідна для розплавлення частинок матеріалу в струмені аргонової плазми, можна визначити за допомогою виразу [13]:

$$P_e = 2,99 \frac{V_r^{1.5} \cdot d_r \cdot D^{0.5}}{\eta \cdot R_0^{1.25} \cdot [l_k + 6(R_0 - R)]^{0.6}} \quad (3.1)$$

де V_r – витрата плазмоутворюючого газу, м³/с;

d_r – діаметр частинки порошку, м;

D – параметр важкості плавлення, кДж/(кг·м³);

$$D = C_e^2 \cdot T_{пл}^2 \cdot \rho_r \quad (3.2)$$

де C_e – еквівалентна теплоємність частинки, кДж/кг·град;

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_e = \frac{i_r}{T_{пл} - T_0} = \int_{T_0}^{T_{пл}} C_r dT - \frac{i}{T_{пл}} - T_0 \quad (3.3)$$

де $T_{пл}$ – температура плавлення частинок, К;

ρ_r – густина частинки, кг/м³;

i_r – ентальпія розплавленого матеріалу частинки, кДж/кг;

C_r – істинна теплоємність частинки, кДж/кг·град;

i – теплота плавлення, кДж/кг;

T_0 – початкова температура, К;

η – ККД плазмотрона;

R_0 – радіус сопла, м;

l_k – відстань від точки введення порошку до зрізу сопла, м;

R – поточний радіус траєкторії частинок, $R = 0,9 R_0$;

$l_k + 6 (R_0 - R)$ – шлях руху частинки в ізотермічній ділянці струменя.

Параметр важкості плавлення D , суттєво впливає на необхідну теплову потужність плазмотрону, для нагріву частинок порошку до стану їх проплавлення.

При малих витратах газу, коли формується ламінарна течія, ККД плазмотрона низький (0,1....0,3). Це пов'язано з тим, що максимум ККД обумовлений перерозподілом теплових потоків між стінками дугового каналу і електродами [13]

Для підрахунку мінімальної потужності розглядатимемо ламінарний потік тому ККД плазмотрону візьмемо рівним 0,1 та 0,2. Розрахунок робимо для найбільш оптимальних витрат плазмоутворюючого газу: 20 та 25 л/хв.

Розрахунок проводиться для частинок порошкової суміші чавун + 20 % Си, розміром 60 мкм.

Для розрахунків значення D для порошку чавун + 20 % Си вибираємо з довідкової літератури, $D = 2,745 \cdot 10^{10}$ кДж/(кг·м³) відповідно, решту величин для

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунку беремо з паспорта плазмотрона ПН-14М1: $R_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_k = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м.

1. ККД плазмотрону дорівнює 0,1.

При напilenні порошкової суміші чавун + 20 % Си потужність визначиться:

при $V_r = 20$ л/хв $= 3,33 \cdot 10^{-4}$ м³/с:

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} (2,745 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [1,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 28,1 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25$ л/хв $= 4,17 \cdot 10^{-4}$ м³/с:

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} (2,745 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [1,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 39,2 \text{ кВт}$$

2. ККД плазмотрону дорівнює 0,2.

При напilenні порошкової суміші чавун + 20 % Си потужність становить:

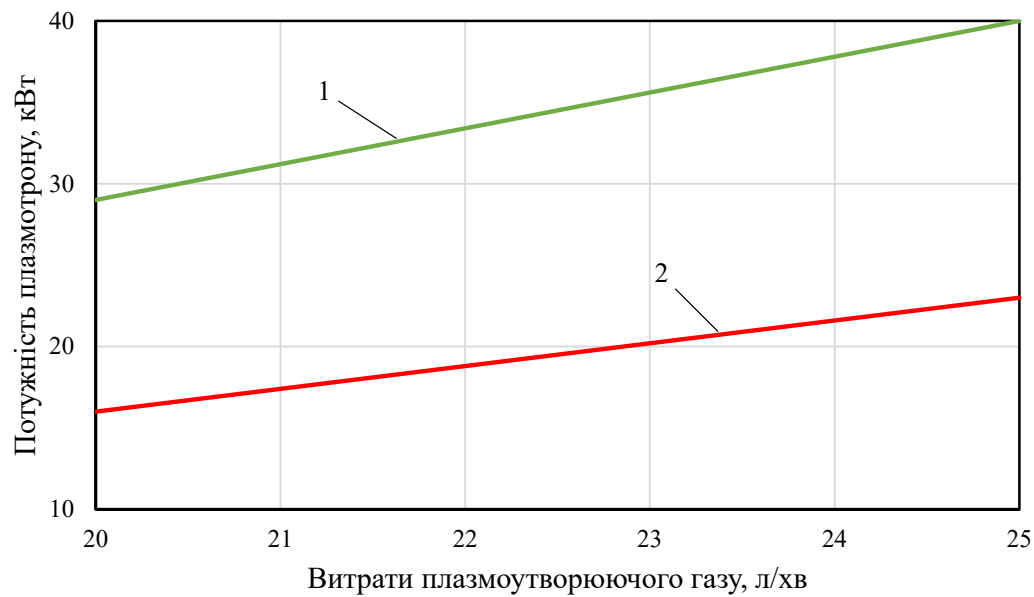
при $V_r = 20$ л/хв $= 3,33 \cdot 10^{-4}$ м³/с:

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} (2,745 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [1,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 14,2 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25$ л/хв $= 4,17 \cdot 10^{-4}$ м³/с:

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} (2,745 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [1,1 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 20,1 \text{ кВт}$$

За результатами розрахунку будемо графік залежності потужності плазмотрону від витрат плазмоутворюючого газу при напilenні часток чавун + 20 % Си (при різних значеннях ККД плазмотрону).



1 – частки чавун + 20 % Cu ($\eta = 0,1$), 2 – частки чавун + 20 % Cu ($\eta = 0,2$);

Рисунок 3.1 Залежність потужності плазмотрону від витрат плазмоутворюючого газу

3.2 Розрахунок продуктивності напилення

Кількість порошку, необхідна для напилення покриття відповідає

витраті матеріалу і виражається формулою:

$$m = \frac{m_n}{\eta} \quad (3.4)$$

де m_n – маса напиленого покриття, кг;

η – ефективність напилення

Ефективність напилення залежить від виду напилюваного матеріалу, умов напилення та від геометричних розмірів деталі. Для напилення композиційного порошку (чавун + 20 % Cu), на проміжний вал з урахуванням

його геометричних розмірів ефективність напилення за рекомендаціями, становить близько 60 %. Масу напиленого покриття можна визначити як добуток його обсягу на щільність.

$$m_n = \rho \cdot V \quad (3.5)$$

де ρ – щільність напиляного покриття; для композиції чавун з 20 % Cu $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$.

Для визначення обсягу напиленого покриття розглянемо геометричні характеристики напиленої поверхні валу. Товщина напилюваного покриття 0,8 мм. Враховуючи, що напилення проводиться, при обертанні валу по циліндричній поверхні, отриманий зріз покриття можна представити як кільце.

Враховуючи, що обсяг напиленого покриття можна представити у вигляді:

$$V = S \cdot l \quad (3.6)$$

де S – площа поперечного перерізу покриттів, м^2 ;

l – протяжність покриття, м; $l = 0,042 \text{ м}$

Маса напилюваного на вал покриття може бути представлена формулою:

$$m = \frac{S \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (3.7)$$

При товщині покриття 0,8 мм і діаметром напилюваної ділянки валу 126 мм $= 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Тоді:

$$m = \frac{1,38 \cdot 10^{-4} \cdot 0,042 \cdot 8000}{0,6} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

Для напилення покриття композицією чавун + 20 % Cu на один валопровід необхідно 75 грам порошку.

3.3 Дослідження структури покриттів

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вивчення впливу термічної обробки на структуру плазових покриттів була проведена термічна обробка покриттів з чавуну + 20 % міді на 18ХНВА. Вона полягала в нагріванні трубчастої печі до температури 900 °С з витримкою дві години, а потім охолодження з піччю до кімнатної температури. Після цього штифти досліджували на електронному мікроскопі марки УЕМВ–100К. Проведено фотографування характерних ділянок структур при напрузі 75 кВ. Крім цього проводилося фотографування цих же штифтів при збільшенні 500× на мікроскопі. На рисунку 3.2 представлена мікроструктура покриттів з чавуну + 20 % міді, що не піддається термообробці. На фото чітко простежується межа між частинками, що представляє собою поздовжні пори.

При напиленні використовувався порошок різних фракцій (20...160 мкм), і це не сприятливо позначилося на структурі, так як більші частки порошку недостатньо прогрілися в струмені і при зіткненні з раніше напиленими частинками утворилися порожнечі (пори). Крім цього на щільність покриттів великий вплив має ступінь очищення порошку від різного роду домішок. Це спостерігається при збільшенні 500× (рис. 3.2).

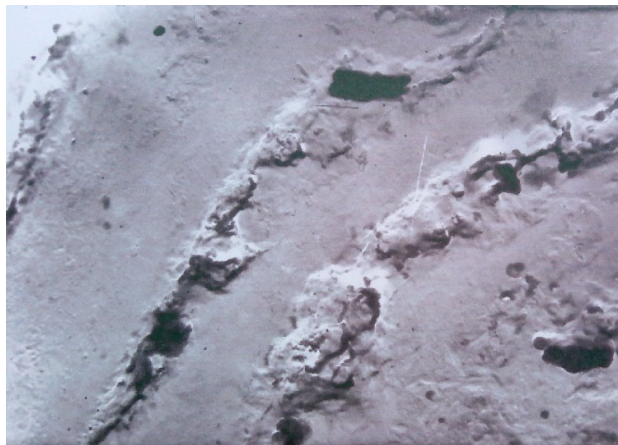


Рисунок 3.2 Мікроструктура плазового покриття з чавуну з 20 % міді (не термообробленого) [$\times 5000$]

Видна характерна луската структура покриттів. Видно на скільки за розмірами і конфігурації одні частинки відрізняються від інших. Частинки мають

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

більш велику форму, мабуть недостатньо проплавились і по цьому незначно деформувалися при зіткненні з підкладкою.

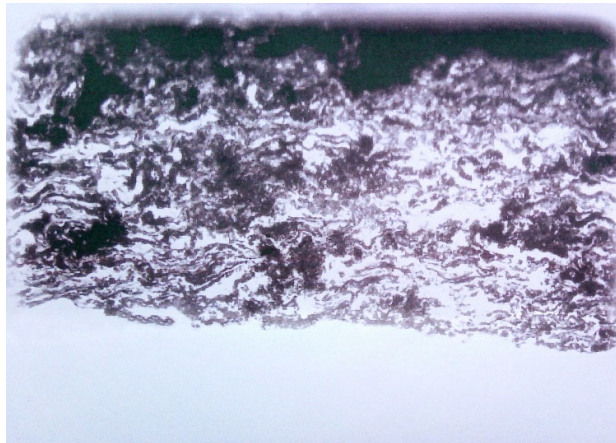


Рисунок 3.3 Мікроструктура не термообробленого плазмового покриття чавун + 20 % міді на 18ХНВА [$\times 500$]

Слід зазначити, що відсутня пориста межа розділу покриття–підкладка. На рисунку 3.3 показана структура покриття з чавуну з 20% міді, що піддавалась термообробці. Структура більш однорідна, ніж такого ж роду покриття, але не термооброблена. Досліджуючи це ж покриття при збільшенні $500\times$ (рис. 3.4) Видно, що більшість кордонів розділу частинка–частинка зникли і покриття стало більш однорідним.

Але спостерігається дуже пориста межа розділу покриття–підкладка, що знижує міцність зчеплення. Ймовірно це пов'язано з дифузією вуглецю до підкладки і по кордонах зерен вглиб підкладки.

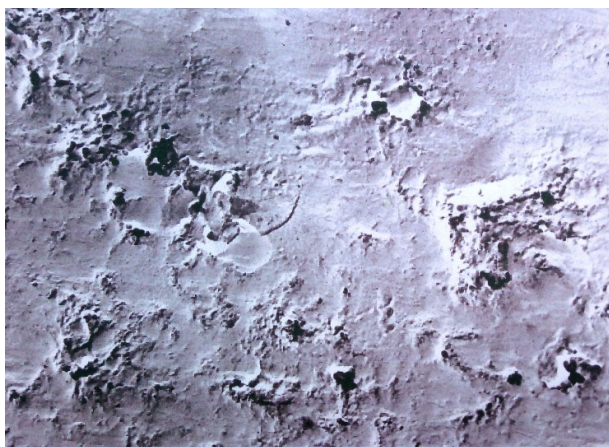


Рисунок 3.4 Мікроструктура термообробленого плазмового покриття чавун + 20 % міді [$\times 5000$]



Рисунок 3.5 Мікроструктура термообробленого плазмового покриття чавун + 20 % міді на 18ХНВА [$\times 500$]

Висновки: на основі результатів проведених в даному розділі досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

- для напилення покриття композицією чавун + 20 % міді на один валопровід необхідно 77 грам порошку;
- для повного проплавлення часток порошку чавун + 20 % міді розраховане значення потужності плазмотрону складає 39,2 кВт, мінімальна потужність складає 20,1 кВт.

– структура після термообробки більш однорідна, ніж такого ж роду покриття, але не термообробленого. Досліджуючи це ж покриття при збільшенні 500× (рис. 3.4) Видно, що більшість кордонів розділу частинка–частинка зникли і покриття стало більш однорідним. Але спостерігається дуже пориста межа розділу покриття–підкладка, що знижує міцність зчеплення. Ймовірно це пов'язано з дифузією вуглецю до підкладки і по кордонах зерен вглиб підкладки.

					MP. 132. 6121м. 05. 05. 03. ПЗ.	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Шевченко Г.П.				Розробка технологічного процесу відновлення валопроводів	Літ.	Арк.	Акрушіє
Керівник	Лебедєв В.О.						65	12
Конс.	Лебедєв В.О.					ХННІ НУК		
Н. Контр.	Лебедєв В.О.							
Зав. каф.	Матвієнко М.В.							

4.1 Послідовність при відновленні валів

При відновленні валів процес напилення включає: попередню обробку поверхні основи для підвищення міцності зчеплення напилюваного матеріалу; напилення відновлювальної поверхні, обробку покриття після напилення, термічну обробку або ущільнення покриття якщо в цьому є необхідність.

Знежирення поверхні проводиться для видалення з поверхні виробу всіх видів жирових забруднень. Завдяки попередній і подальшим промивкам видаляється більшість забруднень, не пов'язаних з поверхнею. Якщо на напилення поступає велика кількість відносно невеликих деталей, то доцільно знежирення проводити у ваннах. Склад миючого розчину, що рекомендується: 35...40 г/л три натрій фосфату; 40...45 г/л кальцинованої соди.

Температура ванни 75...85°C, тривалість знежирення – 20...25 хв. Потім - промивка в гарячій і холодній воді та сушка стислим підігрітим повітрям.

Коли покриття наносяться на ділянки поверхні габаритних виробів, доцільно застосовувати місцеве знежирення протиранням дрантям, змоченим ацетоном, чотирехлористим вуглецем, бензином, уайт-спіритом і іншими активними розчинниками. Якщо на напилення поступають сильно замастилені деталі і можливий їх нагрів до температури 700...800°C, їх поміщають в печі і прожарюють на повітрі при цих температурах до повного вигорання органічних забруднень.

Абразивно-струминна підготовка поверхні Проводиться шляхом обдування поверхні виробу струменем абразивного матеріалу. Для розгону частинок використовується стисле повітря. Для створення подібних струменів служать пістолети інжекторного або напірного типу. Як абразивні матеріали використовують:

- ДЧК - дріб чавунний колений;
- ДСК - дріб сталевий колений; кварцевий пісок; електрокорунд.

Розмір частинок 0,3...1,5 мм. Тиск повітря 0,4...0,7 МПа. Воно не повинно містити вологи і мастила. Дистанція обробки 8...15 см, час 20...30 секунд. Після обробки поверхня повинна бути матовою, блискучі ділянки на ній не допускаються. Шорсткість визначається товщиною покриттів, методом і способом напilenня.

Після абразивно-струминної обробки поверхня стає надзвичайно активною. Так, наприклад, коефіцієнт самодифузії Ni підвищується до 30 разів.

Звичайно дозволяється зберігати підготовлену до напilenня деталей в сухому повітрі не більше трьох годин. Розміри частинок абразивного матеріалу вибирають залежно від товщини матеріалу, що напilenня, матеріалу основи і ряду інших технологічних чинників [6].

Нарізання «рваної» різи. Метод знайшов широке розповсюдження при підготовці до напilenня зовнішніх і внутрішніх поверхонь круглих виробів. Для отримання «рваної» різи різець встановлюється дещо нижче за центр деталі. Величина зсуву h визначається за формулою

$$h = R \cdot \sin \gamma \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\sin \gamma = K_1 / \delta, \quad / \quad (3.2)$$

де h - зсув різця щодо осі деталі;

R - радіус деталі;

γ - кут заточування різця;

K_1 - коефіцієнт, що характеризує матеріал, який оброблюється. Для сталі $K_1 = 0,393$;

δ - відносне видовження матеріалу деталі.

Крок «рваної» різи повинен бути не менше діаметра напилених частинок.

Попередня обробка поверхні основи є важливим чинником для забезпечення міцного зчеплення напilenого покриття з деталлю так як в більшості випадків з'єднання напilenого покриття з основою відбувається в результаті механічного зчеплення.

Порошки необхідно просушити в сушильній шафі при температурі 130...150 °С протягом 3...5 годин в деках з нержавіючої сталі. Чавун + 20 % Cu або чавун + 15 % Cu прожарюють в електропечі при температурі 600...800 °С протягом 3,5 годин. Товщина шару засипки висушуваних порошків повинна бути не більше 20 мм.

4.2 Обґрунтування вибору порошку

Висока зносостійкість є основною вимогою до покриття для відновлення поверхні валу.

Відомо, що сірий чавун має високу зносостійкість, тому що у структурі його міститься цементит, а графітові включення є як би природною змазкою. Чавун досить близький за хімічним складом до сталі, тому при плазмовому напиленні чавунного порошку слід чекати високу міцність зчеплення. Таке покриття з чавуну буде мати високу зносостійкість і може надійно служити при невисоких температурах і в неагресивних середовищах.

Відновлююючі покриття посадкових місць проміжного валу повинні відповідати наступним вимогам: мати високу зносостійкість, корозійну стійкість, працювати в парі з бабітовим підшипником таким чином, щоби знос покриття та підшипника був однаковим і мінімальним. Користуючись літературними даними і попереднім напиленням чавуну, встановлено, що вище перерахованим вимогам (задовільна зносостійкість, нескладна технологія виробництва, відсутність дорогих дефіцитних компонентів) повною мірою відповідає композиції чавун–мідь.

На базі проведених досліджень зносу при терті між покриттям та бабітовим вкладишем при різних змістах міді (5, 10, 15, 20%) з чавуном було обрано композиційний порошок чавун + 20 % Cu, покриття з якого має найбільш високі показники зносостійкості.

У результаті іспитів встановлено, що ці покриття мають високу міцність зчеплення після напилення на вал.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

4.3 Обґрунтування вибору обладнання

В наш час існує велика кількість установок для плазмового напилення покриттів. До основних ознак обладнання можна віднести:

1. Середовище, в якій відбувається напилення (атмосфері, вакуумі, захисному газі, окислювальному, відновлюючому газам і т.п.).
2. Ступінь автоматизації (установки з ручним, механізованим та автоматичним програмним керуванням).
3. Число робочих позицій (однопозиційні та багатопозиційні установки).

При виборі обладнання для плазмового нанесення порошкових матеріалів необхідно дотримуватися наступних вимог:

- обладнання повинно забезпечувати отримання рівномірних по товщині покриттів з високою якістю та міцністю, необхідною пористістю та шорсткістю;
- обране обладнання повинно забезпечувати можливість роботи з будь-якими газами, мати великий термін служби та бути зручним у експлуатації;
- обладнання повинно відповідати вимогам санітарно-гігієнічних умов праці та охорони навколишнього середовища;
- обладнання повинно мати достатньо високу ефективність використання енергоресурсів, матеріалу, що напилюється, високу продуктивність та володіти низькою вартістю;
- габарити та вага обладнання повинні бути мінімально можливими.

В даний час створено кілька промислових установок для плазмового напилення, які дозволяють одержувати покриття із широким спектром властивостей із різних матеріалів.

Установка Київ-7 серійно випускається на базі Інституту електрозварювання ім Патона. Укомплектована джерелом живлення, пультом керування, плазмотронами, має 2 порошкоживлювача.

До недоліків установки відносяться нестабільність режимів плазмотрона на кінцевому етапі гарантованого ресурсу.

Універсальна плазмова установка УПУ–3Д серійно випускається Ржевским РПКО “Електромеханіка”. Поставляється в комплекті з джерелом живлення ИПН 160/600, призначеним для живлення силового ланцюга як при металізації дротом, так і при нанесенні порошкових покриттів.

У якості плазмоутворюючих газів застосовують аргон, азот, гелій, водень і їхні суміші. Джерело живлення з плавним регулюванням робочого струму може працювати при напрузі холостого ходу 80, 120 і 160 В.

Установка має модифікації: УПУ–3М, УПУ–3Д. Комплектується пультом керування, дозатором порошку, плазмотронами ПН–14М; ПП–125; ПП–25.

Дозатори ДР–2 і ДШ–1 забезпечують рівномірну подачу порошкових матеріалів.

Подача порошку до плазмотрону проводиться через порошкоживлювач, від стабільності роботи цього пристрою залежить якість напилюваного покриття.

Джерело живлення постійного струму ИПН 160/600, яке входить в комплект установки УПУ–3Д, служить для живлення силового ланцюга при нанесенні покриттів порошковими матеріалами.

Джерело живлення являє собою напівпровідниковий випрямляч з падаючою зовнішньою вольт–амперною характеристикою. Джерело складається із трифазного силового трансформатора; блоку випрямлячів, зібраного на кремнієвих діодах В–320 по трифазній мостовій схемі (схема Ларіонова); блоку сигнальної, пускової та регулюючої апаратури. Принцип регулювання робочого струму в ИПН–160/600 заснований на переміщенні магнітних шунтів, при якому змінюється доля магнітного потоку, який створений первиною обмоткою трансформатора.

Для створення різної напруги холостого ходу первина обмотка трансформатора поділена на три секції. Дві секції обмотки розміщені над

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

вторинною обмоткою. Третя секція розміщена по другу сторону шунта. Ступені переключають переносом перемички на вивідній панелі трансформатора.

Джерело живлення забезпечує плавне регулювання зварювального струму в межах 160...600 А та може працювати при напрузі холостого ходу від 80 до 160 В.

4.4 Напилення покриттів

Напилення покриттів проводять в наступній послідовності:

- підготовлений для напилення вал закріплюють в спеціальному пристосуванні;
- встановлюють задану дистанцію напилення між зрізом сопла плазмотрона і напилюваною поверхнею за допомогою поперечної подачі. Оптимальні значення дистанції напилення лежать в межах 150 мм. Збільшення дистанції напилення приводить до зниження міцності зчеплення. Це пов'язано з тим, що при плазмовому напиленні, в результаті високого градієнту температур в плазмовому струмені, напиляемі частини встигають охолоджуватися, при цьому різко знижується пластичність і здатність заповнювати мікронерівності поверхні;
- проводять запуск плазмової установки при значеннях параметрів, що забезпечують малі електричні і теплові навантаження на плазмотрон;
- встановлюють технологічний режим напилення. Параметри режиму повинні забезпечувати необхідне проплавлення частиц порошку та задовільні властивості покриття. Міцність зчеплення покриття з основою інтенсивно збільшується з підвищенням струму та напруги на дузі. З урахуванням можливостей джерела живлення можна вважати прийнятною величину сили струму 250...280 А. Збільшення напруги стримується можливостями установки. Цілком прийнятна величина напруги 80...105 В, яка досягається при застосуванні джерела живлення ИПН 160/600 та плазмотрона ПН-14М;
- здійснюють підігрів поверхні що напилюється плазмовим струменем до 100 °С. Контроль температури напилюваної поверхні проводять

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

термоіндикаторними датчиками;

- подають порошок і при цьому обертають вал зі швидкістю 2...4 м/хв;

Параметри режимів плазмового напилювання наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Параметри режиму плазмового напилювання

Вид покриття	Сила струму, А	Напруга, В	Витрати плазмоутворюючого газу, м ³ /с	Дистанція напилювання, мм
чавун + 20 % Cu	250-280	100-120	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$	130-150

В процесі напилення та по його закінченні візуально контролюється стан напилюваної поверхні: рівномірно матовий колір, відсутність інородних включень, тріщин, сколів, відшарувань, вздуття та місць перегріву.

4.5 Контроль якості напилених покриттів

Вироби з напиленим покриттям піддають контролю по зовнішньому вигляду, товщині, геометричним розмірам.

Контроль по зовнішньому вигляду виконується з метою виявлення зовнішніх дефектів – сколів, відшарувань. Для цього використовують лупи десятикратного збільшення ЛІІ–3, ЛІІ–4 по ГОСТ 8309–75, ГОСТ 7594–75.

Геометричні розміри деталі з покриттям вимірюються за допомогою лінійки (ГОСТ 427–75) та штангенциркуля (ГОСТ 166–80) і повинні відповідати вимогам креслення.

Товщину покриття на деталі вимірюють штангенциркулем (ГОСТ 166–80), мікрометром (ГОСТ 6507–78) та товщиномірами різноманітних типів. Похибка вимірювань всіх типів товщиномірів складає в середньому 10 %.

Мікротвердість покриттів вимірюють по ГОСТ 9540–76 за допомогою прибору ПМТ–3.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Контроль мікроструктури здійснюють на зразках при збільшенні 250...1000 з метою виявлення нерівномірного розподілу включень, наявності забруднень на межі підложка–покриття.

Висновки: в процесі технологічних розробок по напиленню зносостійких покриттів на судновий проміжний вал прийняті наступні рішення:

- обрана установка УПУ–ЗД;
- в якості матеріалів для напилення прийняті порошки: чавун + 20 % Cu.
- в якості плазмоутворюючого і транспортуючого газу обрано аргон вищого сорту;
- на основі обраного обладнання і матеріалів розроблено технологічний процес напилення зносостійких покриттів на судновий проміжний вал, який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напиленням, просушування порошку, плазмове напилення покриття, термічну обробку, контроль якості покриття.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 05. ПЗ.							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Студент		Шевченко Г.П..			Економічна оцінка проектних розробок			Літ.	Арк.	Акрушіє		
Керівник		Лебедев В.О.								74	7	
Конс.		Лебедев В.О.						ХННІ НУК				
Н. Контр.		Лебедев В.О.										
Зав. каф.		Матвієнко М.В.										

Річна програма випуску проміжних валів становить 300 шт. Роздрібна ціна одного такого валу становить 12000 грн.

5.1 Розрахунок вартості основних матеріалів

Витрата порошку (чавун + 20 % Cu) на напилення одного розглянутого валу становить $75 \cdot 10^{-3}$ кг. Ціна одного кг порошку = 2300 грн. Отже, витрати на основні матеріали становлять:

$$2300 \times 75 \times 10^{-3} = 172,5 \text{ грн.}$$

Витрата аргону на напилення одного розглянутого валу становить 600 л. Ціна одного літру становить 0,2 грн. отже, витрати на газ становлять:

$$0,2 \times 600 = 120 \text{ грн.}$$

5.2 Розрахунок витрат на електроенергію

Витрати електроенергії розраховуються за формулою:

$$B_e = \Phi_{\text{еф.обл.}} \cdot K_z \cdot P \quad (5.1)$$

де B_e – витрати електроенергії, кВт;

$\Phi_{\text{еф.обл.}}$ – ефективний фонд часу обладнання, год, $\Phi_{\text{еф.обл.}} = 1774$ год.;

K_z – коефіцієнт завантаження обладнання;

P – номінальна потужність одиниці обладнання, кВт.

Номінальна потужність кожного виду обладнання, яке застосовується на ділянці, та його коефіцієнти завантаження наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Обладнання, яке застосовується на ділянці

Найменування обладнання	Кількість обладнання, одиниць	Номінальна потужність одиниці обладнання (P), кВт	Коефіцієнт завантаження обладнання (K_z)
Установка УПУ–ЗД	1	20	0,90
Пристрій для обертання	1	20	0,90

$$B_e = 1774 \times 0,90 \times 20 + 1774 \times 0,90 \times 20 = 63864 \text{ кВт}$$

Затрати на електроенергію визначаються:

$$Z_e = B_e \times C_e \quad (5.2)$$

де Z_e – затрати на електроенергію, грн.;

C_e – вартість одного кіловата електроенергії, $C_e = 4,20$ грн/кВт год.

$$Z_e = 40 \times 4,20 \times 0,35 = 58,8 \text{ грн.}$$

5.3 Визначення трудомісткості

Норма часу на напилення проміжного валу за даними експериментальних досліджень становить 0,35 н–год.

5.4 Розрахунок витрат на основну заробітну плату виробничих робітників

Тарифний розряд роботи – IV

Годинна тарифна ставка робітника IV розряду – 120 грн.

Відрядна розцінка складає:

$$P_{cd} = 120 \times 0,35 = 42,0 \text{ грн.}$$

Собівартість напилення одного валу становить 393,3 грн. Отже ціна одного валу з плазмовим покриттям складе: $9000 + 393,3 = 9393,3$ грн.

Розрахунок економічного ефекту проводився за формулою:

$$\Delta = \left[Z_1 \cdot \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(I_1 - I_2) - E_n(I_2 - I_1)}{P_2 + E_n} - Z_2 \right] \cdot A$$

де Z_1 і Z_2 – приведені витрати на виготовлення валу по базовому і новому техпроцесу;

B_1 і B_2 – річні обсяги виробництва валів при використанні базового і нового техпроцесу;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності (0,15);

P_1 і P_2 – частка відрахувань від балансової вартості, розраховується як величини зворотні терміну служби;

Термін служби проміжного валу складає 2 роки, а з урахуванням відновлення 3 роки, тоді:

$$P_1 = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$P_2 = \frac{1}{3} = 0,33$$

I_1 и I_2 – річні експлуатаційні витрати споживача при використанні напиленого і не напиленого валів при розрахунку на обсяг продукції; $I_1 = I_2$;

A – річний об'єм напилених валів.

Наведені витрати за базовим варіантом ($З_1$) відповідають вартості проміжного валу і складають 9000 грн. Наведені витрати по проектованому варіанту ($З_2$) становлять 12008,9 грн, розраховані за формулою:

$$З = C + E_n \cdot K$$

де C – собівартість одиниці продукції, грн;

K – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди, грн. $K = 15600$, грн.

$$З_2 = 393,3 + 0,15 \times 15600 = 12008,9 \text{ грн}$$

Враховуючи вище сказане, розрахунок економічного ефекту розраховуємо за формулою:

$$\mathcal{E}_r = \left(9000 \cdot \frac{0,5 + 0,15}{0,33 + 0,15} - 12008,9 \right) \cdot 300 = 164920 \text{ грн}$$

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 05. ПЗ.	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.5 Розрахунок строку окупності додаткових капітальних витрат

Термін окупності додаткових капіталовкладень ($T_{ок}$) характеризує період часу в період якого додаткові капітальні вкладення окупляться за рахунок вкладення собівартості продукції:

$$T_{ок} = \frac{K}{\Xi_r} = \frac{15600}{164920} = 0,1 \text{ року}$$

Висновки: відновлення проміжних валів за рахунок напilenня плазмового покриття збільшує термін служби валів від 2 до 3 років. Термін окупності додаткових капіталовкладень складає 0,1 року. Річний економічний ефект проектованого технологічного процесу складає 164920 грн.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. 05. ПЗ.	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі результатів проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

- для відновлення валопроводів доцільно використовувати покриття, отримані плазмовим напиленням;

- з технологічної і економічної точки зору процес плазмового напилення доцільно виконувати на повітрі;

- встановлено, що для напилення покриттів слід використовувати порошок чавуну +20% міді;

- для напилення покриття композицією чавун + 20 % міді на один валопровід необхідно 77 грам порошку;

- для повного проплавлення часток порошку чавун + 20 % міді розраховане значення потужності плазмотрону складає 39,2 кВт, мінімальна потужність складає 20,1 кВт.

- структура після термообробки більш однорідна, ніж такого ж роду покриття, але не термообробленого. Досліджуючи це ж покриття при збільшенні 500× (рис. 3.4) Видно, що більшість кордонів розділу частинка–частинка зникли і покриття стало більш однорідним. Але спостерігається дуже пориста межа розділу покриття–підкладка, що знижує міцність зчеплення. Ймовірно це пов'язано з дифузією вуглецю до підкладки і по кордонах зерен вглиб підкладки.;

- на основі обраного обладнання і матеріалів розроблено технологічний процес напилення відновлюючих покриттів на валопроводи, який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напиленням, просушування порошку, плазмове напилення покриття, термічну обробку, контроль якості покриття.

					МП. 132. 6121м. 05. 05. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

- методами комп'ютерного моделювання встановлено напруженій стан найбільш завантаженої зони, а отже, і зони найбільш ймовірного руйнування, при випробуванні міцності напиляного шару методом витягування штоку;

- при випробуванні міцності напиляного шару методом витягування штоку найбільш завантажена зона, а отже, і зона найбільш ймовірного руйнування, розташована поблизу точки сполучення шток-втулка у поверхні розділу напиляного шару і підкладки;

- найбільші напруження відриву збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару и в 2,5...3 рази перевищують навантаження на шток. Максимальні дотичні та еквівалентні напруження зменшуються зі збільшенням жорсткості, також значно перевищуючи навантаження на шток;

- при випробуванні таких зразків з тонким напиленням шаром руйнування відривом можливо тільки при дуже малій міцності зчеплення (міцності на відрив) та великій міцності напиляного шару на зріз;

- зі збільшенням жорсткості матеріалу напиляного шару збільшується ймовірність руйнування відривом штока від напиляного шару і зменшується ймовірність руйнування відривом штока разом з напиленням шаром;

- відновлення проміжних валів за рахунок напилення плазмового покриття збільшує термін служби валів. Термін окупності додаткових капіталовкладень складає 0,1 року. Річний економічний ефект проектного технологічного процесу складає 164920 грн.

Список джерел інформації

1. Шевченко Г.П. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» на тему «Удосконалення технології відновлення валопроводів», Миколаїв, 2023. – 61 с.
2. Сокур Т.Д. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття / Т.Д. Сокур, Ю.С. Попіль, В.М. Корж // Вісник НТУ «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування, № 61, 2011. – С. 168 – 171.
3. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 38. Одеса: НУ «ОМА», 2019. - 312 с.
4. <https://abiznes.prom.ua/ua/a196394-sovremennye-tehnologii-polucheniya.html>
5. Харламов Ю.О. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учебное пособие: В 2-х т. /текст/ Ю.О. Харламов, Н.А. Будагьянц – Луганск: издательство Восточнoукраинского национального университета имени В. Даля, 2003. – 496 с.
6. Корж В.М. Технологія та обладнання для напилення /текст/ В.М. Корж Навчальний посібник – К.: НМЦВО, 2000. – 152 с.
7. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина І: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 51 с.
8. Корж, В.М. Нанесення покриття [Текст]: навчальний посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко.-К.: Арістей, 2005. - 204 с.
9. Дубовий, О.М. Технологія напилення покриттів [Текст]: підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. - 236 с.
10. Трушин, С.И. Метод конечных элементов. – М: АСВ, 2008. 256 с.
11. Басов, К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
12. Лебедев, В.А. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв / В.А. Лебедев., С.А. Лой, Г.В. Ермолаев, М.В.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

Матвиенко // Упрочняющие технологии и покрытия. - №12(120), 2014. - С. 8-12.

13. Дубовой А.Н. Технология нанесения газотермических порошковых покрытий /текст/ А.Н. Дубовой, Э.Б. Хачатуров, С.А. Лой – Николаев: НКИ, 1986. – 65 с.

14. Лебедев В.О., Дубовий О.М., Лой С.А. Дослідження та оцінка термоциклічної стійкості плазових ущільнюючих покриттів для вузлів газотурбінних установок // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - №2, 2019.-С. 38-46.

					МР. 132. 6121м. 05. 05. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

