

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонська філія**

Кафедра зварювання

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

(освітній рівень)

на тему: Дослідження напружено-деформованого стану плазмових
теплозахисних покриттів, їх властивостей та технологія напилення

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
за освітньо-професійною програмою
Інжиніринг зварювання та споріднених
процесів

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Бондаренко Євгеній Віталійович

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лой Сергій Анатолійович

(прізвище та ініціали)

Херсон - 2020 року

Зміст

Вступ.....	4
1. Аналіз матеріалів за темою досліджень.....	5
1.1 Умови експлуатації і проблема захисту теплонавантажених деталей ГТД	5
1.2 Ущільнюючі покриття.....	7
1.3 Плазмове напилення ущільнюючих покриттів.....	12
1.4 Методи визначення міцності зчеплення покриттів.....	13
1.5 Мета і завдання дипломної роботи.....	14
2. Вибір метода дослідження та побудова комп'ютерних моделей.....	15
2.1 Суть методу скінчених елементів.....	15
2.2 Програмний комплекс ANSYS та його можливості	17
2.3 Моделі для випробування міцності зчеплення покриття з підкладкою...	19
3. Напружено-деформований стан при визначенні міцності зчеплення покриття	26
3.1 Дослідження впливу жорсткості покриття на напружено-деформова- ний стан	26
3.2 Вплив товщини покриття на напружено-деформований стан.....	36
4. Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження властивостей та..... структури покриттів.....	52
4.1 Розрахунок потужності плазмотрону.....	52
4.2 Визначення термоциклічної стійкості покриттів.....	56
4.3 Дослідження стійкості покриттів до теплових змін	62
4.4 Вплив умов експлуатації на мікроструктуру і фазовий склад	64
5. Технологія плазмового напилення покриттів.....	67
5.1 Матеріали для напилення покриттів.....	67
5.2 Обладнання для плазмового напилення.....	68
5.3 Технологічний процес напилювання покриттів.....	72

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						2
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3.1 Підготовка поверхні перед напиленням.....	72
5.3.2 Підготовка порошків.....	73
5.3.3 Напилення ущільнюючих покриттів.....	74
5.3.4 Термічна обробка.....	75
5.3.5 Контроль якості напилених покриттів.....	75
6. Розрахунок собівартості напилення ущільнюючих покриттів.....	77
6.1 Розрахунок прямого фонду заробітної плати	78
6.2 Розрахунок затрат на матеріали	78
6.3 Розрахунок витрат на електроенергію	79
6.4 Витрати на амортизацію обладнання.....	80
6.5 Розрахунок собівартості технологічного процесу напилення.....	
ущільнюючих покриттів.....	81
Загальні висновки.....	83
Список використаної літератури.....	85

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						3
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Істотну роль у машинобудівному комплексі грає газотурбінобудування. Газові турбіни широко використовуються в різних галузях народного господарства. Розширення сфер промислового застосування газових турбін обумовлено рядом їхніх переваг перед іншими енергетичними установками:

- одержання великих абсолютної і питомої потужностей в одному агрегаті;
- компактність;
- простота автоматизації;
- відсутність споживання охолоджуючої води;
- можливість роботи в різних видах палива - газоподібному, рідкому, твердому;
- менше забруднення навколишнього середовища.

В роботі розглядається питання збільшення ККД газотурбінного двигуна за рахунок нанесення припрацьованих ущільнюючих покриттів. Одним із перспективних методів нанесення захисних покриттів є плазмове напилення. Плазмове напилення може здійснюватися на повітрі або у вакуумі. Необхідно відзначити, що нанесення покриттів мало змінює структуру і властивості початкового виробу. Тому для досягнення найбільшого ефекту використання плазмових захисних покриттів, необхідно надати особливу увагу вибору матеріалу, підготовці поверхні виробу, режиму напилення.

Для досягнення найбільшого ефекту використання плазмових теплозахисних покриттів, необхідно надати особливу увагу міцності зчеплення покриття і виробу. Для оцінки міцності зчеплення покриття проводять спеціальні лабораторні випробування на зразках по штифтовій методиці. На жаль, при цьому, як правило, не аналізується кількісний вплив співвідношення товщини покриття і підкладки, їх модулів пружності і т.д. Тому моделювання напруженого стану при визначенні міцності зчеплення та впливу на нього різних факторів актуально.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						4
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 Аналіз матеріалів за темою досліджень

1.1 Умови експлуатації і проблема захисту теплонавантажених деталей ГТД

Внутрішня поверхня корпусу лопаткового апарата піддається впливу агресивних високотемпературних газових потоків, що приводить до високотемпературної сульфідної корозії і твердих часток, що 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.

Лопатки ГТД, виготовлені з нікелевих жароміцних сплавів, працюють в умовах високих температур і великих навантажень.

Соплові лопатки є направляючими лопатками активних ступенів, у які надходить робітниче середовище - газ. У соплових каналах він розширюється, змінюючи тиск, а швидкість його при цьому збільшується. Це відбувається внаслідок звуження соплового каналу і повороту газового потоку. Далі робітниче середовище надходить на робочі лопатки, змушуючи їх обертатися. Вплив на лопатки агресивних високотемпературних газових потоків приводить до високотемпературної сульфідної корозії, що найчастіше і визначає ресурс їхньої роботи [1]. Збільшення робочих температур, підвищення ресурсу роботи, перехід на більш дешеві види палива - вимагає рішення питання захисту лопаток від впливу перерахованих факторів.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						5
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш перспективним напрямком є створення на поверхні лопатки спеціального теплозахисного покриття з високою корозійною і жаростійкістю.

Ущільнення повинні забезпечити приробітку вузлів, мати високу стійкість проти високотемпературної корозії й ерозійну стійкість в умовах впливу високошвидкісного газового потоку, 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].

Застосовувані в суднових ГТД високотемпературні ущільнення в основному не задовольняють цим суперечливій вимогам і вимагають розробки більш ефективних ущільнювальних матеріалів і технологій їхнього одержання.

Припрацьовуємі покриття проточної частини ГТД повинні задовольняти наступним вимогам:

- забезпечувати високу жаростійкість у продуктах згоряння важкого палива до 1373 К;
- мати низьку теплопровідність;
- володіти достатньою ерозійною стійкістю;
- припрацьовуваність пари ущільнення-лопатка повинне забезпечуватися за рахунок зносу ущільнення без наволочування;
- спрацьовування ущільнення повинне здійснюватися шляхом відділення м'яких часток, які могли б легко захоплюватися газовим потоком і нестися з гарячого тракту турбіни, не викликаючи ушкоджень [2].

Застосовувані в суднових ГТД високотемпературні ущільнення в основному не задовольняють цим суперечливій вимогам і вимагають розробки більш ефективних ущільнювальних матеріалів і технологій їхнього одержання.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						6
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ретельний аналіз цих твердих і суперечливих вимог і пророблення літератури показали, що для цих цілей може бути придатне тільки композиційне покриття. Нижче приведений рисунок вставки.

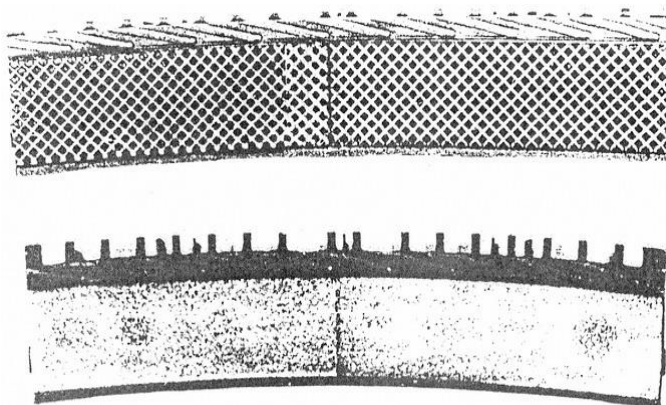


Рисунок 1.1 Вставка

Літературні дані про 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 Ущільнюючі покриття

На сьогоднішній день для захисту деталей гарячого тракту ГТД використовуються різні склади покриттів та методи їх нанесення [2, 3].

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні вимоги до таких покриттів – висока корозійна стійкість в умовах високих температур при наявності шкідливих домішок (1273...1423 К), ерозійна стійкість, стабільність і довговічність, пластичність і міцність, виходячи з чого, покриття повинне бути досить тонким. Можливість видалення ушкодженого покриття і нанесення нового.

Як ущільнювальні елементи для деталей ГТД використовується ряд матеріалів, одержуваних різними методами [4, 5]. 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 К. У деяких випадках графіт і дисульфід молібдену застосовуються при високих температурах, але на короткий час. Графіт при температурах вище 673 К починає окислятися. 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. Інтенсивність окислення вуглецю можна понизити змішуванням із протиокислювальними присадками. Максимальна робоча температура на повітрі таких складів обмежена 775 К. Більш високі робочі температури мають CaF_2 і BaF_2 . Температурні характеристики цих фторидів і металевих срібла приведені в роботі [6]. Тонкі плівки срібла добре змазують до температур 500 °С, але не мають достатню міцність. Фторидні покриття мають

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 [6]. Фторидні покриття зі сріблом забезпечують змазування від кімнатних температур до 800 °С [7].

Покриття серії PS100, що містять стабільні фториди і срібло з нікель-хромовою зв'язкою і PS200, що складаються з тих же самих змащень, карбиду 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 [8].

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. Застосування струйно-абразивної обробки в процесі плазмового напилення сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик [9].

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 [10].

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 [11]. 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.

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, сульфіди, селеніди і теллуриди молібдену, вольфраму, титана), м'які, неорганічні матеріали (свинець, срібло, індій, оксиди свинцю, барію і заліза,

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

фториди кальцію і барію), м'які органічні матеріали (фторопласт, фталоціанін і ін.). До числа найбільш розповсюджених відносяться графіт, дисульфід молібдену, фторид кальцію і фторопласт.

1.3 Плазмове напилення ущільнюючих покриттів

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

У потоці плазми частинки порошку нагріваються приблизно до 1000 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 чим у 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 закристалізовувалися, 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

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

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.

Плазмове напилення може здійснюватися на повітрі або у вакуумі. Як плазмоутворюючі гази можуть використовуватися Ar , H_2 , He , N_2 або їх суміші. Істотне поліпшення властивостей покриттів досягається при використанні плазмового напилення у вакуумі.

Найважливіше значення в технології плазмового напилення має розробка і підготовка порошкових матеріалів [12]. 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 кристаллографічними фазами [13].

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

1.4 Методи визначення міцності зчеплення покриттів

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

Метод гарцювання застосовують для м'яких покриттів типу срібних. Поверхня покриття гарцюють не менше 15...20 с. Для гарцювання застосовують латунні або сталеві щітки з діаметром дроту 0,15...0,25 мм. Швидкість обертання щіток 1800...2500 об/хв. Після гарцювання на контрольованій поверхні не повинно спостерігатися здуття і відшаровування покриттів. Метод нанесення сітки подряпин. На напилену поверхню гострим ножом наносять кілька паралельних ліній, глибиною до основного металу підкладки на відстані 2...3 мм один від одного і стільки ж паралельних ліній, перпендикулярних до них. На поверхні покриття не повинно спостерігатися відшарувань.

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

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

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

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

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

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

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

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

1.5 Мета і завдання роботи

Таким чином на основі зробленого аналізу літературних даних можна зробити висновок, що метою роботи є: розробка технологічного процесу нанесення ущільнюючих теплозахисних покриттів, дослідження методом комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану напилених покриттів при визначенні їх міцності зчеплення, дослідження характеристик 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 покриттів;

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виконати аналіз літератури за методиками оцінки напружено-деформованого стану та вибрати метод дослідження;
- побудувати СЄ моделі для комп'ютерного моделювання;
- виконати аналіз результатів розрахунку напруженого стану при визначенні міцності зчеплення покриттів;
- дати рекомендації з обґрунтуванням вибору розмірів зразків для випробування;
- виконати дослідження експлуатаційних характеристик покриттів;
- розрахувати вартість основних фондів, фонду заробітної плати, собівартість напilenня;
- проілюструвати вищезгадані розрахунки, розробки та вибране обладнання кресленнями, графіками та таблицями.

2 Вибір метода дослідження та побудова комп'ютерних моделей

2.1 Суть методу скінчених елементів

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

Суть методу впливає з його назви. Область, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеве кількість під областей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції. У найпростішому випадку це поліном першого ступеня. Поза своїм елементом апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на кордонах елементів (у вузлах) є вирішенням завдання і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності

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

значення сусідніх функцій на кордонах між елементами (у вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких шукається рішення вихідної системи, прямо пропорційно кількості елементів і обмежується тільки можливостями ЕОМ. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь має розріджений вигляд, що істотно спрощує її рішення.

З точки зору обчислювальної математики, ідея методу скінченних 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. Швидкий розвиток МСЕ пов'язано, в першу чергу, зі створенням високопродуктивних обчислювальних машин і вирішенням проблем аерокосмічної техніки [14].

Переваги та недоліки методу:

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

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

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

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». Система працює на основі геометричного ядра Parasolid [15].

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

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

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

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

інші, а також застосовується на багатьох провідних підприємствах промисловості.

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

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

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

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

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимізація конструкції, таким чином, може вестися з урахуванням усього різноманіття фізичних впливів на неї.

2.3 Моделі для випробування міцності зчеплення покриття з підкладкою

Моделі для випробувань обрали на основі статті [16]. Загальний вигляд зразка для випробувань міцності зчеплення напиляного шару з підкладкою методом витягування штока показаний на рисунку 2.1. Дослідження напруженого стану виконувались в невеликій зоні, що безпосередньо примикає до місця з'єднання торця штока з покриттям (область 4 на рис. 2.1). Саме в цій зоні зосереджені напруження при навантаженні штока.

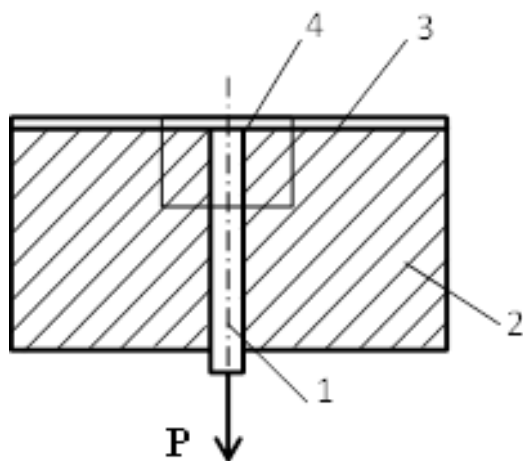


Рис. 2.1. Конструкція зразка для випробування міцності зчеплення покриття методом витягування штока. 1 – шток, 2 – втулка, 3 – напилений шар, 4 – область моделювання напруженого стану при навантаженні

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

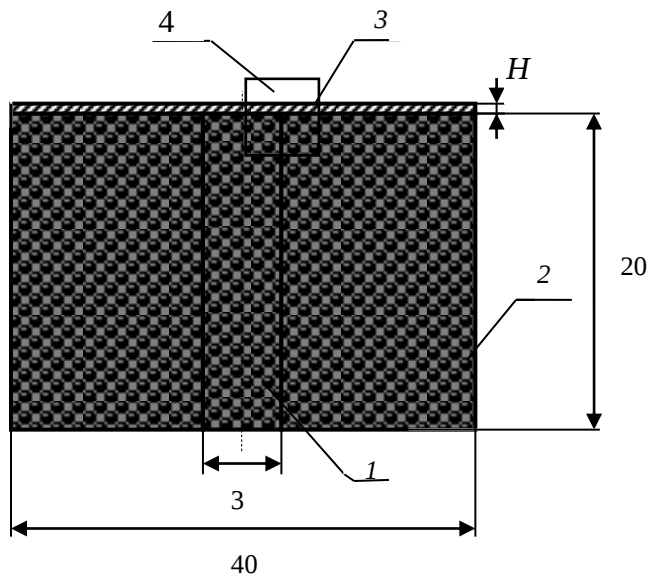


Рисунок 2.2 Фізична модель досліджуваної області: 1- стрижень, 2 – втулка, 3 – напиляний шар, 4 - область моделювання

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

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

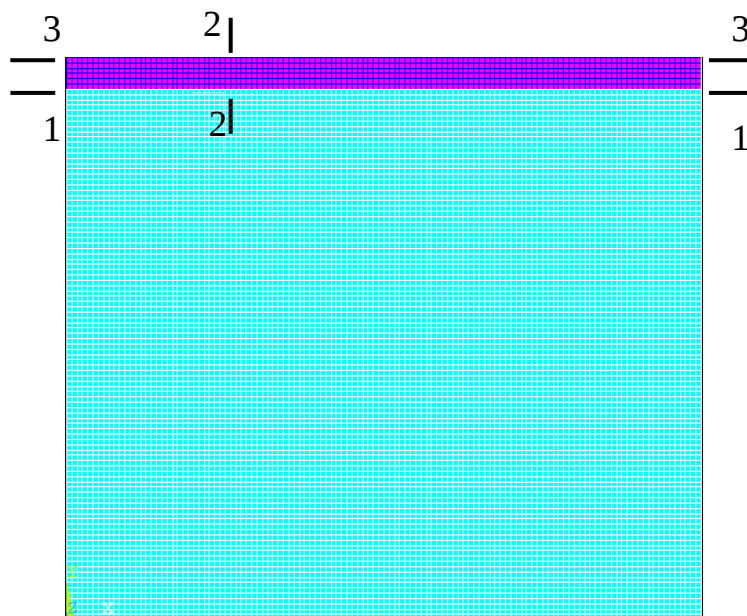


Рисунок 2.3 Скінченно-елементна модель та шляхи 1-1, 2-2 та 3-3 побудови епюр напружень

Таблиця 2.1- Варіанти співвідношення товщини та жорсткостей шарів

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

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

Висновки

1. В якості методу дослідження обрано один з найбільш ефективних чисельних методів вирішення інженерних задач на ЕОМ - метод скінчених елементів.
2. Для реалізації цього методу обраний сучасний універсальний програмний комплекс ANSYS.
3. Побудовано фізичні і СЕ моделі зразків для випробувань міцності напіляного шару при силовому навантаженні. Обрані варіанти товщин і модулів пружності матеріалу напіляного шару.

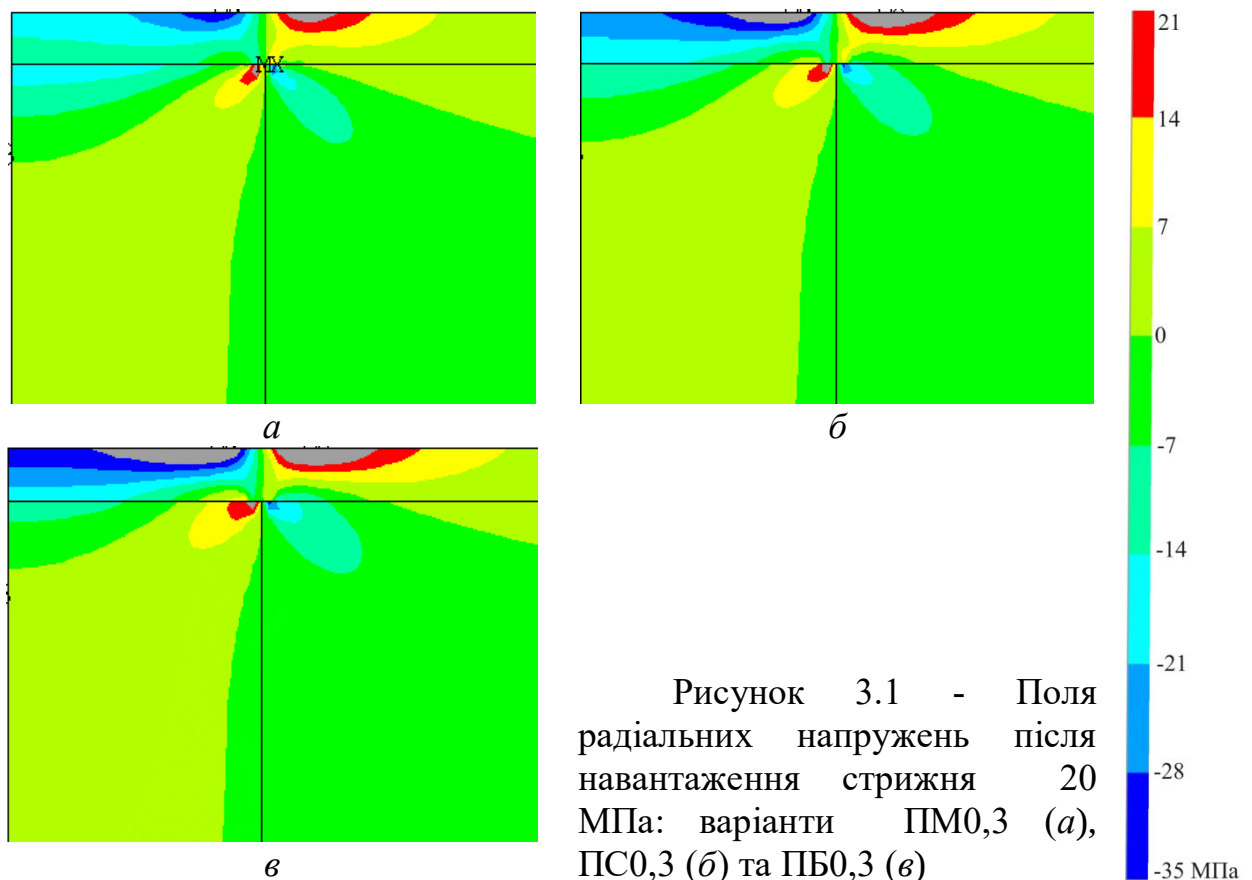
					МР. 132. 6121м. 01. 06. 02. ПЗ.	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

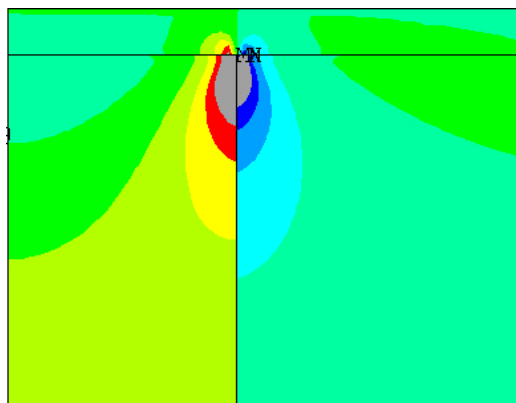
3 Напружено-деформований стан при визначенні міцності зчеплення покриття

3.1 Дослідження впливу жорсткості покриття на напружено-деформований стан

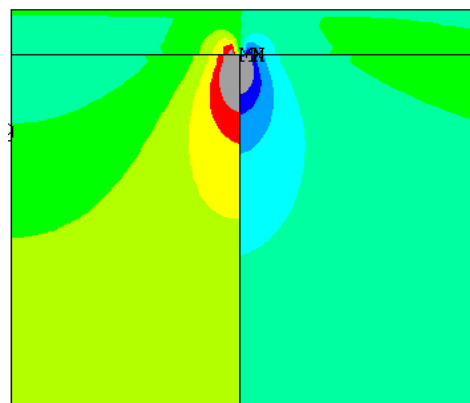
Результати моделювання полів напружень (поздовжніх, поперечних, окружних, дотичних та еквівалентних) в вузлах з напиленням шаром товщиною 0,3 мм при різній жорсткості матеріалу покриття (малої ПМ0,3, середній ПС0,3, великої ПБ0,3) наведені на рисунках 3.1...3.5.

Аналіз полів показує, що характер розподілу напружень практично не залежить від жорсткості матеріалу покриття. Найбільш навантажена ділянка поблизу точки сполучення штока, втулки і покриття. Радіальні та окружні напруження досягають великої величини також на верхній зовнішній поверхні напиляного шару (рис. 3.1 и 3.3).

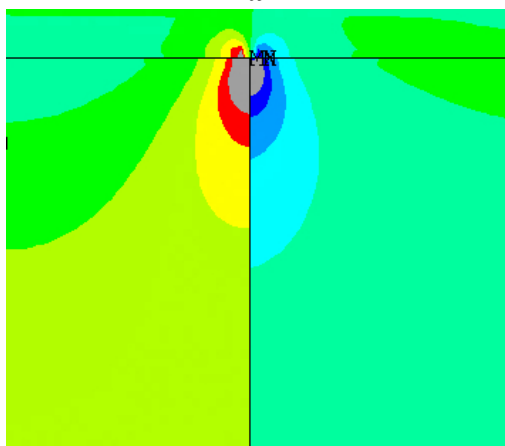




а

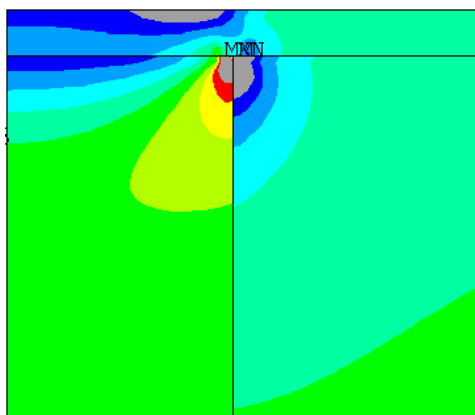
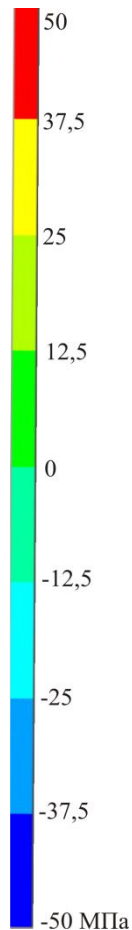


б

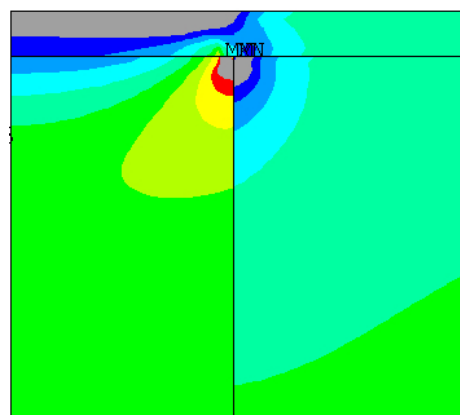


в

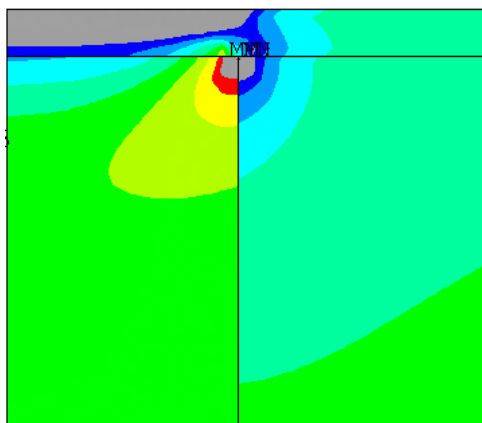
Рисунок 3.2 - Поля осевих напружень після напруження стержня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



а

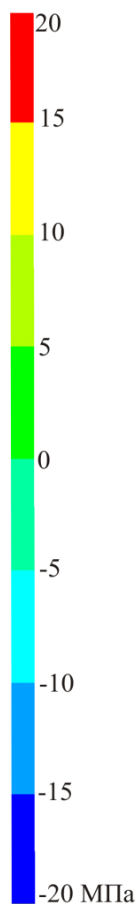


б



в

Рисунок 3.3 - Поля окружних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)

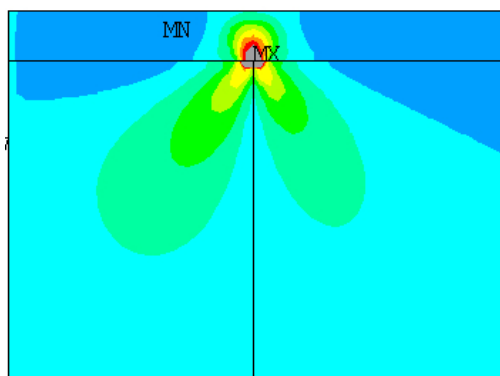


Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

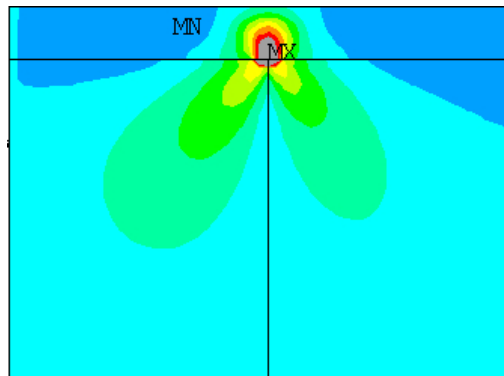
МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.

Арк.

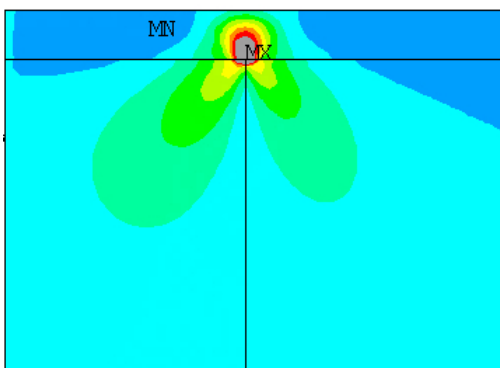
27



a

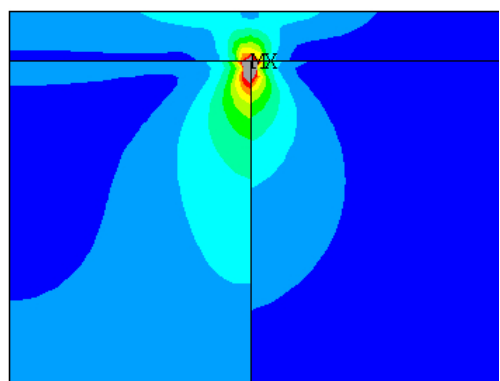
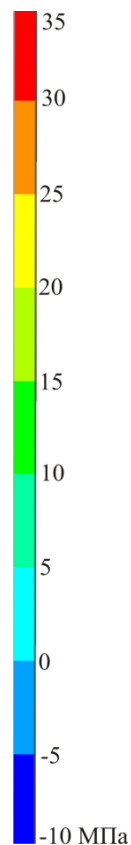


б

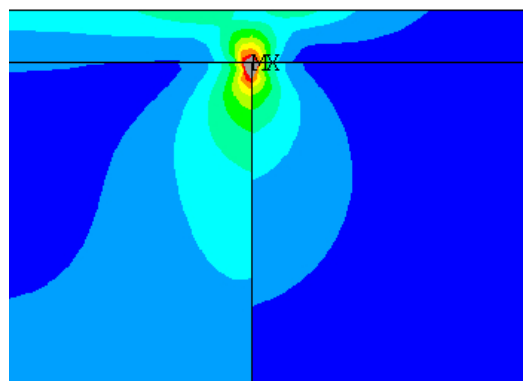


в

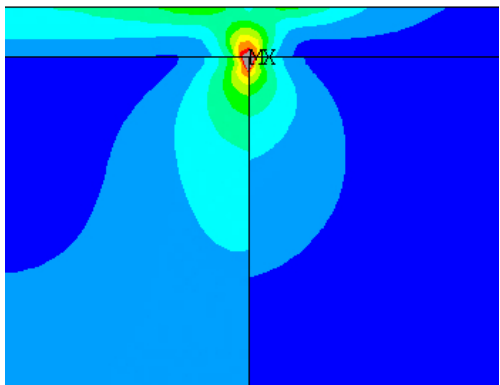
Рисунок 3.4 - Поля дотичних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



a

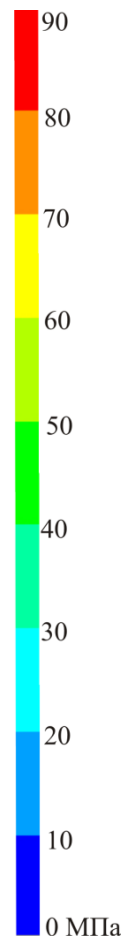


б



в

Рисунок 3.5 - Поля еквівалентних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПМ0,3 (а), ПС0,3 (б) та ПБ0,3 (в)



Для зручності кількісної оцінки рівня та характеру розподілу напружень в найбільш завантажених перерізах моделі на рис. 3.6 ... 3.17 наведені епюри.

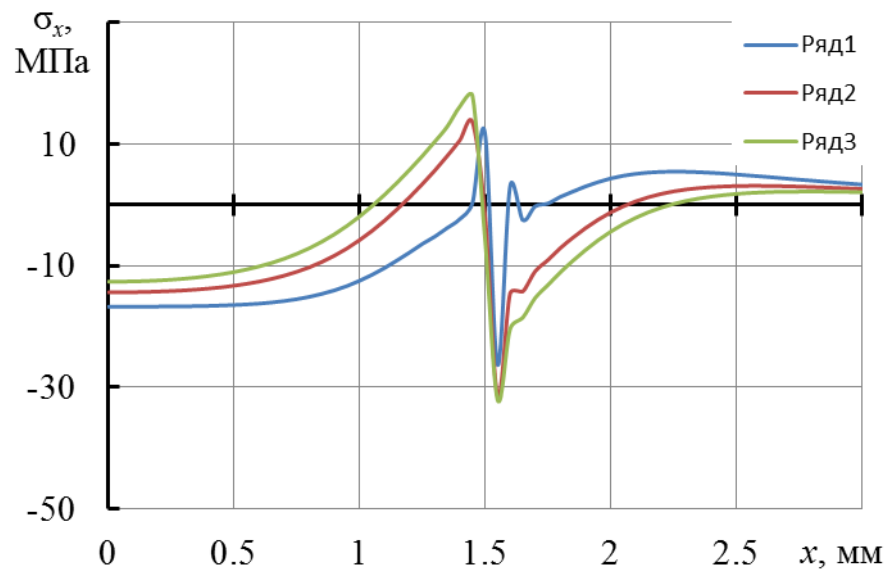


Рисунок 3.6 – Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

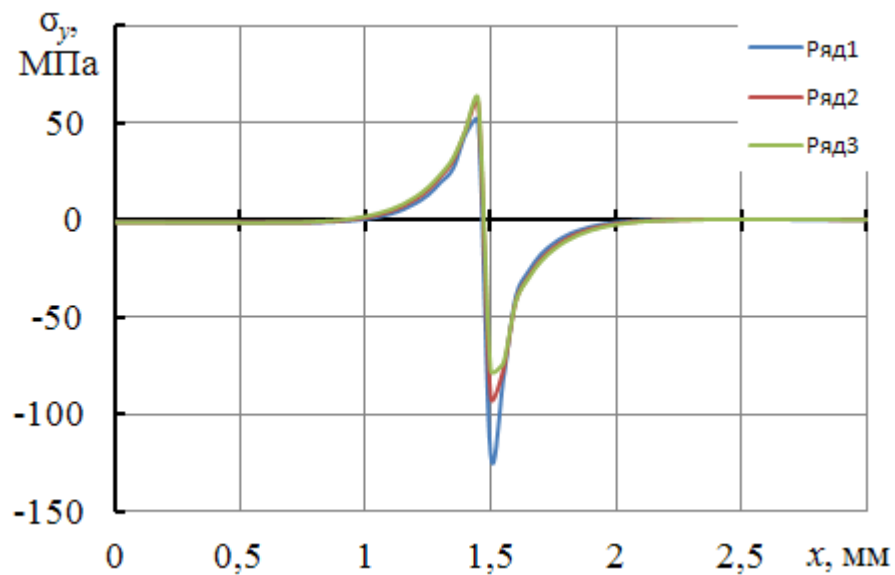


Рисунок 3.7 – Епюри осьових напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

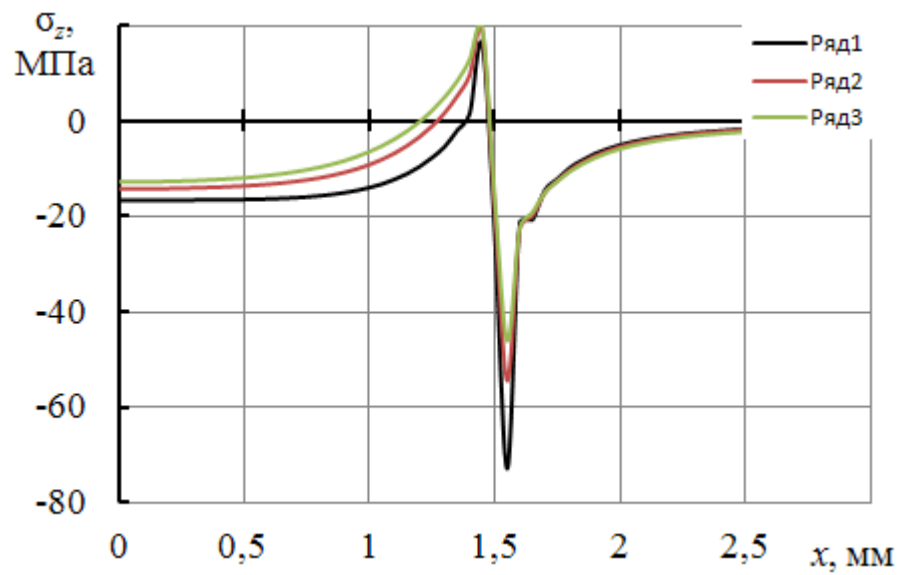


Рисунок 3.8 – Епюри окружних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

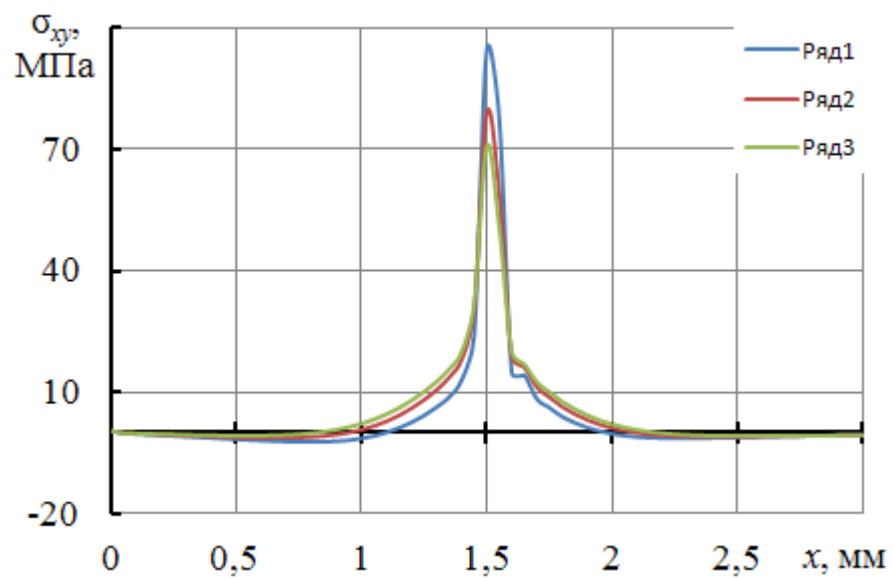


Рисунок 3.9 – Епюри дотичних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1.
Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

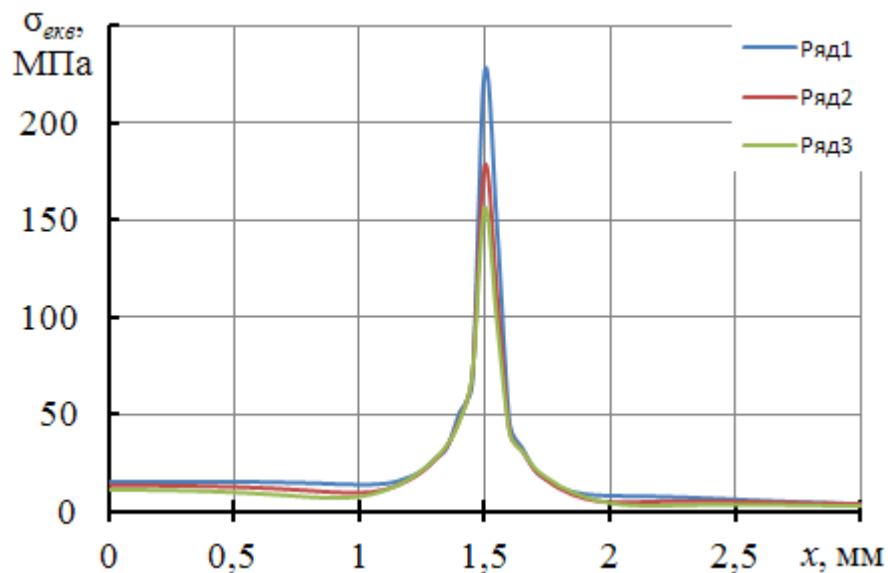


Рисунок 3.10 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 1-1. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Аналіз епюр (рис. 3.6...3.10) показує, що характер розподілу напружень по межі розділу напилений шар - підкладка (переріз 1-1) при зміні жорсткості матеріалу напиляного шару в досить широких межах (в 3 рази) змінюється мало.

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

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

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

напиляного шару збільшується зі збільшенням жорсткості напиляного матеріалу.

Аналогічно змінюються і окружні напруження (рис. 3.8), але рівень максимумів змінюється меншою мірою (не більш 10%), залишаючись на рівні близько 20 МПа. Положення їх відносно точки сполучення шток - втулка залишається незмінним для всіх варіантів жорсткостей напиляного матеріалу.

Епюри осьових (рис. 3.7) , дотичних (рис. 3.9) та еквівалентних (рис. 3.10) напружень при зміні жорсткості напиляного шару практично не змінюються , змінюється лише рівень максимуму - в найменшій мірі осьових (в межах 10%), в дещо більшому ступені дотичних (до 30%) та еквівалентних (до 50%). При цьому рівень максимальних напружень значно перевищує напруження в штоку 20 МПа: осьових в 2,5 рази, дотичних від 3,5 до 4,5 разів, еквівалентних від 7 до 11 разів. Зі збільшенням жорсткості напиляного шару максимумами дотичних і еквівалентних напружень зменшуються.

У напрямку товщини напиляного шару (по перерізу 2-2) все напруження швидко зменшуються в міру віддалення від межі розділу основного металу і напиляного шару (рис. 3.11 ... 3.15).

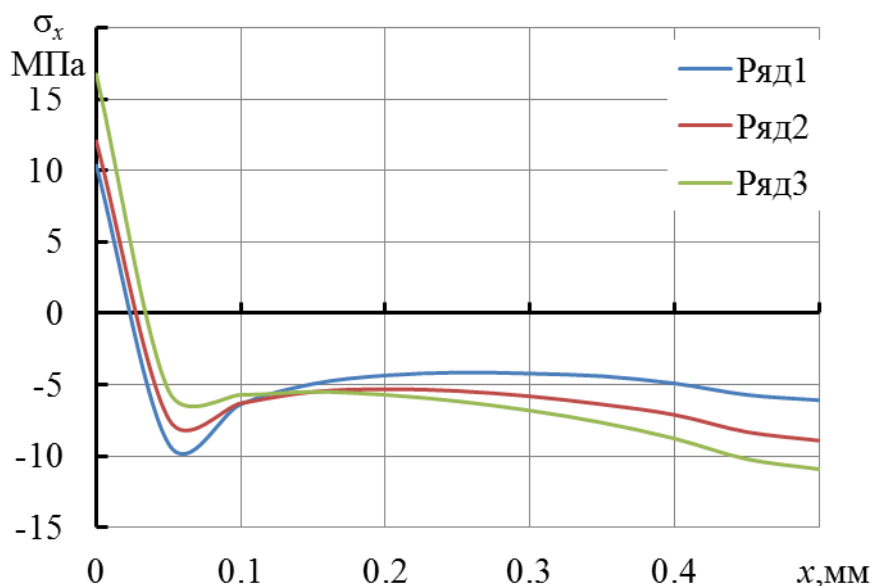


Рисунок 3.11– Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

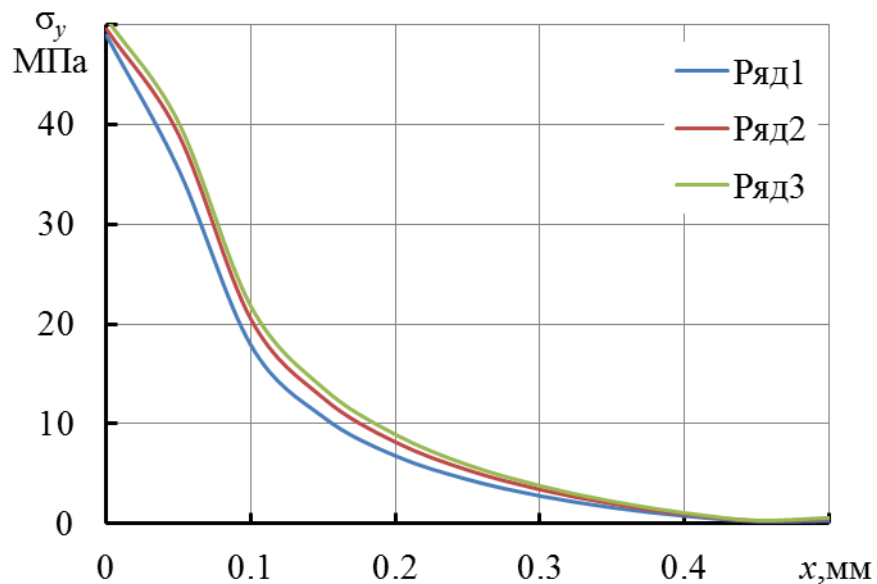


Рисунок 3.12 – Епюри осьових напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

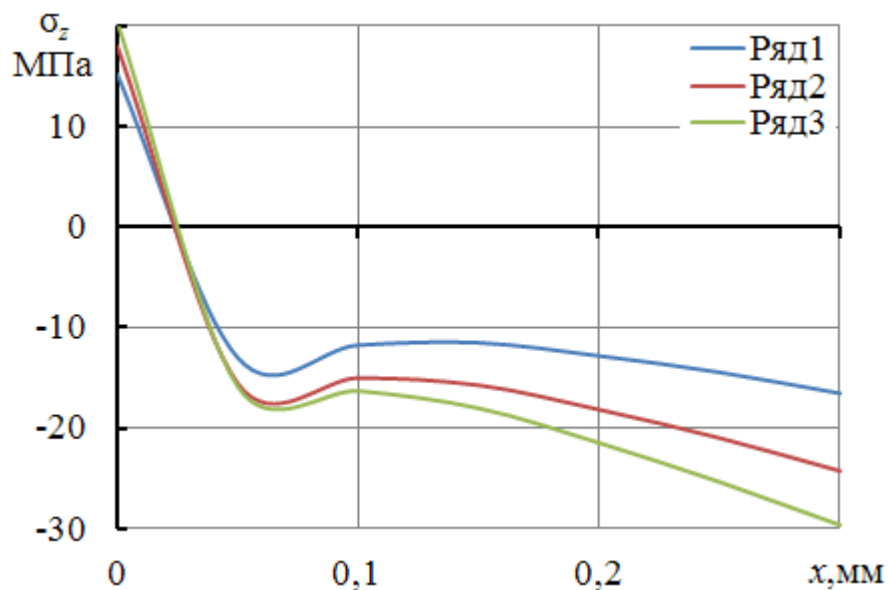


Рисунок 3.13 – Епюри окружних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Радіальні та окружні напруження розтягу (рис. 3.11 і 3.13) зменшуючись, вже на відстані менше 0,05 мм від поверхні розділу досягають нуля і міняють знак на зворотний (стиск).

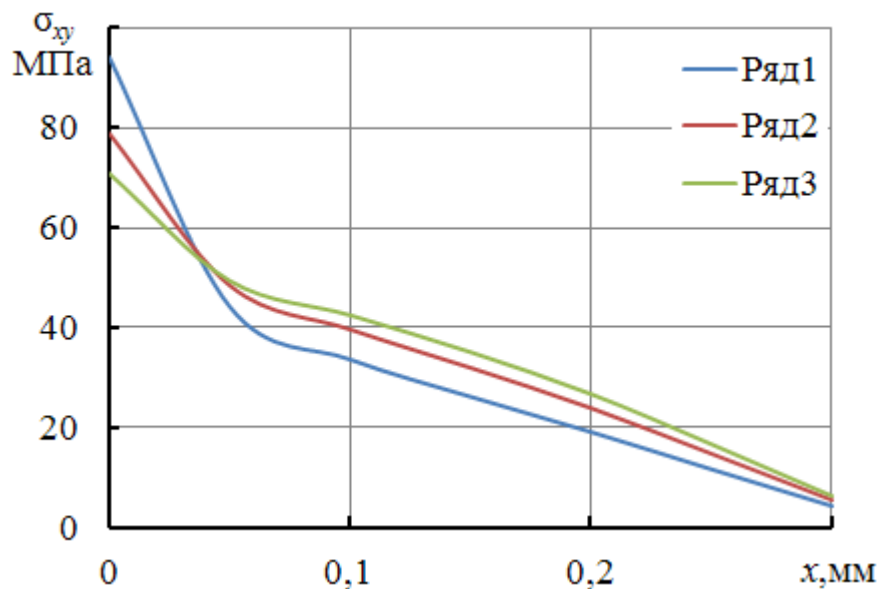


Рисунок 3.14 – Епюри дотичних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

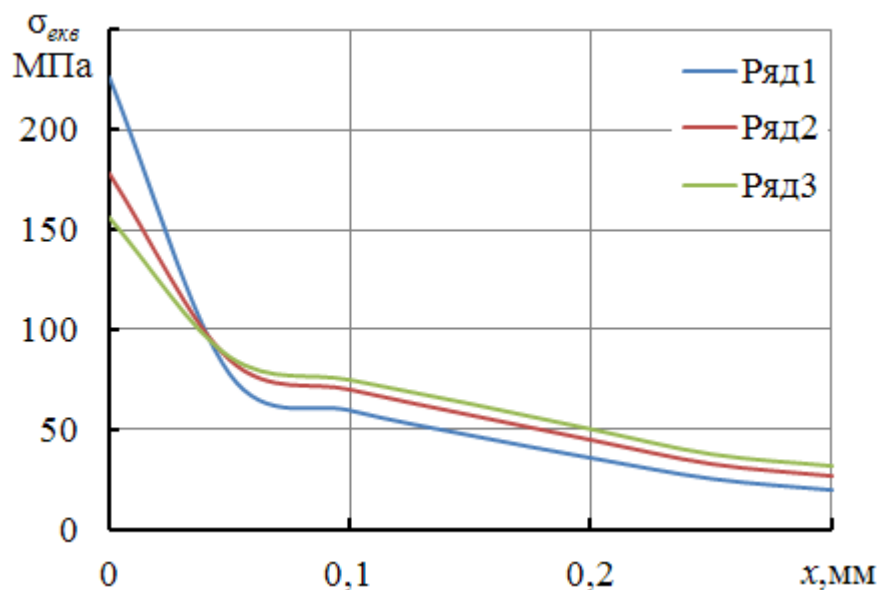


Рисунок 3.15 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 2-2. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

Як показав аналіз полів напружень великі напруження розтягу виникають також на поверхні напиляного шару в радіальному напрямку. Вони зосереджені за межами діаметра штока (рис.3.16), збільшуючись від 0 до 25 ... 40МПа на невеликій відстані (0,2 мм) від точки його сполучення з втулкою. При цьому рівень цих напружень зростає із збільшенням жорсткості напиляного шару.

Відповідно розподілені і еквівалентні напруження на зовнішній поверхні напиляного шару (рис. 3.17). Їх максимуми розташовуються по обидві сторони від точки сполучення шток-втулка, збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару і становлять від 20 до 50МПа.

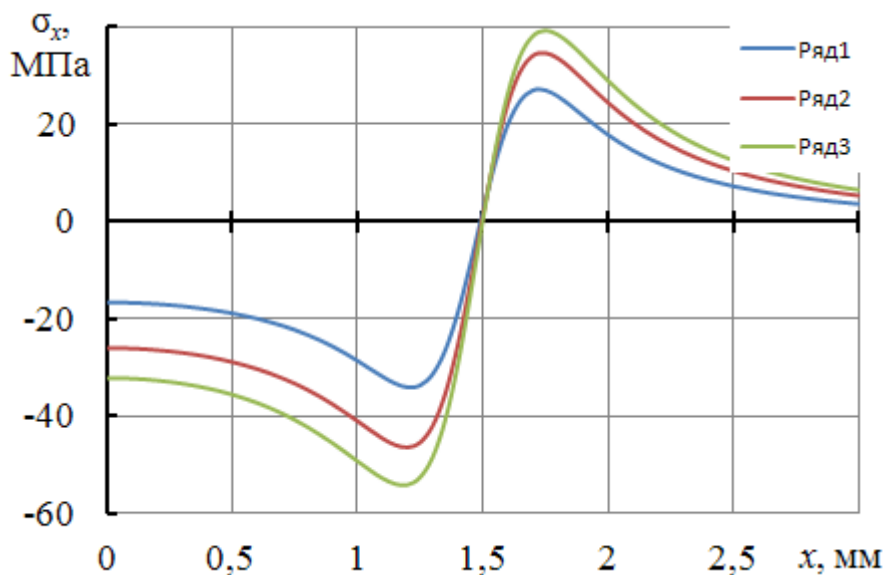


Рисунок 3.16 – Епюри радіальних напружень в напиленому шарі в перерізі 3-3. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

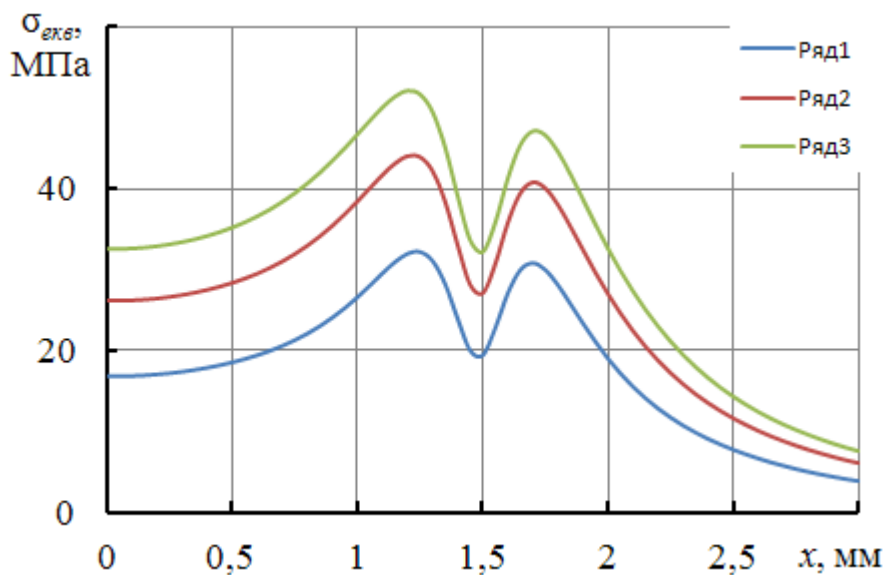


Рисунок 3.17 – Епюри еквівалентних напружень в напиленому шарі в перерізі 3-3. Варіанти ПМ0,3(1), ПС0,3 (2), ПБ0,3 (3)

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

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

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

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

3.2. Вплив товщини покриття на напружено-деформований стан

На рисунках 3.18...3.22 наведені результати моделювання полів напружень (радіальних, осьових, окружних, дотичних та еквівалентних) у вузлах з напиленим шаром товщинами 0,3, 0,4, 0,5 та 1 мм при однаковій середньої жорсткості матеріалу покриття ($E=2 \cdot 10^5$ МПа).

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

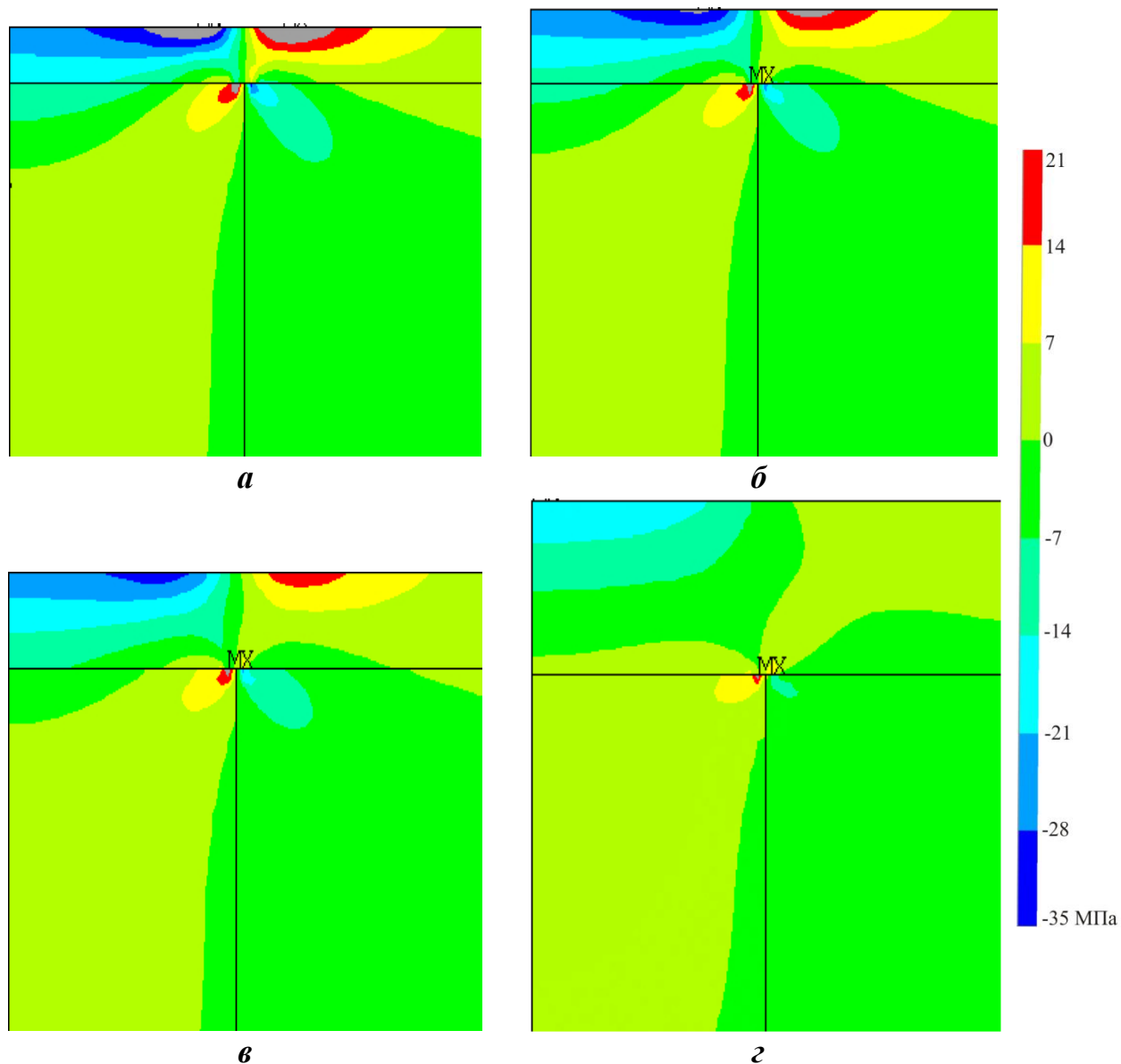


Рисунок 3.18 - Поля радіальних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

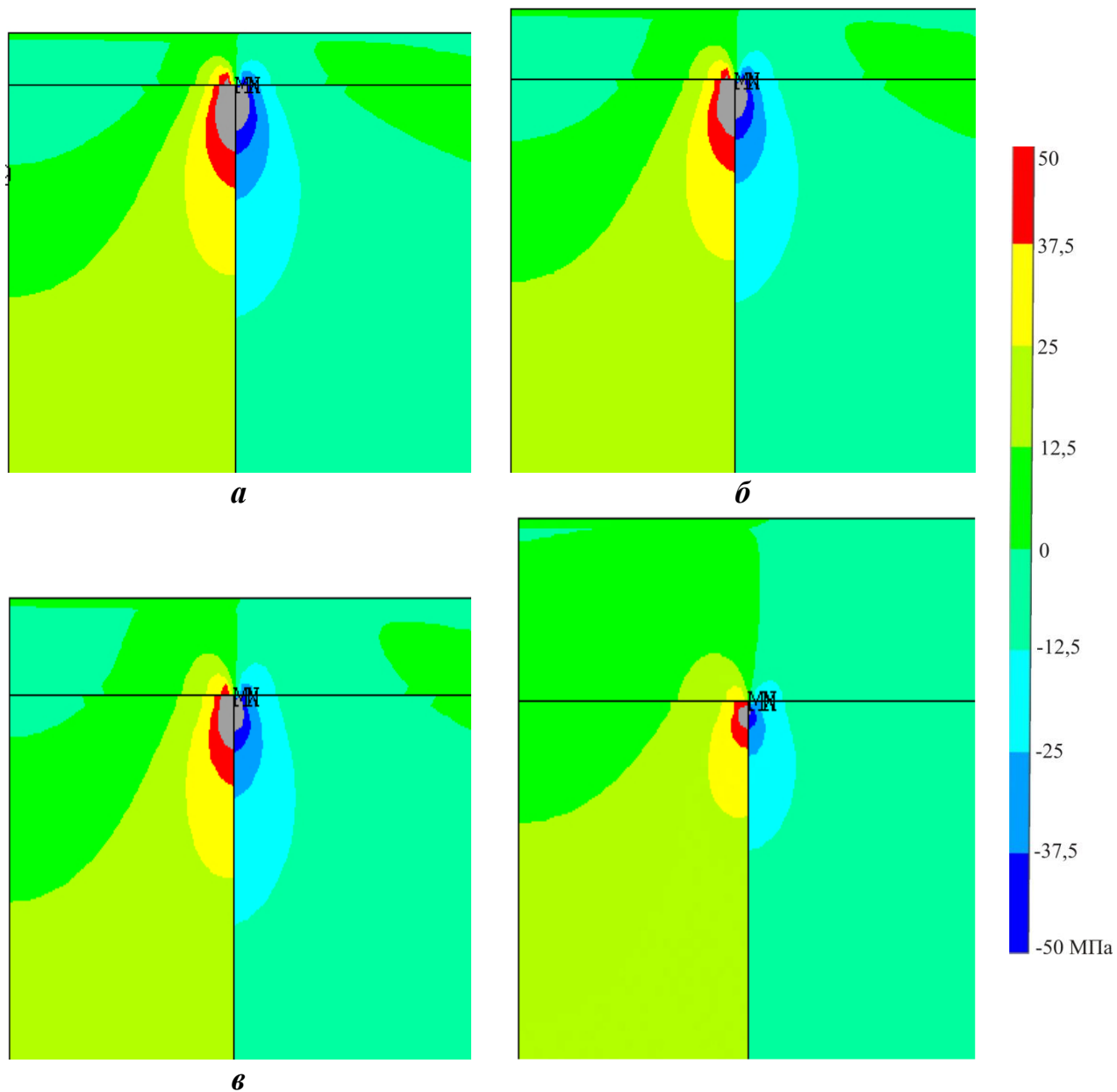


Рисунок 3.19 - Поля осьових напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*з*)

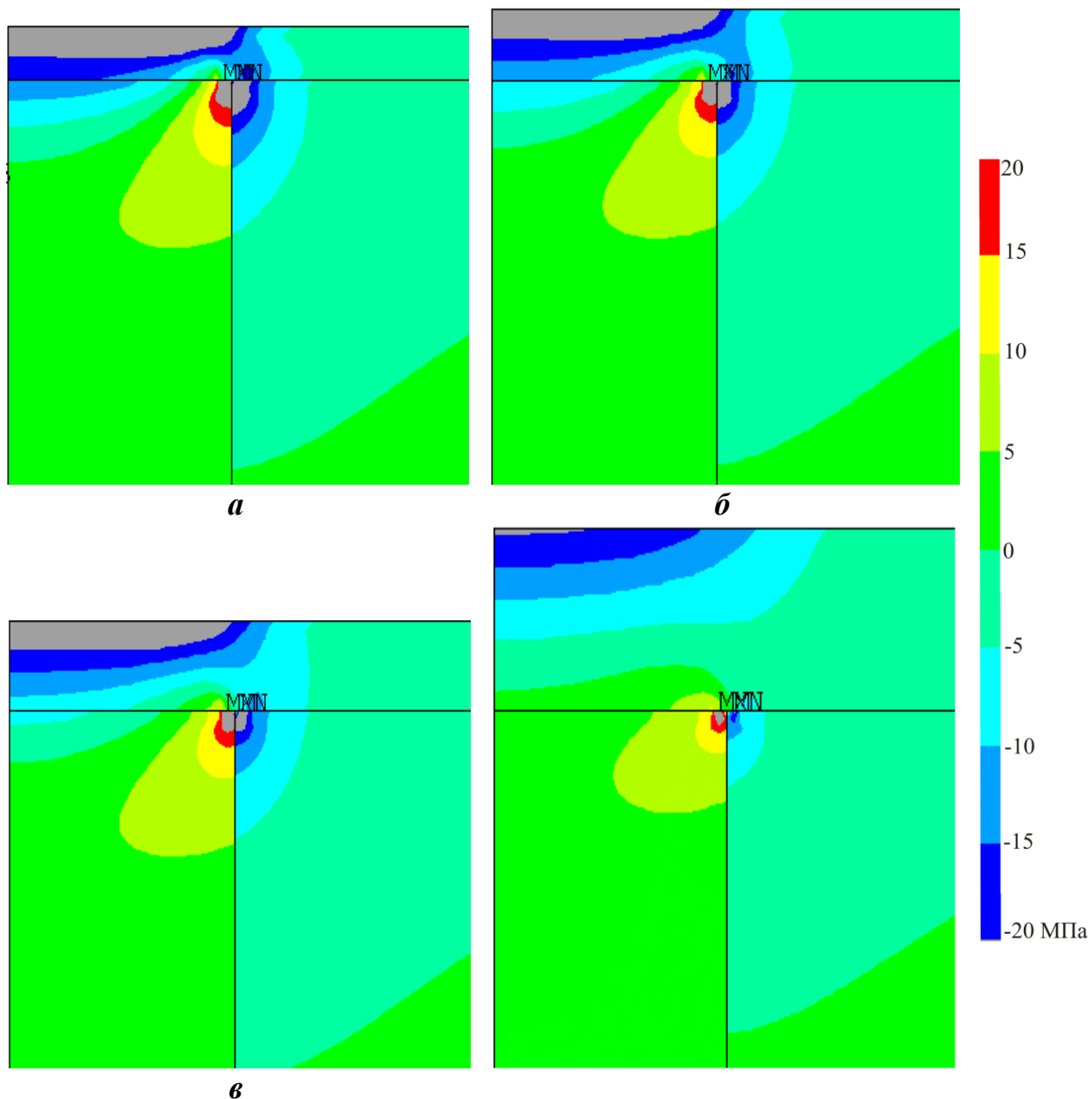


Рисунок 3.20 - Поля окружних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*а*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*г*)

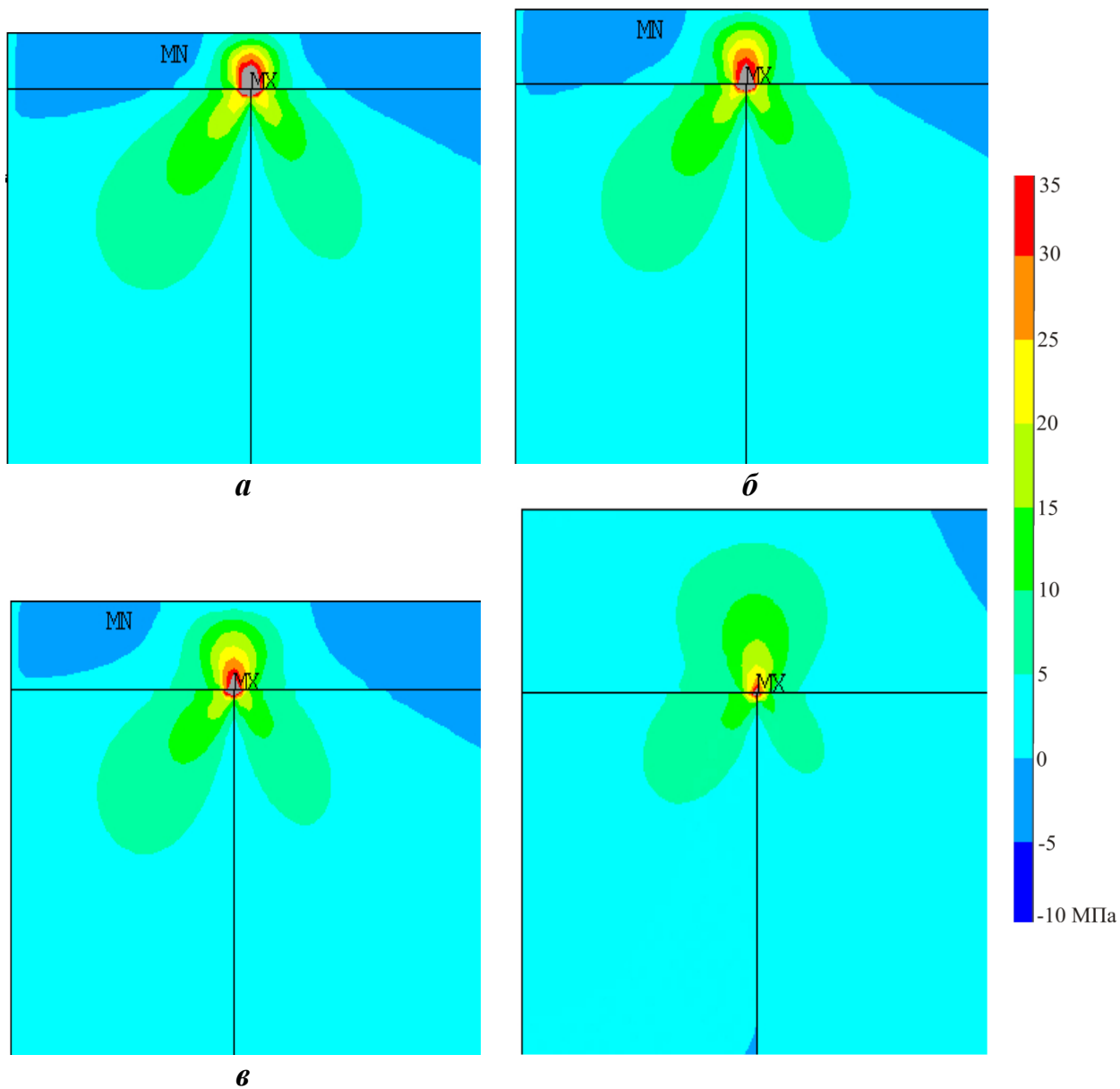


Рисунок 3.21 - Поля дотичних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (*a*), ПС0,4 (*б*), ПС0,5 (*в*) та ПС1,0 (*з*)

					МП. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

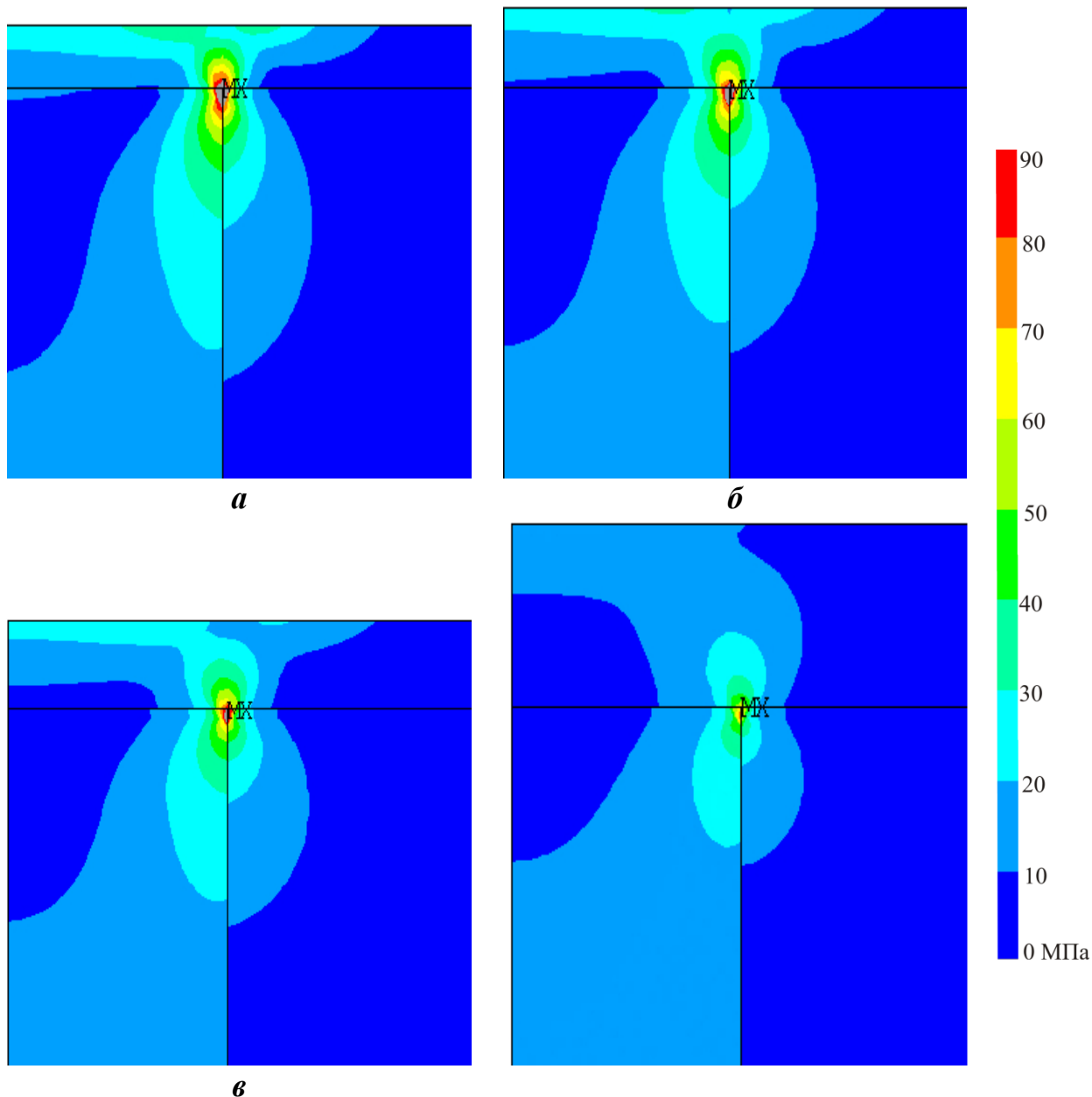


Рисунок 3.22 - Поля еквівалентних напружень після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти ПС0,3 (а), ПС0,4 (б), ПС0,5 (в) та ПС1,0 (г)

Для зручності кількісної оцінки рівня напружень на рисунках 3.23... 3.34 наведені епюри розподілу напружень в напиленому шарі по межі розділу (переріз 1-1), в зоні сполучення шток-втулка (переріз 2-2) і вздовж верхньої (зовнішньої) поверхні (переріз 3-3) напиляного шару.

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

При цьому рівень максимальних радіальних та окружних напружень розтягу (рис. 3.23 та 3.25) при збільшенні товщини майже не змінюється, залишаючись на рівні 14 МПа радіальних та 16...20 МПа окружних. За межами точки максимуму епюра із збільшенням товщини стає більш пологою, в результаті напруження розтягу ростуть, а стиску зменшуються, переходячи в напруження розтягу. Таким чином, ступінь концентрації радіальних та окружних напружень вздовж границі розділу з ростом товщини зменшується.

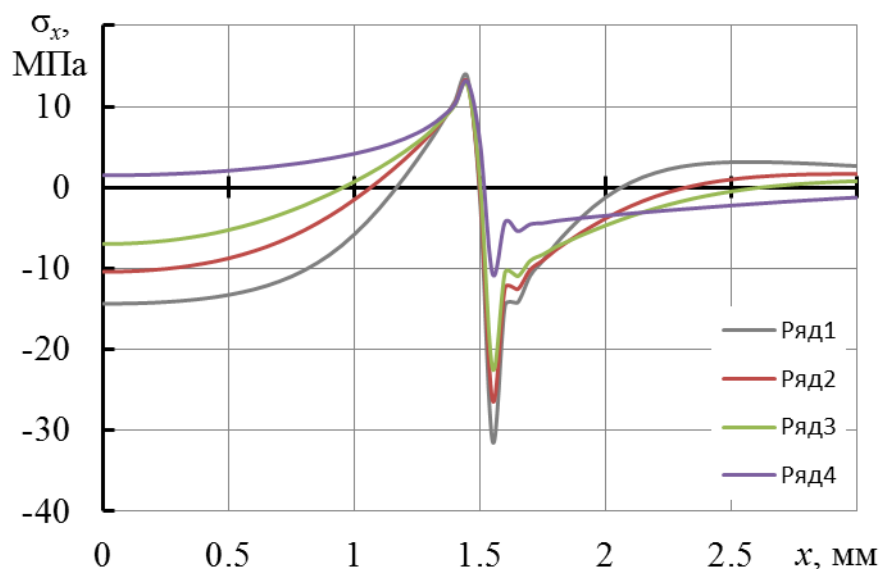


Рисунок 3.23 - Епюри радіальних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Рівень максимальних осьових напружень розтягу (рис. 3.24) із збільшенням товщини зменшується з 59 МПа (0,3 мм) до 37 МПа (1,0мм). За межами точки максимальних напружень вони практично не змінюються. Тобто, ступінь концентрації осьових напружень розтягу вздовж границі розділу з ростом товщини також зменшується.

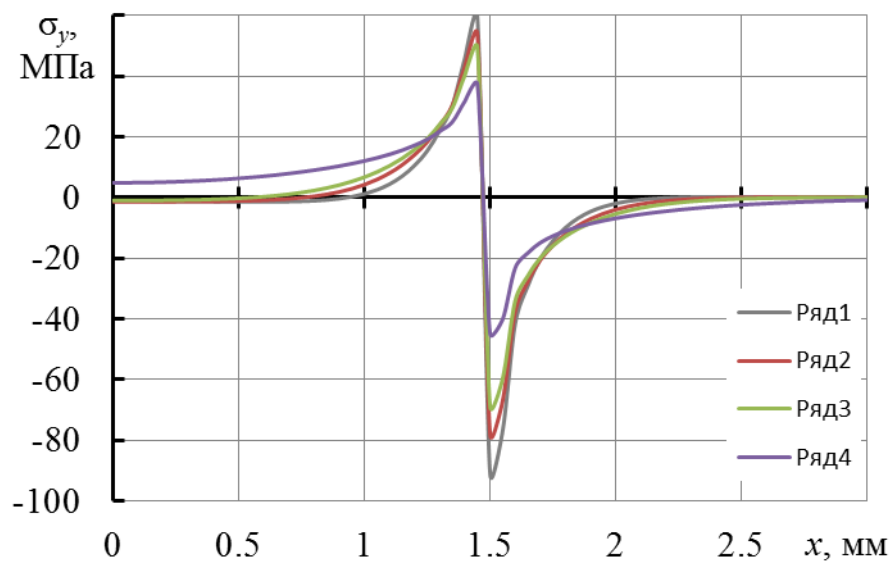


Рисунок 3.24 - Епюри осьових напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

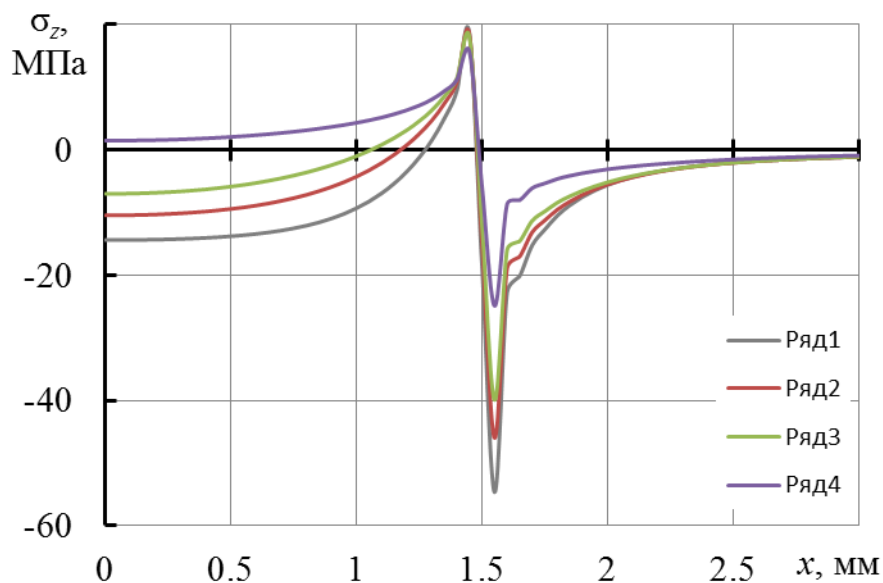


Рисунок 3.25 - Епюри окружних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

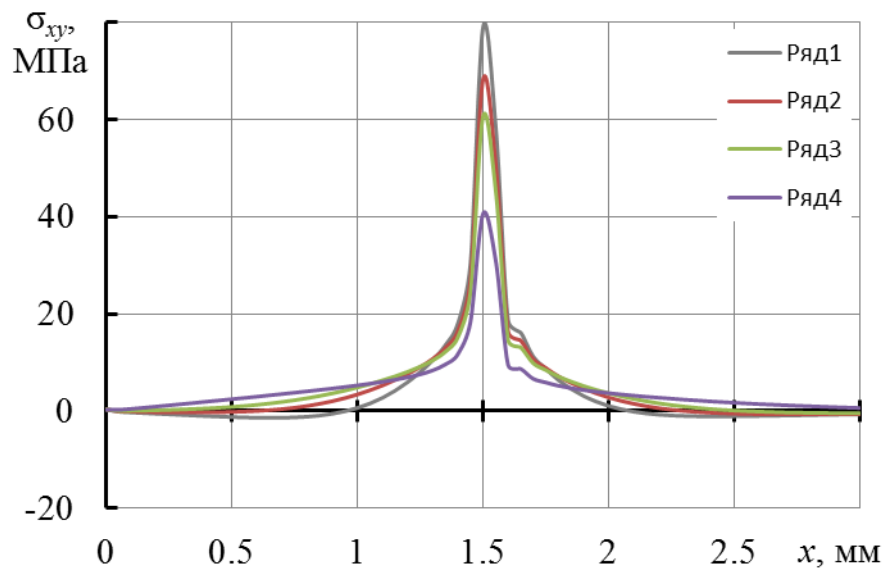


Рисунок 3.26 - Епюри дотичних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

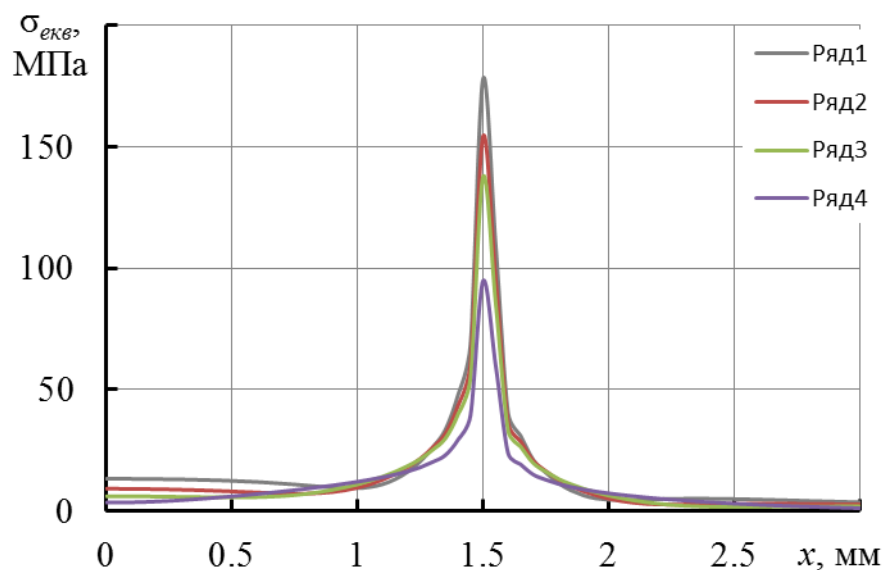


Рисунок 3.27 - Епюри еквівалентних напружень у перерізі 1-1 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Рівень максимальних дотичних напружень (рис. 3.26) із збільшенням товщини зменшується з 79 МПа (0,3 мм) до 40 МПа (1,0 мм), тобто в 2 рази. За межами точки концентрації вони змінюються в меншій мірі і в бік

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

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

Відповідно до змін складових змінюються і еквівалентні напруження (рис. 3.27). Їх максимальні значення 178 МПа при товщині напиленого шару 0,3 мм зменшуються до 95 МПа при товщині 1мм. За межами точки концентрації вони міняються мало. Тобто, коефіцієнт концентрації еквівалентних напружень на межі розділу з збільшенням товщини шару зменшується практично в 2 рази.

У напрямку товщини радіальні напруження розтягу в міру віддалення від межі розділу різко зменшуються, переходять в стискаючи, продовжують наростати на вузькій ділянці шириною близько 0,5 мм, а потім практично стабілізуються і змінюються в межах близько 5МПа (рис. 3. 28).

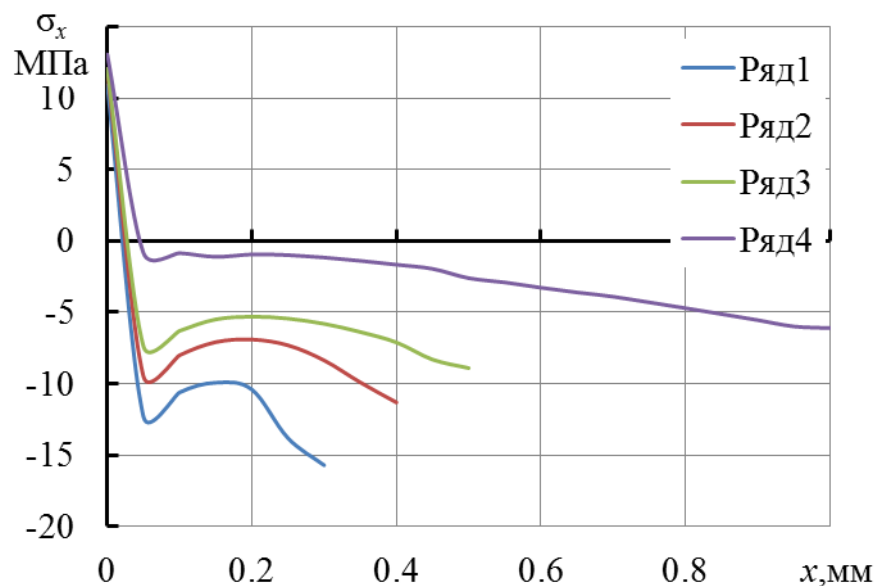


Рисунок 3.28 - Епюри радіальних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Осьові напруження в міру віддалення від межі розділу швидко зменшуються до нуля, тим швидше, чим менше товщина напиляного шару (рис. 3.29).

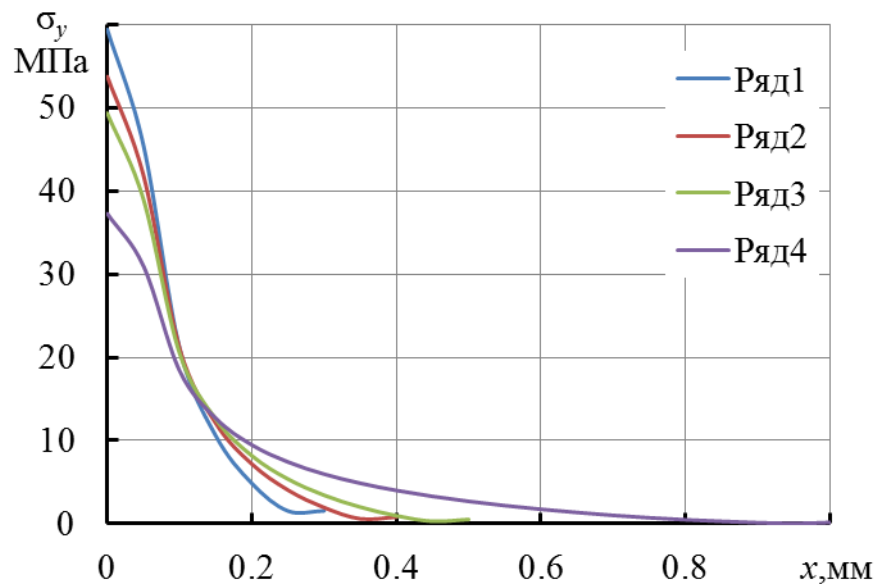


Рисунок 3.29 - Епюри осевих напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

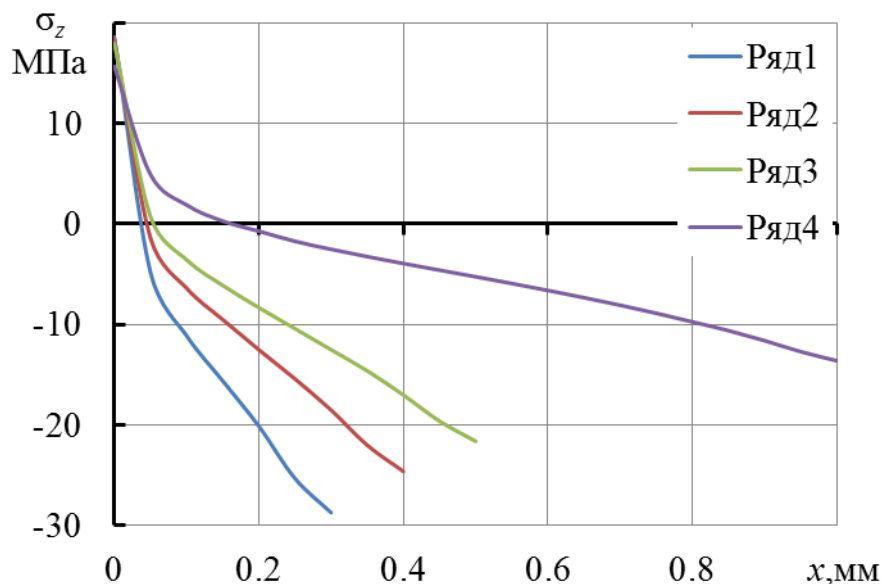


Рисунок 3.30 - Епюри окружних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

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

Дотичні та еквівалентні напруження в міру віддалення від межі розділу також різко зменшуються і продовжують спадати до верхньої поверхні напильного шару (рис. 3. 31 и 3.32).

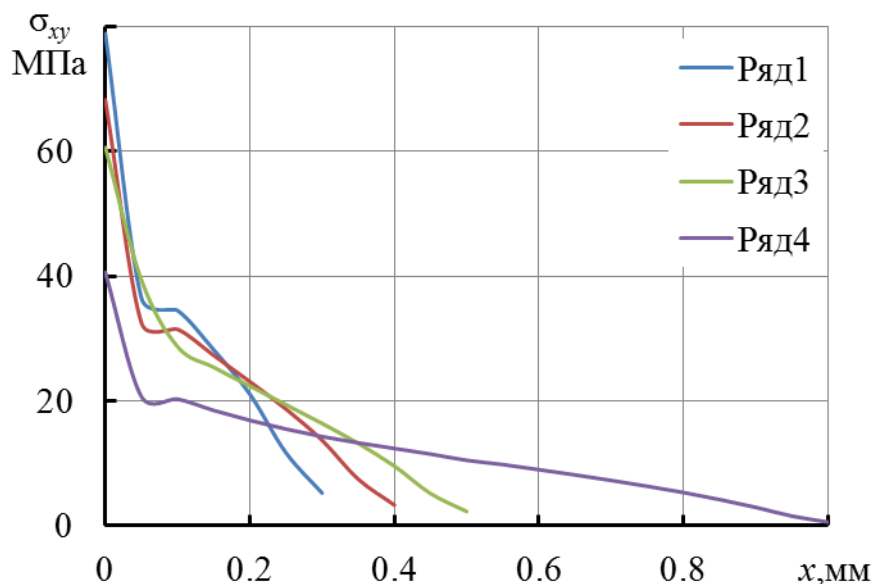


Рисунок 3.31 - Епюри дотичних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

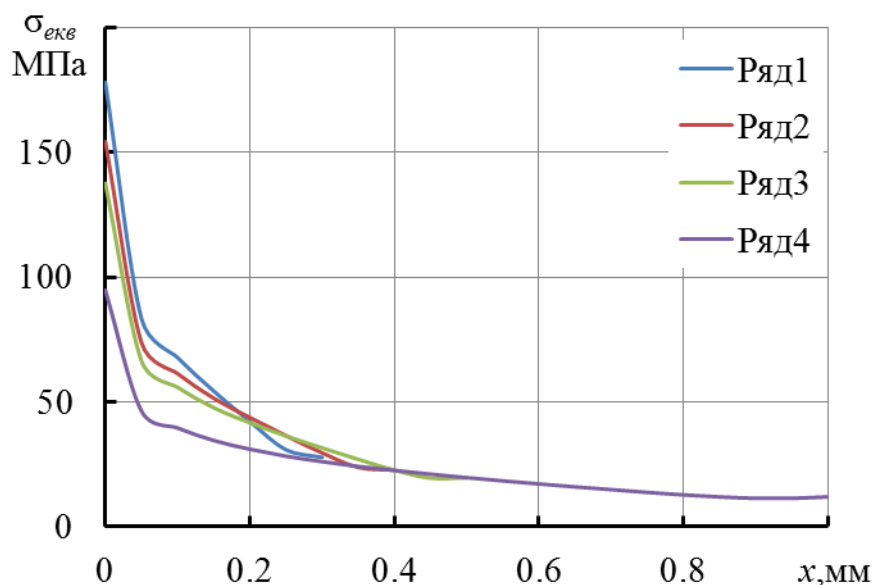
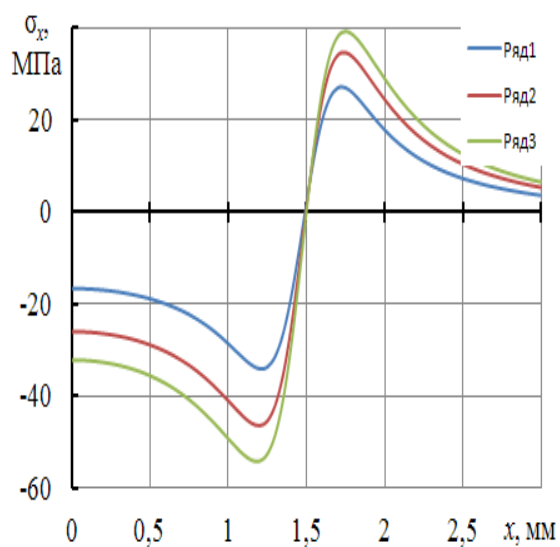


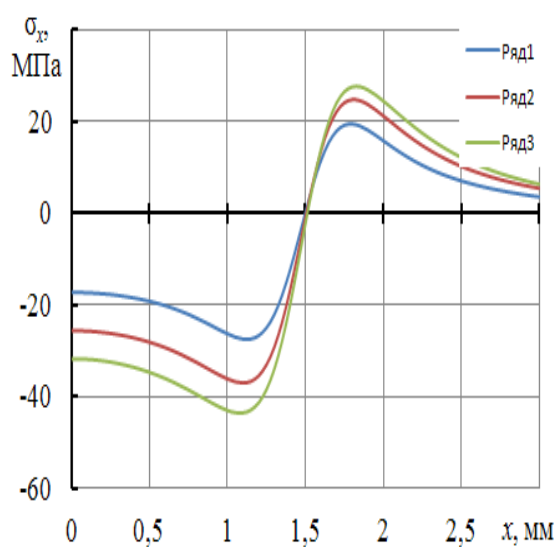
Рисунок 3.32 - Епюри еквівалентних напружень в перерізі 2-2 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

На зовнішній поверхні напиляного шару в межах діаметра штока радіальні напруження - стискаючи (рис. 3.33). Вони поступово наростають у міру віддалення від осі і різко знижуються до нуля в точці сполучення штока і втулки. За межами діаметра штока ці напруження – розтягу, спочатку зростають у міру віддалення від точки сполучення, а потім знову

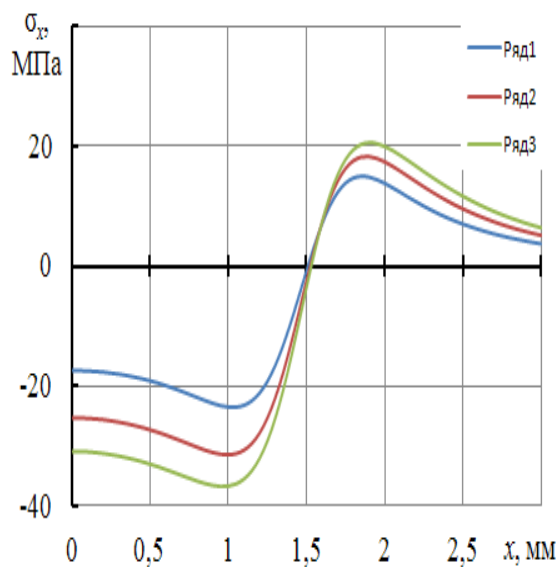
зменшуються, поступово наближаючись до нуля. Ступінь зростання тим більше, чим менше товщина напиляного шару.



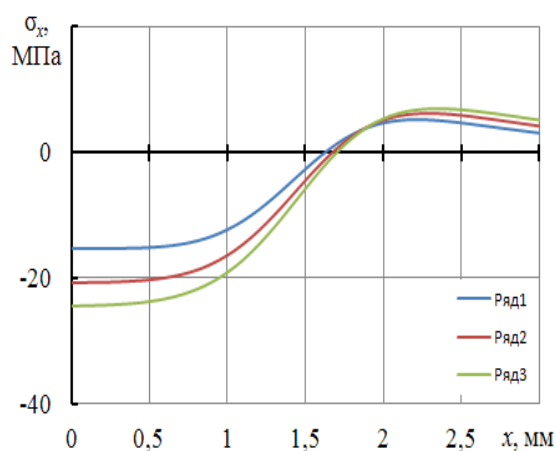
a



б



в



г

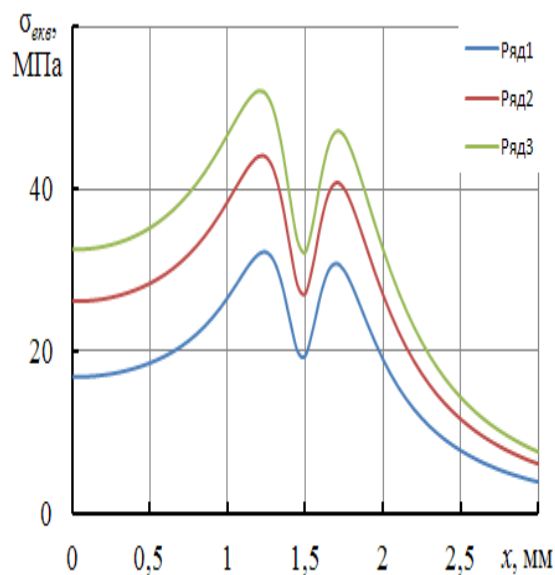
Рисунок 3.33 - Епюри радіальних напружень в перерізі 3-3 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

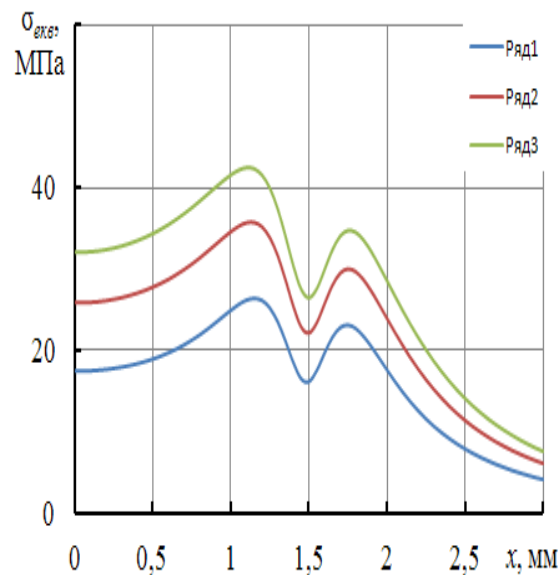
МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.

Арк.

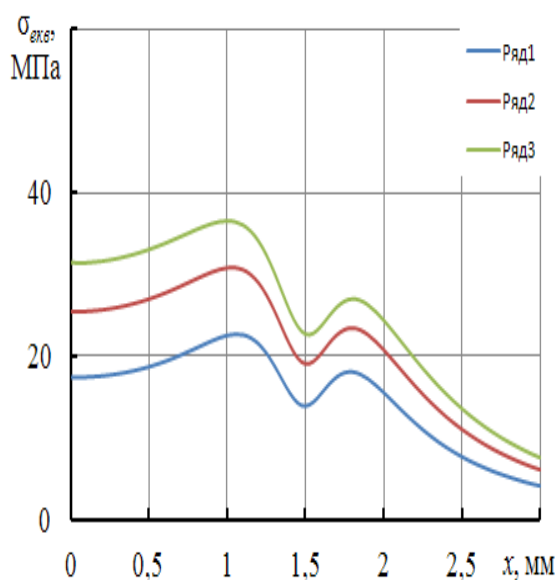
48



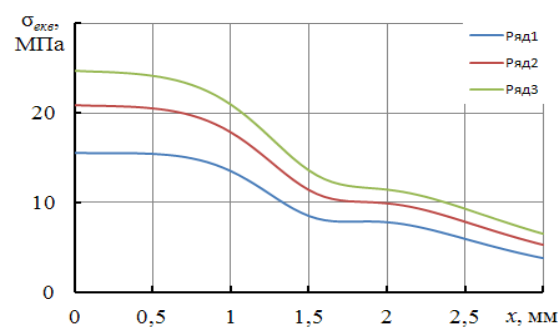
а



б



в



г

Рисунок 3.34 - Епюри еквівалентних напружень в перерізі 3-3 після навантаження стрижня 20 МПа: варіанти товщини 0,3 (1), 0,4 (2), 0,5 (3) та 1,0 (4) мм

Висновки

1. Зі збільшенням жорсткості матеріалу напиляного шару збільшується ймовірність руйнування відривом штока від напиляного шару і зменшується ймовірність руйнування вирином штока разом з напиленим шаром.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.

Арк.

49

2. При випробування міцності напиляного шару найбільш завантажена зона розташована поблизу точки сполучення шток-втулка у поверхні розділу напиляного шару і підкладки.
3. Напруження відриву збільшуються із збільшенням жорсткості напиляного шару від 52 до 62МПа, тобто в 2,5...3 рази перевищують навантаження на штоку (20МПа).
4. Максимальні дотичні та еквівалентні напруження зменшуються зі збільшенням жорсткості покриття з 91 до 72МПа і з 232 до 162МПа відповідно, значно перевищуючи навантаження на штоку.
5. Зразки з тонким напиленим шаром руйнуються відривом тільки при малій силі зчеплення (міцності на відрив) та великій міцності напиляного шару на зріз.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 03. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

4 Розрахунок потужності плазмотрону і дослідження властивостей та структури покриттів

4.1 Розрахунок потужності плазмотрону

Для отримання якісного покриття, необхідно, щоб частинки порошку в плазмовому струмені встигали повністю проплавитися. Для визначення умов оптимального проплавлення частинок порошку і максимального зростання товщини покриття (коефіцієнт осадження матеріалу) запропонована спрощена модель поведінки конденсуючої частинки в плазмовому струмені, за допомогою якого можна легко встановити зв'язок між її газодинамічними параметрами і теплофізичними властивостями порошків. Цей зв'язок дає можливість визначити необхідну потужність для розплавлення частинок порошку. Величину теплової потужності плазмотрона, необхідної для розплавлення частинок матеріалу в струмені аргонної плазми, можна визначити за допомогою виразу (4.1) [17]:

$$P_e = 2,99 \frac{V_r^{1,5} \cdot d_r \cdot D^{0,5}}{\eta \cdot R_0^{1,25} \cdot [l_k + 6(R_0 - R)]^{0,6}}, \quad (4.1)$$

де V_r - витрата плазмоутворюючого газу, м³/с;

d_r - діаметр частинки порошку, м;

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

$$D = C_9^2 \cdot T_{пл}^2 \cdot \rho_r, \quad (4.2)$$

де C_9 - еквівалентна теплоємність частинки, кДж/кг·град;

$$C_9 = \frac{i_r}{T_{пл} - T_0} = \int_{T_0}^{T_{пл}} C_r dT - \frac{i}{T_{пл}} - T_0, \quad (4.3)$$

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

ρ_r - густина частинки, кг/м³;

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						52
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

i_r - ентальпія розплавленого матеріалу частинки, кДж/кг;

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

i - теплота плавлення, кДж/кг;

T_0 - початкова температура, К;

η - ККД плазмотрона;

R_0 - радіус сопла, м;

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

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

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

Чим більше параметр важкості плавлення, тим більшу теплову потужність треба підвести до струменя для того щоб нагріти частинки до стану їх проплавлення.

Зміна теплової потужності, залежно від параметра D , при різних витратах плазмоутворюючого газу складає від 20 до 50 кВт.

При малих витратах газу, коли формується ламінарна течія, ККД плазмотрона низький (0,1...0,3). Це пов'язано з тим, що максимум ККД обумовлений перерозподілом теплових потоків між стінками дугового каналу і електродами [17].

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

Розрахунок проводиться для частинок порошкової суміші ПГ-10К-01+20%С(Ni), розміром 80 і для частинок ПГ-10К-01+20%ВN(Ni) розміром 60 мкм.

Для розрахунків значення D для порошків ПГ-10К-01+20%С(Ni) та ПГ-10К-01+20%ВN(Ni) вибираємо з довідкової літератури [15-17], $D=4,435 \cdot 10^{10}$ кДж/(кг·м³) та $D=3,843 \cdot 10^{10}$ кДж/(кг·м³) відповідно, решту величин для розрахунку беремо з паспорта плазмотрона ПН-14М: $R_0=4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_k=2,1 \cdot 10^{-2}$ м.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
						53
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ККД плазмотрону дорівнює 0,1.

При напыленні порошкової суміші ПГ-10К-01+20%С(Ni) потужність визначиться:

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

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (4,435 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 29 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25 \text{ л/хв} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (4,435 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 40,6 \text{ кВт}$$

Потужність плазмотрону при напыленні порошку ПГ-10К-01+20%ВN(Ni) становить:

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

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (3,843 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 20,2 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25 \text{ л/хв} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (3,843 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,1 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 28,3 \text{ кВт}$$

2. ККД плазмотрону дорівнює 0,2.

При напыленні порошкової суміші ПГ-10К-01+20%С(Ni) потужність становить:

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

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (4,435 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 14,5 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25 \text{ л/хв} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
						54
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (4,435 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 20,3 \text{ кВт}$$

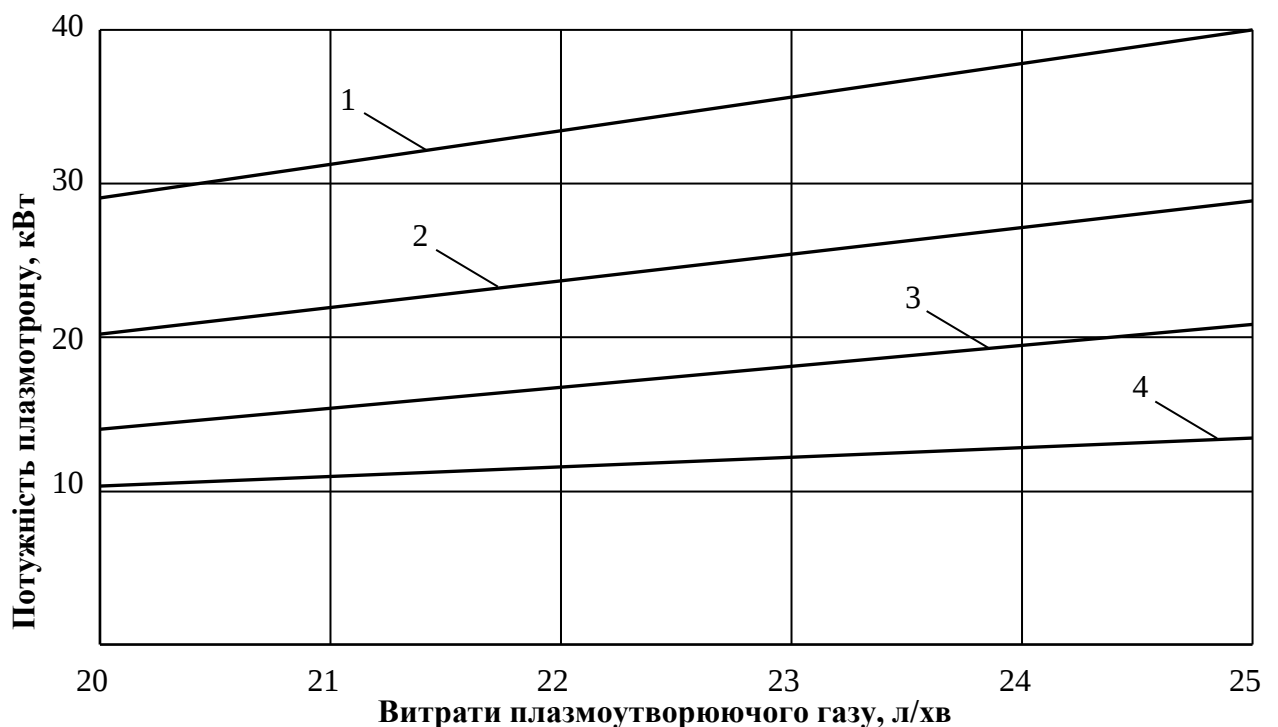
Потужність плазмотрону при напыленні порошку ПГ-10К-01+20%BN(Ni) становить: при $V_r = 20 \text{ л/хв} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P_e = 2,99 \frac{(3,33 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (3,843 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 10,1 \text{ кВт}$$

при $V_r = 25 \text{ л/хв} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$:

$$P_e = 2,99 \frac{(4,17 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 6 \cdot 10^{-5} \cdot (3,843 \cdot 10^{10})^{0,5}}{0,2 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^{1,25} \cdot [2,1 \cdot 10^{-2} + 6(4 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-3})]^{0,6}} = 14,2 \text{ кВт}$$

За результатами розрахунку будуюмо графік (рис 4.1) залежності потужності плазмотрону від витрат плазмоутворюючого газу при напыленні частиц ПГ-10К-01+20%C(Ni) та ПГ-10К-01+20%BN(Ni) (при різних значеннях ККД плазмотрону).



1- ПГ-10К-01+20%C(Ni) ($\eta=0,1$); 2- ПГ-10К-01+20%BN(Ni) ($\eta=0,1$);
 3- ПГ-10К-01+20%C(Ni) ($\eta=0,2$); 4- ПГ-10К-01+20%BN(Ni) ($\eta=0,2$)

Рисунок 4.1 Потужність плазмотрону

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

4.2 Визначення термоциклічної стійкості покриттів

Результати іспитів на термоциклічну стійкість 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 двох годин.

Плазмове напилення ущільнюючих покриттів виконували на установці УПУ-3Д на режимах: I, А – 250...300; U, В – 80...108;

Q (Ar), л/хв – 20...30; [18]

Пошаровий склад, умови напилення, міцність зчеплення й кількість термоциклів до руйнування ущільнюючих покриттів наведені в таблиці 4.1. 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

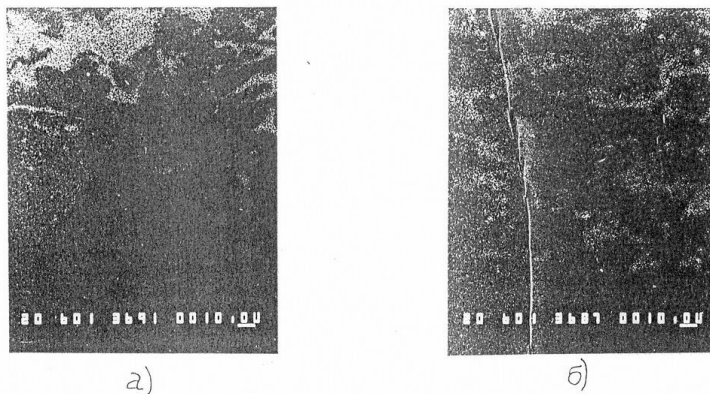
					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

товщиною 0,1 мм у вакуумі незалежно від складу й умови напилення наступних шарів.

Таблиця 4.1 Міцність зчеплення та результати іспитів на термоциклічну стійкість ущільнюючих покриттів

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

Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях досліджували на електронно-зондовому мікроаналізаторі "Супперпроб-733" (Японія). Результати представлені на рис. 4.2.



а) напилено у вакуумі; б) напилено на повітрі

Рисунок 4.2 Розподіл вуглецю в ущільнюючих покриттях
ПГ-10К-01+20%С(Ni) [x600]

Отримані результати (рис. 4.2) 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. [19]

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

Надалі, доцільно провести корозійні і термоциклічні іспити на натуральних зразках-вставках кращих дослідних ущільнюючих покриттях, за даними табл. 4.2, 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. 4.3. Перед напиленням вставки піддавалися знежиренню й піскоструменевій

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

обробці. Залишкові осередки на двох вставках покликані підвищити адгезію покриття, а отже й стійкість до тепло змін.

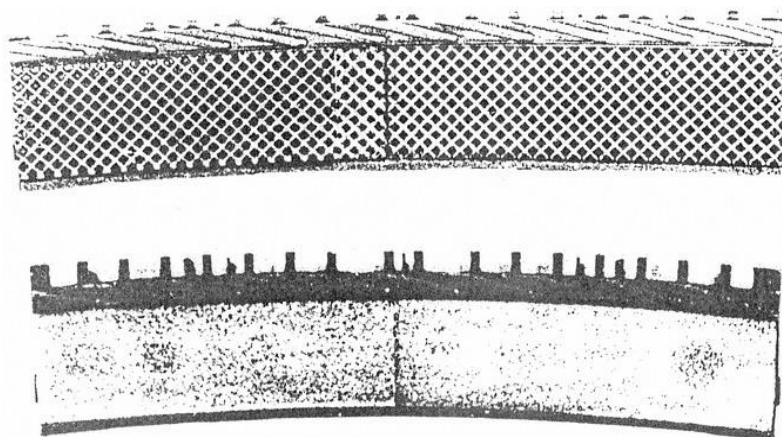


Рисунок 4.3 Вставки із заглибленою робочою поверхнею для нанесення ущільнюючих покриттів

Після напилення вставки термооброблювали у вакуумі при 1050 °С в плин 1,5 ч. Загальний вид вставок з напиленими ущільнюючими покриттями приведений на рис. 4.4.

Таблиця 4.2 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. 4.2. Вставки з ущільнюючими покриттями приварювали до касети, рис. 4.5. 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.

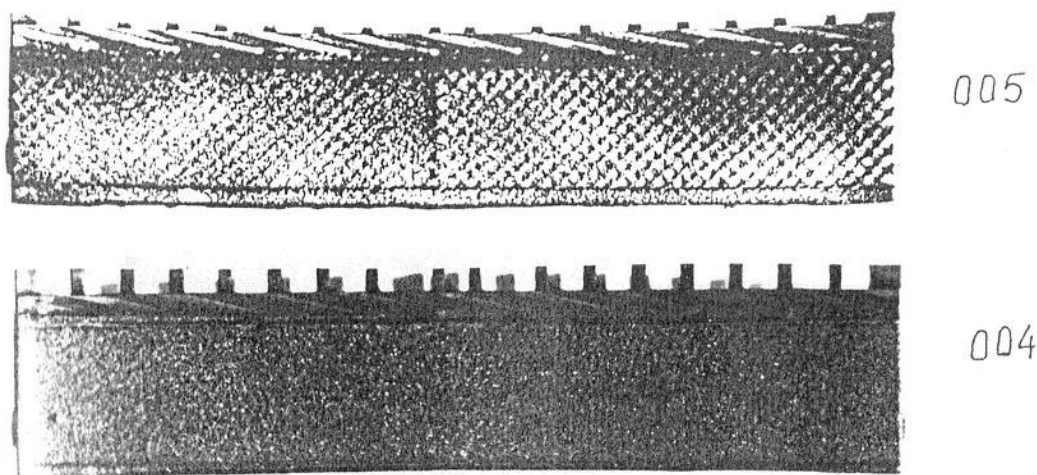


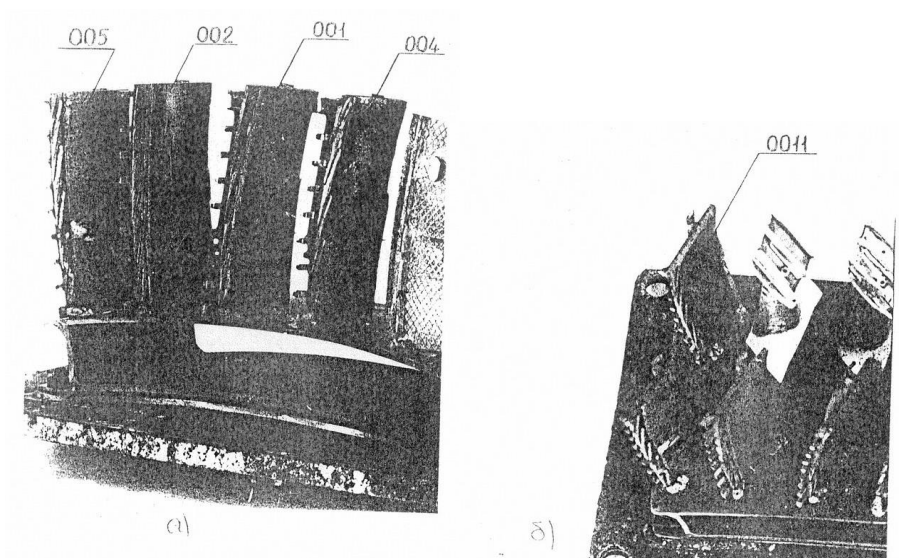
Рисунок 4.4 Вставки NN004, 005 з ущільнюючими покриттями, нанесеними плазмовим напиленням

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. 4.5) у місцях де товщина перевищувала висоту буртику вставки.

					<i>МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

В середній частині покриття посвітліло і з'явилися світло-коричневі розводи. Глибока тріщина поперек покриття вставки N 005 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 4.5 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. 4.5) з наповнювачем УМ-16П, застосовувана на виробництві по всій поверхні містить дрібні (100...300

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

мкм) пори, можливо, обумовлені розплавленням або вигоранням і видуванням одного з компонентів.

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 сольовій корозії, які успішно витримали стійкості до теплових навантажень. Слід зазначити зміну кольору покриттів. Можливо, це пояснюється появою нальоту сольових з'єднань з компонентами палива при високих температурах.

Після контрольного огляду, іспит на "прожиг" відновили, потім, після закінчення 200 годин наробітку, іспити продовжили в режимі термоциклювання 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.

4.3 Дослідження стійкості покриттів до теплових навантажень

З метою оцінювання стійкості до теплових навантажень плазмових покриттів, були проведені дослідження в лабораторії ГТП НУК на спеціальній установці. Структурна схема установки наведена на рисунку 4.6. [18]

Структурна схема зразка, який використовується для визначення стійкості до теплових навантажень покриттів, наведена на рисунку 4.7.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

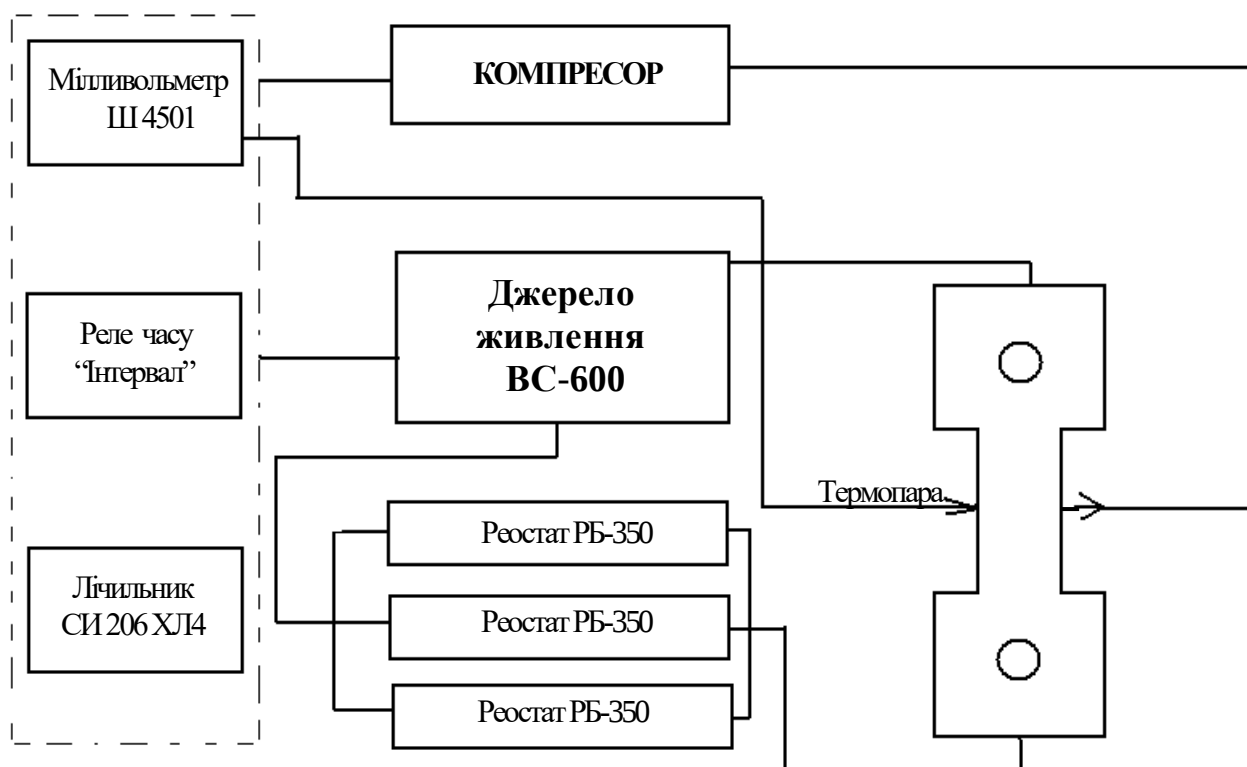


Рисунок 4.6 Структурна схема установки для визначення стійкості покриття до теплозмін

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 „Интервал” одночасно подається напруга і на пускач, який включає джерело живлення ВС-600, яке замкнено через батарею баластних реостатів РБ-350 на зразок; при досягненні температури зразка 1000°С, яка контролюється за допомогою хромель-алюмелевої термопари та мілівольтметру Ш4501, спрацьовує отсікач та лічильник; реле часу „Интервал” вмикає компресор, який стислим повітрям охолоджує зразок; після вимкнення компресору спрацьовує пускач джерела живлення та цикл повторюється.

					МП. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Результати досліджень наведені в таблиці 4.1.

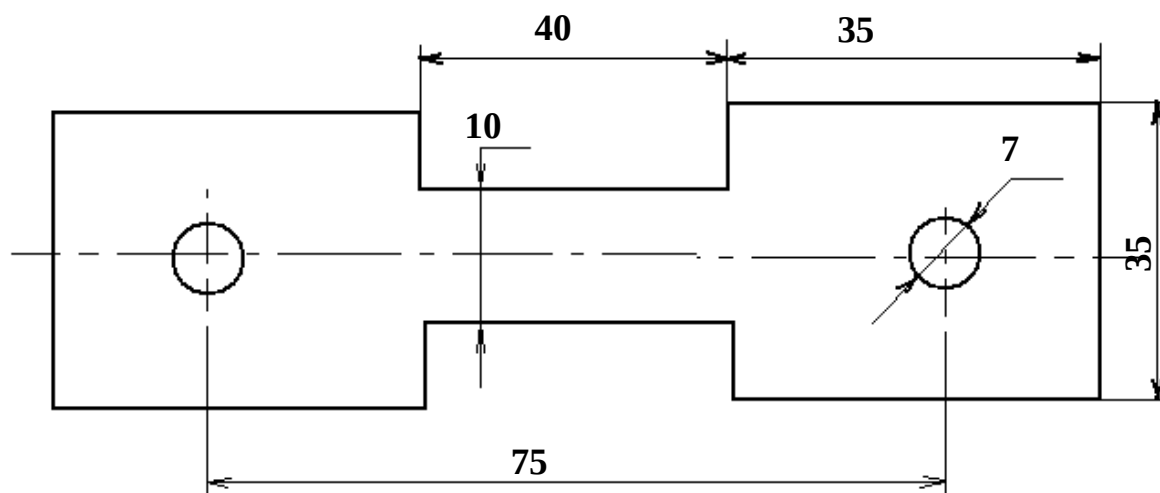


Рисунок 4.7 Зразок для визначення стійкості до теплових змін

4.4 Вплив умов експлуатації на мікроструктуру і фазовий склад

Зміст графіту (C) нітриду бору (BN) у вставках після іспитів, описаних вище, визначали методом кількісного рентгенофазового аналізу на приладі ДР0Н-3, що працює в режимі запису дифрактограми. Для виключення небажаного впливу флуоресцентного тла, зйомку зразків робили в монохроматизованому Си - випромінюванні. Як аналітичні відображення нами були обрані Ni(111), BN(002), C(002).

Результати визначення змісту нітриду бора і графіту представлені в табл. 4.3.

У результаті встановлено, що після іспитів в ущільненнях знайдено сліди BN на глибині 0,2...1,0 мм. Сліди C виявлені на глибині 0,8...1,0 мм. Це пояснюється вигоранням твердого змащення в процесі іспитів, чому сприяє пористість, яка досягає 10%.

					МП. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Дослідження розподілу С, Ni і Cr на електроннозондовому мікроаналізаторі Superproba 733 фірми Jol (Японія) показані на рис. 4.8, показали, що поблизу границі підшар - робочий шар у покритті міститься С(Ni). Про це свідчать величини концентрації вуглецю і нікелю.

Таблиця 4.3 Результати визначення кількості нітриду бору та графіту у вставках після корозійних та термоциклічних іспитів

Номер зразка	Аналізована фаза	Склад, %		
		поверхневий шар	на глибині 0,2...0,4 мм	на глибині 0,8...1,0 мм
0011	С	не виявлено	не виявлено	сліди
001	С	не виявлено	не виявлено	не виявлено
002	BN	не виявлено	не виявлено	не виявлено
005	BN	не виявлено	сліди < 0,2	сліди < 0,2
штатне ущільнення	BN	не виявлено	не аналізувалося	не аналізувалося

Дослідження мікроструктури ущільнюючих покриттів проводили на металографічному мікроскопі на нетравлених шліфах.

На рис. 4.9 представлено мікроструктуру ущільнюючих покриттів після корозійних і термоциклічних іспитів.

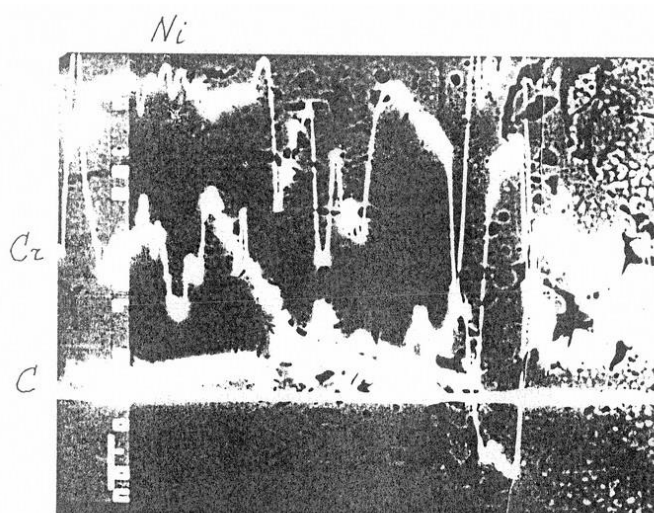
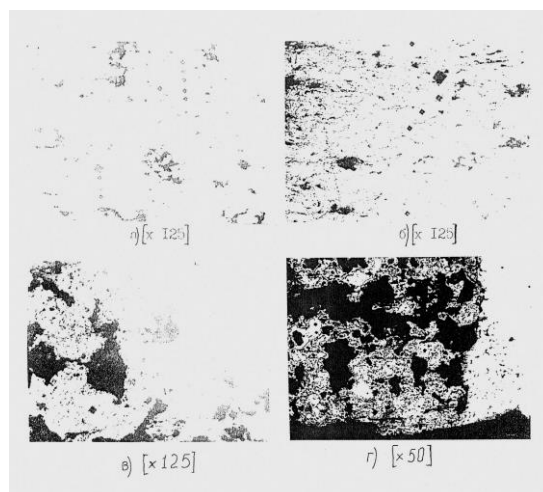


Рисунок 4.8 Розподіл С, Ni, та Cr в ущільнюючому покритті ПГ-10К-01+20%С(Ni)

Відомо, наприклад, що оплавлене покриття із самофлюсуючого сплаву має складну мікроструктуру. У неї входять евтектики різного складу, зміцнюючі кристали і твердий розчин елементів нікелю. Основними легуючими елементами твердого розчину є кремній, хром, залізо.



а – ПГ-10К-01+20%С(Ні) (зраз. №0011); б - ПГ-10К-01+20%ВН(Ні) (зраз. № 005); в, г – УМ-16П (зраз. № 2000)

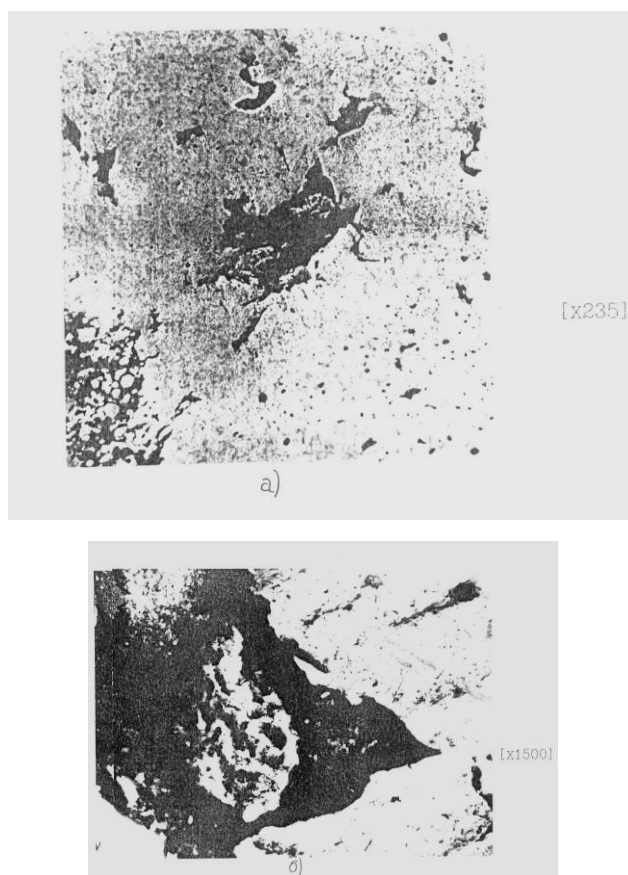
Рисунок 4.9 Мікроструктура ущільнень після іспитів:

Мікротвердість ділянок твердого розчину елементів у нікелі складає 2360...3470 МПа. У даному дослідженні використовується самофлюсуючийся сплав, що на основі кобальту. Як видно з рис. 4.9 а, б мікроструктура ущільнюючих покриттів на основі самофлюсу ПГ-10К-01 являє собою Со-Ні твердий розчин, що містить легуючі елементи і евтектики різного складу, а також боріди, силіциди й ін. зміцнюючі фази. На нетравленому шліфі ідентифікується світла фаза, що представляє собою Со-Ні твердий розчин і темні включення. Останні являють собою пористі ділянки, у які практично "провалюється" індектор. Видимо, це включення твердого змащення, трансформовані (частково газофіцировані) у пористі утворення під високотемпературними впливами продуктів згоряння палива ДС (рис. 4.9

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

а,б). Відсутність твердого змащення в поверхневому шарі ущільнення після іспитів (див. табл. 4.3) пояснюється цими явищами. Проникнення газів в ущільнення може бути пояснено в основному пористістю покриття (близько 10%) і навіть дифузією.

Мікротвердість основи плазмових ущільнених покриттів до іспитів не має істотних відмінностей у залежності від типу твердого змащення. Після термоциклювання мікротвердість значно зростає, особливо в покриття з ПГ-10К-01+20%BN(Ni). Підвищилася мікротвердість після термоциклювання й у підкладки з ВХ-4Л. Пористість ущільнень після термоциклювання у продуктах згоряння палива ДС вища, ніж до іспитів.



а, б - ПГ-10К-01+20%С(Ni) (зраз. №0011)

Рисунок 4.10 Мікроструктура ущільнення після іспитів

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Мікроструктура штатного ущільнення УМ-16П являє собою три структурні складові: світла, сіра і темна (рис. 4.9 в, г). Темні ділянки по будівлі подібні попереднім (індентор ПМТ-3 "провалюється"). Світлі ділянки (~30%) мають порівняно низьку, з незначним розкидом значень, мікротвердість. Сірі ділянки (~40%) мають високу, зі значним розкидом, мікротвердість. Останні, видимо, містять боріди й інші зміцнюючі фази. Наявність близько 30% темних ділянок, які можуть бути ідентифіковані як пори, пояснює той факт, що штатне ущільнення в процесі експлуатації фарбується.

Дослідження складу і будівлі пористих утворень в ущільнюючих покриттях має немаловажне значення, тому що вони забезпечують спрацьовуваність у процесі експлуатації.

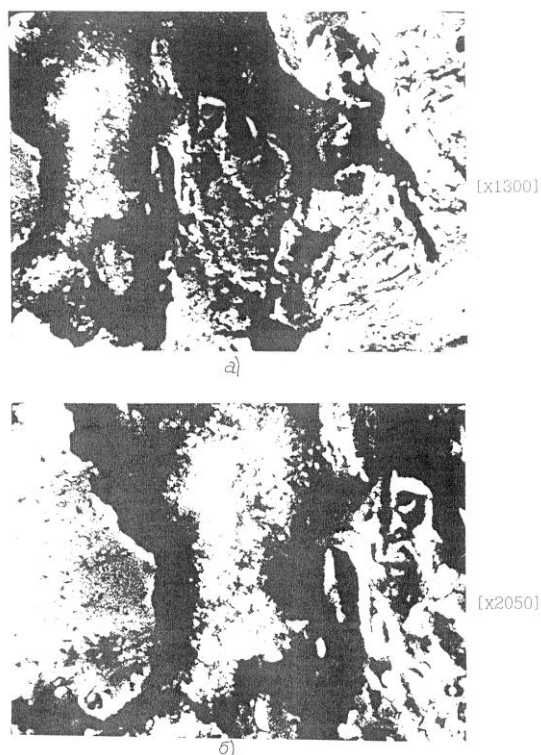
При проведенні металографічних досліджень висунуто припущення про концентрацію в "пористих утвореннях" ущільнюючих покриттів твердого змащення.

Утворення пор в ущільнюючих покриттях відбувається як у процесі їхнього одержання, так і в процесі експлуатації в міру вигорання твердого змащення (С або BN).

З метою більш детального вивчення структури ущільнюючих утворень, нами були проведені дослідження нетравлених шліфів на растровому електронному мікроскопі РЕМ-100У.

У результаті проведених досліджень методом РЕМ у порах покриття ПГ-10К-01+20% С (Ni) виявлені окремі частки розміром 30. . . 50 мкм (рис. 4.10 а, б, рис. 4.11 а, б). Судячи з морфології цих часток і порівнюючи з даними дослідженнями морфології порошків, можна зробити висновок, що вони являють собою частки С (Ni). Поряд з цими відносно великими частками в порах покриття ПГ-10К-01+20%С(Ni) знайдені дрібнодисперсні плоскої форми утворення (до 7 мкм) неметалевої природи, що можуть бути віднесені до вільного графіту.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а, б - ПГ-10К-01+20%С(Ni) (зраз. №0011)

Рисунок 4.11 Мікроструктура ущільнення після іспитів

Штатне ущільнення УМ-16П після термоциклювання має значну пористість (рис. 4.12 а). У порах цього ущільнення, методом РЕМ, знайдені частки неметалічної природи розміром близько 20 мкм, складені з більш дрібних зрослих кристалів, що мають чітке огранювання (рис. 4.12 б, 4.13 а, б), що являють собою, очевидно, боріди, які утворилися в результаті термічного впливу В и BN із металевими компонентами сплаву.

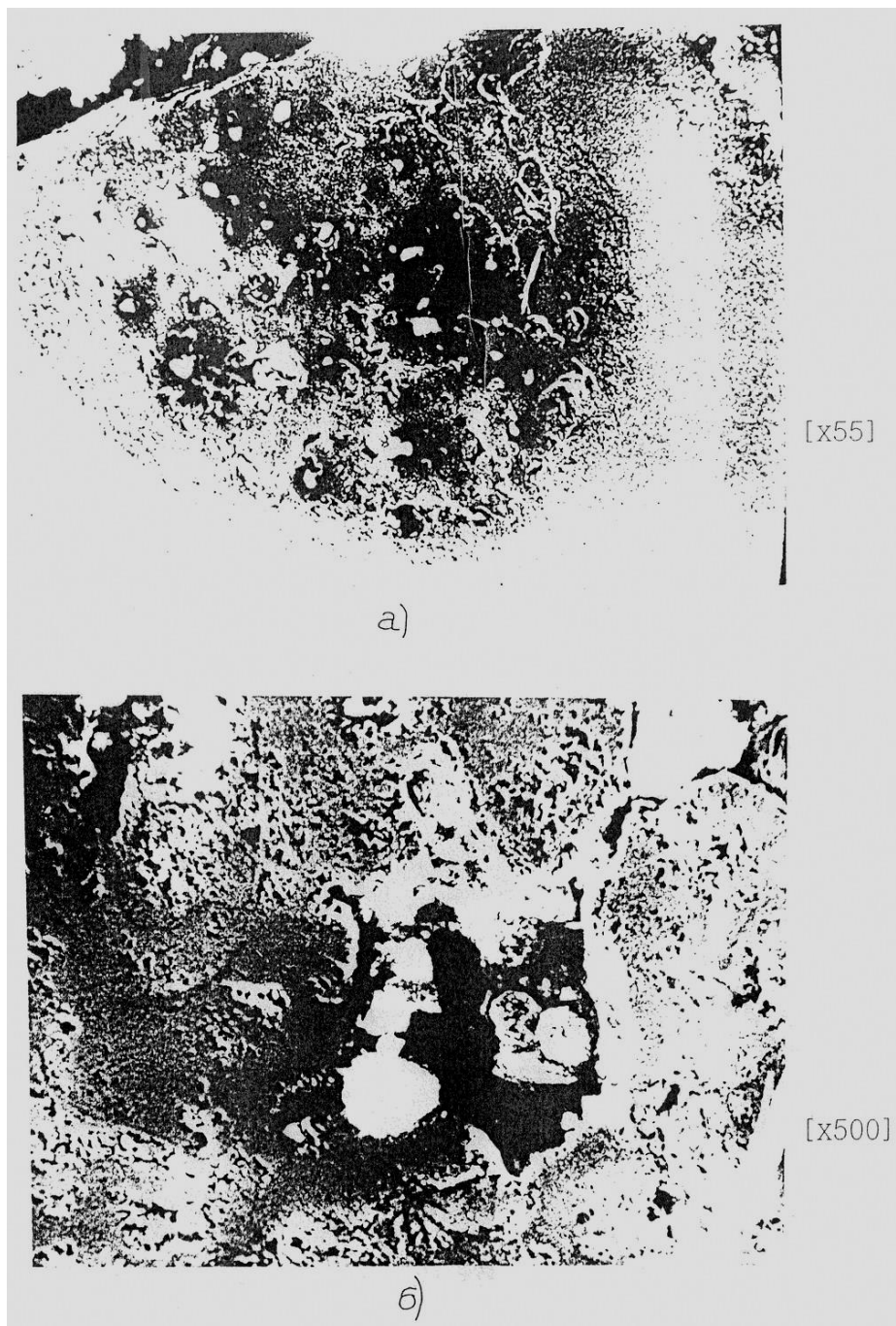
Утворення борідів відзначається як на поверхні металевої фази (рис. 4.12 а), так і на окремих частках, по усій видимості являючи собою BN, тому що мають лускату будівлю (рис. 4.13 б).

У процесі мікроаналізу на границі наповнювача УМ-16П, нанесеного на вставки з осередками, і підкладки спостерігається сітка дрібних тріщин (див. рис. 4.12 а).

Таким чином, проведені дослідження пористих утворень у великих порах ущільнюючих покриттів, методом РЕМ, дозволяє зробити висновок

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

про наявність в них первинних часток твердого змащення C , $C(Ni)$, $BN(Ni)$, а також утворення в результаті термічного впливу продуктів взаємодії твердого змащення з металевими компонентами покриттів.



а, б – УМ16П (зраз. №2000)

Рисунок 4.12 Мікроструктура ущільнення після іспитів

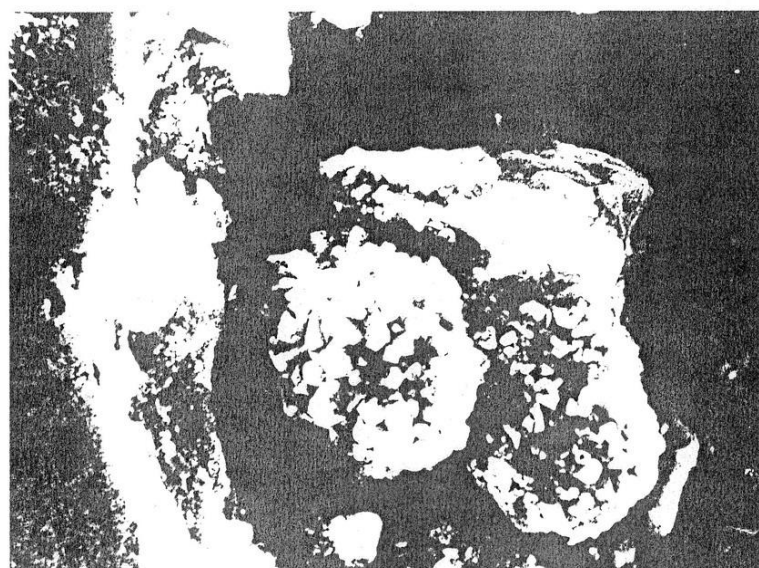
					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
						70
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Чутливість методу кількісного рентгенофазового аналізу на приладі ДРОН-3 (0,2%) недостатня для виявлення твердого змащення в ущільненнях після іспитів на глибині до 1,0 мм.



[x950]

а)



[x1600]

б)

а, б – УМ-16П (зраз. №2000)

Рисунок 4.13 Мікроструктура ущільнення після іспитів

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Проведено мікроаналіз іспитового ущільнення ПГ-10К-01+20%С(Ni), напиленого в динамічному вакуумі на установці УПНКА з наступною термообробкою у вакуумі при 1050 °С на протязі 1,5 ч. У ньому виявлено дві структурні складові - світлу і темну (15...20%). Мікротвердість світлої складової 6581 МПа (середнє значення), розкид значень від 4120 до 9270 МПа. У темних ділянках индентор "провалюється". Для порівняння досліджували покриття з ПГ-10К-01, напиленого й термообробленого у вакуумі. В останньому, темних ділянок малого розміру менш 2%. У ПГ-10К-01+С(Ni) зафіксовані темні ділянки великого і малого розмірів. Мікротвердість ПГ-10К-01 складає 8630 МПа (середнє значення), розкид значень від 7660 до 9270 МПа. Більш широкий діапазон розкиду мікротвердості в першому випадку пояснюється присутністю твердого змащення. Наявність великої кількості темних ділянок, навіть у порівнянні зі зразками 0011, 005 після термоциклювання, пояснюється тим, що при напиленні і термообробці у вакуумі, тверде змащення практично не вигорає. Це підтверджується тим, що в покритті з ПГ-10К-01+С(Ni) після напилення і термообробки у вакуумі кількісним рентенофазовим аналізом на приладі ДРОН-3 виявлено 4,8% графіту [18].

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 самофлюсуючогося сплаву ПГ-10К-01 з підкладкою.

Запропоновані ущільнення на основі самофлюсуючогося сплаву ПГ-10К-01 з добавками твердих змащень С(Ni) і ВN(Ni) можуть працювати, як впливає з акта корозійних і термоциклічних іспитів у продуктах згоряння палива ДС, при температурах до 1000... 1050 °С.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

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;

- для гарного проплавлення часток порошку ПГ-10К-01+20%С(Ni) розраховане значення потужності плазмотрону складає 40,6 кВт, а для часток порошку ПГ-10К-01+20%ВN(Ni) -28,3 кВт;

- 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 та 20Б.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 04. ПЗ.	Арк.
						73
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 Технологія плазмового напilenня покриттів

5.1 Матеріали для напilenня покриттів

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 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%С(Ni) і ПГ-10К-01-20%ВN(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%С(Ni) зернистістю 40...63 мкм;
- порошку ПГ-10К-01-20%ВN(Ni) зернистістю 40...63 мкм;
- порошку 20Б зернистістю 50...60 мкм.

Склад порошкових матеріалів для плазмового напilenня ущільнюючих покриттів приведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Склад порошкових матеріалів, %

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.	-	-

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.				Арк.
									67
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

5.2 Обладнання для плазмового напилення

Для отримання покриттів використовуємо установку плазмового напилення в контрольованому середовищі, яка створена на базі серійної УПУ-3Д і успішно експлуатується в Херсонській філії НУК. Переміщення деталей при напиленні здійснюється за допомогою розробленого спеціального маніпулятора, встановленого в камері і керованого з пульта [20]. Вакуумна система установки забезпечує при напиленні постійний тиск в межах 13,3...133 Па і вище. Установка складається з наступних основних вузлів (рисунок 5.1): охолоджуваної вакуумної камери, маніпулятора; вакуумної системи; пульта керування; джерел живлення; системи охолодження; плазмотрона і живлювача порошку.

Вакуумна камера має циліндричну форму. Внутрішній діаметр камери складає 1050 мм, а її висота – 2100 мм. Завантажувальний люк кріпиться до корпусу камери за допомогою кронштейнів і забезпечений оглядовим вікном діаметром 226 мм. У середині камери змонтований підйомник з маніпулятором.

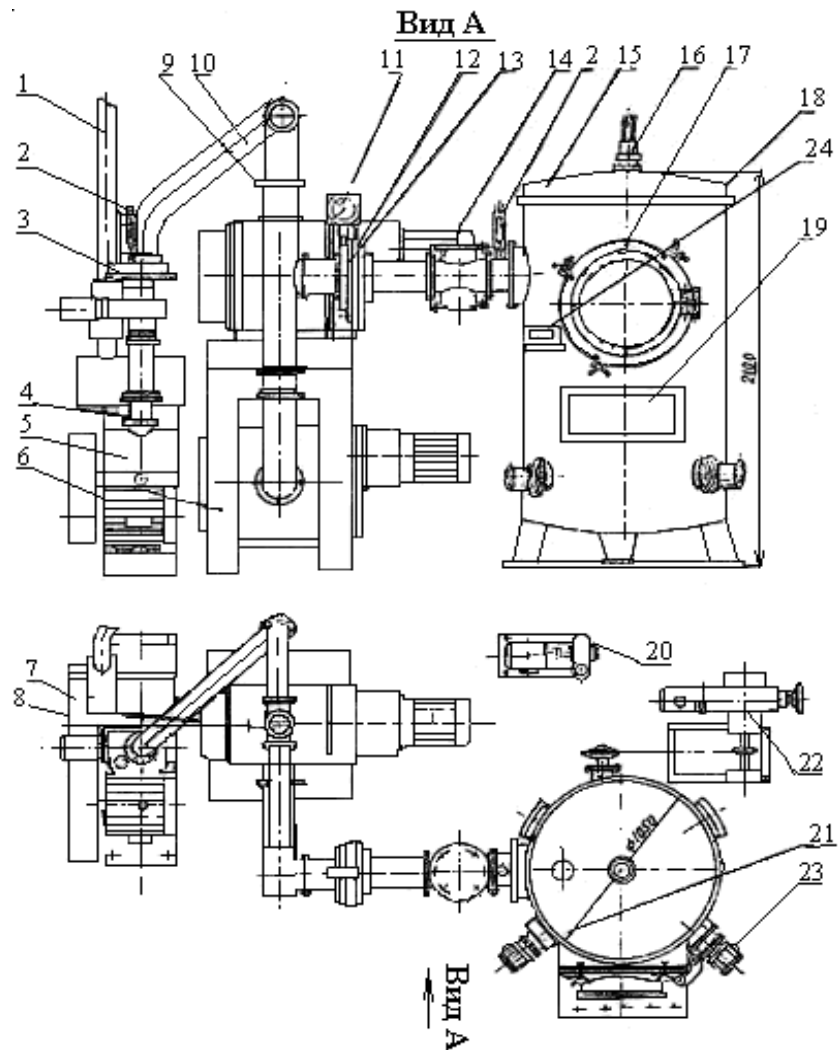
Плазмотрон встановлений на верхній кришці камери. Управління роботою плазмотрона проводиться з пульта установки УПУ-3Д.

Джерелом живлення служить ASA-500 або ИПН-160/600, який підключається через контактор.

Для напилення використовуємо модернізований багатосекційний плазмотрон з аксіальною подачею газу типу ПН-7М, який має шість міжелектродних вставок, за рахунок чого робоча напруга може бути підвищена до 150 В. В якості матеріалу катода при роботі в аргоні в даному плазмотроні використовуємо прутки лантанованого вольфраму марки ВЛ-15. Максимальний робочий струм складає 450 А.

Водяне охолодження плазмотрона, вакуумних насосів, джерел живлення, кожуха і кришки вакуумної камери забезпечується системою з поршневим насосом ПН 1,6/16М.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1- вихлоп; 2- вакуумна лампа ПМТ-2; 3- вакуумний затвор; 4- сифон Ø 90; 5- форвакуумний насос НВЗ-150; 6- стіл; 7- маслозбірник; 8- задвижка вакуумна; 9- сифон Ø 160; 10- вакуумопровід; 11- вакуумметр механічний; 12- вакуумний насос ДВН-500; 13- вакуумний затвор; 14- фільтр; 15- кришка вакуумної камери; 16- плазмотрон; 17- завантажувальний люк; 18- корпус камери; 19- пульт керування маніпулятором; 20- водяний насос; 21- привод підйому столу; 22- електродвигун приводу обертання; 23- електродвигун подовжньо-поперечного переміщення; 24- вакуумметр ВТ-3.

Рисунок 5.1 Принципова схема установки

Управління маніпулятором здійснюється з пульта, встановленого під оглядовим вікном. Обертання напилюваної деталі, поперечний і поворотно-поступальний рух забезпечується двома двигунами постійного струму Д-90,

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.

Арк.

69

встановленими на корпусі камери.

Візуальне спостереження за процесом напилювання здійснюється через оглядове вікно.

Дистанція напилювання регулюється з пульта включенням окремого двигуна через черв'ячний редуктор, фрикційне гальмо і ланцюгову передачу столу підйомника.

На установці можна одержувати покриття в широкому спектрі робочого тиску в камері. При напилюванні в діапазоні малого робочого тиску збільшуються розміри і швидкість плазмового струменя і зменшується її ентальпія, що приводить до необхідності застосування спеціальних насадок, встановлюваних на вихідне сопло плазмотрона, які дозволяють істотно поліпшити прогрівання напилюваного порошкового матеріалу.

На виході з насадки струмінь має характерну для надзвукового потоку форму у вигляді "бочок" і "вузлів", а швидкість частинок порошку досягає 800 метрів за секунду.

Подача порошку до плазмотрону проводиться через порошкоживлювач, встановлений на верхній кришці камери перемиканням тумблера на пульті. Від стабільності роботи цього пристрою залежить якість напилюемого покриття.

В установці для плазмового напилення в контрольованій атмосфері для рівномірної подачі порошку розроблений і виготовлений спеціальний живлювач роторного типу. Порошок з бункера потрапляє в канал над ротором у вигляді шестерні і заповнює її пази, а потім при обертанні ротора висипається в нижню порожнину і транспортується газом подається в плазмотрон. Наявність ущільнень запобігає підсосу повітря. Дозування подачі напилюваного матеріалу здійснюється зміною швидкості обертання ротора.

Для уловлювання частинок порошку встановлений фільтр. Вакуумні затвори типу СПлП забезпечують ізоляцію камери від вакуумної системи і регулювання умовного проходу, а також запобігають попаданню масла в

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						70
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему у разі зупинки насосів.

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

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

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

Сушку порошку перед напилюванням виконуємо в сушильній шафі з регулюванням температури до 300 °С типу ШСВ 3,5.3,5.6/3, прокалювання кераміки виконуємо в електричній муфельній печі СНОЛ-1,6.2,5.1/9-114.

Для термічної обробки після процесу плазмового напилювання використовуємо електровакуумна піч СНВ-1-3-1/16И1.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						71
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3 Технологічний процес напилювання покриттів

Згідно проведених робіт по нанесенню ущільнюючих порошкових покриттів плазмовим напиленням на підкладки газотурбінних двигунів розроблена технологічна інструкція.

Технологічна інструкція передбачає порядок виконання технологічних операцій та прийомів; встановлює перелік необхідного обладнання, діапазон параметрів напилення, визначає матеріали, які застосовуються, спосіб підготовки підложки, режими термічної обробки та контроль якості отриманих покриттів.

Процес напилення покриттів плазмовим методом являє собою сукупність прийомів та операцій, які виконуються в наступній послідовності:

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

5.3.1 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 оброблюєму поверхню, град	60...90
Лінійна швидкість переміщення пістолету, мм/хв.	50...400

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

					МП. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

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

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.

5.3.2 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%ВN(Ni) прожарюють в електропечі при температурі 600...800° С протягом 3,5 годин. Товщина шару засипки висушуваних порошків повинна бути не більше 20 мм.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						73
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3.3 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...500С. Контроль температури напилюємої поверхні проводять термоіндикаторними датчиками;

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						74
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметри режимів плазмового напилення наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Параметри режимів плазмового напилення

Вид покриття	Сила струму, А	Напруга, В	Витрати плазмоутворюючого газу, м ³ /с	Дистанція напилення, 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.

5.3.4 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.

5.3.5 Контроль якості напилених покриттів

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						75
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 ЛІ-3, ЛІ-4.

Геометричні розміри деталі з покриттям вимірюються за допомогою лінійки та штангенциркуля та повинні відповідати вимогам креслення.

Товщину покриття на деталі вимірюють штангенциркулем, мікрометром та товщиномірами різноманітних типів. Похибка вимірювань всіх типів товщиномірів складає в середньому 10%.

Мікротвердість покриттів вимірюють за допомогою прибора 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 технологічних розробок по напиленню ущільнюючих покриттів на підкладочні кільця прийняті наступні рішення:
- для напилення ущільнюючих покриттів на підкладочні кільця 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 напилення ущільнюючих покриттів на підкладочні кільця ГТД, який включає наступні операції: надання необхідної шорсткості поверхні виробу перед напиленням, просушування порошку, плазмове напилення покриття, термічну обробку, контроль якості покриття.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						76
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 Розрахунок собівартості напilenня ущільнюючих покриттів

Техніко-економічна частина роботи містить техніко-економічні розрахунки, які відображають величину затрат на здійснення технологічного процесу плазмового напilenня ущільнюючих покриттів у газових турбінах.

В роботі розроблена технологія нанесення ущільнюючих покриттів на кільця газотурбінних установок.

Початкові дані для розрахунку собівартості технологічного процесу напilenня ущільнюючих покриттів наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 Початкові дані

Річний випуск продукції, шт.	1000
Трудовісткість напilenня одного кільця, н–год.	1,38
Річна трудовісткість, н–год.	1380

Розрахунок вартості обладнання, яке застосовується на ділянці, наведений в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 Розрахунок вартості обладнання

Найменування обладнання	Кількість обладнання, од	Вартість одиниці обладнання, грн	Загальна вартість обладнання, грн
Установка піскоструменевого очищення	1	7300	7300
Установка УПУ-3Д	1	60000	60000
Вакуумна піч	1	40000	40000
Всього	-	-	107300

Сумарна вартість обладнання визначається помноженням дійсних цін на кількість обладнання.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						77
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

6.1 Розрахунок прямого фонду заробітної плати

Прямий фонд заробітної плати основних робітників розраховується за формулою:

$$Z_{\text{пр.ф.ос.р.}} = Z_{\text{ср.ос.р.}} \cdot T_p \quad (6.1)$$

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

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

T_p - річна трудомісткість, н-год. $T_p = 1380$ 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 6.3.

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

Тоді, згідно (6.3) прямий фонд заробітної плати основних робітників:

$$Z_{\text{пр.ф.ос.р.}} = 2 \cdot 56 \cdot 1380 + 62 \cdot 1380 = 240120 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.3 Тарифні ставки основних робітників

Розряд	3	4
Середній тарифний коефіцієнт	1,35	1,5
Тарифна ставка, грн./год	56	62

6.2 Розрахунок затрат на матеріали

Затрати на матеріали для річного випуску продукції визначаються:

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						78
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z_M = Z_{M1} \cdot N \quad (6.2)$$

де Z_M - затрати на матеріали для річного випуску, грн;

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

N - річний обсяг виробництва, шт, $N=1000$ шт.

Розрахунок затрат на матеріали для однієї одиниці виробу виконуємо в табличній формі (таблиця 6.4).

В таблиці 6.4 витрати матеріалів на одну вставку визначені експериментальним шляхом.

По формулі (6.2) визначимо витрати на матеріали для річного випуску продукції:

$$Z_M = 76,1 \cdot 1000 = 76100 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.4 Розрахунок затрат при напиленні 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)	1070	0,06	64,2
Аргон	0,050	200	10
Електрокорунд	19	0,1	1,9
Всього			76,1

6.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Витрати електроенергії розраховуються за формулою:

$$B_e = \Phi_{ef.obl.} \cdot k_z \cdot P \quad (6.3)$$

де B_e - витрати електроенергії, кВт;

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

k_z - коефіцієнт завантаження обладнання;

P - номінальна потужність одиниці обладнання, кВт.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						79
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номінальна потужність кожного виду обладнання, яке застосовується на ділянці плазмового напилення, та його коефіцієнти завантаження наведені в таблиці 6.5.

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:

$$Z_e = B_e \cdot C_e \quad (6.4)$$

де Z_e - затрати на електроенергію, грн.;

C_e - вартість одного кіловата електроенергії, $C_e = 1,68$ грн./кВт

$$Z_e = 94927 \cdot 1,68 = 159477 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5 Обладнання, яке застосовується на ділянці

Найменування обладнання	Кількість обладнання, одиниць	Номінальна потужність одиниці обладнання (P), кВт	Коефіцієнт завантаження обладнання (K_3)
Апарат для струміневого очищення	1	5	0,26
Установка УПУ-3Д	1	40	0,89
Вакуумна піч	1	20	0,82

6.4 Витрати на амортизацію обладнання

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

$$B_{ам.обл.} = 0,3 \cdot C_{обл} \quad (6.5)$$

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						80
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$C_{обл}$ - вартість обладнання, грн. $C_{обл}=107300$ грн.

$$B_{ам.обл.} = 0,3 \cdot 107300 = 32190 \text{ грн}$$

6.5 Розрахунок собівартості технологічного процесу напилення ущільнюючих покриттів

Собівартість технологічного процесу напилення визначається за формулою:

$$C_{техн} = Z_m + Z_{пр.ф.ос.р.} + Z_e + B_{ам.обл.} \quad (6.6)$$

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

Z_m - затрати на матеріали, грн. $Z_m=76100$ грн;

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

$Z_{пр.ф.ос.р.} = 240120$ грн.

Z_e - затрати на електроенергію, грн. $Z_e = 159477$ грн.

$B_{ам.обл.}$ - витрати на амортизацію обладнання, грн. $B_{ам.обл.} = 32190$, грн.

$$C_{техн.} = 76100 + 240120 + 159477 + 32190 = 507887 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.6 Техніко–економічні показники плазмового напилення ущільнюючих покриттів

Найменування показників	Величина показників
Річний випуск продукції, шт.	1000
Трудомісткість на річну програму, н–год.	1380
Затрати на матеріали, грн.	76100
Прямий фонд заробітної плати основних робітників, грн.	240120
Затрати на електроенергію, грн.	159477
Витрати на амортизацію обладнання, грн.	32190
Технологічна собівартість річної програми, грн.	507887

Висновки: річна собівартість технологічного процесу напилення ущільнюючих покриттів на вставки складає 507887 грн.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						82
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки

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

- для підвищення к.к.д. та збільшення ресурсу роботи робочих лопаток газотурбінних двигунів доцільно використовувати ущільнюючі покриття, отримані плазмовим напиленням;

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

- 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 та 20Б;

- для гарного проплавлення часток порошку ПГ-10К-01+20%С(Ni) розраховане значення потужності плазмотрону складає 40,6 кВт, а для часток порошку ПГ-10К-01+20%ВN(Ni) -28,3 кВт;

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

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

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

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						83
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

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

- річна собівартість технологічного процесу напилювання ущільнюючих покриттів на вставки складає 507887 грн.

					MP. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						84
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаної літератури

1. Зайцев, В.И. Судовые паровые и газовые турбины [Текст] / И.В. Зайцев, Л.М. Грицай, А.А. Моисеев. – М.: Транспорт, 1981. – 311 с.
2. Гецов, А.Б. Детали газовых турбин [Текст] / А.Б. Гецов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 296 с.
3. Коломыцев, П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов [Текст] / П.Т. Коломыцев, – М.: Металлургия, 1991. – 273 с.
4. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / В.А. Барвинок, И.Л. Шитарев, В.И. Богданович, И.А. Докукина, В.М. Карасёв // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - №3(19), 2009. - С. 11 – 28.
5. Галлямов Р. Т. Разработка технологии получения и исследование свойств уплотнительных срабатываемых покрытий на основе стабилизированного диоксида циркония : диссертация кандидата технических наук : 05.17.11 Екатеринбург, 2007. - 150 с.
6. Deadmore D. L., Sliney H. E. Hardness of Ca F₂ and Ba F₂ solid lubricants at 25 to 670 °C// NASA TM- 88979.
7. Слини. Композиционные материалы для подшипников и уплотнений газовых турбин. Обзор.// Труды Американского Общества Инж. –Мех., Современное машиностроение.-1991.- № 3.- С. 175 - 180.
8. Della Corte C., Sliney H. E. Composition optimization of self – lubricating chromium carbide based composite coatings for use to 760 °C// ASLE Transactions.- 1987.- 30, № 1.- P. 77-83.
9. 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.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						85
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. 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.

11. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях.- М.: Машиностроение, 1986. - 220 с.

12. 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.

13. Дубовий, О.М. Технологія напилення покриттів [Текст]: підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. - 236 с.

14. Трушин, С.И. Метод конечных элементов. – М: АСВ, 2008. 256 с.

15. Басов, К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

16. Лебедев, В.А. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв / В.А. Лебедев., С.А. Лой, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко // Упрочняющие технологии и покрытия. - №12(120), 2014. - С. 8-12.

17. Юшков В.И., Борисов Ю.С., Гирмензон С.М. О связи необходимой тепловой мощности плазменной струи с теплофизическими характеристиками напыляемого материала // Физика и химия обработки материалов. -№ 4, 1975. – С. 20-22.

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

19. Лебедев В.А., Лой С.А. Некоторые особенности технологии плазменного напыления уплотнительных покрытий лопаток газотурбинных двигателей и установок // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте. Материалы 19-го Международного

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						86
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

научно-технического семинара, 18-22 февраля 2019 г., г. Кошице.-Киев :
АТМ України, 2019. – С. 100-102.

20. Lebedev V., Loi S., Khalimovskyy O. Improvement of equipment for
plasma lubrication of gas-turbine engines and installations // Scientific Journal of
the Ternopil National Technical University. - 2019, № 3 (95). –Р. 86-96.

					МР. 132. 6121м. 01. 06. 05. ПЗ.	Арк.
						87
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		