

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри


_____ к.т.н., проф. НУК Г.В. Єрмолаєв

«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти **«магістр»**

на тему: Дослідження властивостей покриттів при отриманні
ушільнень

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)



Светлицький Дмитро Володимирович

(прізвище та ініціали)



Керівник Лебедєв Володимир Олександрович

(прізвище та ініціали)



Рецензент Лой Сергій Анатолійович

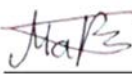
(прізвище та ініціали)

Миколаїв - 2023 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

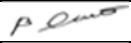
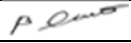
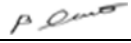
 Гарант освітньої програми
к.т.н., доц. М.В. Матвієнко
“ ” 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

студенту Светлицькому Дмитру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження властивостей покриттів при отриманні.....
ущільнень
керівник проекту Лебедєв Володимир Олександрович, д.т.н. .
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені розпорядженням ХННІ НУК від “10” жовтня 2023 року № 19
2. Строк подання студентом проекту 12 грудня 2023р.
3. Вихідні дані до проекту Креслення виробу, матеріал сталь ВХ4Л
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз матеріалів по ущільнюючим покриттям та методам їх досліджень. 2. Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на термостійкість. 3. Дослідження термоциклічної стійкості покриттів. 4. Розробка технології напилювання ущільнень. 5. Визначення економічних показників технологічного процесу
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Тема роботи. 2. Мета роботи, завдання. 3. Вставка осередкова. 4 Зразки та їх комп'ютерні моделі для випробувань на термостійкість. 5. Варіанти товщини напиленого шару та підкладки 6. Поля напружень при випробуванні на термостійкість зразків з «м'яким» та «жорстким» напиленим шаром. 7. Епюри напружень при випробуванні на термостійкість зразків з «м'яким» та «жорстким» напиленим шаром. 8. Порівняння результатів моделювання та аналітичного розрахунку. 9. Залежність поздовжніх напружень від співвідношення його товщини і товщини основного металу при нагріванні на 100 °С. 10. Дослідження стійкості покриттів до тепловмі. 11. Характеристика матеріалів, що застосовуються та режими напилювання. 12. 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 13.10.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз матеріалів по ущільнюючим покриттям та методам їх досліджень	27.10.2023р.	
2.	Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на термостійкість	10.11.2023р.	
3.	Дослідження термоциклічної стійкості покриттів	17.11.2023р.	
4.	Розробка технології напилювання ущільнень	24.11.2023р.	
5.	Визначення економічних показників технологічного процесу	01.12.2023р.	
6.	Оформлення пояснювальної записки	10.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Светлицький Д.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Лебедєв В.О.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Магістерська робота присвячена дослідженню та вдосконаленню технології отримання ущільнювальних покриттів методом газотермічного (плазмового) напилювання для деталей газотурбінних двигунів. Обґрунтовано актуальність застосування газотермічних покриттів як ефективного способу підвищення експлуатаційних характеристик деталей без суттєвої зміни властивостей основного матеріалу.

Досліджено напружено-деформований стан покриттів, що виникає внаслідок термічних впливів і різниці коефіцієнтів теплового розширення. Виконано аналітичні розрахунки та комп'ютерне моделювання розподілу напружень при нагріванні та охолодженні, визначено умови виникнення розтягувальних, дотичних напружень і можливого руйнування або відшарування покриття.

Розроблено технологічний процес плазмового напилювання ущільнювальних покриттів із використанням установки УПУ-3Д та порошкових матеріалів ПГ-10К-01+20%С(Ni) і ПГ-10К-01+20%ВN(Ni). Встановлено, що запропоновані покриття перевершують традиційні за корозійною, ерозійною та термічною стійкістю. Проведено техніко-економічну оцінку процесу.

Ключові слова: газотермічне напилювання, плазмове напилювання, ущільнювальні покриття, газотурбінний двигун, напружено-деформований стан, залишкові напруження, адгезія, термоциклування, порошкові матеріали, ПГ-10К-01, комп'ютерне моделювання.

Abstract

The master's thesis is devoted to the study and improvement of sealing coatings produced by thermal (plasma) spraying for gas turbine engine components. The relevance of thermal spraying as an effective method for enhancing performance properties without significantly altering the base material is substantiated.

The stress-strain state of coatings caused by thermal effects and differences in thermal expansion coefficients is investigated. Analytical calculations and computer modeling of stress distribution during heating and cooling were performed, and conditions for the occurrence of tensile and shear stresses, as well as possible coating failure or delamination, were determined.

Process of plasma spraying using the UPU-3D system and powder materials PG-10K-01+20%C(Ni) and PG-10K-01+20%BN(Ni) was developed. The proposed coatings demonstrate improved corrosion, erosion, and thermal resistance compared to conventional solutions. A techno-economic assessment of the process was also carried out.

Keywords: thermal spraying, plasma spraying, sealing coatings, gas turbine engine, stress-strain state, residual stresses, adhesion, thermal cycling, powder materials, PG-10K-01, computer modeling.

Вступ	6
1. Аналіз матеріалів по ущільнюючим покриттям та методам їх досліджень	8
1.1 Умови експлуатації ущільнюючих покриттів.....	9
1.2 Матеріали для отримання ущільнюючих покриттів	10
1.3 Плазмове напилення ущільнюючих покриттів	13
1.4 Склад та технологія напилювання матеріалу 20Б	15
1.5 Методи визначення термостійкості покриттів.....	17
1.6 Мета та завдання кваліфікаційної роботи	19
2. Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на термостійкість.....	20
2.1 Суть методу скінчених елементів	21
2.2 Програмний комплекс ANSYS та його можливості.....	22
2.3 Моделі для визначення термостійкості покриття.....	23
2.4 Вплив товщини та жорсткості покриття на напружено-деформований стан	24
2.5 Аналітичний розрахунок напружень при нагріванні та охолодженні. Порівняння результатів моделювання та аналітичного розрахунку	59
3. Дослідження термоциклічної стійкості покриттів	63
3.1 Термоциклічна стійкість на термоудар.....	64
3.2 Термоциклічні іспити на газодинамічному стенді та лабораторної установці	66
4. Розробка технології напилювання ущільнень	73
4.1 Вибір обладнання для плазмового напилення	74
4.2 Вибір матеріалів	77
4.3 Розробка технологічного процесу.....	79
5 Визначення економічних показників технологічного процесу	85
5.1 Розрахунок прямого фонду заробітної плати	87
5.2 Розрахунок затрат на матеріали	87

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 00. ПЗ.	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3 Розрахунок витрат на електроенергію	88
5.4 Витрати на амортизацію обладнання.....	90
5.5 Визначення економічних показників технологічного процесу	90
Загальні висновки.....	92
Список джерел інформації	95

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

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 00. ПЗ.			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Светлицький Д.В.				Вступ	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Лебедев В.О.						6	2
Конс.	Лебедев В.О.					ХННІ НУК		
Н. Контр.	Лебедев В.О.							
Зав. каф.	Єрмолаєв Г.В.							

ВСТУП

Одним з перспективних методів отримання ущільнень є процеси газотермічного нанесення покриттів, які набули широкого розповсюдження в Україні і в світі.

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, Скандинавські країни) темп зростання цих методів складає 5-7%, в Індії - 15-17%, у Китаї -20% [1].

При нанесенні покриттів мало змінюються структуру і властивості основного металу. Однак в покриттях виникають напруження, що може призвести до їх руйнування. При зміні температури за рахунок різних коефіцієнтів термічного розширення в покриттях та на границі з основою має місце напружено-деформований стан дослідження якого представляє науковий інтерес.

В магістерської роботі продовжується та розвивається тема, яка розглядалася в бакалаврської атестаційної роботі [2]. 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. 02. 05. 01. ПЗ.								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент		Светлицький Д.В.			Аналіз матеріалів по уцільнюючим покриттям та методам їх досліджень				Літ.	Арк.	Акрушіє		
Керівник		Лебедев В.О.									9	12	
Конс.		Лебедев В.О.							ХННІ НУК				
Н. Контр.		Лебедев В.О.											
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.											

1.1 Умови експлуатації ущільнюючих покриттів

Зона експлуатації ущільнюючих покриттів лопаткового сегмента піддається впливу агресивних високотемпературних газових потоків, що призводить до високотемпературної сульфідної корозії і впливу твердих часток, які розганяються в газовому потоці до швидкостей 200...300 м/с і викликають ерозійний знос. Широкий діапазон зміни температур - від навколишнього середовища до температури роботи турбіни (950...1000 °С) вимагає стійкості до теплових змін.

Величина зазору між лопаткою і корпусом повинна бути мінімальною, що досягається застосуванням ущільнень. З цією метою використовуються металокерамічні і керамічні вставки, стрічковий металокерамічний прокат, стільникові вставки з наповнювачем і без нього, спеціальні покриття.

Ущільнення повинні забезпечити приробітку вузлів, мати високу стійкість проти високотемпературної корозії й ерозійну стійкість в умовах впливу високошвидкісного газового потоку, забезпечувати високу жаростійкість у продуктах згоряння важкого палива до 1100 °С, мати низьку теплопровідність. Матеріал ущільнення в умовах сухого тертя не повинний зношувати лопатки, при зіткненні не викликати інтенсивного нагрівання, не наволочуватися і не зварюватися з лопатками, а при спрацьовуванні не повинний утворювати великих часток. [2].

Високотемпературні ущільнення, що застосовуються в суднових газотурбінних двигунах (ГТД) в основному не задовольняють цим суперечливим вимогам і вимагають розробки більш ефективних ущільнювальних матеріалів і технологій їхнього одержання.

Ретельний аналіз цих жорстких і суперечливих вимог та пророблення літератури показали, що для цих цілей може бути придатне тільки композиційне покриття.

					MP. 132. 6121m. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тертя і зношування при високих температурах тугоплавких з'єднань свідчать про те, що при температурах вище $0,35 \dots 0,45 T_{пл}$ створюються умови для пластичної деформації поверхневого шару і розвитку адгезійних процесів. У свою чергу, речовини з переважно ковалентними зв'язками характеризуються високим опором пластичному плину. До них відносять неметалічні тугоплавкі з'єднання.

Вибір ущільнювальних покриттів може бути здійснений шляхом іспиту на виробі, що надзвичайно дорого і практично нездійсненно, чи імітацією умов роботи вузлу безбандажна робоча лопатка-корпус (вставка) у лабораторних умовах.

1.2 Матеріали для отримання ущільнюючих покриттів

Для отримання ущільнень використовуються різні склади покриттів та методи їх нанесення. Це металокерамічні та керамічні вставки, стрічковий металокерамічний прокат, стільникові вставки з наповнювачем та без нього, спеціальні покриття, ряд матеріалів, одержуваних різними методами [3].

Найбільш широке поширення знайшли композиції метал - тверде змащення. Тверде змащення, утворюючи на сполучених деталях плівки, що знижують тертя, запобігає схоплюванню. Звичайно застосовують нітрид бора, графіт, дисульфід молібдену, фторид кальцію, природну слюду.

Металокераміка повинна в умовах сухого тертя володіти гарними антифрикційними властивостями.

Антифрикційні властивості металокераміки нікель-графіт, нікель-нітрид бора, ніхром-слюда і ніхром-нітрид бора зі збільшенням змісту змащення більш 20 об'ємних відсотків погіршуються, тому що зростає коефіцієнт тертя і підвищується знос досліджуваних матеріалів. Дисульфід молібдену не має довгострокову стійкість до окислювання на повітрі при температурах вище 573

					МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

К. У деяких випадках графіт і дисульфід молібдену застосовуються при високих температурах, але на короткий час [2].

При температурах вище 673 К графіт починає окислятися [4]. Механізм мастильної дії графіту зв'язується з моделлю граничного тертя, відповідно до якої роль граничних шарів мастильного матеріалу виконують фізично сорбовані молекули води й інші речовини [5].

Інтенсивність окислення вуглецю можна понизити змішуванням із протиокислювальними присадками [6]. Максимальна робоча температура на повітрі таких складів обмежена 775 К. Більш високі робочі температури мають CaF_2 і BaF_2 [7].

Тонкі плівки срібла добре змазують до температур 500 °С, але не мають достатню міцність. Фторидні покриття мають мастильну здатність при температурах вище 400 °С, але не ефективні як змащення при знижених температурах через переходи від крихкості до пластичності при великих швидкостях деформації [8]. Фторидні покриття зі сріблом забезпечують змазування від кімнатних температур до 800 °С [9].

Покриття серії PS100, що містять стабільні фториди і срібло з нікель-хромовою зв'язкою і PS200, що складаються з тих же самих змащень, карбїду хрому і нікель-кобальтового сплаву, напилені плазмовим методом, забезпечують змащення від кімнатної температури до температури не менш 1000 К в водні, гелії і повітрі в ущільненні газових турбін [10].

На підставі досліджень структури, жаростійкості і припрацьовуваності ряду порошків системи нікель-графіт, напилених плазмовим і газополум'яним методами, виявлено, що графіт у залежності від розмірів кристалів і змісту домішок починає взаємодіяти з киснем при температурі 500...600 °С, а оптимальним визнаний склад ПГН-85, напилений плазмовим методом [11, 12].

Застосування струмно-абразивної обробки в процесі плазмового напилення сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик [13].

					MP. 132. 6121m. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нітрид бора має більш високу жаростійкість у порівнянні з графітом і зберігає експлуатаційні властивості до 1073 К. Нітрид бора, рівномірно розподілений в металевій основі і знаходячись постійно в зоні приробляння, запобігає розвитку схоплювання поверхонь тертя.

У суднових турбінах вітчизняного виробництва застосовуються стільникові ущільнювальні матеріали для температур експлуатації вище 1173 К. У цьому випадку має місце значне перетікання робочого газу через осередки стільників, а при їхній експлуатації нерідко спостерігається знос торців лопаток.

Тому для робочих температур 773...870 К розроблені ущільнювальні матеріали, одержувані газотермічним напиленням з наступних композицій: алюмінієва бронза-нітрид бора, кремнієво-алюмінієвий сплав-графіт, алюміній-ніхром-нітрид бора [14, 15].

Ущільнювальний матеріал 20Б, що складається з основи - нікель-мідь і наповнювача у виді нітриду бора і графіту, наноситься газополум'яним напилюванням. Однак для його здійснення необхідне виготовлення стрижнів діаметром 4 і 5 і довжиною до 600 мм шляхом екструзії матеріалу зі сполучним силікатом натрію. Працездатне таке ущільнення до температури 837 К протягом 6000 годин [15].

Так само використовують матеріал УМ-16П на нікелевій основі, що як змащення містить нітрид бора. Вплив на властивості матеріалу має сплав ВПР-11, який міститься в його складі в кількості 20% (по масі). Покриття, нанесені газополум'яним напилюванням, представляють двохкомпонентну систему нікель-нітрид бора, допускають врізання лопатки на глибину 0,2 мм і працездатні до 973 К. При змісті нікелю менш 65% спостерігається віднесення ущільнювального матеріалу в результаті ерозії, а більш 80% викликає знос лопаток.

					МП. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При робочих температурах до 1173 К застосовуються газополум'яні ущільнювальні покриття на основі нікелю з додаванням алюмінію і кремнію. Роль твердого змащення виконують нітрид бора і графіт.

В якості ущільнюючого матеріалу використовують нікель-графіт (С-137, С-120, С-5 та ін.). Нікель виконує роль твердого каркаса, а графіт - м'якого компонента, який зношується. В умовах тертя ковзання з високими питомими навантаженнями, агресивних середовищах, глибокому вакуумі й умовах радіації для широкого діапазону температур використання твердих змащень є єдиним способом забезпечення надійної роботи вузлів тертя. Тверді змащення мають перевагу також там, де присутність рідких і пластичних змащень буває небажаною (електронні прилади, виробництво харчових продуктів, текстилю й ін.).

Як тверді змащення при нанесенні покриттів найбільш широке застосування знайшли матеріали з анізотропною структурою (графіт, нітрид бора, сульфід, селеніди і теллуриди молібдену, вольфраму, титана), м'які, неорганічні матеріали (свинець, срібло, індій, оксиди свинцю, барію і заліза, фториди кальцію і барію), м'які органічні матеріали (фторопласт, фталоціанін і ін.). До числа найбільш розповсюджених відносяться графіт, дисульфід молібдену, фторид кальцію і фторопласт [2].

1.3 Плазмове напilenня ущільнюючих покриттів

При плазмовому напilenні покриття формується з дрібних розплавлених частинок, які переносяться на поверхню при розпилюванні плазмою дроту, стрижнів або з порошку. У технологіях плазмового напilenня велике значення мають час перебування частинок в плазмі і час доставки нагрітих частинок до основи, вдосконалення плазмових установок, знання процесів, що протікають в низькотемпературній плазмі при напilenні покриттів.

					МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 натягнення 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 закристалізувалися, 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 має середовище, в якому здійснюється процес осадження тих або інших покриттів [2].

Плазмове напилення може здійснюватися на повітрі або у вакуумі. Як плазмоутворюючі гази можуть використовуватися Ag, H₂, He, N₂ або їх суміші. Істотне поліпшення властивостей покриттів досягається при використанні плазмового напилення у вакуумі.

					MP. 132. 6121m. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найважливіше значення в технології плазмового напилення має розробка і підготовка порошкових матеріалів [16]. 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 [17].

1.4. Склад та технологія напилювання матеріалу 20Б

Процес нанесення матеріалу 20Б, застосовуваного для ущільнення масляних і повітряних порожнин проточної частини ГТД, відносився до розряду нестабільних технологічних процесів з початку застосування матеріалу на підприємстві. Ущільнювальний матеріал 20Б на поверхні деталей наносився розпиленням стрижнів ацетиленокисневим полум'ям. Технологічні процеси виготовлення стрижнів і напилювання покриття не забезпечували стабільної якості, не дозволяли механізувати процеси й покращити умови праці.

Склад механічної суміші:

- нікелевий порошок марок ПНЕ-1, ПНК-УТ1, ПНК-ОТ1;
- мідний порошок марок ПМ, ПМА або ПМС-1;
- графіт марки П;

					МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- нітрид бору гексагональний.

З'єднувальні елементи:

- карбамід;

- скло натрієве рідке (густина 1,45...1,52 г/см³).

Таблиця 1.1 Хімічний склад порошку 20Б

BN, %	C, %	Cu, %	SiO, %	Ni, %
12...14	7...9	17...20	6...8	залишок

Зернистість порошку має складати 20...315 мкм. Перед використанням порошок необхідно просушити при температурі 120±10 °С на протязі 45±10 мін.

Для покращення з'єднання матеріалу напилення з матеріалом основи необхідно застосовувати обробку поверхні. Використовують струйно-абразивну обробку, для якої застосовують наступні складові:

- електрокорунд нормальний марок 13А, 14А (зернистість 32...80 мкм);
- стиснене повітря (без вологості й олії). Клас забруднення не нижче 3.

При напиленні використовують плазмоутворюючий і транспортуючий газ – аргон вищого і першого сортів. Для напилення використовується установка 15В-Б.

Для додання додатково жорсткості поверхня деталі чи складальної одиниці повинна пройти струйно-абразивну обробку при наступних режимах;

- | | |
|---|-----------|
| - тиск стиснутого повітря, МПа | 0,5...0,6 |
| - кут нахилу сопла до поверхні, град | 60...90 |
| - відстань від струменя сопла до поверхні, мм | 90...150 |

Зона струйно-абразивної обробки повинна бути більше зони напилення на сторону від 2 до 7 мм. Після обробки поверхні необхідно видалити металевий пил і залишки абразиву обдуванням стисненим повітрям з послідовним знежиренням напиленої поверхні шляхом протирання кистю,

					МП. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

змоченой ацетоном. Тривалість перерви між обробкою і напиленням повинна складати не більш 2-х годин.

Твердість покриття повинна складати 8...14 НВ. Перед напиленням необхідно підігріти деталь до температури 100 ± 20 °С.

При напиленні використовуються наступні режими:

Напруга, В	100±15
Сила струму, А	170±30
Витрата газу, л/хв	7,5±1,5
Тиск транспортуючого газу, МПа	0,2±0,05
Відстань від сопла до поверхні деталі, мм	140±30
Лінійна швидкість обертання, м/хв..	2...4
Швидкість переміщення плазмотрона, м/хв..	0,2...0,4
Температура нагрівання деталі, °С	не більше 200

Контроль температури виконується термоелектричним перетворювачем.

Охолодження виконується повітрям.

Максимальна товщина покриття після механічної обробки повинна складати не більше 3 мм.

1.5 Методи визначення термостійкості покриттів

Методи, що використовуються для визначення термостійкості залежать від специфіки застосування даного матеріалу, при цьому майже завжди вирішальну роль грає механічна міцність матеріалу. Тому фізико-механічні випробування завжди використовуються для визначення термостійкості.

Ізотеніскопний метод дуже корисний для визначення термостійкості речовин з низькою молекулярною вагою.

Ізотеніскопний метод часто застосовується для визначення напрямів створення нових полімерів . Слід мати на увазі , що критерій термостійкості вибирається в даному випадку довільно. Метод заснований на припущенні , що

					МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

швидкість утворення газоподібних продуктів розкладання прямо пропорційна швидкості розкладання вихідної речовини. Однак це припущення дотримується далеко не у всіх випадках. Незважаючи на це, Ізотеніскопний метод дозволяє визначати порядок розташування по термостійкості органічних сполук. Так, наприклад, при використанні зазначеного вище критерію встановлено, що термостійкість бензолу, дифенілу, нафталіну і дифенілові ефіру лежить в інтервалі температур 540...600 С.

Тензометричний метод дуже ефективний для визначення термостійкості низькомолекулярних речовин.

Тензометричний метод дозволяє визначати напруження на внутрішніх поверхнях і частинах судин при нормальних температурах. Аналогічні тензорезистори та апаратура можуть одночасно використовуватися і для вимірювань на зовнішніх поверхнях судин.

Сутність тензометричного методу полягає в тому, що в процесі навантаження деталі вимірюються деформації поверхневих волокон. За знайденими деформаціями на основі закону Гука обчислюються дійсні напруження. Таким чином, вихідним є припущення, що матеріал деталі пружний і ізотропний. Метод тензометричного вимірювання при експериментальному дослідженні деталей машин може бути застосований не тільки в умовах статичних навантажень, але і в умовах динамічних навантажень, здебільшого відповідних робочих умов. У ряді випадків є доцільним при вимірюванні значних деформацій виготовляти модель деталі у збільшеному масштабі. У цьому випадку розглянутий метод забезпечує більшу точність вимірювання.

Перевагою тензометричного методу визначення кількості є простота, а основним недоліком - невисока точність тензометрів і як наслідок - недостатня точність вимірювання [18].

1.6 Мета і завдання кваліфікаційної роботи

					<i>МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.</i>	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином на основі зробленого аналізу літературних даних можна зробити висновок, що метою кваліфікаційної роботи є: розробка технологічного процесу напилення ущільнень, дослідження методом комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану напилених покриттів при випробуваннях зразків на термостійкість та визначення термостійкості покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести вибір обладнання та матеріалів, які найбільш задовольняють усім вимогам, а також розробити технологічний процес напилення ущільнень;
- обрати методику оцінки напружено-деформованого стану та метод дослідження;
- побудувати СЄ моделі для комп'ютерного моделювання;
- виконати аналіз результатів розрахунку напруженого стану при температурному навантаженні зразків;
- дати рекомендації з обґрунтування вибору розмірів зразків для випробування дати рекомендації з обґрунтування вибору розмірів зразків для випробування;
- провести дослідження термостійкості на зразках;
- розрахувати вартість основних фондів, фонду заробітної плати, собівартість напилення;
- проілюструвати вищезгадані розрахунки, розробки та вибране обладнання кресленнями, графіками та таблицями.

					МР. 132. 6121м. 02. 06. 01. ПЗ.	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Светлицький Д.В.				Моделювання напружено-деформованого стану при випробуваннях на термостійкість	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Лебедев В.О.						20	43
Конс.	Лебедев В.О.					ХННІ НУК		
Н. Контр.	Лебедев В.О.							
Зав. каф.	Єрмолаєв Г.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:

Суть методу випливає з його назви. Область, в якій знаходиться 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 знаходиться 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 знаходиться 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 диакоптики - загального методу дослідження систем шляхом їх розчленування.

Переваги та недоліки методу:

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

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 СЕ 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».

2.3 Моделі для визначення термостійкості покриття

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В публікаціях, присвячених напруженому стану в газотермічних покриттях [19...23], як правило, розглядається вплив технологічних факторів на величину та характер розподілу залишкових напруг і практично відсутні дані про їх розподіл у зразках при подальшому термоциклуванні. На опір покриття руйнуванню великий вплив мають термічні напруження, що у результаті різниці коефіцієнта лінійного температурного розширення (КЛТР) підкладки і напиляного шару, зміни температури як у процесі виготовлення (нанесення покриття і термообробки), так і роботи деталі.

Для оцінки термостійкості покриття проводять спеціальні лабораторні випробування [19], в яких зразки з нанесеним покриттям багаторазово нагрівають і охолоджують в діапазоні температур 20...1200 °С. Критерієм термостійкості при цьому є стан покриття після випробувань, зокрема, відсутність тріщин і відшарувань від підкладки. На жаль, при цьому, як правило, не аналізується кількісний вплив окремих параметрів, таких наприклад, як співвідношення товщин покриття і підкладки, їх жорсткостей (модулів пружності), коефіцієнтів лінійного температурного розширення (КЛТР), наявність початкових напружень і т.д. Це ускладнює узагальнення результатів численних експериментів, що проводяться на зразках з різних матеріалів підкладок і покриттів. Тому вивчення напруженого стану при нагріванні - охолодженні зразків з покриттями та впливу на нього різних факторів актуально.

Товщину покриття визначають вимірювальними інструментами, ваговими засобами, спеціальними товщиномірами та іншими прийомами. Властивості матеріалів які були застосовані при іспитах представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Властивості матеріалів

№ Вар.	Матеріал 1	Матеріал 2,3
--------	------------	--------------

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

	Модуль пружності, 10 ⁵ МПа	ТКЛР, 10 ⁻⁶ 1/град	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності, МПа	ТКЛР, 10 ⁻⁶ 1/град	Коефіцієнт Пуассона
1	1	17	0,3	2·10 ⁵	12,1·10 ⁻⁶	0,3
2	2	17	0,3	2·10 ⁵	12,1·10 ⁻⁶	0,3
3	3	17	0,3	2·10 ⁵	12,1·10 ⁻⁶	0,3

При вимірюванні товщини покриття вимірювальними інструментами необхідне знання початкових розмірів напилюваного виробу. Зазвичай товщину покриття на деталях простої форми і невеликих розмірів вимірюють штангенциркулями. Після механічної обробки, як правило, для визначення товщини покриттів використовують мікроміри. При вимірюванні товщини покриттів на складних поверхнях невеликих виробів використовують вагові методи. Для цього повинна бути відома початкова маса виробу і розміри напилюваної поверхні. Ваговий метод дозволяє визначати середню товщину покриття. Найбільш простим є визначення товщини покриттів спеціальними приладами-товщиномірами. Як правило, такі прилади настроюють на один або декілька видів матеріалів покриттів. Товщиноміри не використовують у випадках, коли потрібна висока точність вимірювання. Погрішність вимірювання цих приладів складає в середньому 10%. Для точних вимірювань необхідно використати штангенциркулі і мікроміри.

При зовнішньому огляді покриття контролюється загальний стан поверхні напилення, порівнюється з еталоном наявність зовнішніх дефектів: тріщин, сколювань, спучувань і т.д. Для більш ретельного огляду застосовують лупи із збільшенням до 10 і більше разів.

2.4 Вплив товщини та жорсткості покриття на напружено-деформований стан

Методом комп'ютерного моделювання та аналітичним розрахунком виконано аналіз напруженого стану при нагріванні-охолодженні плоского зразка з напиленим шаром, що має менший КЛТР, ніж матеріал підкладки.

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

Встановлено залежність максимальних напружень в ньому від його жорсткості і відносної товщини.

Для підвищення працездатності і довговічності деталей газових турбін широко використовуються спеціальні захисні покриття. Ці покриття повинні володіти достатньою пластичністю і міцністю і не розтріскуватися під дією механічних і термічних навантажень. На опір покриття руйнування великий вплив мають термічні напруження, що у результаті різниці коефіцієнта лінійного температурного розширення (КЛТР) підкладки і напиляного шару, зміни температури як у процесі виготовлення (нанесення покриття і термообробки), так і роботи деталі.

Це ускладнює узагальнення результатів численних експериментів, що проводяться на зразках з різних матеріалів підкладок і покриттів. Тому вивчення напруженого стану при нагріванні - охолодженні зразків з покриттями та впливу на нього різних факторів актуально.

Дослідження виконувалися методом комп'ютерного моделювання на базі методу скінченних елементів (КЕ) з використанням програмного комплексу ANSYS. Досліджували зразки типу плоскої пластини з нанесеним на верхню поверхню покриттям, які зазвичай використовуються при випробуваннях на термостійкість. Аналізувалися поля і епюри напружень в пружній стадії роботи на зразках з покриттям при підвищенні температури на 100 градусів. Фізичні і звичайно-елементні (КЕ) моделі показані на рис. 2.1.

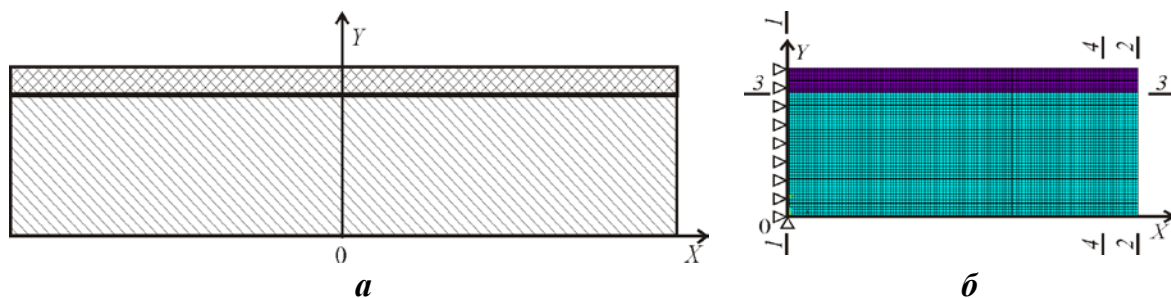


Рисунок 2.1 Фізична (а) і скінчено-елементна (б) моделі досліджуваних зразків з напиляним шаром

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

25

Вивчалися два варіанти моделей: з покриттям малої (варіант 1) і великий (варіант 2) жорсткості. В обох варіантах КЛТР матеріалу прошарку приймався менше, ніж у матеріалу підкладки. Прийняті при моделюванні розміри і фізико-механічні властивості наведені в таблиці 2.2. Коефіцієнти Пуассона для всіх матеріалів підкладок і покриттів приймалися 0,3.

Варіанти моделей з напиленням шаром:

Довжина зразку 30 мм. Товщина напиленого шару $a_1 = 0,2 \dots 1$ мм.

Товщина підкладки $a_2 = 1$ та 2 мм. Властивості матеріалу:

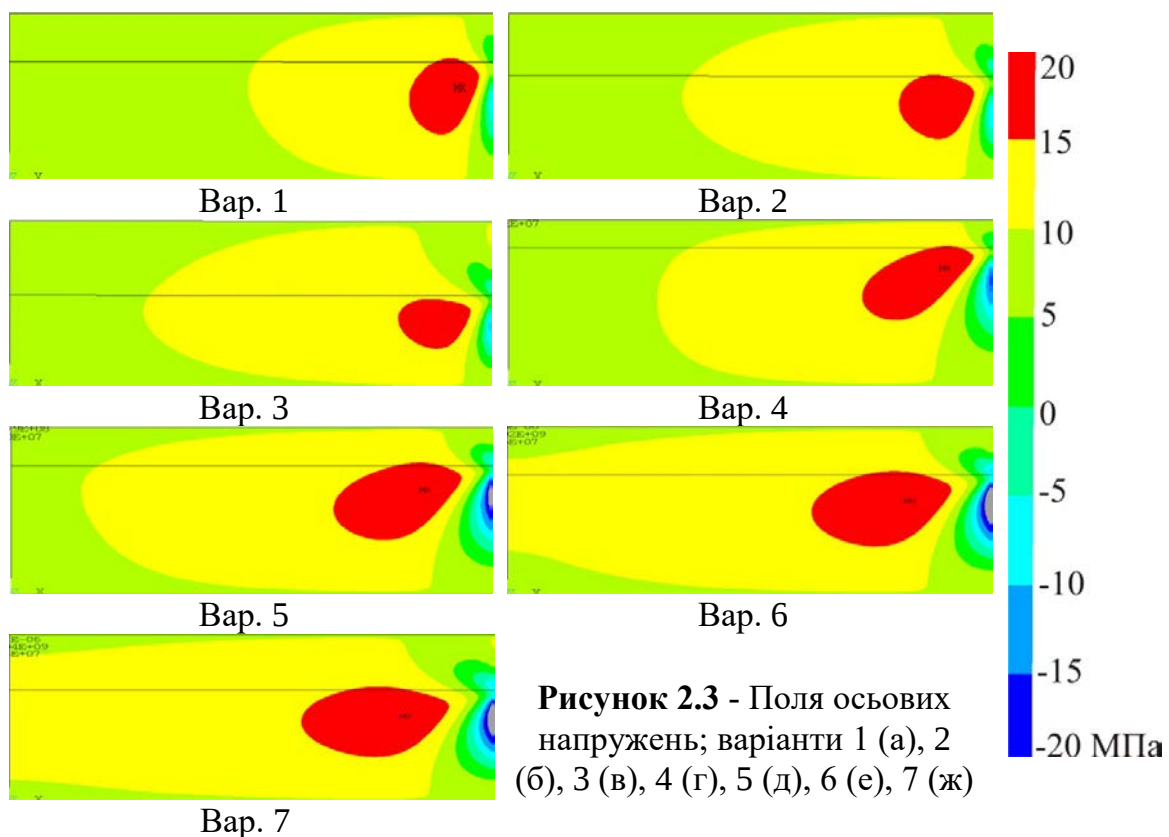
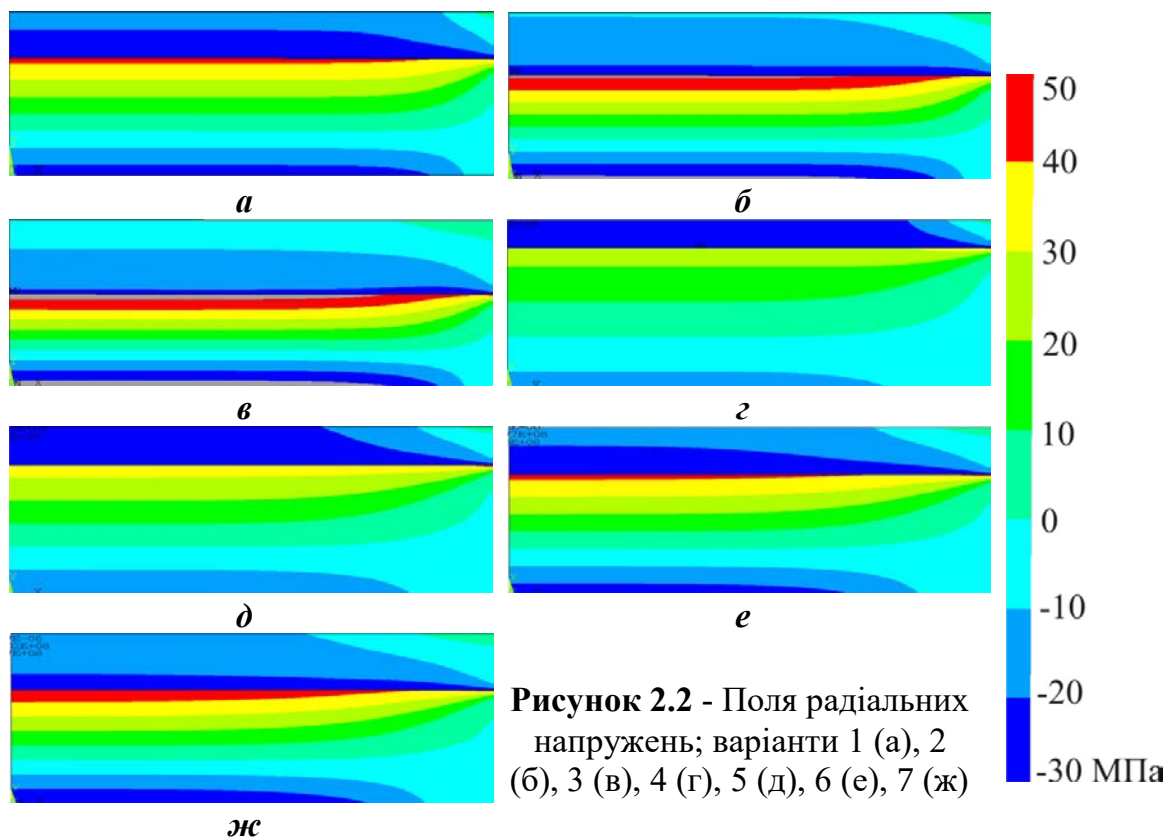
основа $E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\text{КЛТР}_2 = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град; покриття малої жорсткості $E_1 = 0,5 \cdot 10^5$ МПа; покриття великої жорсткості $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа; для обох варіантів слою $\text{КЛТР}_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

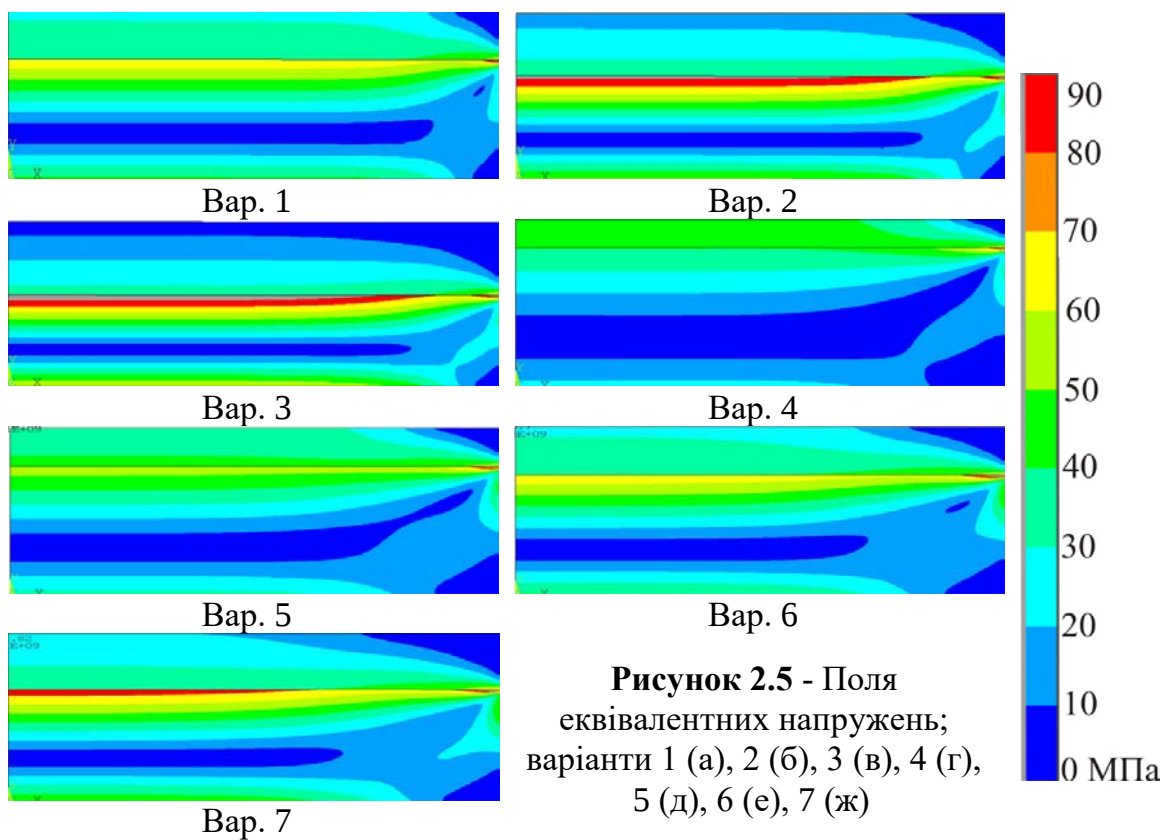
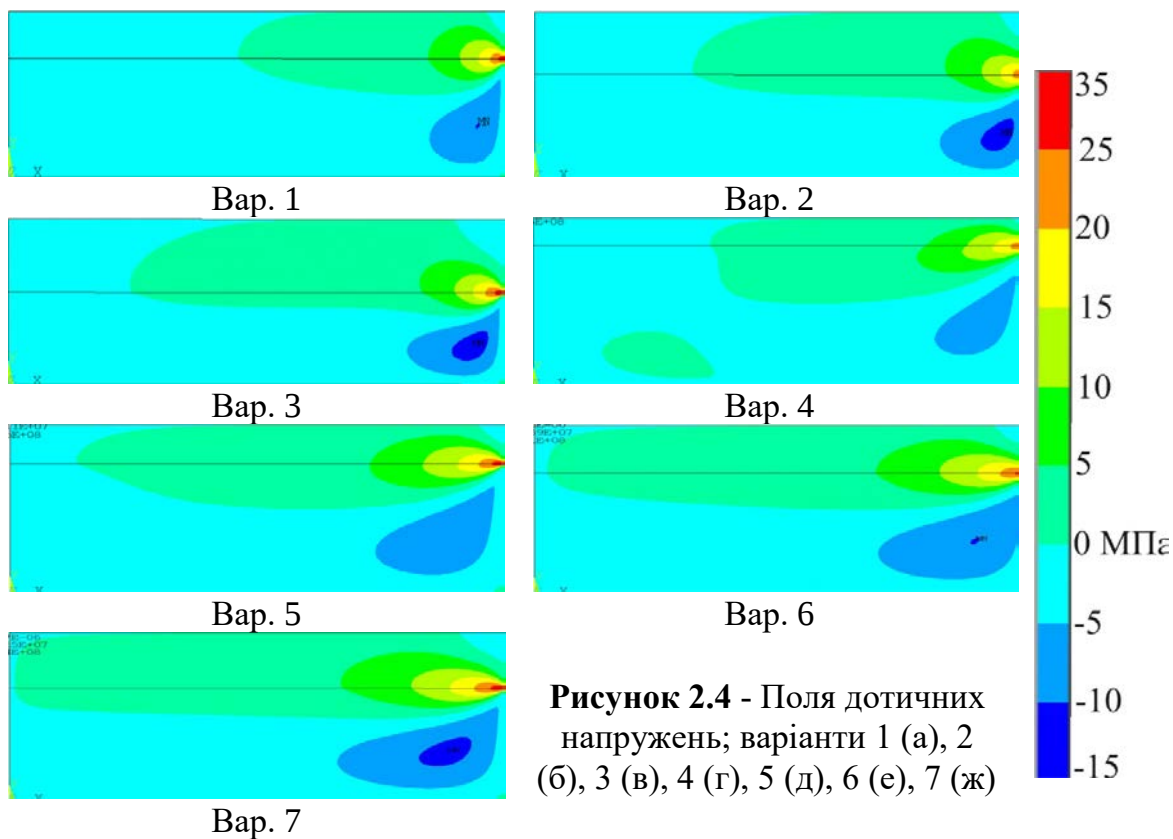
Таблиця 2.2 - Варіанти моделювання для м'якого та жорсткого шарів

№ варіанта	a_2	a_1	a_1/a_2
1	1	0,4	0,4
2	1	0,6	0,6
3	1	0,8	0,8
4	2	0,4	0,2
5	2	0,6	0,3
6	2	0,8	0,4
7	2	1	0,5

Аналіз полів поздовжніх, поперечних і дотичних напружень у перерізі вузла показав, що їх характер практично однаковий в обох варіантах вузлів і при всіх співвідношеннях товщин. На більшій частині довжини вузла поздовжні напруження зберігають постійну величину і лише поблизу торця, на відстані, що дорівнює товщині, починають помітно знижуватися. Це відповідає загальним принципам механіки і говорить про те, що на більшій частині довжини зразка в середній його частині поперечні перетину залишаються плоскими, викривляючись тільки поблизу торців.

Поля напряжень для варіанту задачі з малою жорсткістю:





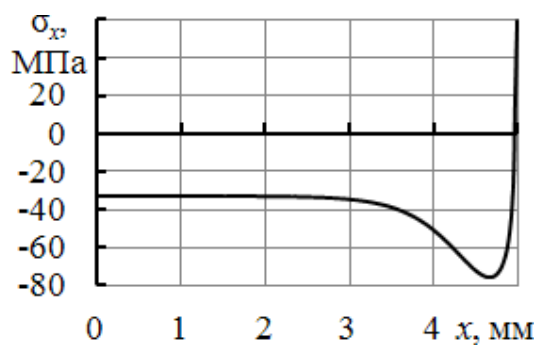
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

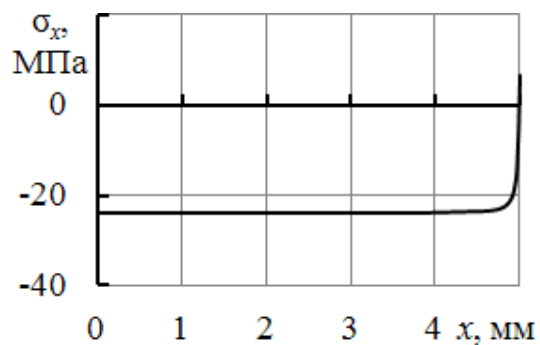
Арк.

28

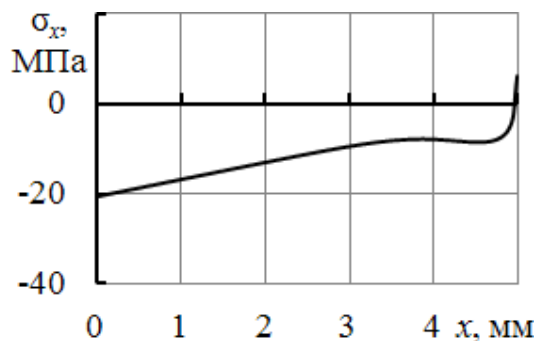
Епюри для путі 1-1



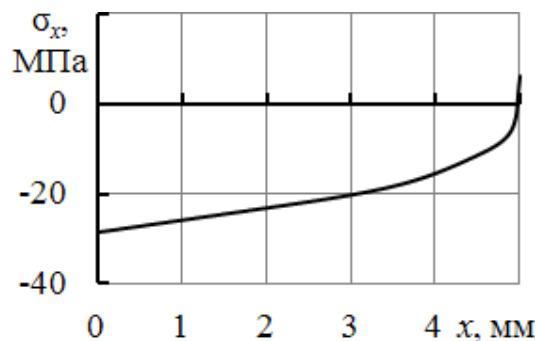
Вар. 1



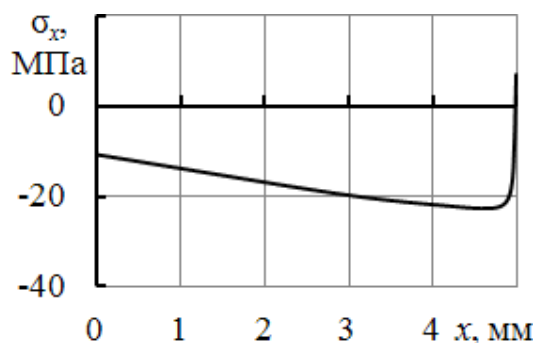
Вар. 2



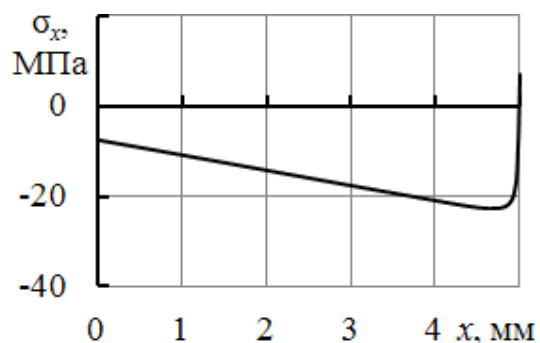
Вар. 3



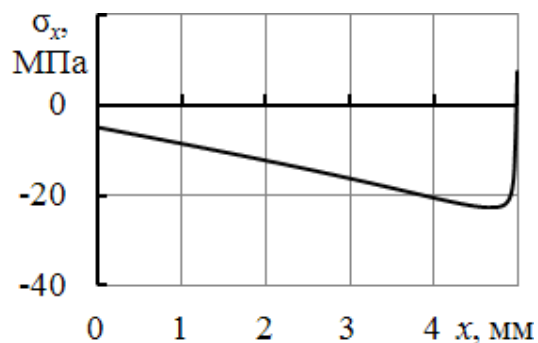
Вар. 4



Вар. 5

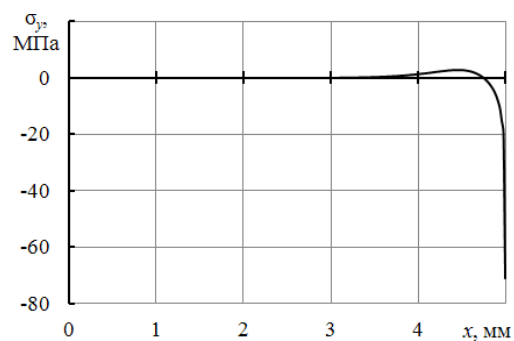


Вар. 6

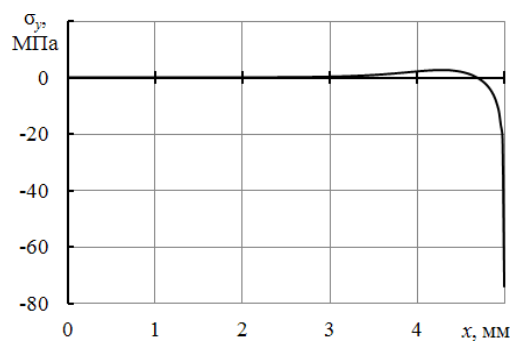


Вар. 7

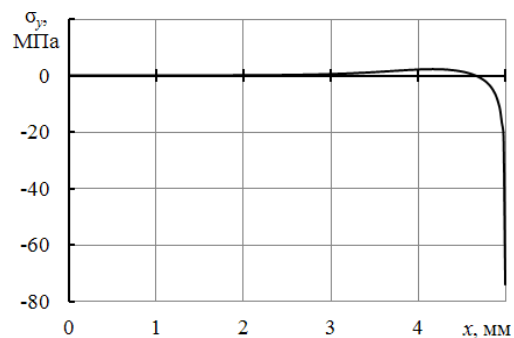
Рисунок 2.6 - Епюри радіальних напружень по путі 1-1 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



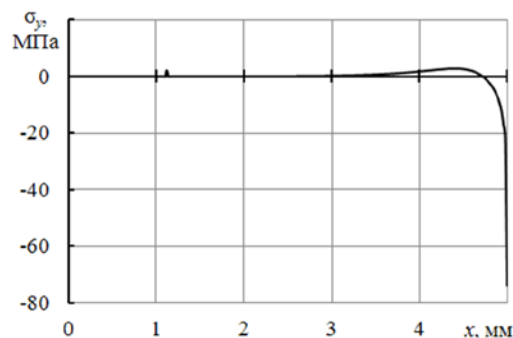
Вар. 1



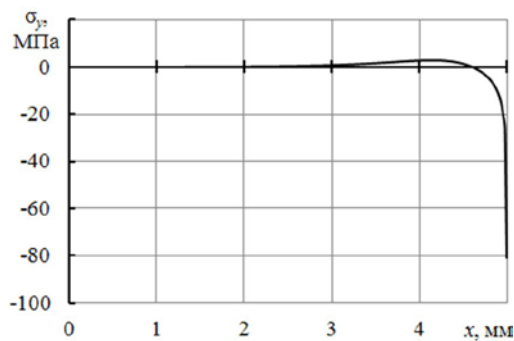
Вар. 2



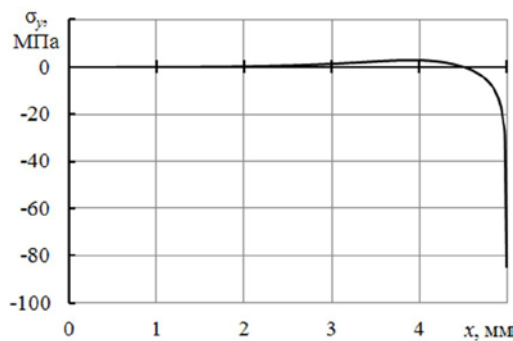
Вар. 3



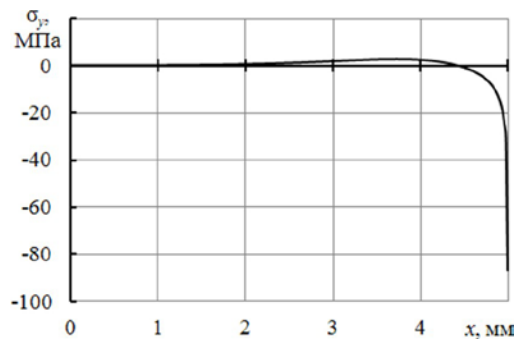
Вар. 4



Вар. 5

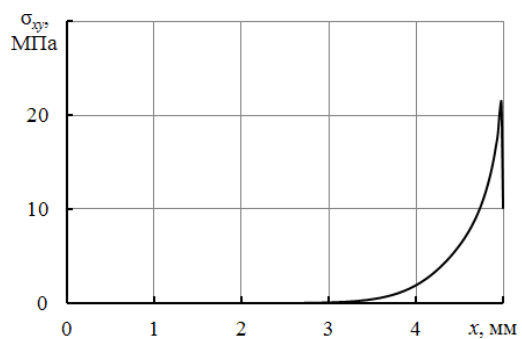


Вар. 6

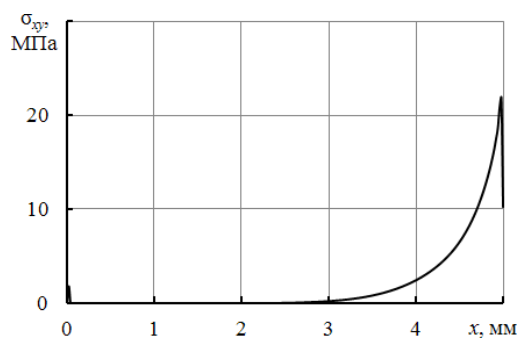


Вар. 7

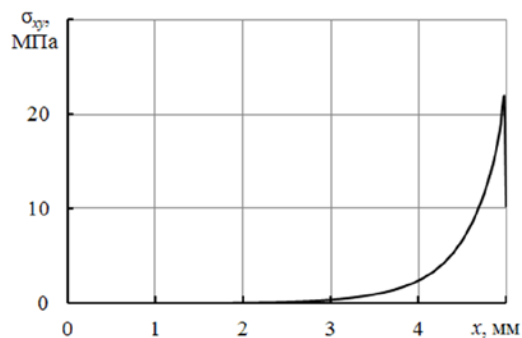
Рисунок 2.7 - Епюри осьових напружень по путі 1-1 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



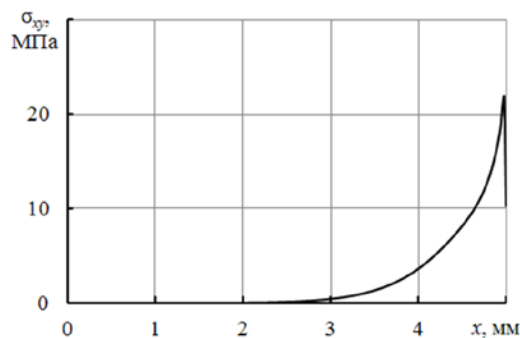
Вар. 1



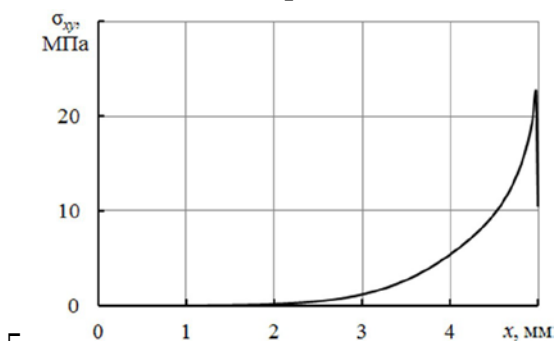
Вар. 2



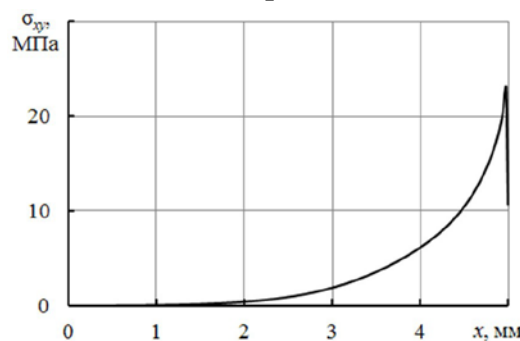
Вар. 3



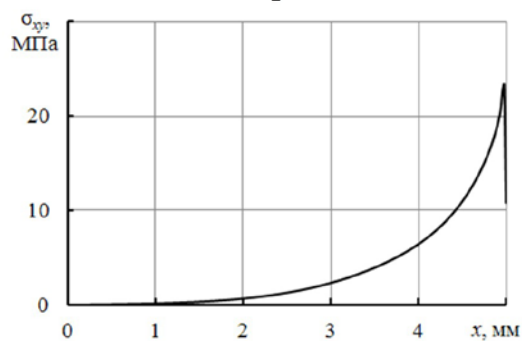
Вар. 4



Вар. 5

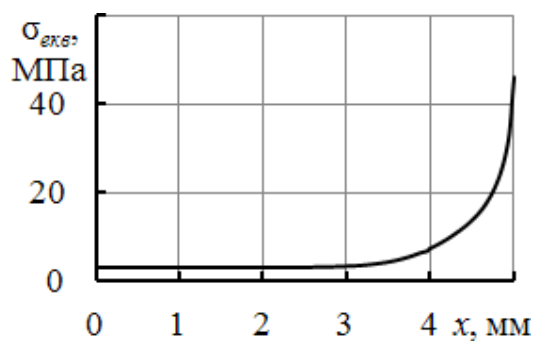


Вар. 6

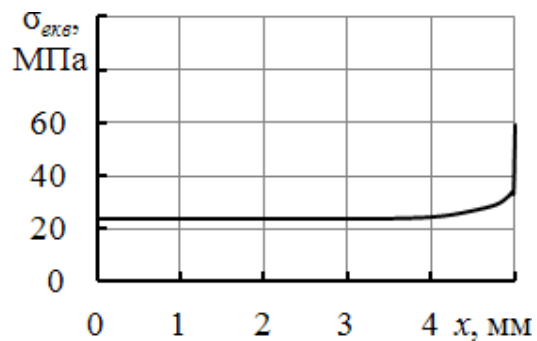


Вар. 7

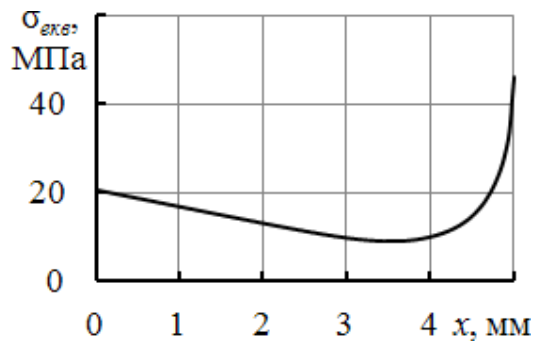
Рисунок 2.8 - Епюри дотичних напружень по пугі 1-1 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



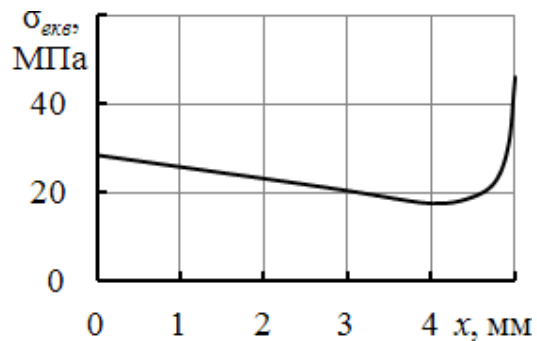
Вар. 1



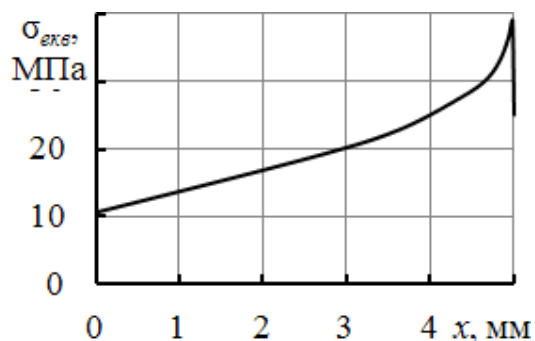
Вар. 2



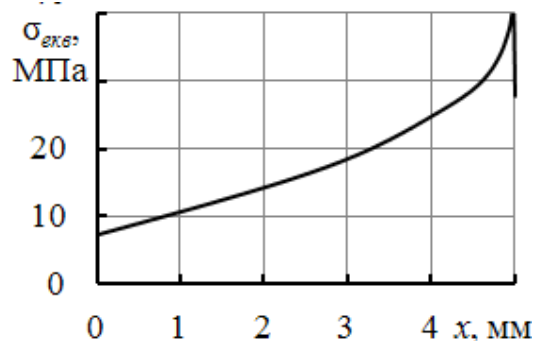
Вар. 3



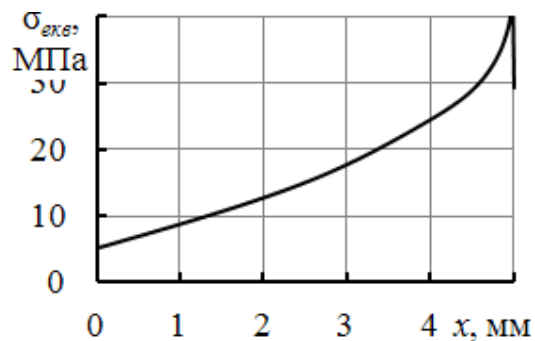
Вар. 4



Вар. 5



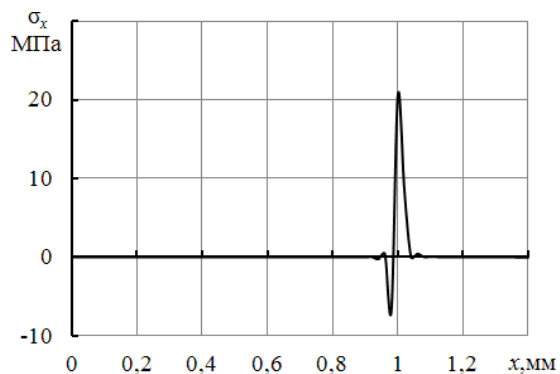
Вар. 6



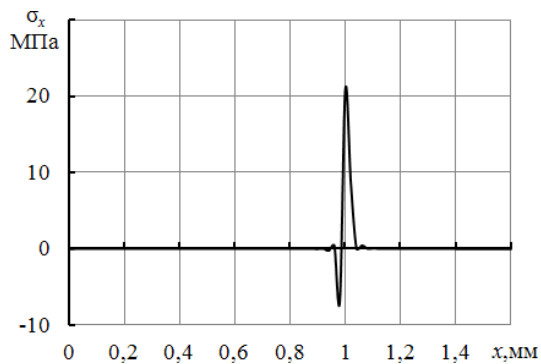
Вар. 7

Рисунок 2.9 - Епюри еквівалентних напружень по путі 1-1 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

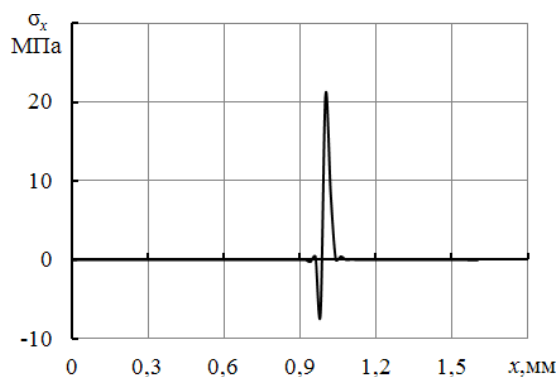
Епюри для путі 2-2



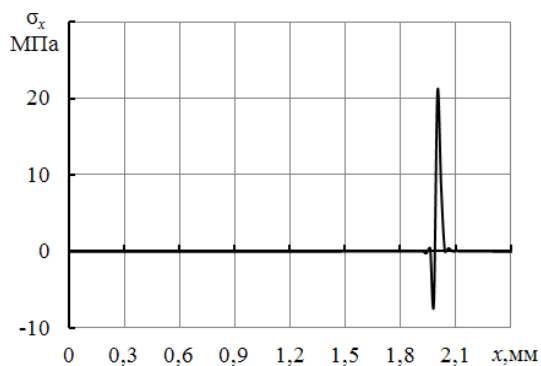
Вар. 1



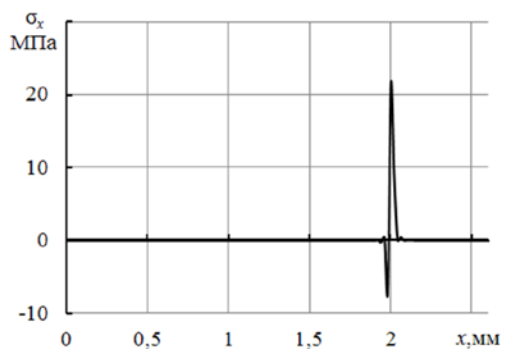
Вар. 2



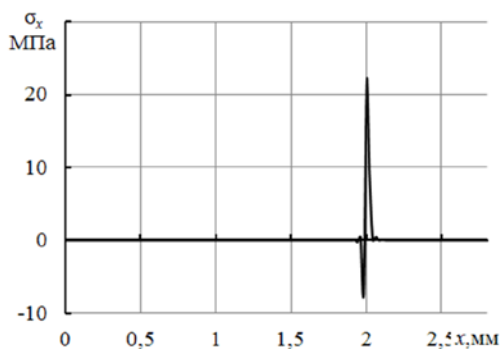
Вар. 3



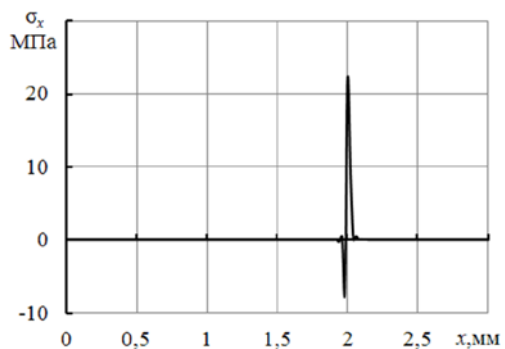
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

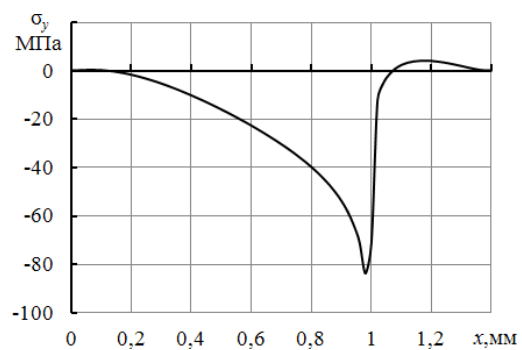
Рисунок 2.10 - Епюри радіальних напружень по путі 2-2 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

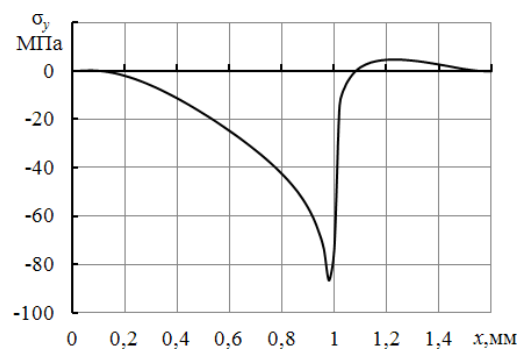
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

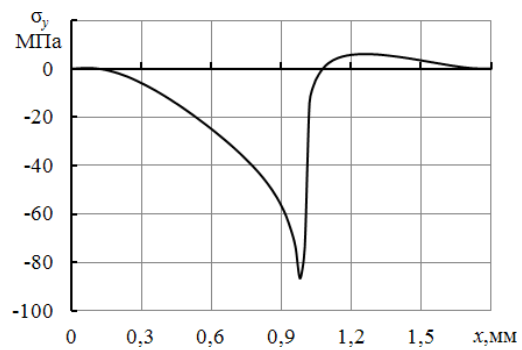
33



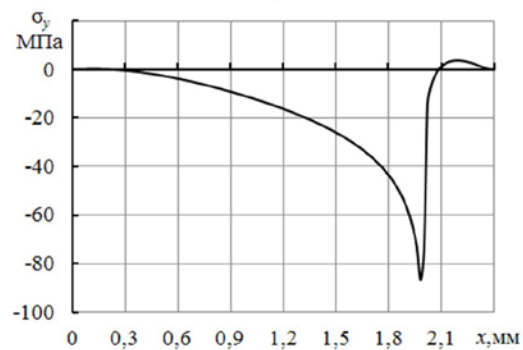
Вар. 1



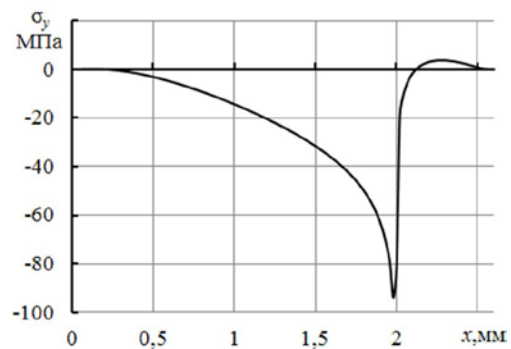
Вар. 2



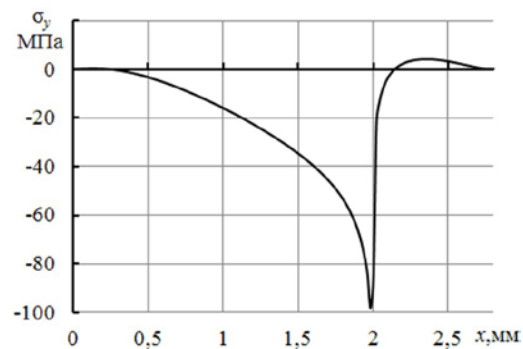
Вар. 3



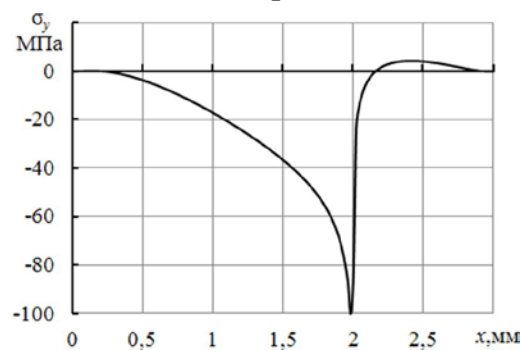
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

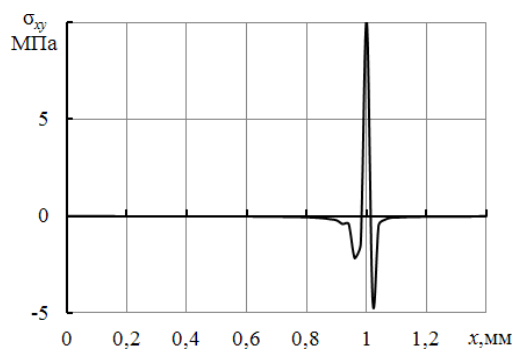
Рисунок 2.11 - Епюри осьових напружень по путі 2-2 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

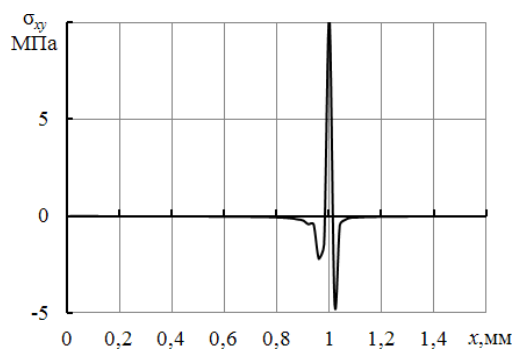
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

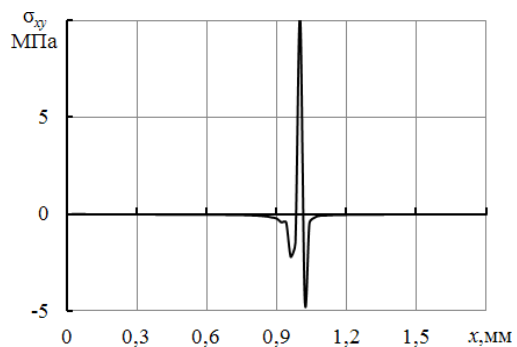
34



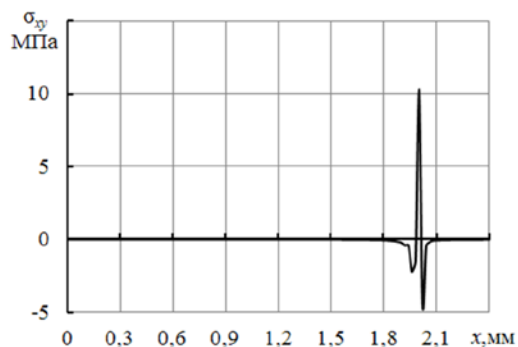
Вар. 1



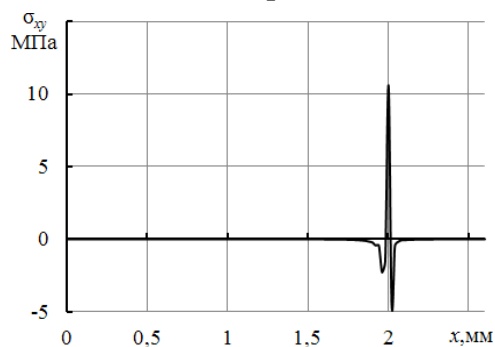
Вар. 2



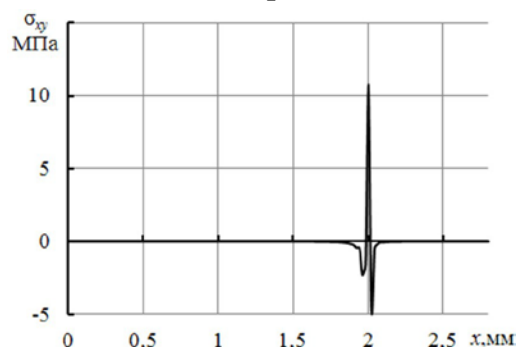
Вар. 3



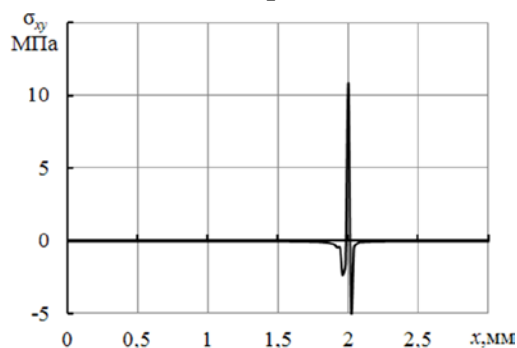
Вар. 4



Вар. 5

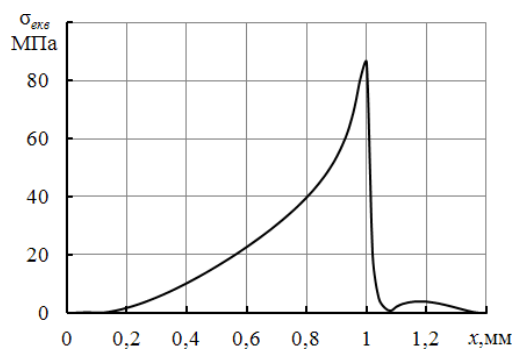


Вар. 6

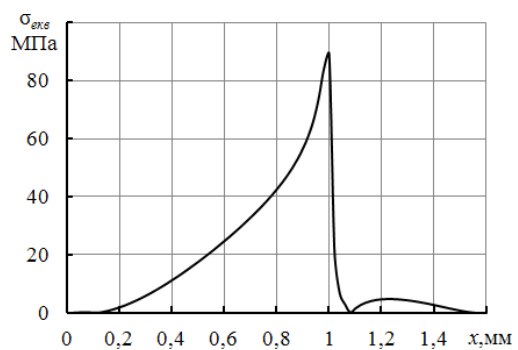


Вар. 7

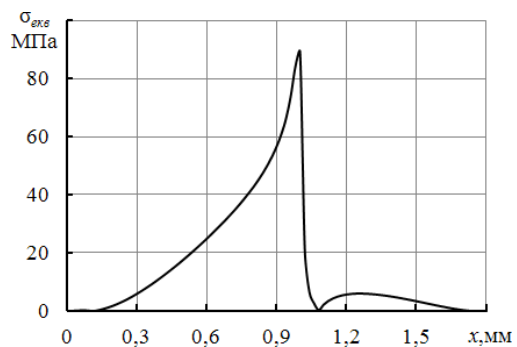
Рисунок 2.12 - Епюри дотичних напружень по путі 2-2 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



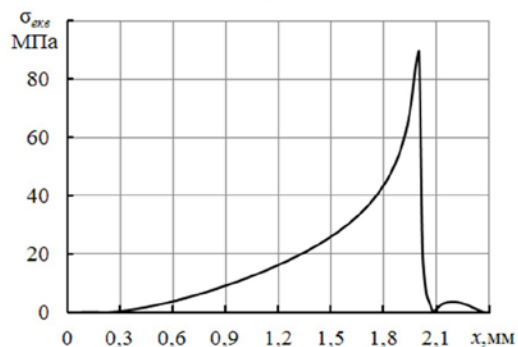
Вар. 1



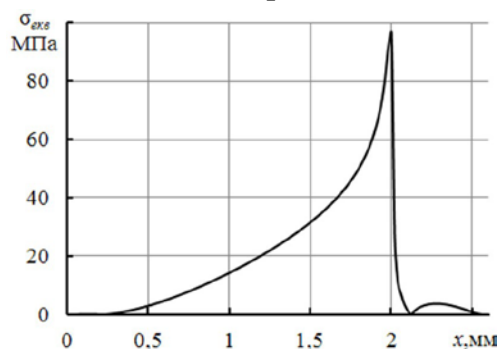
Вар. 2



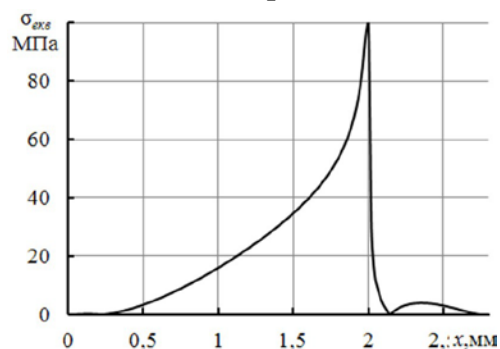
Вар. 3



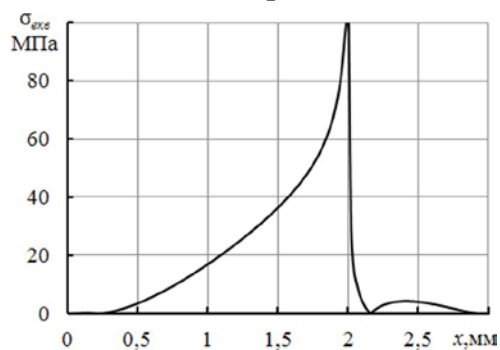
Вар. 4



Вар. 5



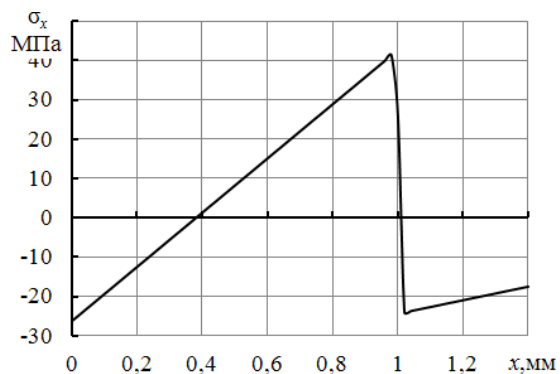
Вар. 6



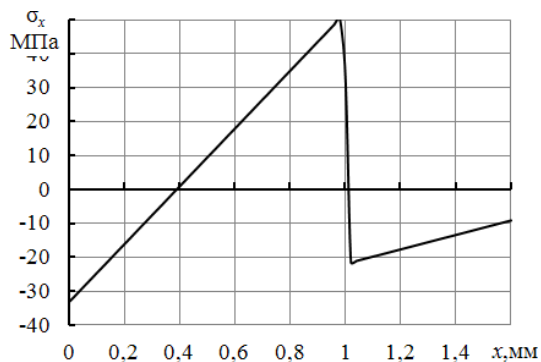
Вар. 7

Рисунок 2.13 - Епюри еквівалентних напружень по путі 2-2 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

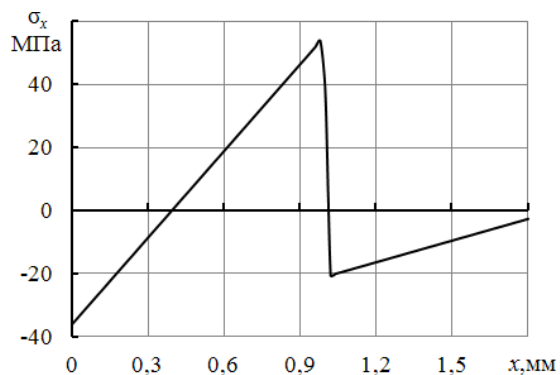
Епюри для путі 3-3



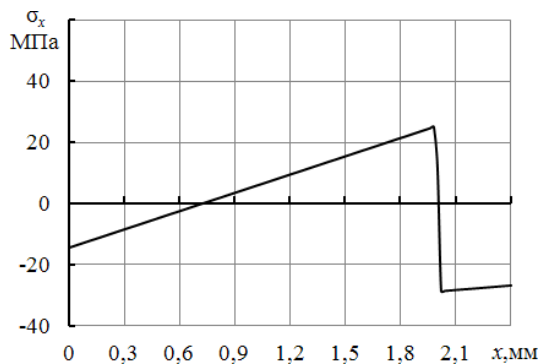
Вар. 1



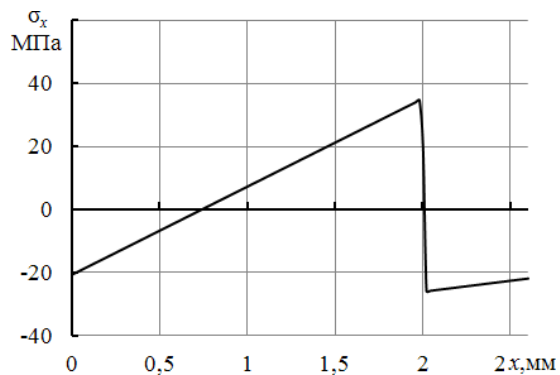
Вар. 2



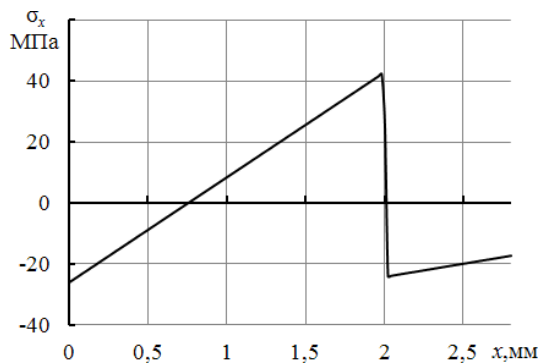
Вар. 3



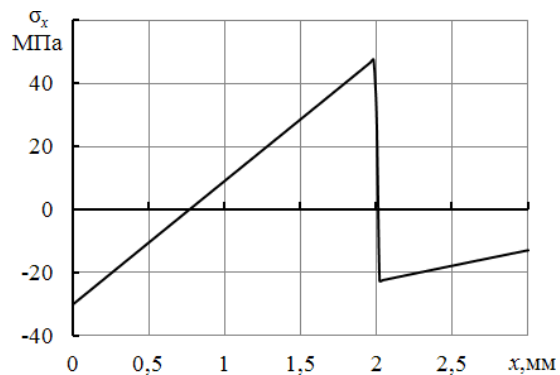
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

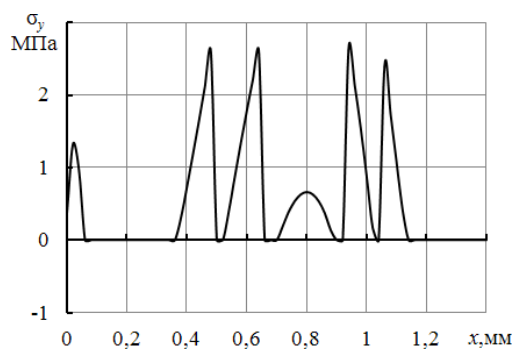
Рисунок 2.14 - Епюри радіальних напружень по путі 3-3 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

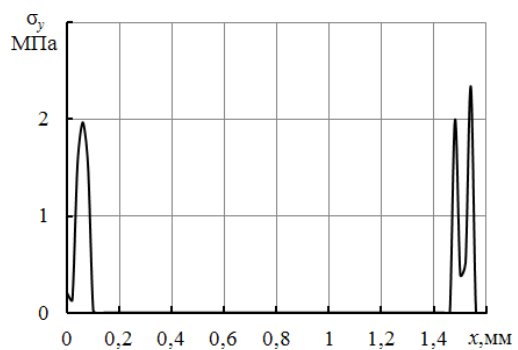
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

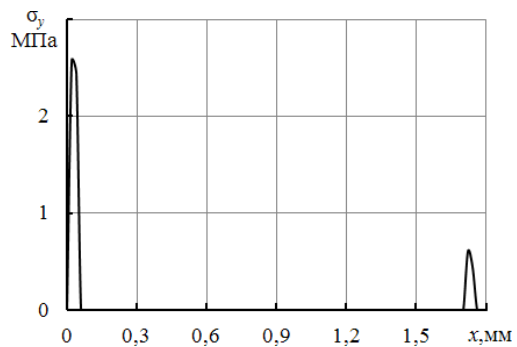
37



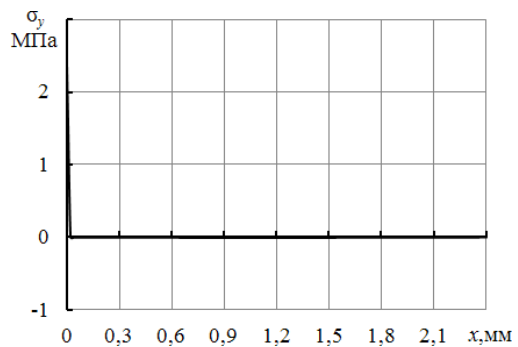
Вар. 1



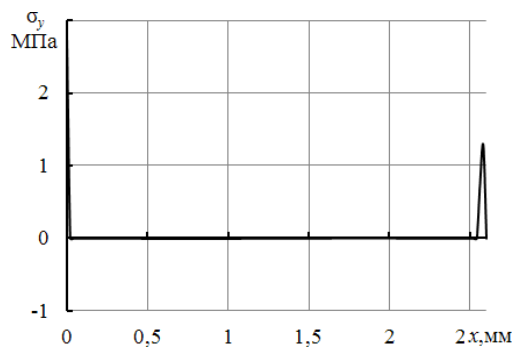
Вар. 2



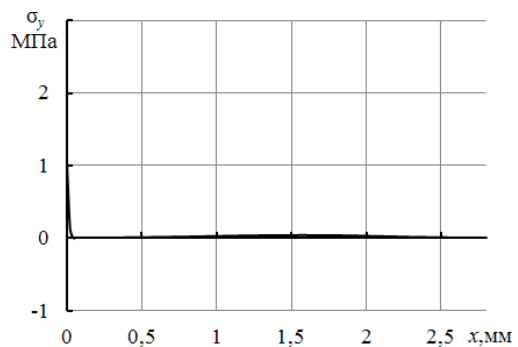
Вар. 3



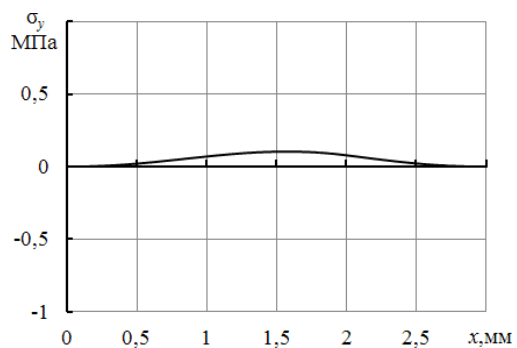
Вар. 4



Вар. 5

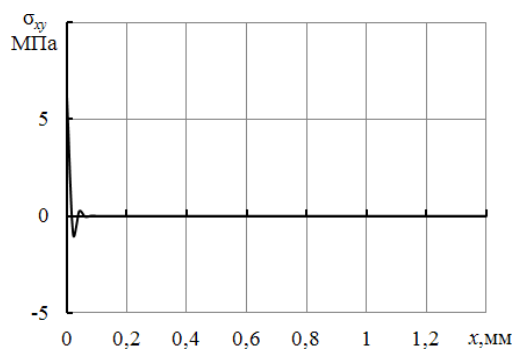


Вар. 6

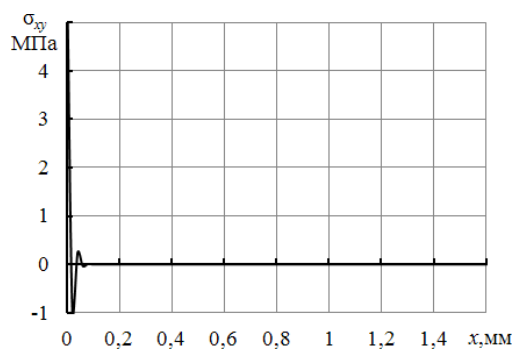


Вар. 7

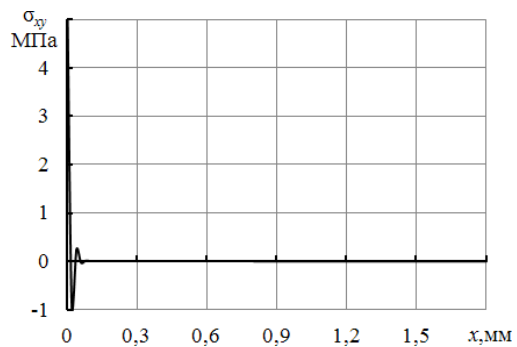
Рисунок 2.15 - Епюри осьових напружень по путі 3-3 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



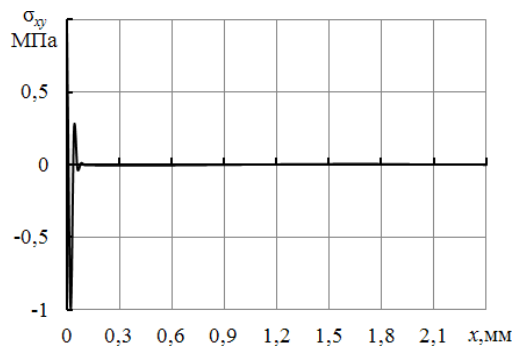
Вар. 1



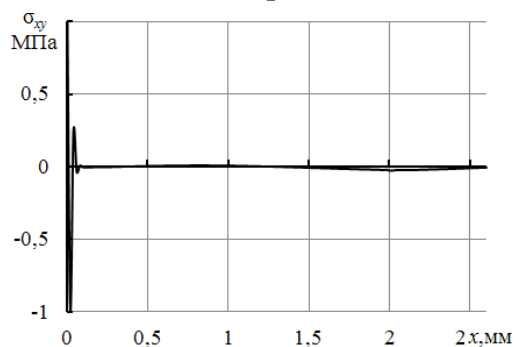
Вар. 2



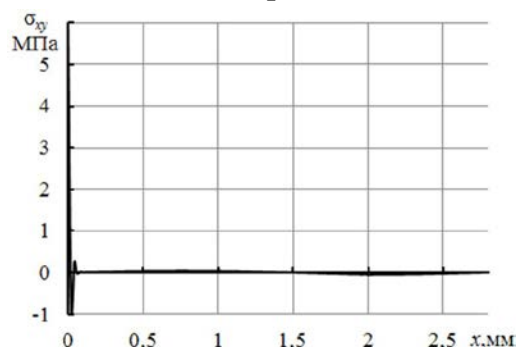
Вар. 3



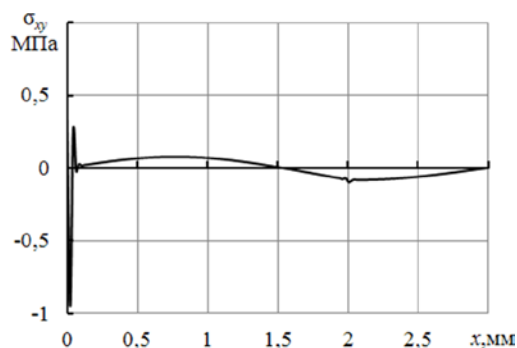
Вар. 4



Вар. 5

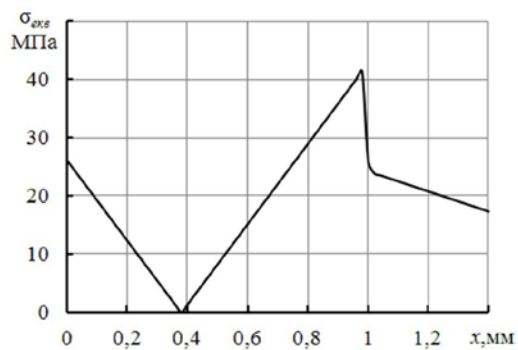


Вар. 6

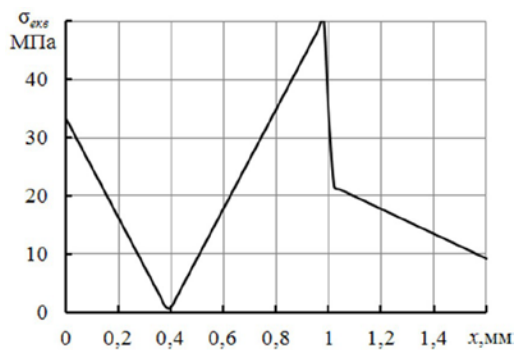


Вар. 7

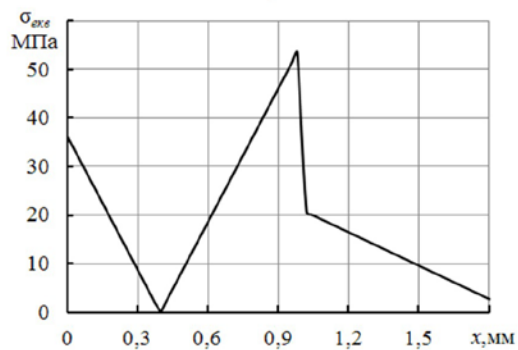
Рисунок 2.16 - Епюри дотичних напружень по путі 3-3 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



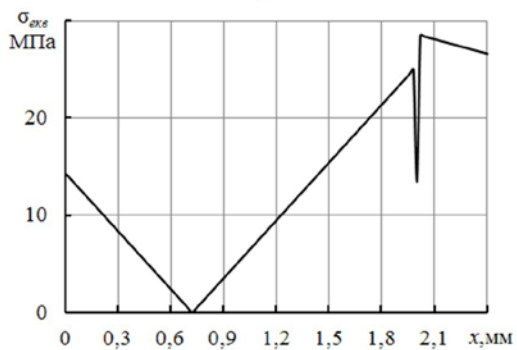
Вар. 1



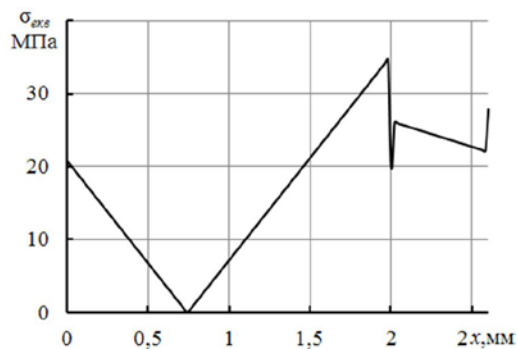
Вар. 2



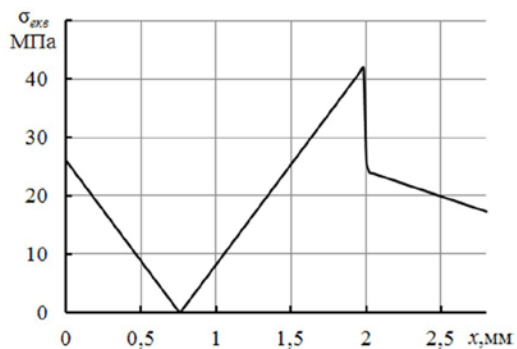
Вар. 3



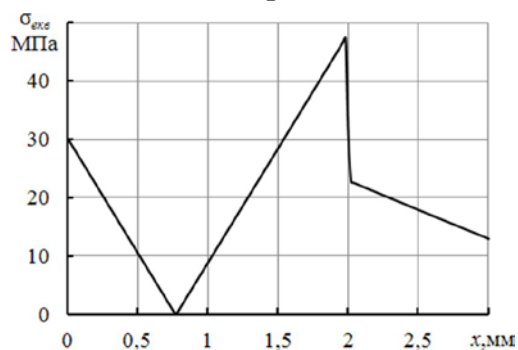
Вар. 4



Вар. 5



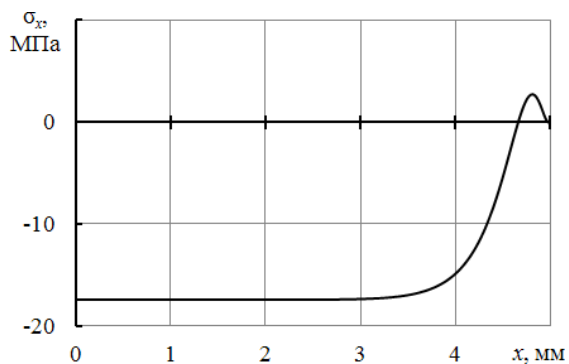
Вар. 6



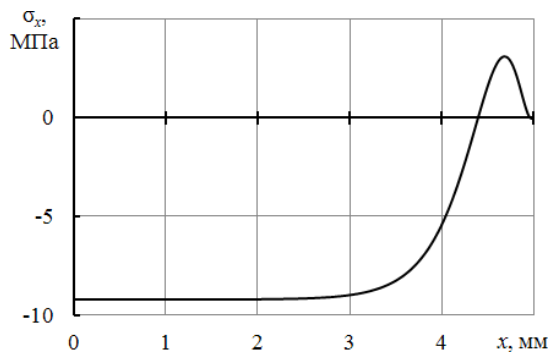
Вар. 7

Рисунок 2.17 - Епюри еквівалентних напружень по путі 3-3 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

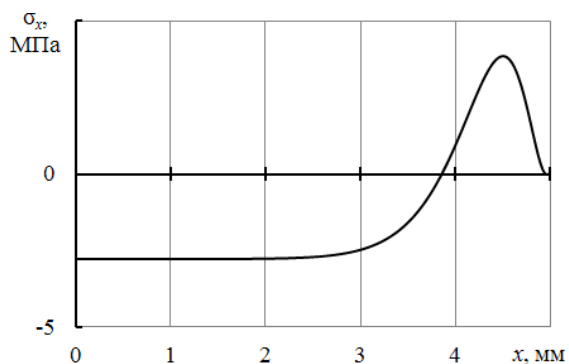
Епюри для путі 4-4



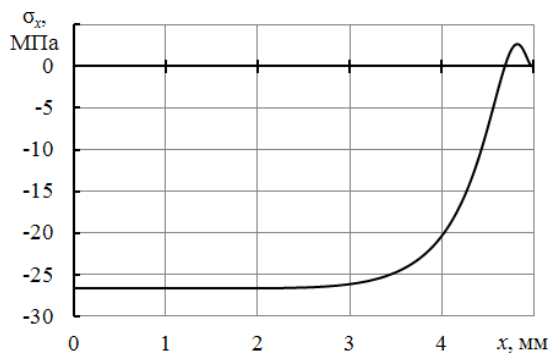
Вар. 1



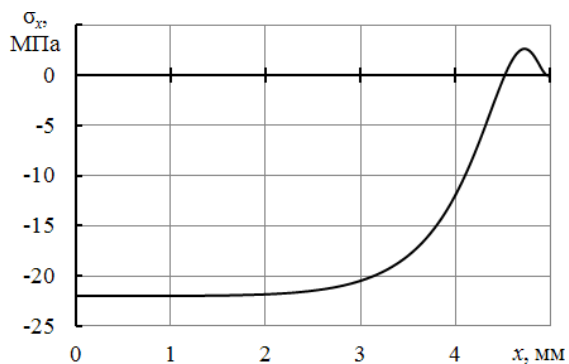
Вар. 2



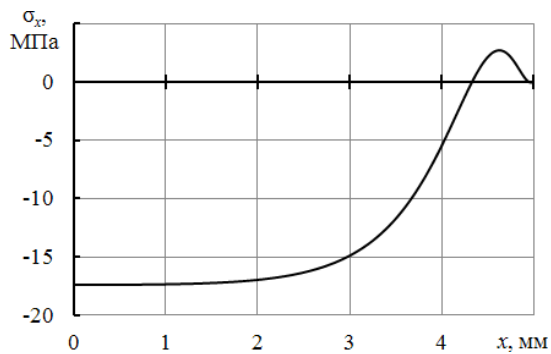
Вар. 3



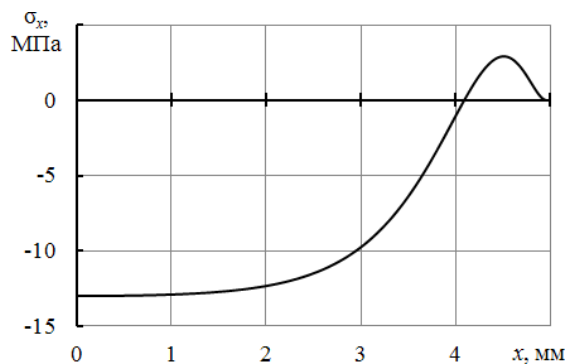
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

Рисунок 2.18 - Епюри радіальних напружень по путі 4-4 для малої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Поля напряжень для варіанту задачі з великою жорсткістю

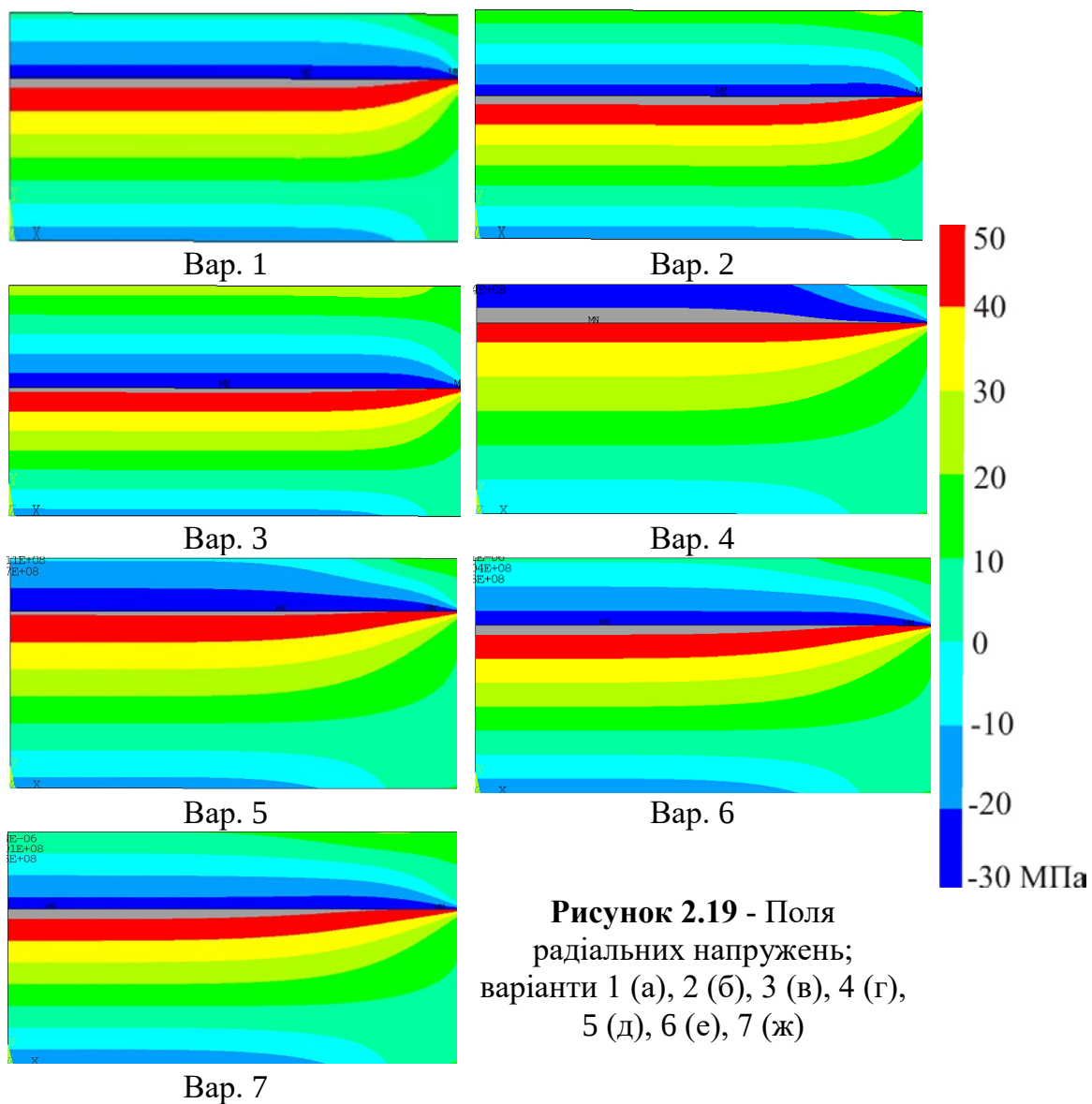
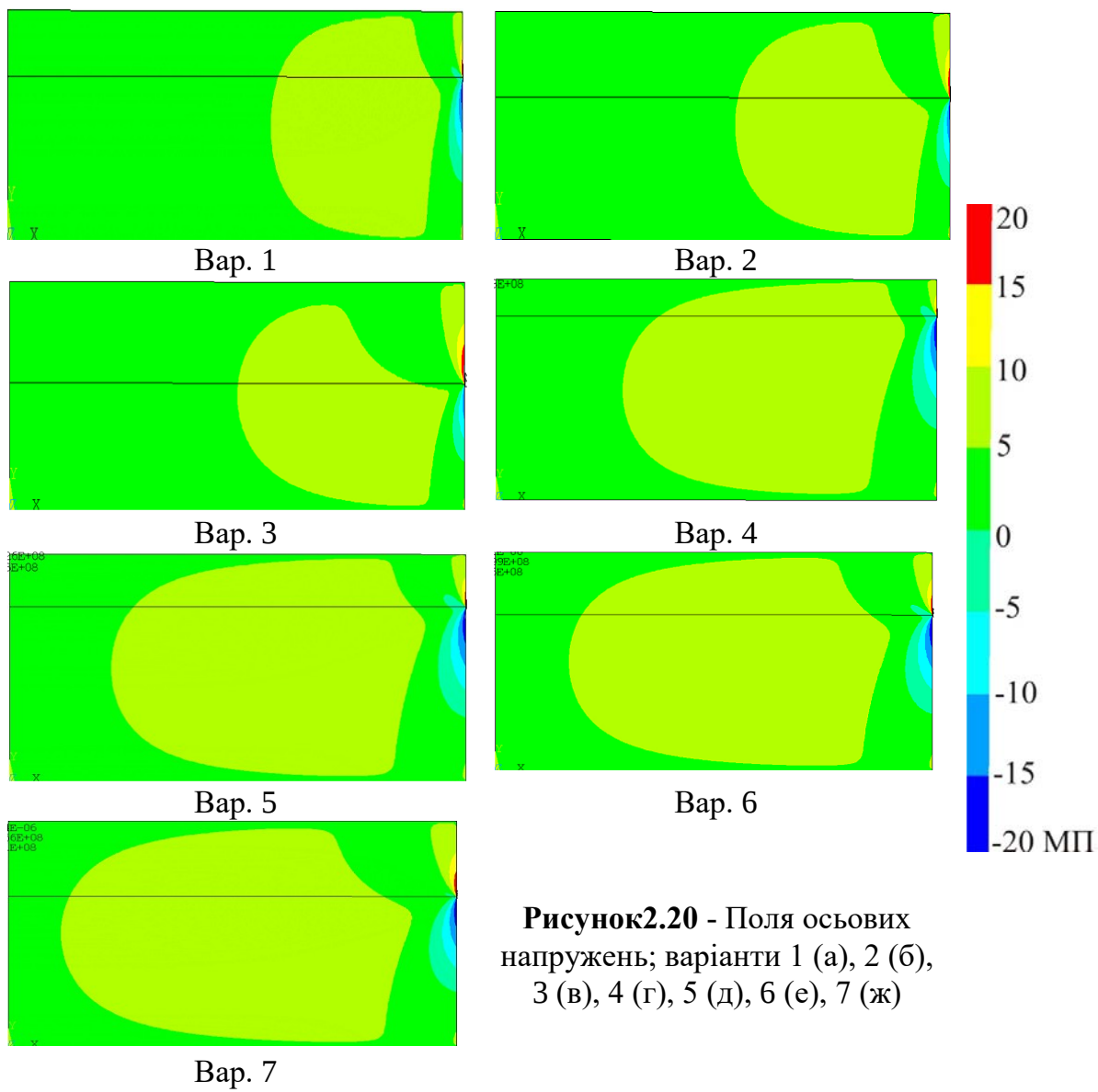


Рисунок 2.19 - Поля
радіальних напружень;
варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г),
5 (д), 6 (е), 7 (ж)



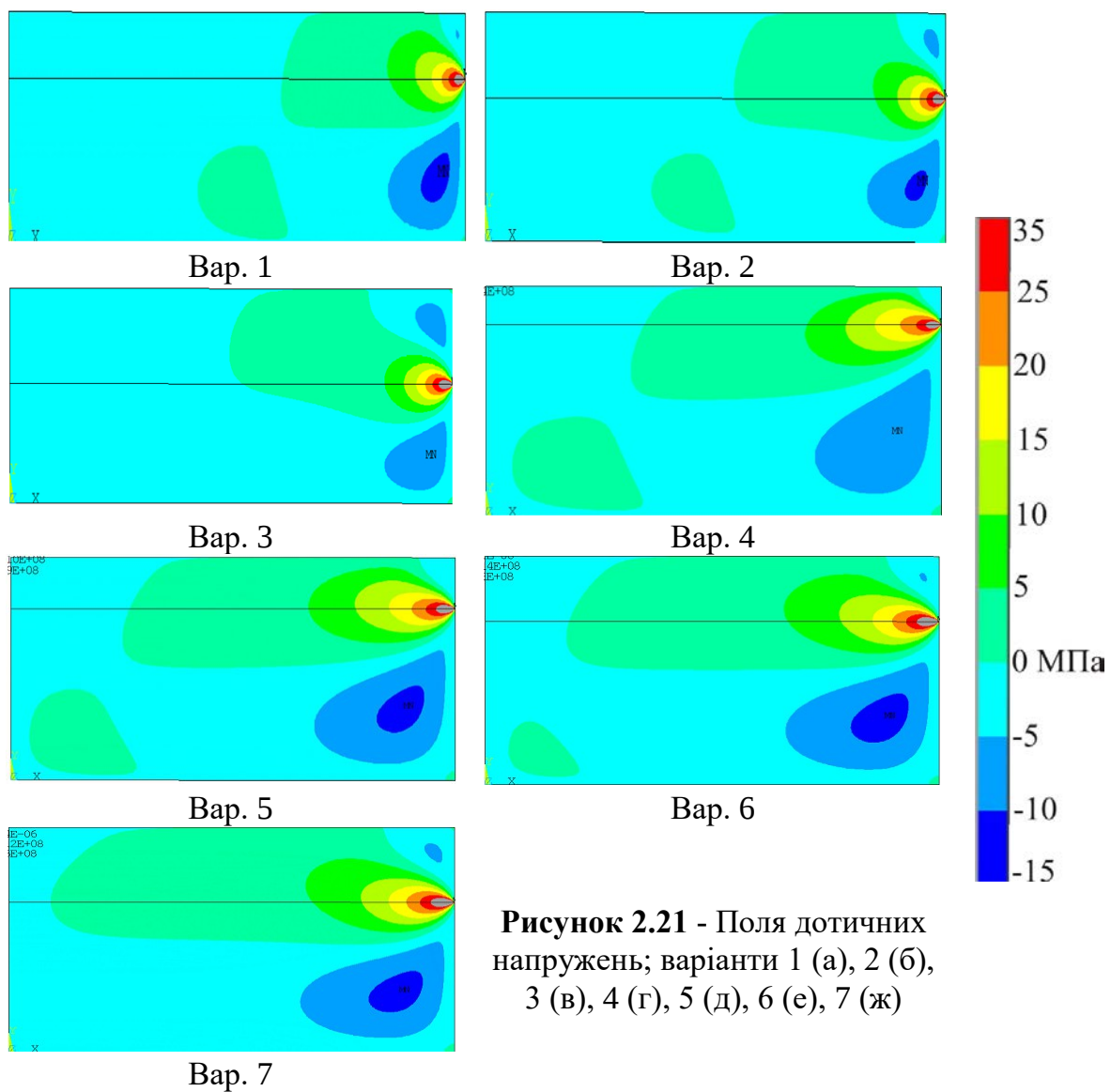
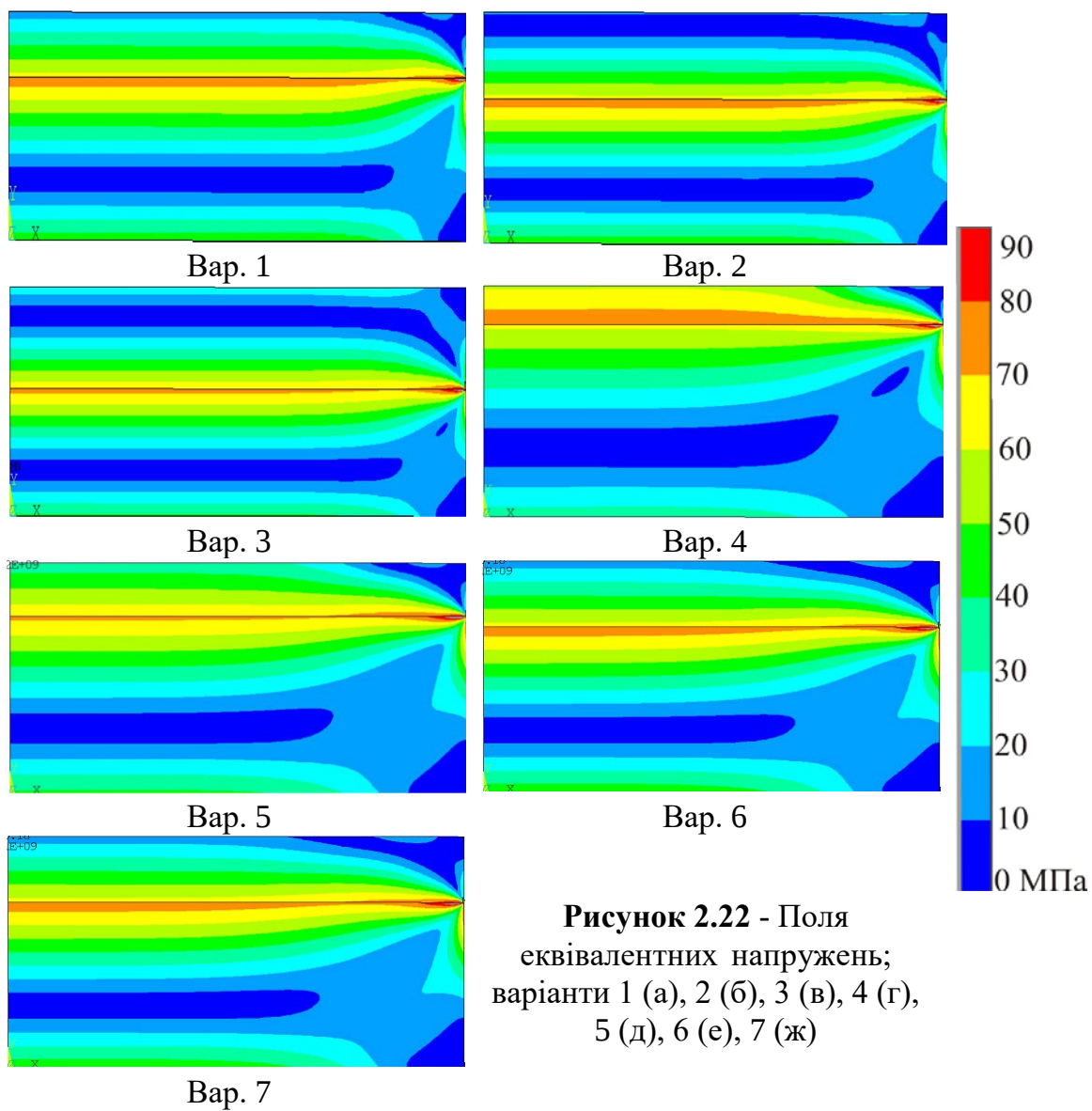
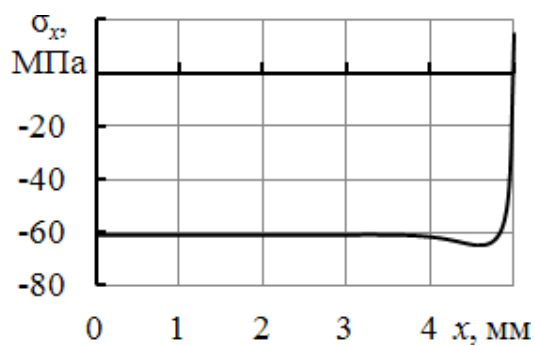


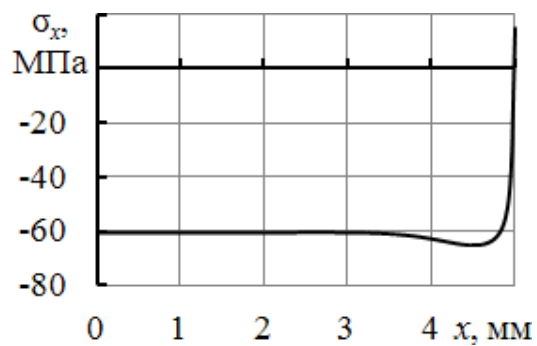
Рисунок 2.21 - Поля дотичних напружень; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



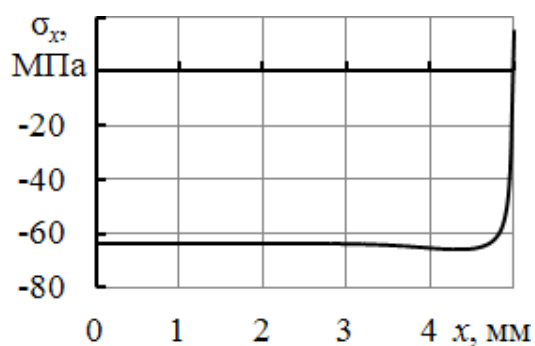
Епюри для путі 1-1



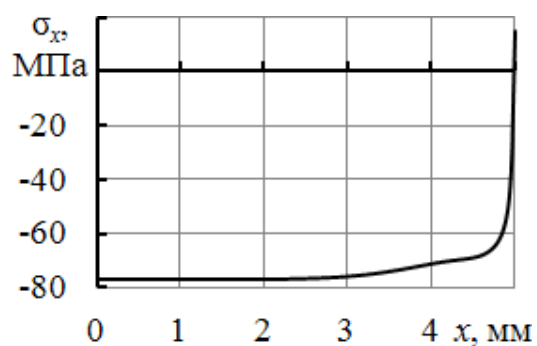
Вар. 1



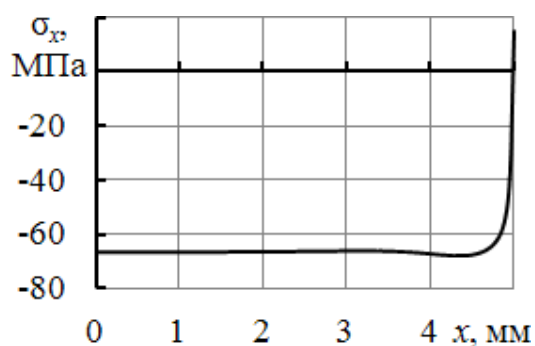
Вар. 2



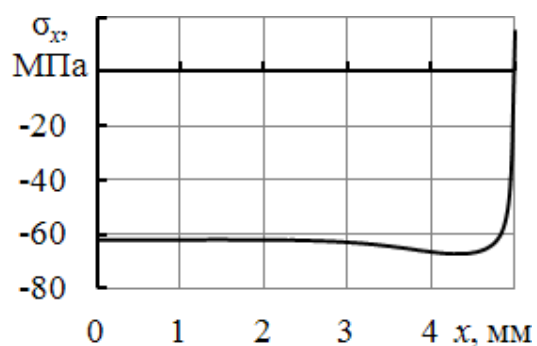
Вар. 3



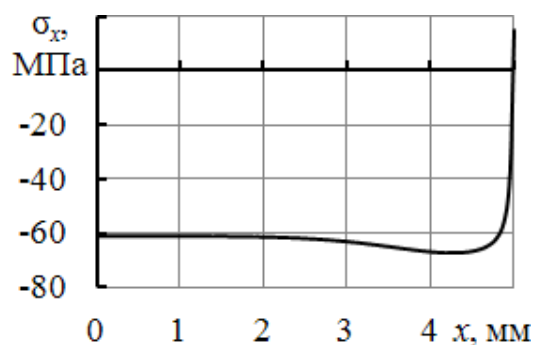
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

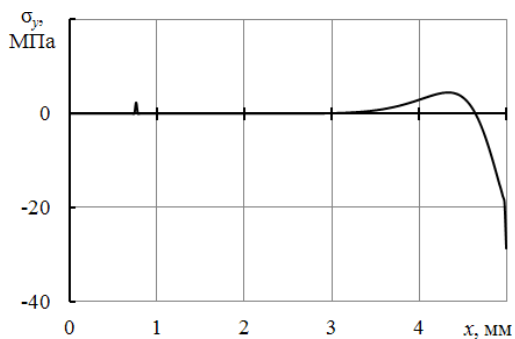
Рисунок 2.23 - Епюри радіальних напружень по путі 1-1 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

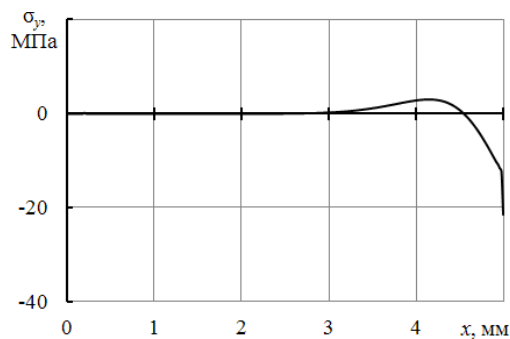
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

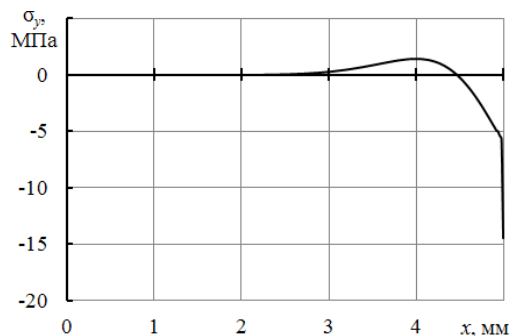
46



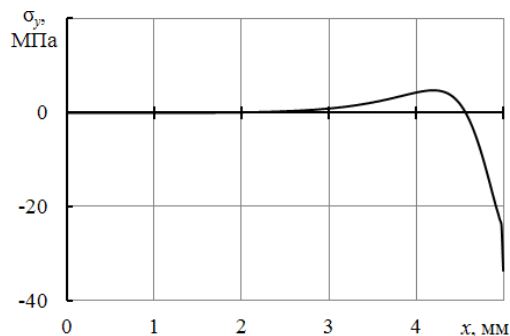
Вар. 1



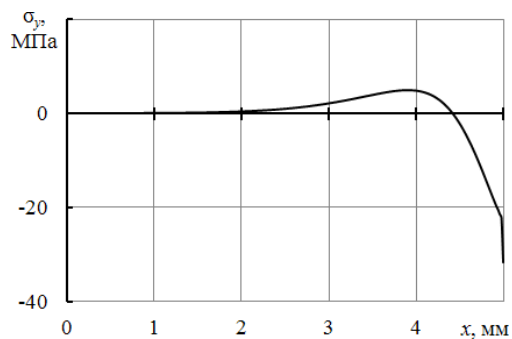
Вар. 2



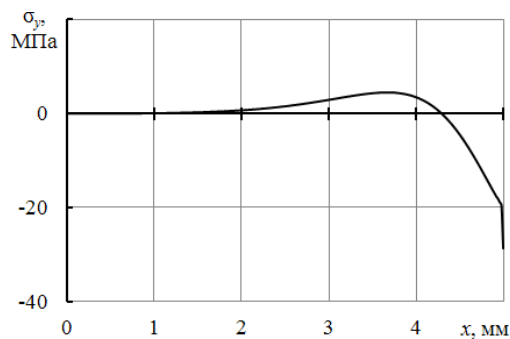
Вар. 3



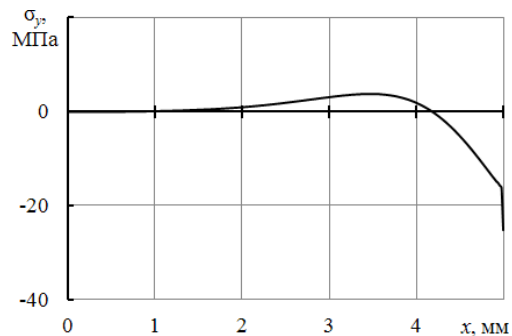
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

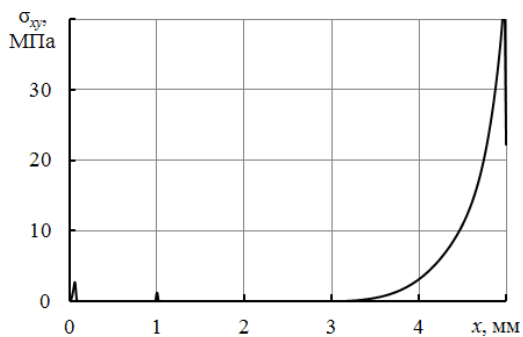
Рисунок 2.24 - Епюри осьових напружень по путі 1-1 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

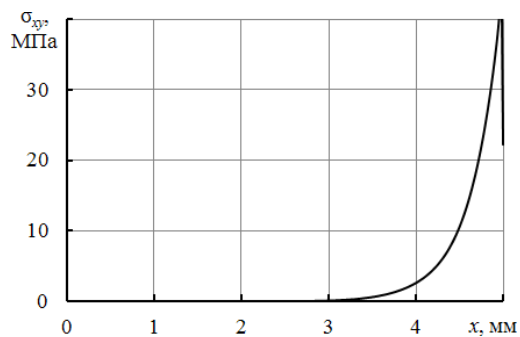
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

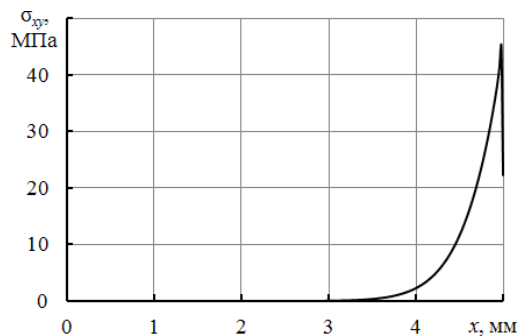
47



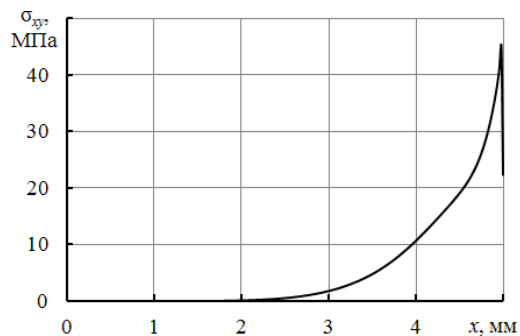
Вар. 1



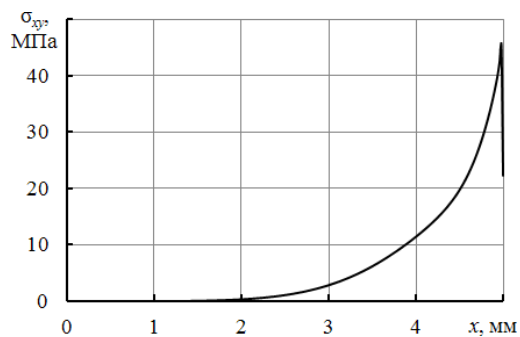
Вар. 2



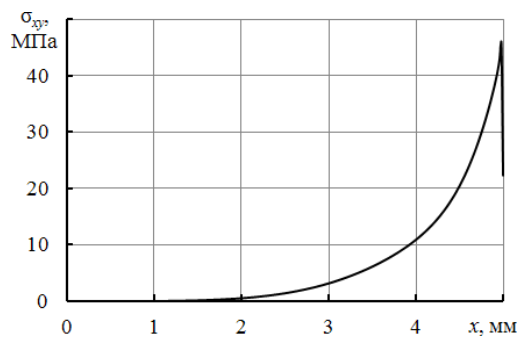
Вар. 3



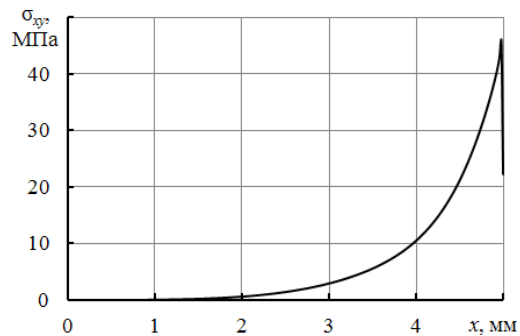
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

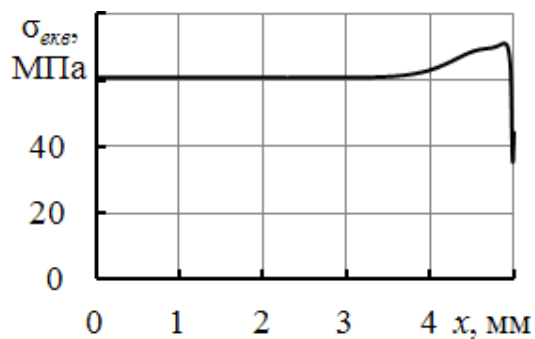
Рисунок 2.25 - Епюри дотичних напружень по путі 1-1 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

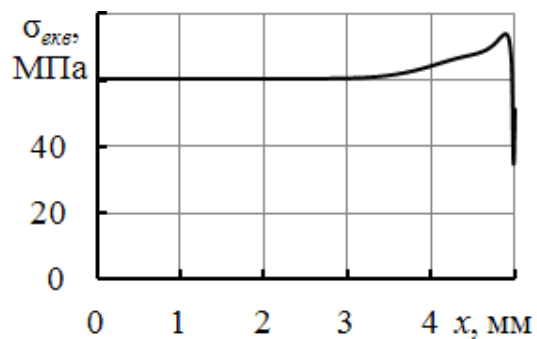
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

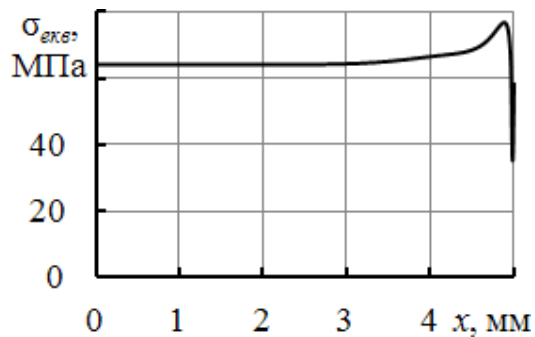
48



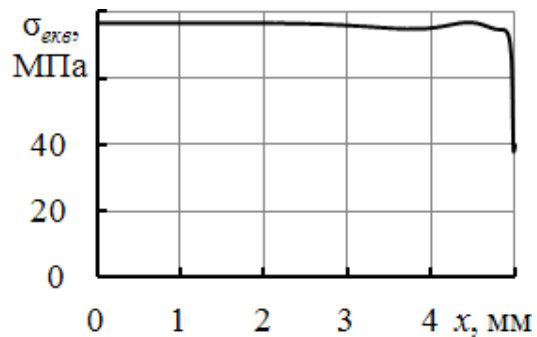
Вар. 1



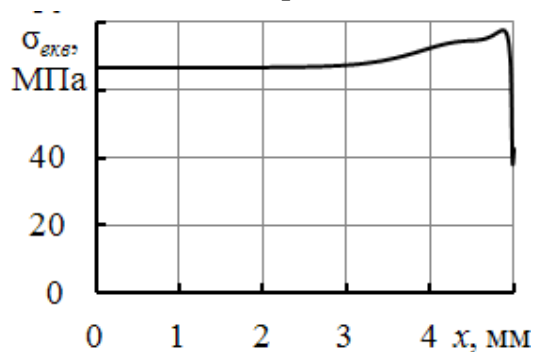
Вар. 2



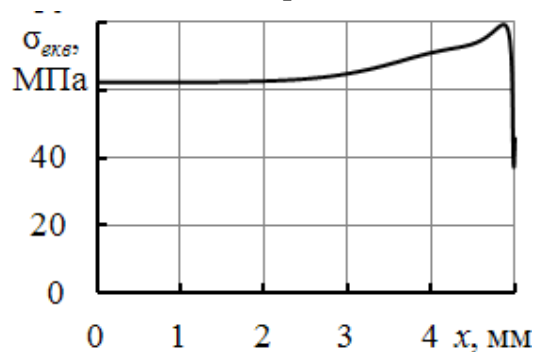
Вар. 3



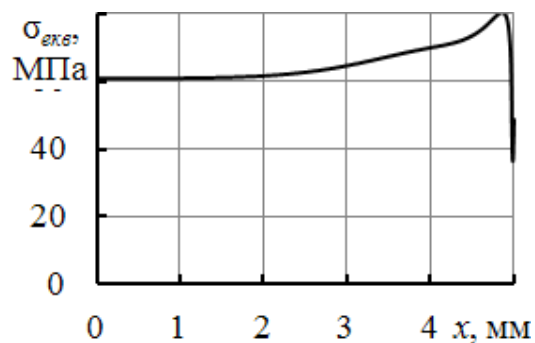
Вар. 4



Вар. 5



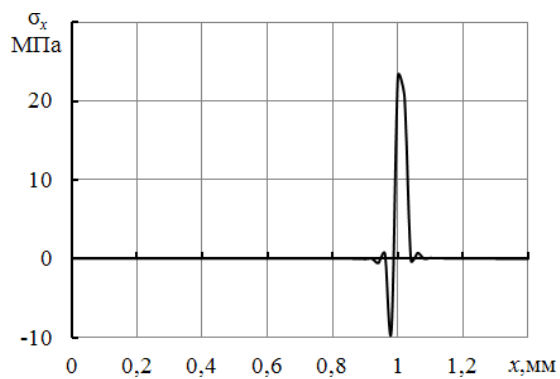
Вар. 6



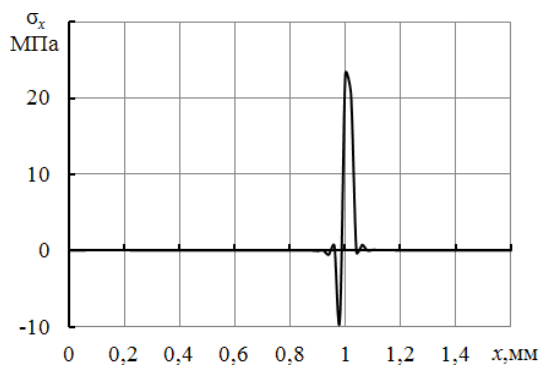
Вар. 7

Рисунок 2.26 - Епюри еквівалентних напружень по путі 1-1 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

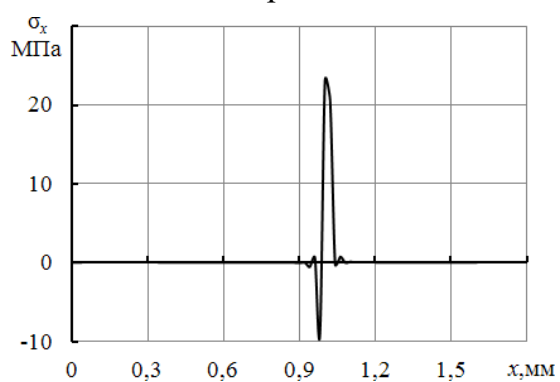
Епюри для путі 2-2



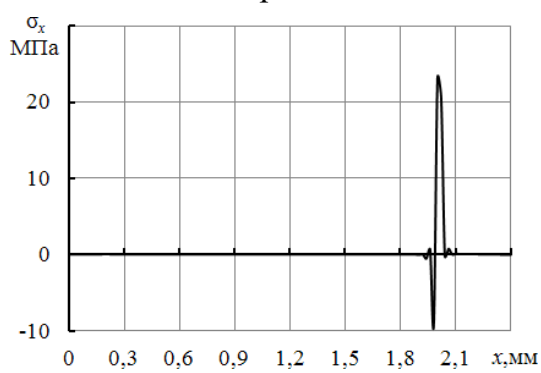
Вар. 1



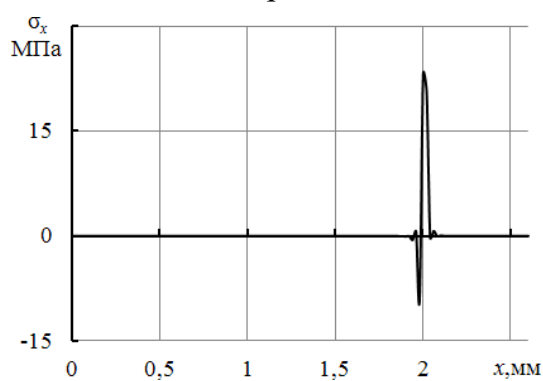
Вар. 2



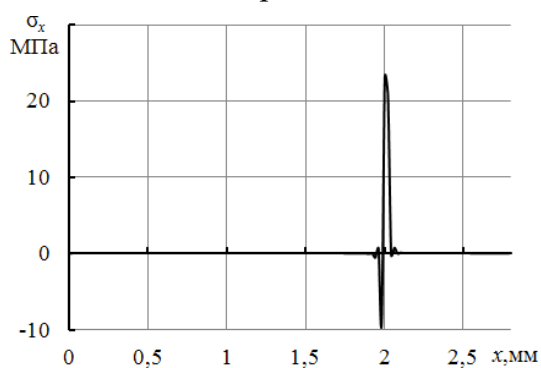
Вар. 3



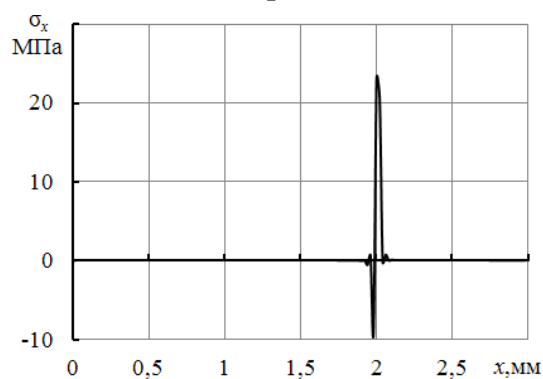
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

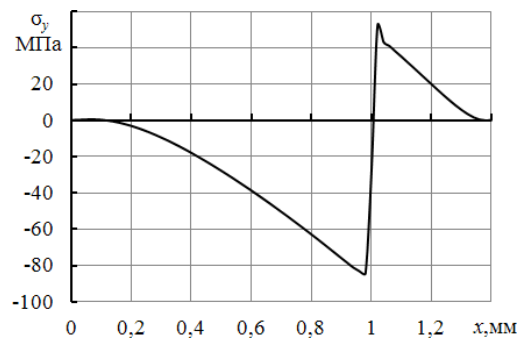
Рисунок 2.27 - Епюри радіальних напружень по путі 2-2 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

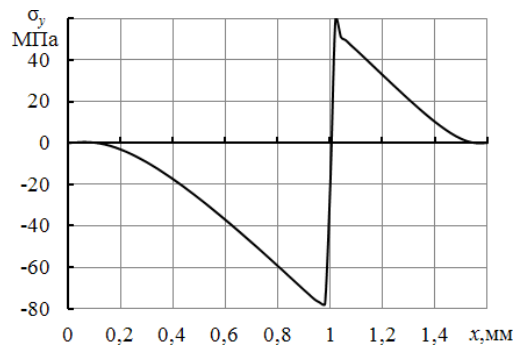
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

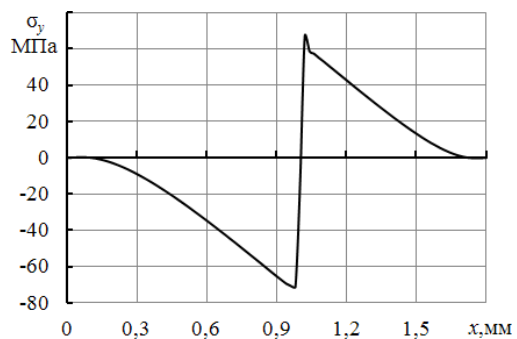
50



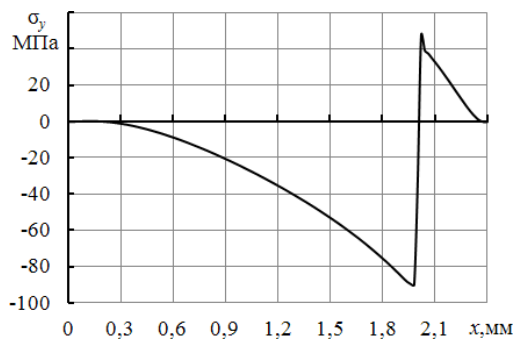
Вар. 1



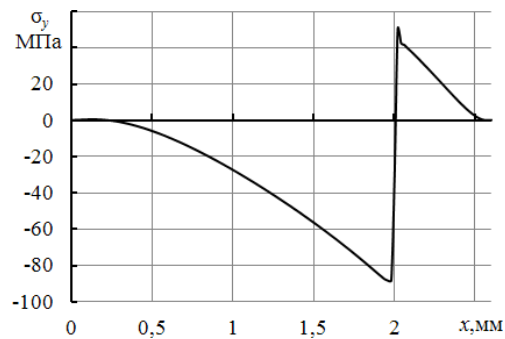
Вар. 2



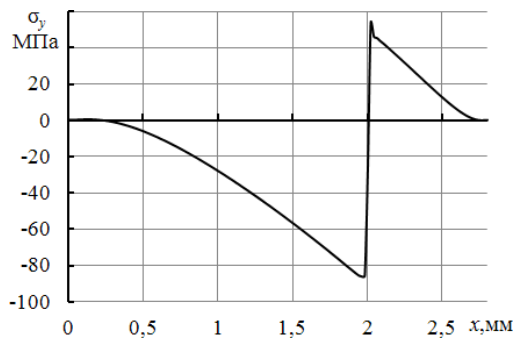
Вар. 3



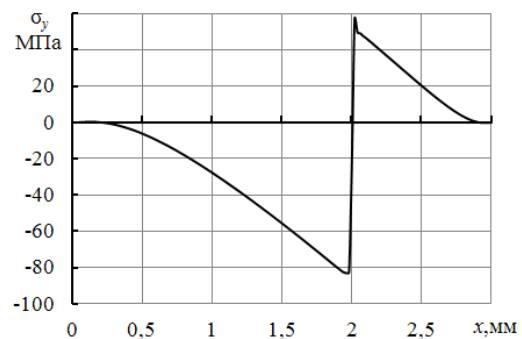
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

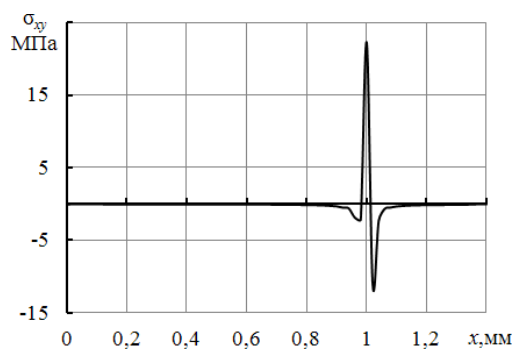
Рисунок 2.28 - Епюри осьових напружень по путі 2-2 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

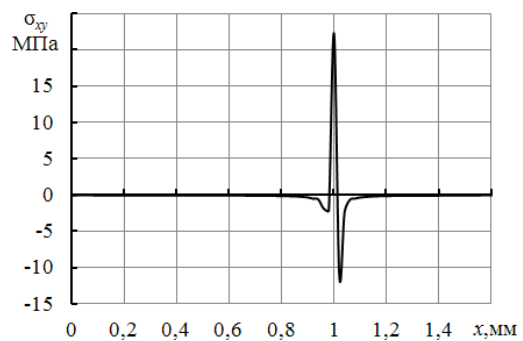
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

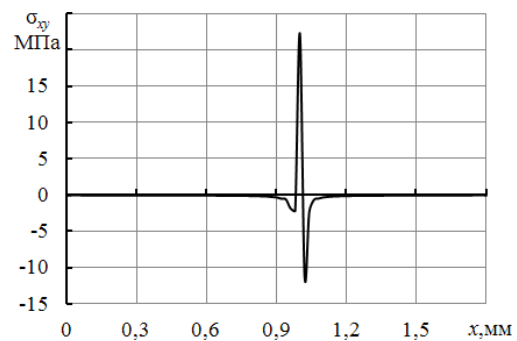
51



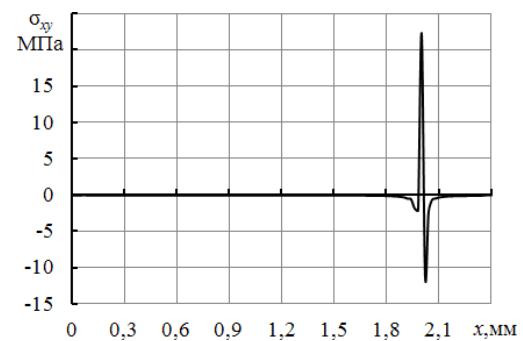
Вар. 1



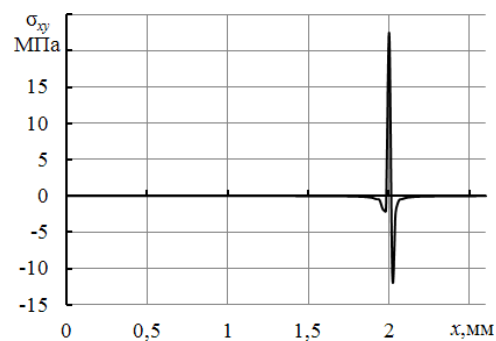
Вар. 2



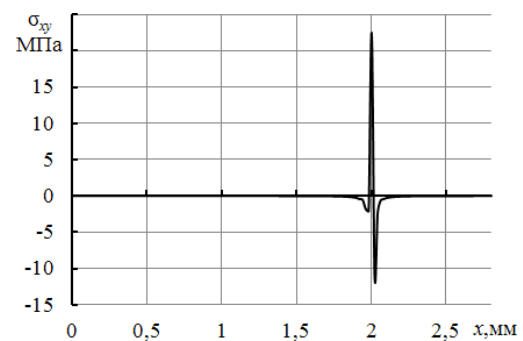
Вар. 3



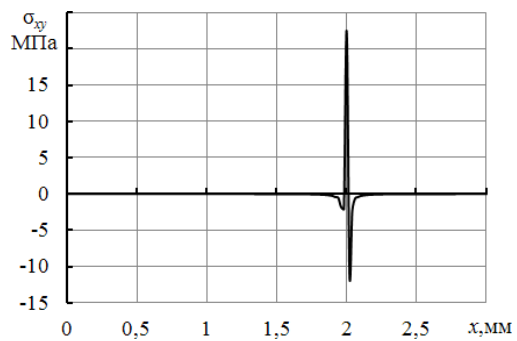
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

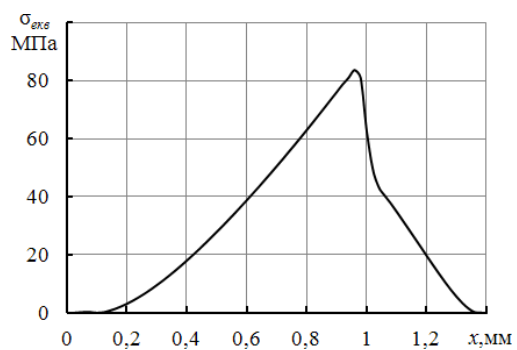
Рисунок 2.29 - Епюри дотичних напружень по путі 2-2 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

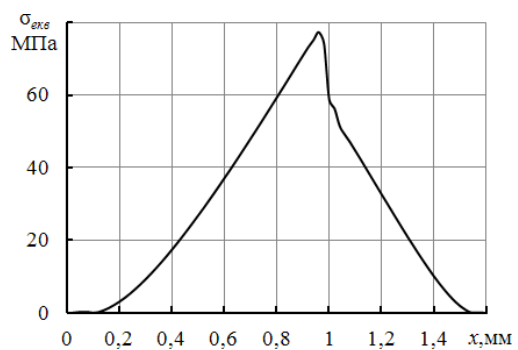
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

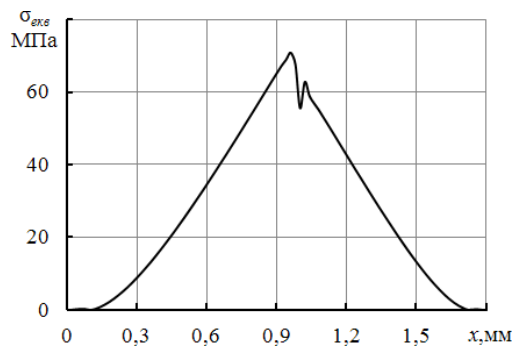
52



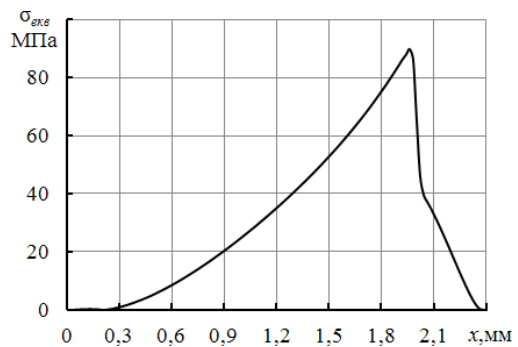
Вар. 1



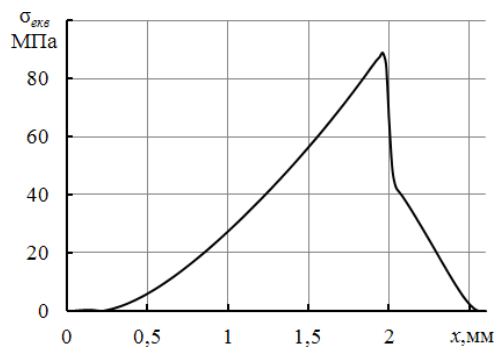
Вар. 2



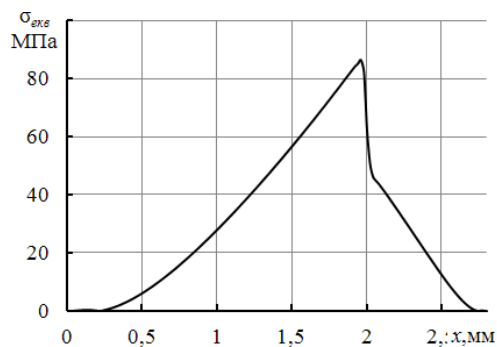
Вар. 3



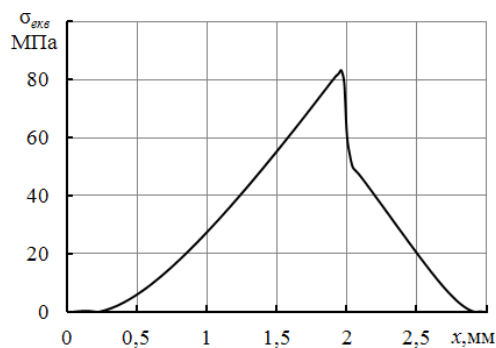
Вар. 4



Вар. 5



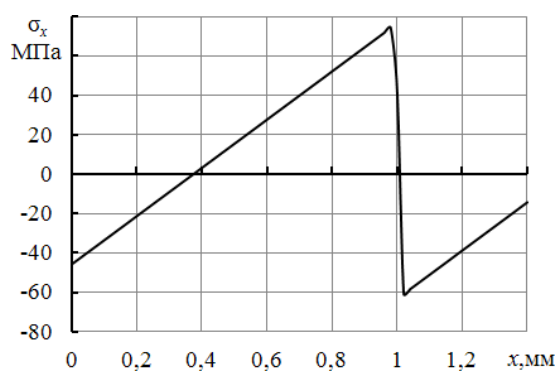
Вар. 6



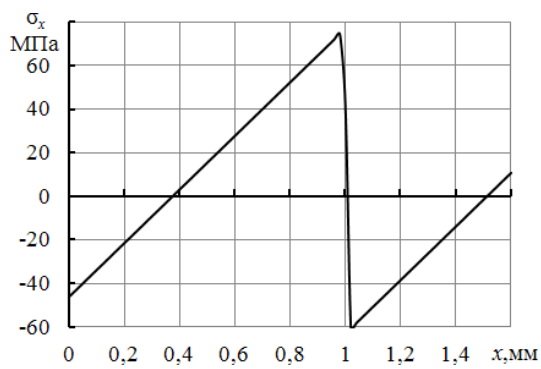
Вар. 7

Рисунок 2.30 - Епюри еквівалентних напружень по путі 2-2 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

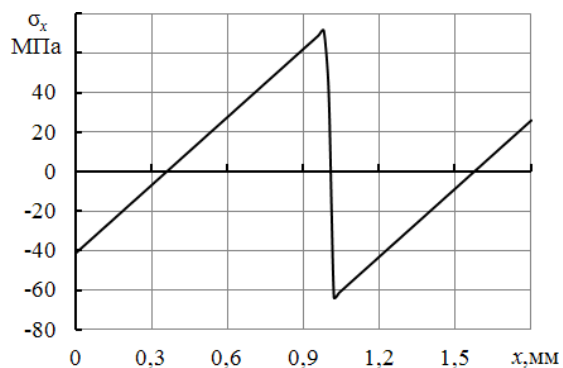
Епюри для путі 3-3



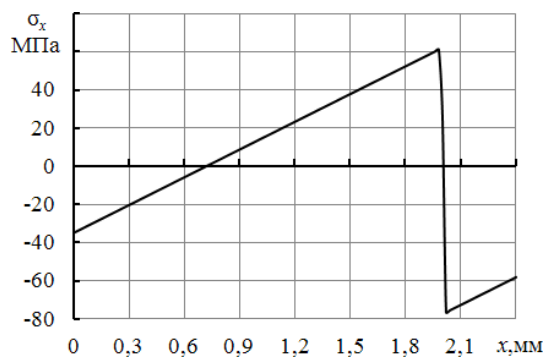
Вар. 1



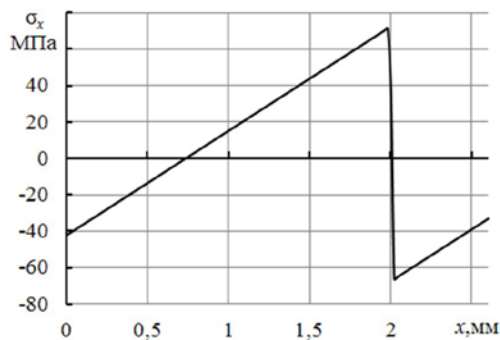
Вар. 2



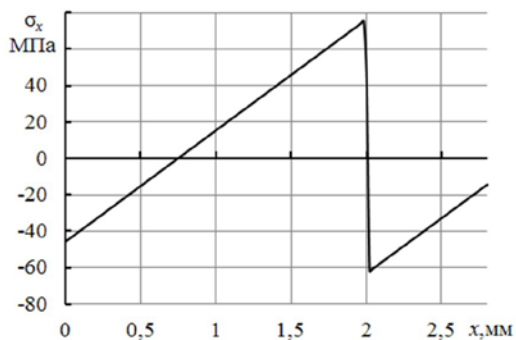
Вар. 3



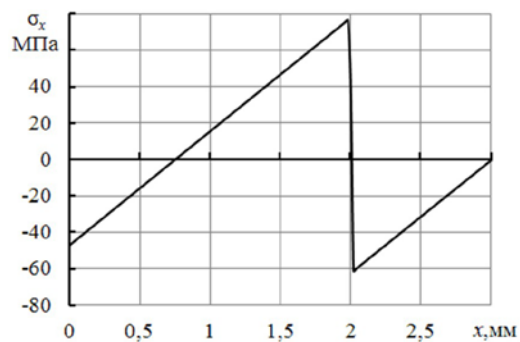
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

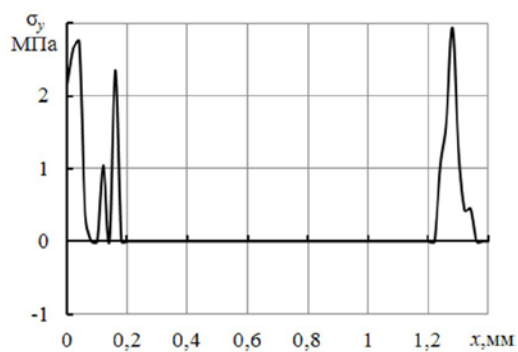
Рисунок 2.31 - Епюри радіальних напружень по путі 3-3 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

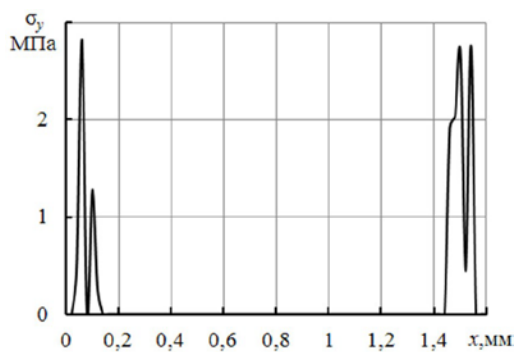
МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

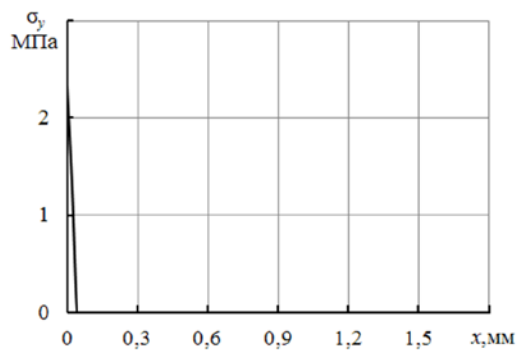
54



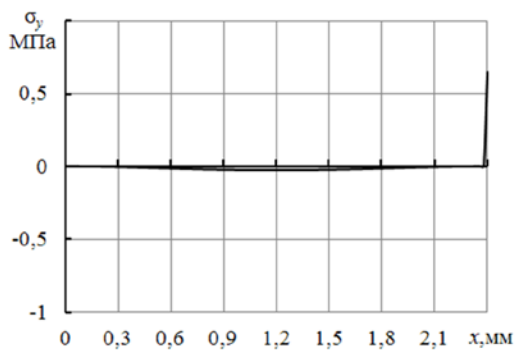
Вар. 1



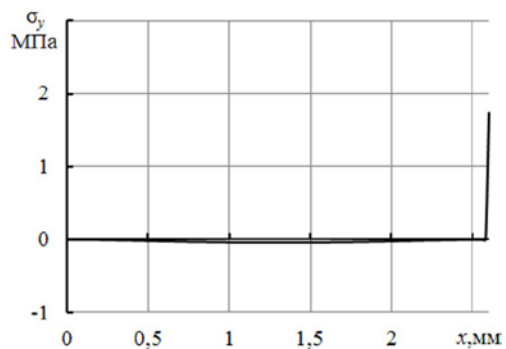
Вар. 2



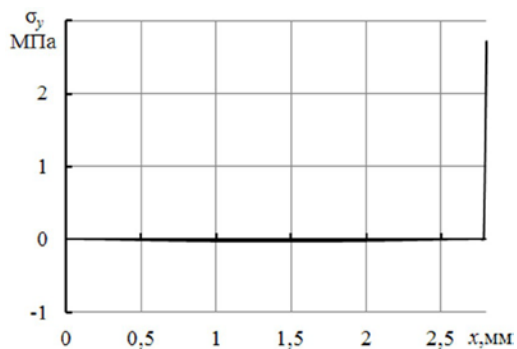
Вар. 3



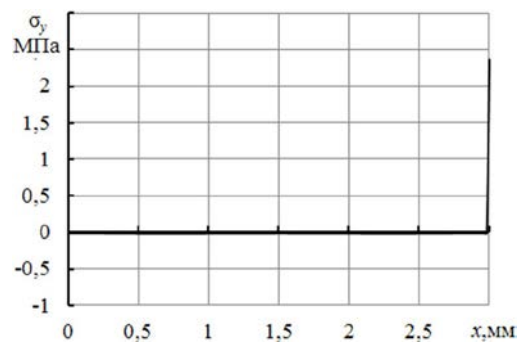
Вар. 4



Вар. 5

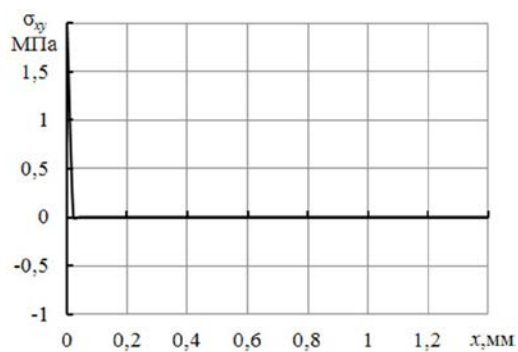


Вар. 6

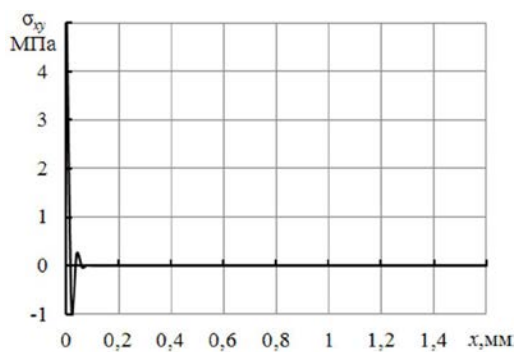


Вар. 7

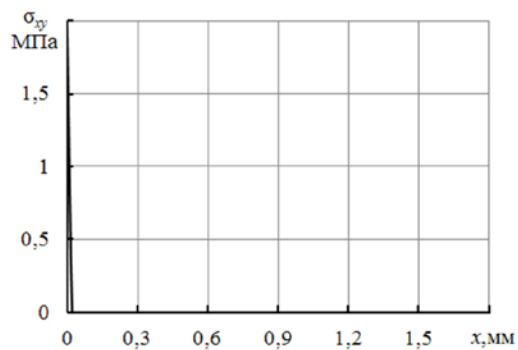
Рисунок 2.32 - Епюри осьових напружень по путі 3-3 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



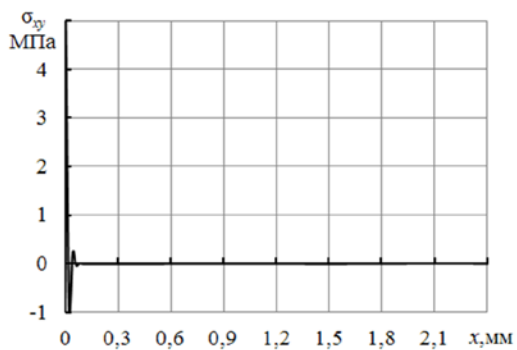
Вар. 1



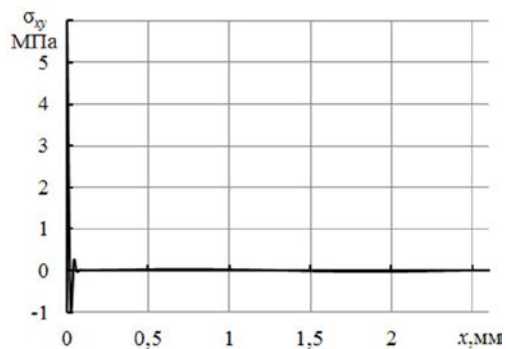
Вар. 2



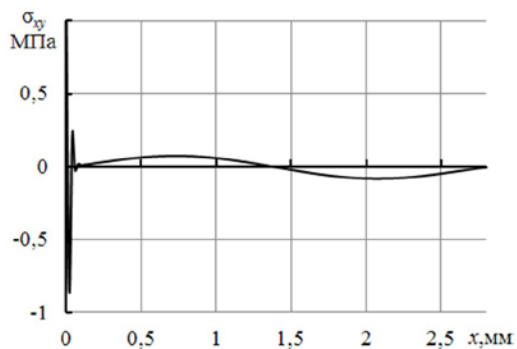
Вар. 3



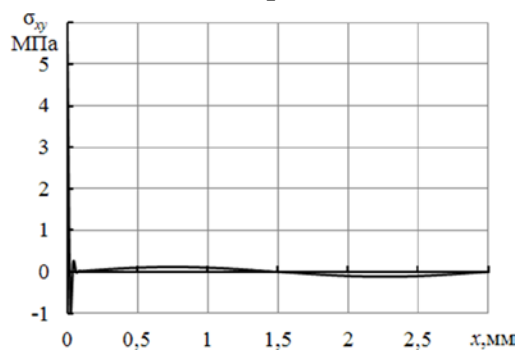
Вар. 4



Вар. 5

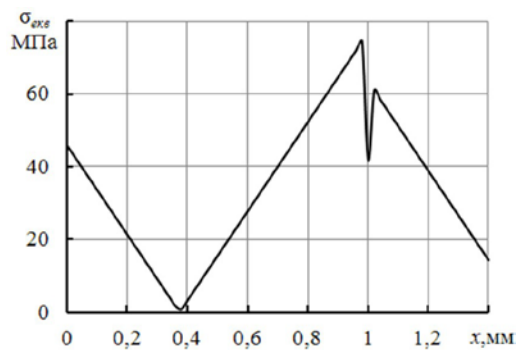


Вар. 6

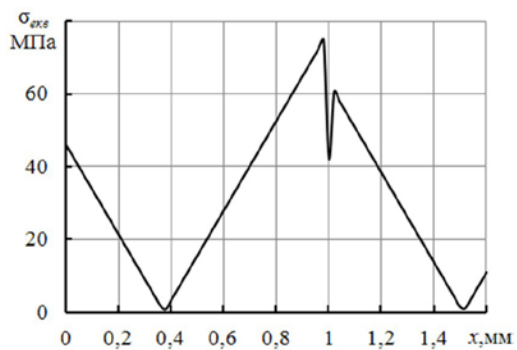


Вар. 7

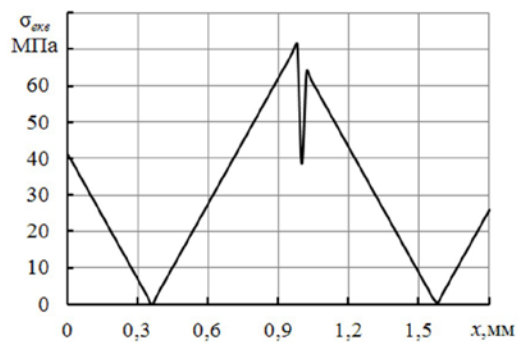
Рисунок 2.33 - Епюри дотичних напружень по путі 3-3 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)



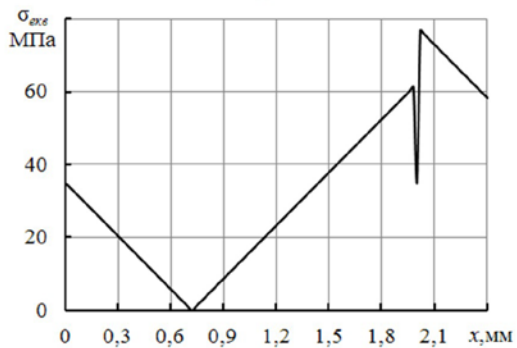
Вар. 1



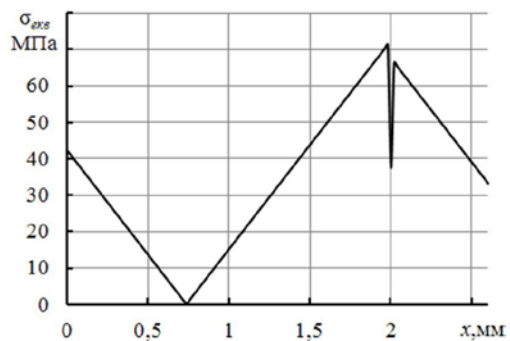
Вар. 2



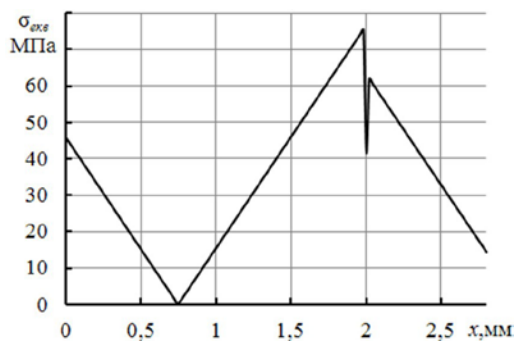
Вар. 3



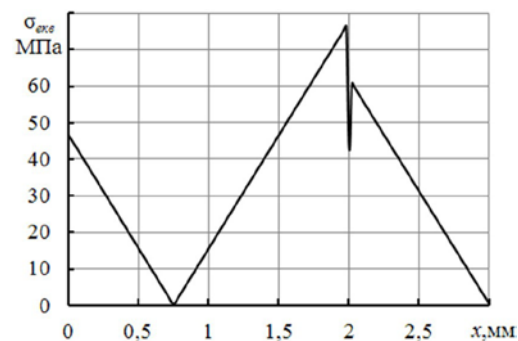
Вар. 4



Вар. 5



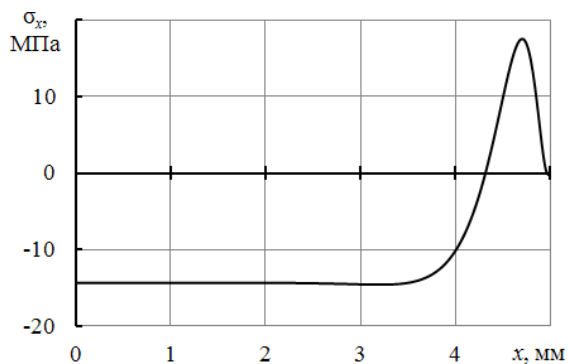
Вар. 6



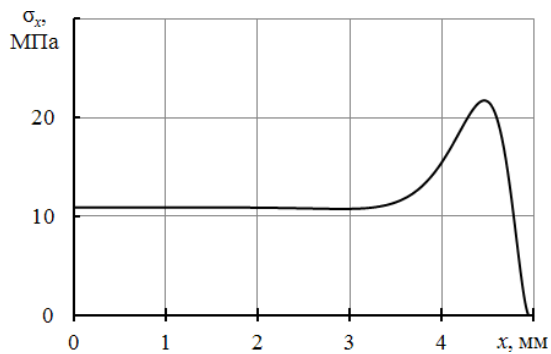
Вар. 7

Рисунок 2.34 - Епюри еквівалентних напружень по путі 3-3 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

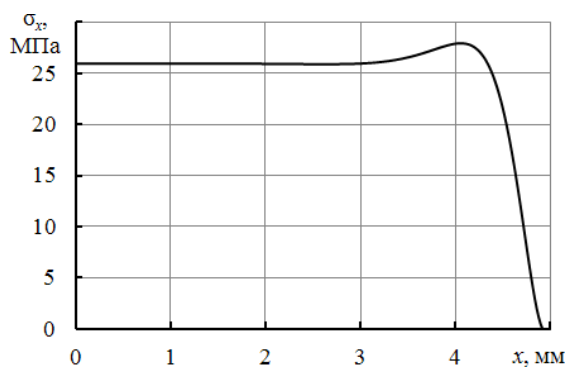
Епюри для путі 4-4



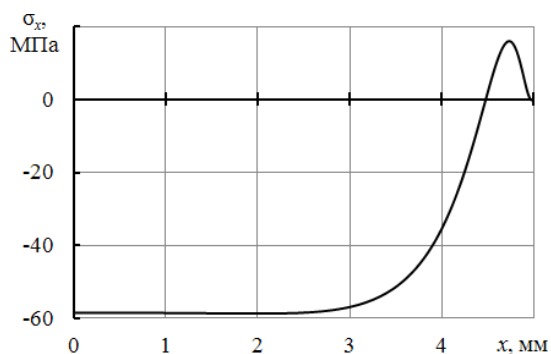
Вар. 1



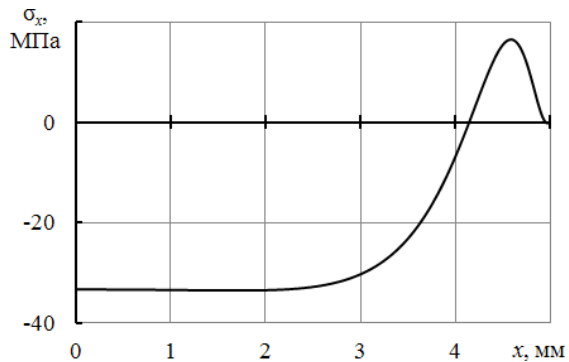
Вар. 2



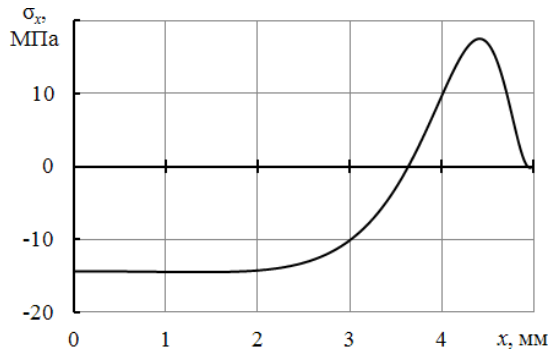
Вар. 3



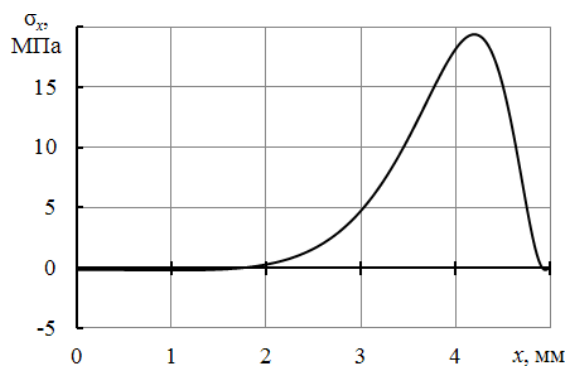
Вар. 4



Вар. 5



Вар. 6



Вар. 7

Рисунок 2.35 - Епюри радіальних напружень по путі 4-4 для великої жорсткості; варіанти 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е), 7 (ж)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.

Арк.

58

2.5 Аналітичний розрахунок напружень при нагріванні та охолодженні. Порівняння результатів моделювання та аналітичного розрахунку

Аналіз полів і епюр показує, що максимальні (по модулю) величини поздовжніх і поперечних напружень протилежні за знаком. При нагріванні максимальні поздовжні стискають напруги виникають в матеріалі підкладки, а максимальні розтягують в напиленні шарі на межі розділу.

Поперечні напруги при цьому зосереджені на торцевих поверхнях. У матеріалі підкладки вони розтягують, а в напиленному шарі - стискають.

При зміні нагріву охолодженням рівень напружень збережеться, а знаки поміняються на зворотні.

Дотичні напруження зосереджені на межі розділу шарів і досягають максимуму поблизу зовнішньої торцевої поверхні.

Рівень всіх напруг як у матеріалі підкладки, так і напиляному шарі, істотно залежить від жорсткості (модуля пружності) матеріалу напиляного шару. Так максимальні поздовжні напруги в підкладці зростають від -25 МПа у варіанті 1 ($E_{nc}=0,5 \times 10^5$ МПа) до -70 МПа у варіанті 2 ($E_{nc}=3,0 \times 10^5$ МПа), тобто майже в 3 рази. У напиленому шарі максимум цих напружень на межі розділу також зростає від 29 до 100 МПа, тобто більш, ніж в 3 рази.

Максимальні поперечні напруги на торцевій поверхні поблизу границі розділу зростають відповідно з 70 до 110 МПа в підкладці і від -5 до -75 МПа в напиленому шарі.

Максимальні дотичні напруження на межі розділу поблизу зовнішньої торцевої поверхні також збільшуються з 35 до 65 МПа.

Таким чином, із збільшенням жорсткості напиляного шару в 6 разів (від $0,5 \times 10^5$ до 3×10^5 МПа) найбільшою мірою в ньому збільшуються поперечні напруги (у 15 разів), меншою мірою поздовжні (більш ніж у 3 рази) та дотичні (майже в 2 рази).

Для оцінки адекватності результати комп'ютерного моделювання напружень у зразках з покриттям порівнювалися з аналітичним рішенням для двошарової пластини за методикою, запропонованою в [25]. Вона ґрунтується на гіпотезі плоских перерізів і дозволяє визначити тільки поздовжні напруги в середній частині зразка.

Аналітичний розрахунок виконувався для зразків з товщиною підкладки a_2 від 1 до 2 мм, товщина покриття a_1 при цьому змінювалася від 0,1 до 1,0 мм. Розраховувалися напруги в покритті на рівні верхньої його поверхні і на поверхні розділу покриття-підкладка.

Напруження в кожній точці при нагріванні двошарового бруса складаються з напруги розтягнення-стиснення і напруги вигину [25].

В точках 1 і 2 напруги розтягнення

$$\sigma_p = -E_1 \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{1 + \frac{E_1 a_1}{E_2 a_2}} \quad (2.1)$$

За рахунок несиметричності бруса ці напруги створюють згинальний момент

$$M = \sigma_p a_1 (a_1 + a_2) / 2 \quad (2.2)$$

Напруги від вигину в точках 1 та 2:

$$\sigma_1 = \frac{M(z_0 - a_1 - a_2)E_1}{E_1 I_{x0}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_2 = \frac{M(z_0 - a_2)E_1}{E_1 I_{x0}}, \quad (2.4)$$

де z_0 – ордината пружного ЦТ щодо нижньої кромки зразка, яка визначається рівнянням

$$z_0 = \frac{E_1 a_1 (a_1 + a_2 / 2) + E_2 a_2^2 / 2}{a_1 E_1 + a_2 E_2} \quad (2.5)$$

$E_0 I_{x0}$ – пружний момент інерції перерізу зразка, що дорівнює:

$$E_0 I_{x0} = E_1 \frac{a_1^3}{12} + E_2 \frac{a_2^3}{12} + E_1 a_1 (z_1 - z_0)^2 + E_2 a_2 (z_2 - z_0)^2. \quad (2.6)$$

Порівняння результатів аналітичних розрахунків та комп'ютерного моделювання показав, що рівень поздовжніх напружень в будь-якій точці при одних і тих же жорсткості матеріалів підкладки і напиляного шару залежать тільки від співвідношення товщини шарів, залишаючись незмінними при пропорційній зміні товщини. Результати розрахунків та моделювання поздовжніх напружень повністю збіглися.

Аналіз кривих показує, що найбільших значень розтягуючи поздовжні напруги в напиленому шарі при нагріванні досягають на поверхні розділу з основним металом, при цьому відмінність напружень по товщині шару із зменшенням його відносної товщини помітно зменшується і при співвідношенні товщин менше 0,5 вони стають практично однаковими. При збільшенні відносної товщини розтягуючи поздовжні напруги на зовнішній поверхні напиляного шару помітно знижуються, досягаючи нуля і переходячи в стискаючи при співвідношенні товщин $a_1/a_2=0,9$ і $0,4$ в шарах з малої і великої жорсткістю відповідно.

Деяке зменшення розтягуючих поздовжніх напружень на поверхні розділу з збільшенням відносної товщини напиляного шару спостерігається тільки при її значеннях до $0,3...0,5$. Потім вони стабілізуються, а в шарі з великою жорсткістю знову трохи збільшуються.

Таким чином, найбільш вірогідною областю зародження тріщини в напиленні шарі при нагріванні є поверхня розділу. При цьому кращим з точки зору зменшення розтягуючих поздовжніх напружень в напиленому шарі і підвищення його термостійкості є співвідношення товщин a_1/a_2 більше 0,5 в шарах малої жорсткості і більше 0,2 (у діапазоні $0,3...0,5$) в шарах великої жорсткості.

Комп'ютерне моделювання при повному збігу з результатами аналітичного розрахунку поздовжніх напружень разом з тим дозволяє, на відміну від останнього, визначити поперечні і дотичні напруження на ділянках викривлення перетинів. Саме на цих ділянках, як показали результати моделювання, створюються сприятливі умови для утворення тріщин в тендітному матеріалі

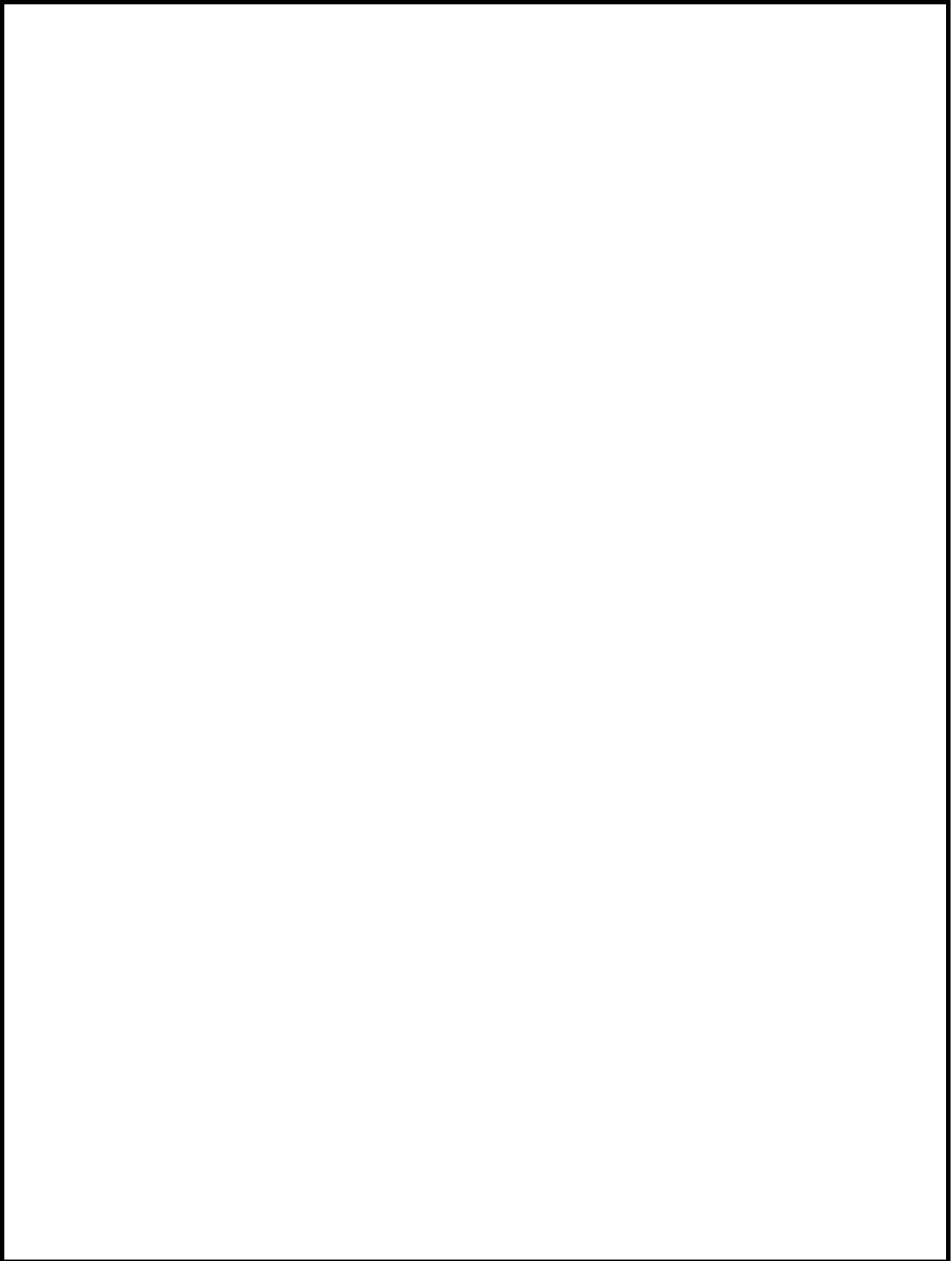
напиляного шару, так як розтягуючи поперечні напруги на стадії зниження температури сумірні з поздовжніми в середній частині зразка на стадії нагріву.

Крім того, великі дотичні напруження на межі розділу на цих ділянках створюють небезпеку відшарування напиленого шару.

Висновки:

1. Спроектовані моделі для проведення іспитів на термостійкість.
2. Аналітичним розрахунком та комп'ютерним моделюванням встановлені кількісні залежності напружень при нагріванні й охолодженні зразків з напиленим покриттям.
3. Поздовжні напруження на більшій частині зразка з напиленим покриттям можуть бути визначені аналітичним розрахунком, поперечні і дотичні напруження - тільки комп'ютерним моделюванням .
4. Зміна температури зразків з напиленим покриттям приводить к створенню напружень розтягу, що є умовою для крихкого руйнування, як на стадії нагріву (поздовжні в середній частині зразка), так і на стадії охолодження (поперечні на торцевих поверхнях). Поблизу торців на межі розділу шарів виникають дотичні напруження, що створюють умови для відшарування покриття.

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 02. ПЗ.	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					МР. 132. 6121м. 02. 05. 03. ПЗ.								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Студент		Светлицький Д.В.			Дослідження термоциклічної стійкості покриттів				Літ.	Арк.	Акрушіє		
Керівник		Лебедев В.О.									63	10	
Конс.		Лебедев В.О.							ХННІ НУК				
Н. Контр.		Лебедев В.О.											
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.											

3.1 Термоциклічна стійкість на термоудар

Дослідження термоциклічної стійкості ущільнюючих покриттів у лабораторних умовах показали, що відшарування відбувається по границі підкладка-покриття. Звідси випливає, що необхідно напиляти підшар із ПГ-10К-01 без твердого змащення, що підвищить міцність зчеплення. Крім того, при дослідженні теплопровідності ущільнень, виявлено, що наявність у покритті ZrO_2 знижує його теплопровідність.

Зазначені передумови поставили задачу оптимізації пошарового складу ущільнень, напилених на повітрі й у вакуумі. Для вибору перспективного пошарового складу користувалися оцінкою термоциклічної стійкості. Оцінювали термоциклічну стійкість по твердому режимі (термоударі). Для цього ущільнюючі покриття наносили плазмовим напиленням на повітрі і у вакуумі на пластини зі сплаву ЧС-70 розміром 40x40x3. Торці пластин шліфували до появи границі "підкладка-покриття" і встановлювали в спеціальний контейнер (по 5 шт.) на відстані 20 мм. Нагрівання пластин з покриттями здійснювали в електричній муфельній печі СМОЛ-1,6.2,5.1/9-114 до 900 °С, охолодження - у проточній воді, при температурі 20 °С. Усі плазмонапилені покриття термооброблювали у вакуумі при температурі 1070°С на протязі 2-х годин.

Плазмове напилення ущільнюючих покриттів виконували на установці УПУ-3Д на режимах:

I, A – 250...300; U, B – 80...108; Q (Ar), л/хв – 20...30;

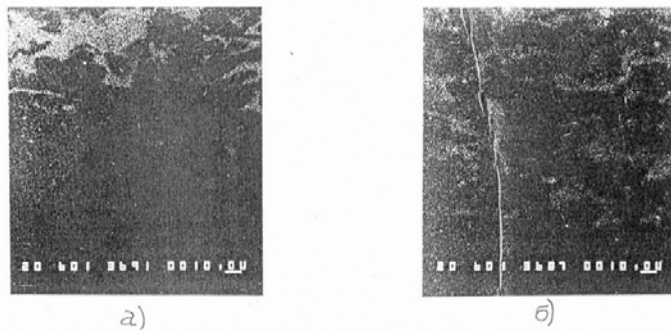
Пошаровий склад, умови напилення, міцність зчеплення й кількість термоциклів до руйнування ущільнюючих покриттів наведені в таблиці 3.1. Серія дослідів, показали що ущільнюючі покриття на основі ПГ-10К-01 з добавками твердого змащення мають максимальні оцінки термоциклічної стійкості і показники міцності на зріз при нанесенні підшару із ПГ-10К-01 товщиною 0,1 мм у вакуумі незалежно від складу й умови напилення наступних шарів [26].

					МП. 132. 6121м. 02. 05. 03. ПЗ.	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 Результати іспитів ущільнюючих покриттів на термічну стійкість та характер руйнування

Склад покриттів	Товщина, мм	Умови напilenня	Міцність зчеплення на зріз, МПа	Кількість термоциклів до руйнування	Характер руйнування
ПГ-10К-01	0,1	повітря	310	142	повне
ПГ-10К-01+20%С(Ni)	1,9	повітря	310	142	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	151	часткове
ПГ-10К-01+20%С(Ni)	1,9	вакуум	350	151	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	345	147	часткове
ПГ-10К-01+20%С(Ni)	1,9	повітря	345	147	відшаровування
ПГ-10К-01+20%С(Ni)	2,0	повітря	110	42	повне
ПГ-10К-01+20%С(Ni)	2,0	вакуум	150	83	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	355	161	часткове
ПГ-10К-01+10%С(Ni)	1,9	повітря	355	161	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	повітря	310	37	повне
ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	1,9	повітря	310	37	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	345	113	часткове
ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	1,9	вакуум	345	113	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	102	часткове
ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	1,9	повітря	350	102	відшаровування
ПГ-10К-01	0,1	повітря	305	15	часткове відшаровування
ПГ-10-01+20%ZrO ₂ (Ni)	0,4	повітря	305	15	
ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	1,8	повітря	305	15	
ПГ-10К-01	0,1	вакуум	350	145	часткове відшаровування
ПГ-10-01+20%ZrO ₂ (Ni)	0,4	повітря	350	145	
ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	1,8	повітря	350	145	

Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях досліджували на електронно-зондовому мікроаналізаторі "Супперпроб-733" (Японія). Результати представлені на рис. 3.1.



а) напилено у вакуумі; б) напилено на повітрі

Рисунок 3.1 - Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях ПГ-10К-01+20%С(Ni) [x600]

Отримані результати (рис. 3.1) показують, що при напиленні у вакуумі графіт, плакірований нікелем, розподіляється по покриттю нерівномірно. Причина цього явища полягає у величинах швидкості потоку і плями напилання, що значно більше, ніж при напиленні на повітрі. Розвита поверхня плакірованих часток сприяє нерівномірному їхньому розподілу, збільшенню концентрації від центра плями напилання до периферії.

Результати дослідження розподілу вуглецю в ущільнюючих покриттях дозволяють рекомендувати доводити С(Ni) до 20%.

3.2 Термоциклічні іспити на газодинамічному стенді та лабораторної установці

Надалі, доцільно провести корозійні і термоциклічні іспити на натуральних зразках-вставках кращих дослідних ущільнюючих покриттях, за даними табл. 3.2, на газодинамічному стенді. Для цього вставки додатково оброблялися на електроерозійному верстаті з метою заглиблення робочої поверхні для нанесення плазмового ущільнюючого покриття. Підготували дві вставки з осередками і три - без них.

Поглиблення робочої поверхні складало 1,8...2,0 мм. Залишкова глибина осередків близько 1мм. Обидва типи вставок представлені на рис. 3.2. Перед напиленням вставки піддавалися знежиренню й піскоструменевій обробці. Залишкові осередки на двох вставках покликані підвищити адгезію покриття, а отже й стійкість до тепло змін.

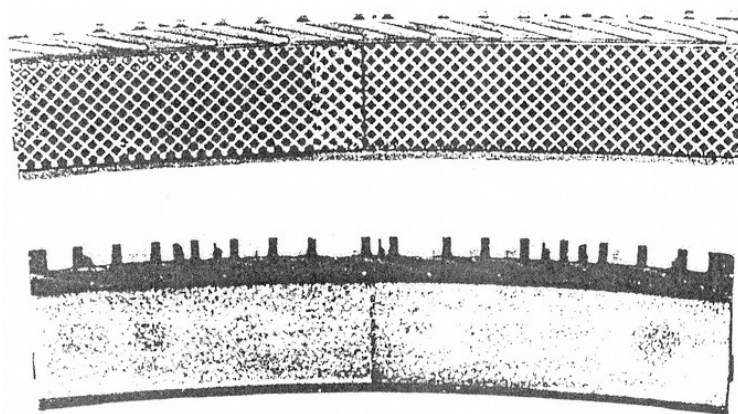


Рисунок 3.2 - Вставки із заглибленою робочою поверхнею для нанесення ущільнюючих покриттів [26]

Після напилення вставки термооброблювали у вакуумі при 1050 °С в плин 1,5 ч. Загальний вид вставок з напиленими ущільнюючими покриттями приведений на рис. 3.3.

Таблиця 3.2 Склад покриттів, напилених на вставки

Номер вставки	Склад робочого шару товщиною близько 2 мм	Примітки
001*	ПГ-10К-01+10%С(Ni)	гладка поверхня
0011	ПГ-10К-01+20%С(Ni)	осередки **
002*	ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	гладка поверхня
004	С(Ni)+10%Si	напил. у вакуумі
005	ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	осередки **

* Вставки N001 і N002 проплавлені електронним променем (рядками).

** Глибина осередків у два рази менше, ніж у вихідному ущільненні.

Іспитам піддавали вставки з покриттями, склад яких приведений у табл. 3.2. Вставки з ущільнюючими покриттями приварювали до касети (рис. 3.4) Для порівняння встановлена вставка (з отвором) з осередковим ущільненням.

Нагрів здійснювали високотемпературним газовим потоком продуктів згоряння, що імітує роботу ГТУ. При цьому напилені поверхні розташовувалися під кутом приблизно 45° до напрямку потоку.

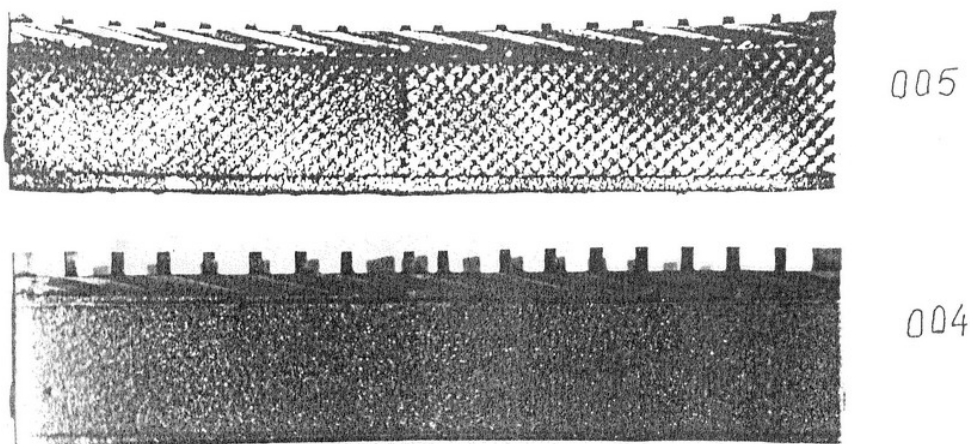


Рисунок 3.3 - Вставки NN004, 005 з ущільнюючими покриттями, нанесеними плазмовим напиленням

Підвищення температури вставок з 80°C до 1050°C відбувалося за 30 с, витримка - 30 с, охолодження до 80°C здійснювали продувкою холодного повітря за 2 хв. Через 1000 циклів проведений огляд деталей. Вставки NN 001*,002*. 0011,005 витримали іспити без істотних зауважень, а вставка N 004 мала зруйноване покриття.

На вставці N 004 з покриттям ПГ-10К-01 + 10% С (Ni) спостерігалися часткові відшарування покриттів (рис. 4.4) у місцях де товщина перевищувала висоту буртику вставки.

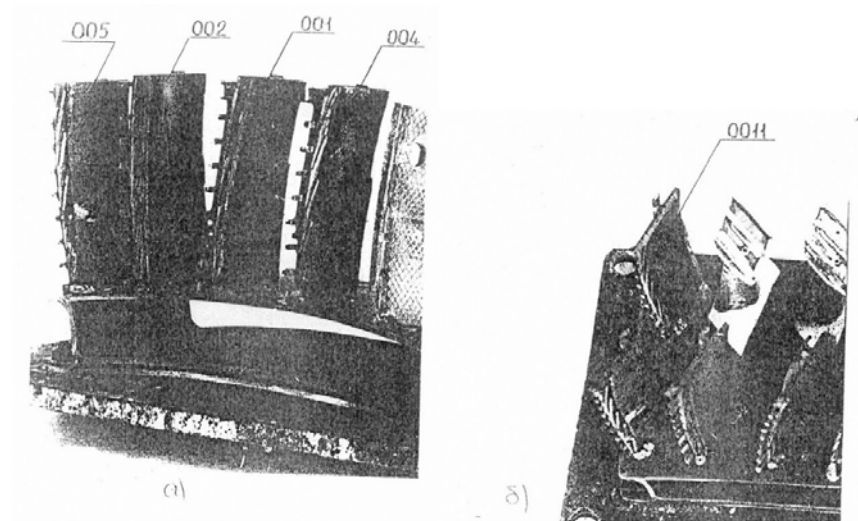
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 03. ПЗ.

Арк.

68

В середній частині покриття повітліло і з'явилися світло-коричневі розводи. Глибока тріщина поперек покриття вставки N005 у самому верху, можливо, пояснюється занадто великою товщиною покриття, що піднімається над буртиком вставки (0,5мм). У даному випадку колір покриття не змінився. Не має зауважень вставка N 002* з покриттям проплавленим електронним променем, рядками. Колір покриття не змінився, воно оброблено в рівень з буртиками вставки. Вставка N 001* мала відшарування у місцях, де над



а – вид збоку; б – вид зверху

Рисунок 3.4 - Загальний вид касети зі вставками

буртиками піднімалося покриття, колір останнього не змінився. Покриття вставки N 004 зруйнувалося на площі близько 40%. Це пояснюється низькою міцністю зчеплення, що привело до здуття і розпушення. Вставка з круглим наскрізним отвором у верхній частині (див. рис. 3.4) з наповнювачем УМ-16П, застосовувана на виробництві по всій поверхні містить дрібні (100...300 мкм) пори, можливо, обумовлені розплавленням або вигоранням і видуданням одного з компонентів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 03. ПЗ.

Арк.

69

Після огляду і фотографування касети продовжили іспити. Для чого касету з вставками нагріли до температури 1000 °С. Потім при ізотермічній витримці в паливо подавалося за 1 хв близько 3 см³ солі відповідного її змісту в морській воді. Таким чином, імітувалася робота деталей у максимально наближених до реальних умов. Після іспитів, протягом 38 годин, зроблений контрольний огляд вставок, що показав стійку опірність всіх дослідних покриттів сольовий корозії, які успішно витримали стійкості до теплосмінам. Слід зазначити зміну кольору покриттів. Можливо, це пояснюється появою нальоту сольових з'єднань з компонентами палива при високих температурах [26].

Після контрольного огляду, іспит на "прожиг" відновили, потім, після закінчення 200 годин наробітку, іспити продовжили в режимі термоцилювання на зазначеному вище режимі. Сумарна кількість циклів доведена до 2000.

У результаті іспитів встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01-20%С(Ni) і ПГ-10К-01-20%ВN(Ni) по корозійно - ерозійній і термічній стійкості перевершує серійне осередкове (стільникове) ущільнення з наповнювачем УМ-16П.

З метою оцінювання стійкості до теплосмін плазових покриттів, були проведені дослідження в лабораторії зварювання та споріднених технологій на спеціальній установці. Структурна схема установки наведена на рисунку 3.5.

Структурна схема зразка, який використовується для визначення стійкості до теплосмін покриттів, наведена на рисунку 3.6.

Нагрівання здійснювали електричним струмом до 1000 °С за 30 секунд, витримка – 30 секунд, охолодження до температури навколишнього середовища за 60 секунд. Установка працює наступним чином: при подаванні струму на мілівольтметр Ш 4501, лічильник СИ 206 ХЛ4 та реле часу „Інтервал” одночасно подається напруга і на пускач, який включає джерело живлення ВС-600, яке замкнуто через батарею баластних реостатів РБ-350 на зразок; при

досягненні температури зразка 1000°C , яка контролюється за допомогою хромель-алюмелевої термопари та мілівольтметра Ш4501,

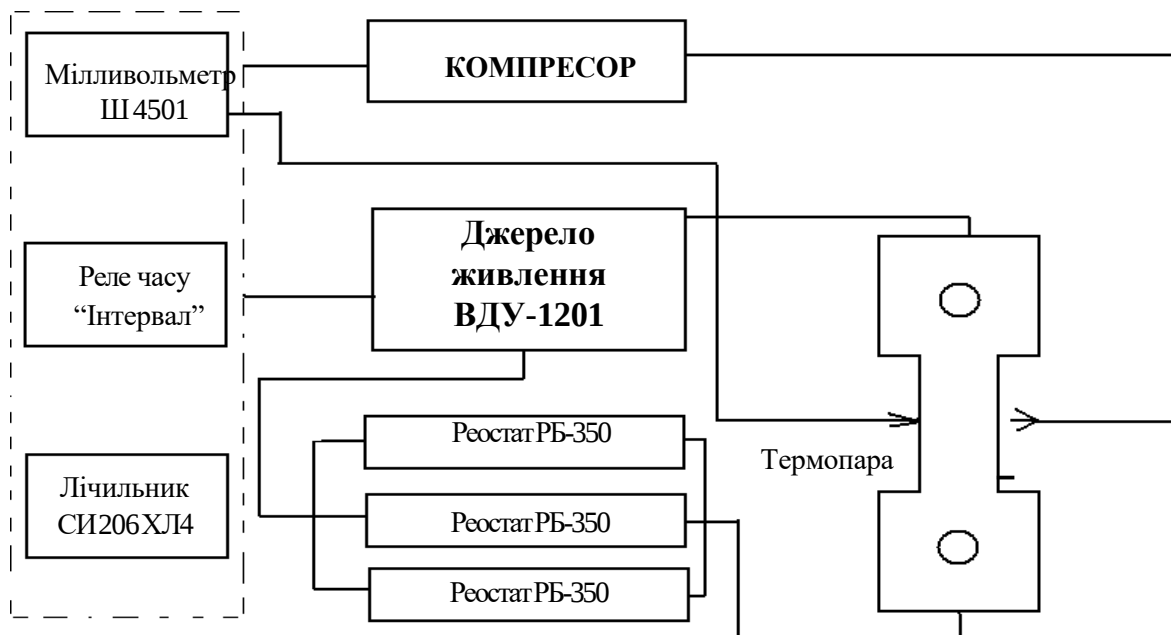


Рисунок 3.5 - Структурна схема установки для визначення стійкості покриття до тепловмінів

спрацьовує отсікач та лічильник; реле часу „Интервал” вмикає компресор, який стислим повітрям охолоджує зразок; після вимкнення компресору спрацьовує пускач джерела живлення та цикл повторюється. Результати досліджень наведені в таблиці 3.1.

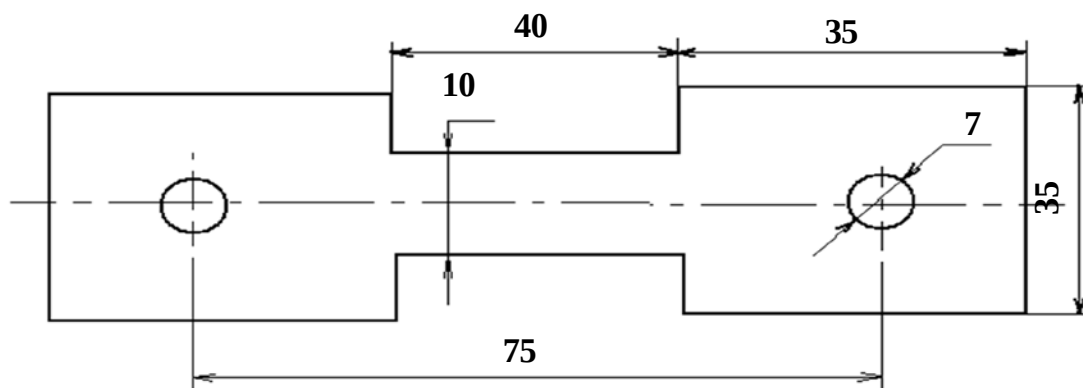


Рисунок 3.6 - Зразок для визначення стійкості до тепловмінів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 02. 05. 03. ПЗ.

Арк.

71

У результаті можна зробити висновок, що задовільна спрацьованість дослідних ущільнень має циклічний характер і забезпечується спочатку пористістю і наявністю твердого змащення потім лише пористістю. Високі значення термоциклічної стійкості пояснюються великою міцністю зчеплення самофлюсуючого сплаву ПГ-10К-01 з підкладкою.

Запропоновані ущільнення на основі самофлюсуючого сплаву ПГ-10К-01 з добавками твердих змащень C(Ni) і BN(Ni) можуть працювати у продуктах згоряння палива ДС при температурах до 1000...1050 °С.

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

- з технологічної і економічної точки зору процес плазмового напилення в контрольованій атмосфері можливо замінити на плазмове напилення на повітрі;

- ущільнення на основі самофлюсуючого сплаву ПГ-10К-01 з добавками твердих змащень C(Ni) і BN(Ni) можуть працювати при температурах до 1000...1050 °С.

- встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01+20%C(Ni) і ПГ-10К-01+20%BN(Ni) по корозійно-ерозійній і термічній стійкості перевершує серійне осередкове (стільникове) ущільнення з наповнювачем УМ-16П та 20Б.

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент		Светлицький Д.В.			Розробка технології напилювання ущільнень			
Керівник		Лебедев В.О.						
Конс.		Лебедев В.О.						
Н. Контр.		Лебедев В.О.						
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.						
					Літ.	Арк.	Акрушіє	
							73	12
					ХННІ НУК			

4.1 Вибір обладнання для плазмового напилення

4.1.1 Вибір основного обладнання

Існує велика кількість установок для плазмового напилювання покриттів. До основних ознак обладнання можна віднести:

1. Середу, в якій відбувається напилювання (на атмосфері, в вакуумі, в захисному газі, в окислювальному, відновлюючому газах і т.п.).
2. Ступінь автоматизації (установки з ручним, механізованим, автоматичним, програмним керуванням).
3. Число робочих позицій (однопозиційні, 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, необхідній 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 напилювання, які дозволяють одержувати покриття із широким спектром властивостей із різних матеріалів. Розглянемо основні із них.

Установка плазмово-порошкового напилення Plakart P-1000 призначена для нанесення зносостійких, корозійностійких, теплозахисних, ущільнювальних, антифрикційних та інших покриттів, що надають робочій поверхні деталей нові

					MP. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

властивості та збільшують їх робочий ресурс. Великий вибір відпрацьованих технологій напilenня на даній установці дозволяє отримувати покриття високої якості, що добре повторюються.

В установці Plakart P-1000 як плазмоутворюючий газ використовується аргон і водень. При необхідності, як плазмоутворюючі можуть використовуватися різні газові суміші, азот, гелій (дод. опція) та ін. [27].

Установка плазмового напilenня АПР-403, розроблена ВНИИЭСО, призначена для плазмового напilenня порошками і дротом; максимальна продуктивність 15 кг/год.

До складу установки входять джерело живлення з апаратурою керування, самохідна голівка з плазмотроном, блоки подачі дроту і порошку, шафа газопідготовки, система примусового охолодження і маніпулятор для переміщення деталі. Напруга холостого ходу джерела живлення 400 В. На установці можна напилувати поверхні тіл обертання діаметром від 50 до 600 мм, довжиною 1500 мм і масою до 400 кг. Установка може працювати в ручному й автоматичному режимах [28].

Універсальна плазмова установка УПУ-3 серійно випускається Ржевским РПКО "Електромеханіка". Поставляється в комплекті з джерелом живлення ИПН 160/600, призначеним для підживлення 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 ГН-5Р, ГН-5М.

В установці УПУ-3Д замість плазмотронів ГН-5Р и ГН-5Н розроблений ряд плазмотронів загального і спеціального призначення (ПН-14М; ПП-125; ПП-25; ПМ-25; ПВ-25), що при високій надійності мають малі розміри і масу. Дозатори ДР-2 і ДШ-1 забезпечують рівномірну подачу порошкових матеріалів.

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблено прилад для контролю витрат порошку (РПЗ-1) і газу, а також температури охолоджуючої води.

Включення плазмотрона, регулювання витрат плазмоутворюючого і транспортуючого газів здійснюється з пульта керування установки. Водяне охолодження плазмотрона та джерел живлення системою з поршневим насосом ПН 1,6/16М.

Подача порошку до плазмотрону проводиться через порошкоживлювач перемиканням тумблера на пульті. Від стабільності роботи цього пристрою залежить якість покриття.

Конструкції порошкових живильників досить різноманітні. За принципом дії їх можна поділити на три типи:

1 – з механічним дозуванням напилюваного порошку;

2 – вібраційні з сепаруванням порошків;

3 – з використанням принципу перемішування порошкових матеріалів транспортуючим газом.

Найбільшу стабільність подачі порошку забезпечує порошкоживлювач з механічним дозуванням і саме він є більш перспективним при проведенні процесу нанесення порошкових матеріалів плазмовим напилюванням ущільнюючих покриттів.

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 трансформатору; 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

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трансформатора.

Для створення різних напруг холостого ходу первина обмотка трансформатора поділена на три секції. Дві секції обмотки розміщені над 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 [29].

4.1.2 Вибір допоміжного обладнання

Для активації поверхні основи перед напилюванням застосовують струменево-абразивну обробку, яку виконують за допомогою установки марки АС-50 для сухої підготовки поверхні.

Для рівномірного транспортування порошку в плазмовий розпилювач він повинен мати гарну сипучість. З метою покращення сипучості порошку його сушать. Сушку перед напилюванням виконуємо в сушильній шафі з регулюванням температури до 300°C типу ШСВ 3,5.3,5.6/3, прокалювання порошку виконують в електричній муфельній печі СНОЛ-1,6.2,5.1/9-114.

Для термічної обробки після процесу плазмового напилення використовуємо електровакуумна піч СНВ-1-3-1/16И1 [2].

4.2 Вибір матеріалів

4.2.1 Вибір порошкових матеріалів

Ущільнюючі покриття проточної частини ГТД повинні відповідати наступним вимогам: мати низьку теплопровідність; володіти достатньою корозійною стійкістю; спрацьовуваність пари ущільнення-лопатка повинна забезпечуватися за рахунок зносу ущільнення без наволочення; спрацьовування

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

ущільнення повинне здійснюватися шляхом відокремлення дрібних м'яких часток, які могли б захоплюватися газовим потоком і нестися не викликаючи ушкоджень.

Допоміжний аналіз, зазначених вище твердих і суперечливих вимог, пророблення літератури по даному питанню показали, що для цих цілей може бути придатне композиційне покриття, що включає тугоплавкий зносостійкий компонент і тверде змащення.

У результаті іспитів встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01-20%C(Ni) і ПГ-10К-01-20%BN(Ni) по корозійно - ерозійній і термічній стійкості перевершує серійне осередкове (стільникове) ущільнення з наповнювачем УМ-16П.

Таким чином можливе використання декількох варіантів:

- порошку ПГ-10К-01-20%C(Ni) зернистістю 70...90 мкм;
- порошку ПГ-10К-01-20%BN(Ni) зернистістю 50...70 мкм;
- порошку 20Б зернистістю 50...60 мкм.

Склад порошкових матеріалів для плазмового напилення ущільнюючих покриттів приведений в таблиці 3.1.

Таблиця 4.1 Склад порошків

Марка порошку	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	W
ПГ-10К-01	21,0-25	1,2-1,8	0,8-1,3	до 2,0	1,3-1,7	28-32,0	зал.	3,5-4,5
УМ-16П	2,8-3,2	0,4-0,6	0,9-1,0	0,6-1,0	0,1-0,12	зал.	-	-

4.2.2 Вибір газів

Основними вимогами до плазмоутворюючого газу є мінімальна хімічна взаємодія з електродами плазмотрону, яка визначає його ресурсні характеристики, та відсутність взаємодії з напилюваним матеріалом та

покриттям. Саме тому найбільш часто в якості плазмоутворюючих газів застосовують інертні гази – частіше аргон.

Для плазмового напилювання ущільнюючих покриттів на підкладку в якості плазми утворюючого та транспортуючого газів застосовуємо аргон вищого сорту.

Перед застосуванням необхідно перевірити газ (по сертифікату) на відповідність обраному сорту. При виявленні невідповідності або низької якості газу в процесі напилювання (по виникненню пульсації напруги та іншим ознакам) необхідно перервати роботу та замінити газ.

4.2.3 Вибір матеріалів для підготовки напилюваної поверхні

В якості абразиву для струменево-абразивної підготовки поверхні для напилювання використовуємо шліфзерно електрокорунда марок 12А, 13А, 14А, 15А зернистістю 63Н, 63П.

Електрокорунд не повинен мати сторонніх домішок. Середній термін роботи абразиву та його втрати наступні: кількість повторних циклів використання – 10...30, витрати – 3...10 кг/м², [30].

4.3 Розробка технологічного процесу

Процес напилювання покриттів являє собою сукупність прийомів та операцій, які виконуються в наступній послідовності:

- підготовка поверхні деталі перед напилюванням;
- підготовка порошків;
- напилювання теплозахисних порошкових покриттів;
- термічна обробка;
- контроль якості напилених покриттів.

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

4.3.1 Підготовка поверхні перед напиленням

Струменево-абразивну обробку поверхні підкладки електрокорундом необхідно проводити на наступному режимі:

Тиск стиснутого повітря, МПа	0,4...0,6
Відстань від зрізу сопла до оброблюємої поверхні, мм	50...120
Діаметр сопла, мм	8...14
Кут падіння струменя на оброблюйому поверхню, град	60...90
Лінійна швидкість переміщення пістолету, мм/хв.	50...400

Повітря в приміщенні підготовки підкладок до напилювання не повинне містити корозійно-активних реагентів, пари масла, пилу.

Час зберігання підкладок з підготовленою поверхнею залежить від умов виконання роботи і не повинен перевищувати 8 годин (2 годин, якщо рване різблення).

Після закінчення процесу підготовки поверхні під напилення категорично забороняється торкатися до підготовленої поверхні руками і брудним інструментом.

При підготовці, монтажі і транспортуванні підкладок, підготовлених до нанесення покриттів, необхідно користуватися знежиреними, чистими інструментами і пристосуваннями, а також чистими брезентовими рукавицями або бавовняними рукавичками.

У разі порушення вимог до процесу підготовки, транспортування і зберігання лопаток з обробленою поверхнею рекомендується повторити всю послідовність операцій підготовки.

4.3.2 Підготовка порошків

Порошки піддають ситовій класифікації. Класифікацію проводять за допомогою сита з сітками №№ 080, 040 і 028.

Для приготування суміші зваженні в чистій ємності порошки в необхідних співвідношеннях зсипають в барабан-змішувач типу "п'яна бочка" для перемішування протягом 4...6 годин при частоті обертання барабана 3 об/хв. Змішувач заповнювати не більше ніж на 1/3 об'єму.

Порошки сушать в сушильній шафі при температурі 130...150° С протягом 3...5 годин в деках з нержавіючої сталі. ПГ-10К-01+20%С(Ni) або ПГ-10К-01+20%BN(Ni) прожарюють в електропечі при температурі 600...800° С протягом 3,5 годин. Товщина шару засипки висушуваних порошків повинна бути не більше 20 мм.

4.3.3 Напилення ущільнюючих покриттів

Напилення ущільнюючих покриттів проводять в наступній послідовності:

- підготовлене для напилення підкладочне кільце закріплюють в спеціальному пристосуванні УПУ-3Д;

- 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, напиляємі частинці 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...300 А. Збільшення напруги стримується можливостями установки. Цілком прийнятна величина напруги 80...110 В, яка досягаєма при застосуванні джерела живлення ИПН 160/600 та плазмотрона ПН-14М;

- здійснюють підігрів кільця плазмовим струменем до 300...500 °С. Контроль температури напилюваної поверхні проводять термоіндикаторними датчиками;

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

Параметри режимів плазмового напилювання наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Параметри режиму плазмового напилювання

Вид покриття	Сила струму, А	Напруга, В	Витрати плазмоутворюючого газу, м ³ /с	Дистанція напилювання, мм
ПГ-10К-01+20%С(Ni) ПГ-10К-01+20%ВN(Ni)	250-300	80-110	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4}$	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.

4.3.4 Термічна обробка

Ущільнюючі покриття, нанесенні плазмовим напиленням, не завжди задовольняють експлуатаційним вимогам в основному із-за появи тріщин та відшарувань. На ці дефекти важливе значення оказують фазові перетворення при термічній обробці.

Таким чином, аналізую отримані результати досліджень можна зробити висновок, що оптимальними параметрами термічної обробки напилених деталей буде нагрівання до температур 1000...1050°C та час витримки 1...1,5 години.

Термічну обробку напилених вставок проводять в електровакуумній печі СНВ-1-3-1/16 И1. ТУ 16-531.594-76. Вставки розташовують горизонтально, не укладаючи одна на одну.

4.3.5 Контроль якості напилених покриттів

Вироби з 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 ЛИ-3, ЛИ-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) та 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.

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

Висновки: в процесі розробки технологічного процесу напилювання ущільнюючих покриттів прийняті наступні рішення:

- обрана установка УПУ-3Д;

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

- в якості матеріалів для напилювання обрані порошки: ПГ-10К-01+20%С(Ni) та ПГ-10К-01+20%BN(Ni). В якості плазмоутворюючого і транспортуючого газу прийнято аргон вищого сорту;
- на основі обраного обладнання і матеріалів розроблено технологічний процес напилювання ущільнюючих покриттів на підкладочні кільця ГТД, який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напилюванням, просушування порошку, плазмове напилювання покриття, термічна обробка, контроль якості покриття.

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 04. ПЗ.	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 05. ПЗ.				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Студент		Светлицький Д.В.			Визначення економічних показників технологічного процесу		Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник		Лебедев В.О.						85	7
Конс.		Лебедев В.О.					ХННІ НУК		
Н. Контр.		Лебедев В.О.							
Зав. каф.		Єрмолаєв Г.В.							

Економічна частина кваліфікаційної роботи містить розрахунки, які відображають величину затрат на здійснення технологічного процесу плазмового напилювання ущільнюючих покриттів.

Початкові дані для розрахунку собівартості технологічного процесу напилювання ущільнюючих покриттів наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Початкові дані

Річний випуск продукції, шт.	500
Трудомісткість напилювання кільця, н–год.	1,38
Річна трудомісткість, н–год.	690

Розрахунок вартості обладнання, яке застосовується на дільниці, наведений в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Розрахунок вартості обладнання

Найменування обладнання	Кількість обладнання, од	Вартість одиниці обладнання, грн	Загальна вартість обладнання, грн
Установка піскоструменевого очищення	1	12000	12000
Установка УПУ-ЗД	1	70000	70000
Вакуумна піч	1	50000	50000
Всього	-	-	132000

Сумарна вартість обладнання визначається помноженням дійсних цін на кількість обладнання.

Вартість одиниці кожного виду обладнання прийнята згідно з цінами заводів-виробників.

5.1 Розрахунок прямого фонду заробітної плати

Прямий фонд заробітної плати основних робітників розраховується за формулою:

$$З_{пр.ф.ос.р.} = З_{ср.ос.р.} \cdot T_p \quad (5.1)$$

де $З_{пр.ф.ос.р.}$ - прямий фонд заробітної плати основних робітників, грн;

$З_{ср.ос.р.}$ - середня тарифна ставка основних робітників, грн/год;

T_p - річна трудомісткість, н-год. $T_p = 690$ н-год.

Тарифні ставки для основних робітників різних розрядів з нормальними умовами праці, затверджені сумісним рішенням адміністрації та профкому Херсонського суднобудівного заводу, та наведені в таблиці 5.3.

На ділянці плазмового напилення працює троє основних робітників, двоє з яких мають 3 розряд, а один - 4.

Тоді, згідно (5.3) прямий фонд заробітної плати основних робітників:

$$З_{пр.ф.ос.р.} = 2 \cdot 64 \cdot 690 + 70 \cdot 690 = 136620 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3 Тарифні ставки основних робітників

Розряд	3	4
Середній тарифний коефіцієнт	1,35	1,5
Тарифна ставка, грн./год	64	70

5.2 Розрахунок затрат на матеріали

Затрати на матеріали для річного випуску продукції визначаються:

$$З_m = З_{m1} \cdot N \quad (5.2)$$

де $З_m$ - затрати на матеріали для річного випуску, грн;

Z_{M1} - затрати на матеріали для однієї одиниці виробів, грн.;

N - річний обсяг виробництва, шт, $N = 500$ шт.

Розрахунок затрат на матеріали для однієї одиниці виробу виконуємо в табличній формі (таблиця 5.4).

В таблиці 5.4 витрати матеріалів на одну вставку визначені експериментальним шляхом.

По формулі (5.2) визначимо витрати на матеріали для річного випуску продукції:

$$Z_M = 150,4 \cdot 500 = 75200 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.4 Розрахунок затрат при напilenні однієї вставки

Матеріали	Ціна за 1 кг(л), грн	Витрати на одну вставку, кг(л)	Сума витрат на одну вставку, грн
Механічна суміш ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	2140	0,06	128,4
Аргон	0,080	200	16
Електрокорунд	60	0,1	6,0
Всього			150,4

5.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Витрати електроенергії розраховуються за формулою:

$$B_e = \Phi_{ef.обл.} \cdot \kappa_3 \cdot P \quad (5.3)$$

де B_e - витрати електроенергії, кВт;

$\Phi_{ef.обл.}$ - ефективний фонд часу обладнання, год. $\Phi_{ef.обл.} = 1781$ год

κ_3 - коефіцієнт завантаження обладнання;

P - номінальна потужність одиниці обладнання, кВт.

Номінальна потужність кожного виду обладнання, яке застосовується на ділянці плазмового напилення, та його коефіцієнти завантаження наведені в таблиці 8.6.

Тоді згідно з (5.3) річні витрати електроенергії на ділянці складуть:

$$B_e = 1781 \cdot 0,26 \cdot 5 + 1781 \cdot 0,89 \cdot 40 + 1781 \cdot 0,82 \cdot 20 = 94927 \text{ кВт}$$

Затрати на електроенергію визначаються:

$$Z_e = B_e \cdot C_e \quad (5.4)$$

де Z_e - затрати на електроенергію, грн.;

C_e - вартість одного кіловата електроенергії, $C_e = 3,30$ грн./кВт

$$Z_e = 94927 \cdot 3,30 = 313259 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 Обладнання, яке застосовується на ділянці

Найменування обладнання	Кількість обладнання, одиниць	Номінальна потужність одиниці обладнання (P), кВт	Коефіцієнт завантаження обладнання (κ_3)
Апарат для струміневого очищення	1	5	0,26
Установка УПУ-ЗД	1	40	0,89
Вакуумна піч	1	20	0,82

5.4 Витрати на амортизацію обладнання

Витрати на амортизацію обладнання визначаються як 30% від вартості обладнання:

$$B_{ам.обл.} = 0,3 \cdot C_{обл} \quad (5.5)$$

де $B_{ам.обл.}$ - витрати на амортизацію обладнання, грн;

$C_{обл}$ - вартість обладнання, грн. $C_{обл} = 132000$ грн.

$$B_{ам.обл.} = 0,3 \cdot 132000 = 39600 \text{ грн}$$

5.5 Визначення економічних показників технологічного процесу

Собівартість технологічного процесу наплення визначається за формулою:

$$C_{техн} = Z_m + Z_{пр.ф.ос.р.} + Z_e + B_{ам.обл.} \quad (5.6)$$

де $C_{техн}$ - технологічна собівартість річної програми, грн;

Z_m - затрати на матеріали, грн. $Z_m = 75200$ грн;

$Z_{пр.ф.ос.р.}$ - прямий фонд заробітної плати основних робітників, грн.

$$Z_{пр.ф.ос.р.} = 136620 \text{ грн.}$$

Z_e - затрати на електроенергію, грн. $Z_e = 313259$ грн.

$B_{ам.обл.}$ - витрати на амортизацію обладнання, грн. $B_{ам.обл.} = 39600$, грн.

$$C_{техн.} = 75200 + 136620 + 313259 + 39600 = 564679 \text{ грн.}$$

					МР. 132. 6121м. 02. 05. 05. ПЗ.	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.6 Техніко–економічні показники плазмового напилювання ущільнюючих покриттів

Найменування показників	Величина показників
Річний випуск продукції, шт.	500
Трудомісткість на річну програму, н–год	690
Затрати на матеріали, грн	75200
Прямий фонд заробітної плати основних робітників, грн	136620
Затрати на електроенергію, грн	313259
Витрати на амортизацію обладнання, грн	39600
Технологічна собівартість річної програми, грн	564679

Висновки: річна собівартість технологічного процесу напилення ущільнюючих покриттів на вставки складає 564679 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В процесі технологічних розробок прийняті наступні рішення:

- для напилювання ущільнюючих покриттів на вставки ГТД обрана установка УПУ-3Д;
- в якості матеріалів для напилювання прийняті порошки: ПГ-10К-01+20%С(Ni) або ПГ-10К-01+20%BN(Ni). В якості плазмоутворюючого і транспортуючого газу прийнято аргон вищого сорту;
- на основі обраного обладнання і матеріалів розроблено технологічний процес напилювання ущільнюючих покриттів на вставки ГТД, який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напилюванням, просушування порошку, плазмове напилювання покриття, термічну обробку, контроль якості покриття.

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

- з технологічної і економічної точки зору процес плазмового напилювання ущільнень доцільно виконувати на повітрі;
- встановлено, що два варіанти розроблених ущільнень ПГ-10К-01+20%С(Ni) і ПГ-10К-01 + 20%BN(Ni) по корозійно-ерозійній і термічній стійкості перевершує серійне осередкове ущільнення з наповнювачем 20Б.

В процесі технологічних розробок прийняті наступні рішення:

- для напилення ущільнюючих покриттів на вставки ГТД обрана установка УПУ-3Д;
- в якості матеріалів для напилення прийняті порошки: ПГ-10К-01+20%С(Ni) або ПГ-10К-01+20%BN(Ni). В якості плазмоутворюючого і транспортуючого газу прийнято аргон вищого сорту;
- на основі обраного обладнання і матеріалів розроблено технологічний процес напилювання ущільнюючих покриттів на вставки ГТД,

					МР. 132. 6121м. 02. 05. ПЗ.	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напилюванням, просушування порошку, плазмове напилювання покриття, термічну обробку, контроль якості покриття.

Методами аналітичного розрахунку і комп'ютерного моделювання встановлені кількісні залежності напружень при нагріванні і охолодженні зразків з напилюваним покриттям:

- рівень і характер розподілу поздовжніх напружень на більшій частині зразка з покриттям, де виконується гіпотеза плоских перерізів, можуть бути визначені аналітичним розрахунком. Поперечні і дотичні напруження, де перерізи скривлюються тільки комп'ютерним моделюванням.

- при термоциклуванні зразків з напиленим покриттям в останніх виникають напруження розтягу, що створює умови для крихкого руйнування, як на стадії нагріву (поздовжні в середній частині зразка), так і на стадії охолодження (поперечні на торцевих поверхнях). Поблизу торців на границі розділу виникають дотичні напруження, що створює умови для відшарування покриття.

- максимальних значень поздовжні напруження розтягу в напиленому шарі при нагріванні досягають на поверхні розділу з основним металом, при цьому відмінність напружень по товщині шару зі зменшенням його відносної товщини помітно зменшується.

- при збільшенні відносної товщини поздовжні напруження розтягу на зовнішній поверхні напиленого шару помітно знижуються, досягаючи нуля і переходячи в напруження стиску при співвідношенні товщини a_1/a_2 0,9 і 0,4 в шарах з малою і великою жорсткістю відповідно.

- підрахована собівартість технологічного процесу плазмового напилення ущільнюючих покриттів, в результаті розрахунку встановлено, що собівартість технологічного процесу напилення річної програми складає 564679 грн.

Список джерел інформації

1. 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.
2. Светлицький Д.В. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» на тему «Удосконалення технології отримання ущільнень», Миколаїв, 2022. – 68 с.
3. Лебедев В.О., Дубовий О.М., Лой С.А. Дослідження та оцінка термоциклічної стійкості плазмових ущільнюючих покриттів для вузлів газотурбінних установок // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - №2, 2019.-С. 38-46.
4. Sliney H. E. Solid Lubricant Materials for High Temperatures// A Review, Tribology International, 1982.-15, №5. P. 305-315.
5. Васильев Ю.Н. Природа смазочной способности графита. В кн.: Трение и износ.- 1983.- т.4, №3.- С. 483-491.
6. Wedeven L. D., Harris T. A. Rolling element bearings operating at the extremes// Machine Design.- , 1987.- 59, № 18.- Aug 6.- P.72-76.
7. Deadmore D. L., Sliney H. E. Hardness of Ca F₂ and Ba F₂ solid lubricants at 25 to 670 0C// NASA TM- 88979.-1987.
8. Sliney H. E. The use of silver in self- lubricating coatings for extreme temperatures// ASLE Transactions. - 29, № 3.- 1986.-P. 370-376.
9. Слини. Композиционные материалы для подшипников и уплотнений газовых турбин. Обзор.// Труды Американского Общества Инж. –Мех., Современное машиностроение.-1991.- № 3.- С. 175-180.
10. Della Corte C., Sliney H. E. Composition optimization of self – lubricating chromium carbide based composite cotings for use to 760 0C// ASLF Transactions.- 1987.- 30, № 1.- P. 77-83.

11. Взаимодействие компонентов частиц композиционного порошка никель-графит при плазменном и газопламенном напылении/ А.Л. Борисова, Е.С. Морозова, Е.Г. Лаврик, А.П. Мурашов// Автомат. сварка № 10.- 1991.- С. 32-35.
12. Структура и свойства плазменных покрытий системы никель-графит/ А.Л. Борисова, Е.Г. Лаврик, И.В. Миц, Е.А. Емельянов// Автомат. сварка.- №7-8.- 1992.- С. 20-22.
13. Рево С. Л., Дашевский Н.Н., Борисова А.Л. Влияние струйно- абразивной обработки в процессе плазменного напыления на эрозионную стойкость покрытий на основе никеля// Автомат. сварка.- № 2.- 1996.- С. 20-23.
14. Церуль М. Ф., Мамковский В. П., Белицкий М.Е. Уплотнительные газоплазменные покрытия на основе никелированного порошка нитрида бора // Авиационная промышленность.- 1983.- № 6.- С. 67-69.
15. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях.- М.: Машиностроение, 1986.
16. 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.
17. Дубовий, О.М. Технологія напылення покриттів [Текст]: підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. - 236 с.
18. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, О. В. Махненко, Г. В. Єгоров, А. В. Лабарткава ; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 246 с.
19. Лузан, С.А. Исследование остаточных напряжений в напыленных покрытиях [Текст] / С.А. Лузан, В.Н. Кальянов // Сварочное производство, № 1, 1986. – С. 2 – 4.

20. Долгов, Н.А. Метод определения модуля упругости газотермических покрытий [Текст] / Н.А. Долгов // Порошковая металлургия, 2004, № 7/8. – С. 110 – 115.
21. Похмурский, В. И. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования [Текст] / В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.М. Довгунук, И.И. Сидорак и др. // Автоматическая сварка. – 2006. - № 10. – С. 15 – 19.
22. Кулик, А.Я. Остаточные напряжения в оксидных плазменных покрытиях [Текст] / А.Я. Кулик, Е.А. Шаронов, А.Ю. Мезерницкий // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. – Рига: Зинатне, 1980. – Том 2. – С. 12 – 16.
23. Куприянов, И.Л. Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий наложку [Текст] / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер, Г.Е. Горелик, А.В. Мазовко // Физика и химия обработки материалов, 1988. - № 3. – С. 27 – 31.
24. Бильченко, А.В. Термостойкость азотированной стали H26ЮЗТБ [Текст] / А.В. Бильченко, В.Г. Горбач, А.И. Дудка, А.В. Любомский // Вісник СевНТУ: Зб. наук. пр. Вип. 120/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. - Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 131 – 136.
25. Ермолаев, Г.В. Напряжения и деформации в паяных соединениях [Текст] / Г.В. Ермолаев, В.Н. Кручинов // Технология судостроения и сварочного производства: Сб. научных трудов. - Николаев: НКИ, 1983, С. 48-57.
26. <https://www.plakart.pro/tekhnologii/plazmennoe-napylenie/>.
27. <https://studylib.ru/doc/2313654/ustanovki-plazmennoj-rezki--svarki--naplavki--napyleniya>.
28. Паспорт установки УПУ-3Д.
29. https://www.teh-stroy.ru/st_elektrokorund-peskostruynaya-obrabotka-poverkhnosti-stali-normalnym-elektrokorundom.php.

