

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Підвищення довговічності ріжучого інструменту методом нанесення зносостійкого покриття»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Дірій Д.О.
(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник Сергієнко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент Шевченко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Підвищення довговічності ріжучого інструменту методом нанесення зносостійкого покриття»: 143 с., 11 табл., 36 рис., 77 джерел.

РІЖУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ, ЗНОСОСТІЙКЕ ПОКРИТТЯ, ЛОКАЛЬНЕ ДИФУЗІЙНЕ ПОКРИТТЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес нанесення локального дифузійного покриття на робочу поверхню різального інструменту.

Мета магістерської роботи – підвищення довговічності різального інструменту шляхом нанесення локального дифузійного покриття для поліпшення якості обробки деталей.

Методи дослідження – аналітично-чисельний метод, метод спільного рішення рівнянь рівноваги і пластичності, методи математичної статистики.

У першому розділі виконано аналіз методів підвищення довговічності різального інструменту шляхом нанесення на нього зносостійких покриттів та розглянуто кінетику і механізм зношування ріжучого інструменту зі зносостійким покриттям.

У другому розділі розроблено теоретичну модель зразка з локальним дифузійним покриттям для оцінки впливу локально-дифузійного і суцільного покриття на довговічність та методика оцінки довговічності різального інструменту з локальним дифузійним покриттям.

У третьому розділі розроблено методологію процесу нанесення локального дифузійного покриття на ріжучий інструмент та загальну методика проведення дослідження.

У четвертому розділі виконано зіставлення результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень. Проведено дослідження параметрів процесу різання та ріжучих властивостей інструменту з локальним дифузійним покриттям.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	C. 5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ НА РІЖУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ.....	9
1.1 Аналіз методів підвищення довговічності різального інструменту шляхом нанесення на нього покриття.....	9
1.2 Класифікація методів нанесення зносостійких покриттів в залежності від умов їх застосування.....	10
1.2.1 Метод хімічного осадження покриттів.....	12
1.2.2 Метод фізичного осадження покриттів.....	13
1.2.3 Іонна імплантація.....	14
1.2.4 Лазерне термозміцнення.....	16
1.2.5 Електроіскрове зміцнення інструменту.....	19
1.3 Застосування зносостійких покриттів.....	22
1.4 Кінетика і механізм зношування ріжучого інструменту зі зносостійким покриттям.....	24
1.5 Мета та завдання дослідження.....	45
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ НА РІЖУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ.....	46
2.1. Розробка теоретичної моделі зразка з локальним дифузійним покриттям для оцінки впливу локально-дифузійного і суцільного покриття на довговічність.....	49
2.2. Розробка методики і критеріїв оцінки довговічності різального інструменту з локальним дифузійним покриттям.....	74
3 РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ДИFUZІЙНОГО ПОКРИТТЯ НА РІЖУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	78
3.1 Теоретичні передумови формування локального дифузійного покриття на робочих поверхнях інструменту.....	80

3.2	Метод нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент.....	89
3.3	Загальна методика проведення досліджень.....	103
3.3.1	Методика визначення ріжучих властивостей.....	104
3.3.2	Методика дослідження фізико-механічних властивостей локального дифузійного покриття.....	109
4	КІНЕТИКА І МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ З ЛОКАЛЬНИМ ДИФУЗІЙНИМ ПОКРИТТЯМ....	113
4.1	Дослідження ріжучих властивостей інструменту з локальним дифузійним покриттям.....	113
4.2	Дослідження параметрів процесу різання і ріжучих властивостей інструменту з локальним дифузійним покриттям.....	115
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....	124
5.1	Загальні вимоги охорони праці.....	127
5.2	Вимоги охорони праці перед початком роботи.....	129
5.3	Вимоги охорони праці під час роботи.....	130
5.4	Вимоги охорони праці після закінчення роботи.....	132
5.5	Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях.....	132
	ВИСНОВКИ.....	134
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	136

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

HB – твердість за Бринелем

HV – твердість за Вікерсом

HRC – твердість за Роквелом

ПНШ – поверхневий нано-шар

ДШ – дифузійний шар

ТПШ – тонкий перехідний нано-шар

ε – відносна поздовжня деформація

k – постійна Больцмана, Дж/К

$\omega_{кр}$ – критичне значення пошкодженості

σ_m - межа плинності приконтаткних шарів тіла, що зношується

J_h – інтенсивність зносу, мм³/км

δ_L - інтенсивність зношування інструменту на передній і задній поверхнях
різального леза, мкм/км

V - об'єм зношеної частини різця, мм³

ρ - щільність інструментального матеріалу, кг/м³

σ_T - межа плинності інструментального матеріалу, МПа

n_T - запас пластичної міцності інструменту

n – кількість дослідів

T – температура, К

δ – відносна деформація зразка, %

σ_s - напруга плинності, МПа

σ_b – границя міцності, МПа

σ_t – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, МПа

σ_{-1} – границя втоми, МПа

ψ – відносне звуження, %

μ - коефіцієнт Пуасона

ВСТУП

У сучасному механообробному виробництві широке застосування знаходить автоматизоване верстатне обладнання з мікропроцесорним управлінням. Особливість сучасного виробництва характеризується інтегральним підходом до проектування технологічного процесу з урахуванням собівартості та надійності [1, 2].

Основне завдання інтенсифікації виробництва - це систематично домагатися збільшення продуктивності, довговічності різального інструменту і полегшення праці робітників при обробці деталей на верстатах за рахунок більш ефективних технологій обробки. Найбільший вплив на працездатність інструменту, а, отже, на ефективність обробки різанням надають властивості інструментального матеріалу.

Аналіз даних показує, що основними причинами виходу з ладу різального інструменту зі зносостійкими покриттями можуть бути: руйнування покриттів в результаті високих контактних силових і температурних навантажень і деформація твёрдосплавної основи, яка веде до зростання контактної площадки на задній поверхні інструменту. Однією з причин передчасного руйнування покриття є виникнення критичних напружень на межі розділу покриття - інструментальний матеріал при термомеханічному навантаженні контактних майданчиків інструменту. Ці напруги залежать від різниці теплофізичних і фізико-механічних властивостей матеріалів зносостійкого покриття і інструмента, власних мікронапруг інструментального матеріалу після повної термообробки. Початковий етап руйнування покриттів спостерігаються вже в період припрацьовочного зношування інструменту, а інтенсивність руйнування покриття збільшується зі зростанням термомеханічних навантажень.

Зазначене різноманіття факторів, що впливають на покриття, залежить від співвідношення фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу і покриття. При низьких і середніх температурах це визначає адгезійну міцність, при високих - характер і інтенсивність твердофазних і рідинофазних дифузійних реакцій, контактено-реактивне плавлення.

Також вельми актуальним є встановлення функціональних зв'язків між технологічними параметрами процесу формування зносостійкого покриття і зношуванням інструменту. Ці завдання до теперішнього часу не вирішені через порівняно низьку довговічності покриття.

Для підвищення довговічності різального інструменту з покриттям необхідний новий метод нанесення покриття, що сприяє збільшенню запасу міцності і жорсткості, зниження схильності ріжучої частини інструменту до втрати формостійкості і термопластичного прогину при додатку термомеханічних напруг, що виникають в процесі різання. Необхідний новий тип покриття, з добавками, у вигляді пластичного матеріалу, що має низький модуль пружності і зсуву, для релаксації напружень. Таким є дифузійне покриття, що складається з локальних зон з покриттям і з областями без покриття між ними, які ініціюють поверхневе гальмування тріщин і навіть їх зупинку на кордонах його локальних областей.

Новий метод нанесення покриття дозволяє отримувати сполуки, що містять в своєму складі оксиди, які мають нерівноважну (нестехіометричну) структуру, що сприяє збільшенню міцності поверхневого шару на інструментальному матеріалі без зміни структури субстрату. Існуючі рішення щодо підвищення експлуатаційних властивостей різального інструменту традиційними методами нанесення покриттів в значній мірі вже вичерпані, оскільки важко збалансувати твердість з одного боку і в'язкість, міцність - з іншого [3].

Зносостійкість ріжучого інструменту під дією напруг, що циклічно змінюються, більш низьких, ніж межа міцності, відображена в монографіях Г.С. Креймера, В.І. Третьякова, В.І. Туманова, М. Г. Лошака. Ймовірний характер зношування і відмову різального інструменту з покриттям, отримано і теоретично обгрунтовано в роботах П.Г. Кацева і Г.Л. Хаєта. Кінетика зношування ріжучого інструменту з покриттям показала, що, незважаючи на значний внесок покриття в зниження інтенсивності зношування контактних майданчиків ріжучого інструменту, довговічність покриття на контактних майданчиках інструменту становить від 0,5 до 5% від періоду стійкості

інструменту [4, 5].

При різанні, на початковій стадії процесу відбувається накопичення пружних спотворень кристалічної решітки, потім руйнуються мікроскопічні об'єми матеріалу з утворенням мікротріщин, які далі розвиваються до макротріщин, що призводять до руйнування [6, 7, 8, 9].

Для ефективної роботи ріжучого інструменту з покриттям необхідно усунення або зменшення причин, що призводять до передчасного руйнування покриття. Ця проблема може бути вирішена шляхом нанесення локального (пористого) дифузійного покриття.

Таким чином, виявлення і встановлення закономірностей, що зв'язують технологічні параметри нанесення функціональних покриттів зі зносостійкістю і довговічністю інструментів, розробка і всебічне дослідження нових методів формування дифузійних покриттів, що забезпечують високі ріжучі властивості, релаксацію термомеханических напруг, гальмування поверхневого розтріскування є дуже актуальними.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ НА РІЗУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ

1.1 Аналіз методів підвищення довговічності різального інструменту шляхом нанесення на нього покриття

У сучасному металообробному виробництві все більше застосування знаходить складне автоматизоване верстатне обладнання, кероване від персонального комп'ютера. Ефективне використання такого обладнання можливо тільки при достатній надійності його функціонування, причому серед багатьох причин відмов верстатного устаткування головними є відмови різучого інструменту, який є найбільш слабкою ланкою технологічної системи СПД. Для підвищення довговічності різального інструменту і технологічної системи в цілому, звичайно різко знижують режими його експлуатації (наприклад, зменшують швидкість різання), реалізуючи, таким чином, умови при яких зростає нестабільність стружкоутворення і контактних процесів, що в свою чергу збільшує ймовірність випадкової відмови інструменту, наприклад, в результаті макро - або мікрокрихкого руйнування. Зазвичай під довговічністю різучого інструменту розуміють здатність зберігати працездатність протягом заданого часу, причому об'єктивним критерієм, що визначає надійність різучого інструменту, є ймовірність його безвідмовної роботи [6, 10, 11]. При цьому відмова може виявитися несподіваною (мікрокрихке або в'язке руйнування різучої частини різального інструменту) або поступовою (мікроруйнування контактних майданчиків). При відомому законі розподілу часу напрацювання на відмову об'єктивними критеріями надійності різального інструменту може служити середньоарифметичне значення часу напрацювання на відмову і коефіцієнт варіації цього часу [10, 11]. Найбільший вплив на довговічність різучого інструменту надають його фізико-механічні властивості [6, 11, 12].

Найбільш ефективним шляхом формування необхідних властивостей приповерхневих шарів інструментального матеріалу є застосування сучасних

методів механічного, фізико-хімічного зміцнення, нанесення зносостійких покриттів і комплексної поверхневої обробки.

В даний час, більше 45% ріжучого інструменту виготовляють з швидкорізальної сталі, незважаючи на те, що ріжучий інструмент з твердого сплаву, кераміки і надтвердих синтетичних інструментальних матеріалів забезпечує більш високу продуктивність різання. Це пов'язано як зі значно більшою технологічністю швидкорізальних сталей, які добре обробляються в відпаленому стані, так і можливістю виготовлення складнопрофільного і великогабаритного ріжучого інструменту.

Тому складнопрофільний інструмент (свердла, зенкери, розгортки, кінцеві і зуборізні фрези, протяжки тощо) виробляють майже виключно зі швидкорізальної сталі [1]. У зв'язку з викладеним матеріалом в даній роботі розглядається проблема підвищення довговічності складнопрофільного ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі, твердого сплаву.

Аналіз основних напрямів вдосконалення ріжучого інструменту дозволяє відзначити, що головні тенденції такого вдосконалення, пов'язані з ростом твердості, теплостійкості, зносостійкості при деякому зниженні міцності, в'язкості і тріщиностійкості [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

Вирішення проблеми створення інструментального матеріалу з «ідеальними» властивостями має бути пов'язане з розробкою композиційного інструментального матеріалу, у якого високі значення поверхневої твердості, теплостійкості, фізико-хімічної інертності поєднувалося б з достатніми значеннями міцності при вигині, ударній в'язкості, границі витривалості.

В останні роки, як за кордоном, так і в країнах СНД мали місце значні зміни в вироблених марках ріжучого інструменту, така тенденція пов'язана як з підвищенням вимог до ріжучого інструменту, так і з вдосконаленням методів термічної обробки і технології виробництва.

1.2 Класифікація методів нанесення зносостійких покриттів в залежності від умов їх застосування

У світовій практиці все більше застосування знаходять методи

підвищення довговічності інструменту шляхом нанесення зносостійких покриттів. Ріжучий інструмент з покриттям має високу продуктивність, високу зносостійкість у поєднанні з досить задовільною міцністю при вигині, ударною в'язкістю, витривалістю, тріщиновитривалістю, універсальністю, економічністю. З'являється можливість управління умовами формування і властивостями покриттів, а також властивостями композиції покриття - інструментальний матеріал. Інструментальний матеріал зі зносостійким покриттям є новим матеріалом композиційного типу, в якому оптимально поєднуються властивості поверхневого шару (високі значення твердості, теплостійкості, пасивності по відношенню до оброблюваного матеріалу тощо) і властивості, які проявляються в об'ємі тіла інструменту (міцність, ударна в'язкість, тріщиностійкість тощо).

Таким чином, інструментальні матеріали зі зносостійким покриттям за своїми властивостями наближаються до властивостей ідеалізованого інструментального матеріалу, а інструмент, виготовлений з такого матеріалу, володіє задовільним запасом жорсткості і міцності одночасно, що збільшує його довговічність, особливо при використанні на складному автоматизованому обладнанні.

Серед різноманіття різних методів осадження покриттів, які наносяться на ріжучий інструмент, найбільшого поширення набули одно і багат шарові покриття. При нанесенні покриття відбуваються складні фізичні і хімічні процеси, тому вибір складу покриття залежить від умов обробки [1].

В роботах [7, 8, 19] проведено порівняльний аналіз способів формування якості поверхневого шару при повному і локальному нанесенні зносостійких покриттів на різальний інструмент.

Кожен метод нанесення покриттів має переваги і недоліки, має специфічну сферу застосування, яка залежить від технологічних особливостей методу, ступеня автоматизації, економічних витрат на процес нанесення покриття.

1.2.1 Метод хімічного осадження покриттів

Цей метод заснований на гетерогенних хімічних реакціях в парогазовому середовищі, що оточує інструмент, в результаті яких утворюється покриття. Вихідними продуктами служать газоподібні галогеніди, при взаємодії яких з іншими складовими сумішей (воднем, аміаком, оксидом вуглецю) утворюється покриття. Розкладання галогеніду срібла відбувається внаслідок термічної хімічної реакції при температурі 1000-1100°C [1].

Покриття формується адсорбцією, з подальшою дифузією вуглецю в титанове покриття або хемосорбцією з утворенням тугоплавкого з'єднання. Найбільш вірогідний інтегральний механізм формування покриття, що включає обидва процеси - хемосорбцію з осадженням з'єднання і адсорбцію з подальшою дифузією.

Метод хімічного осадження покриттів з парогазової фази (CVD) широко використовується при масовому виробництві (5 ÷ 10 тис.) твердосплавних пластин і цільного твердосплавного інструменту. Цей метод має підгрупи: газотермічний метод (ГТ), ліцензійні технології шведської фірми «Сандвик Коромант» (технологія GM) і австрійської фірми «Планзее» (технологія GC), методи термодифузійного насичення (ТДН), до яких відноситься метод дифузійної термообробки (метод ДТ) [1, 2].

В основі методу лежать високотемпературні гетерофазні реакції, в основі яких використовують нітрати металів, газовідновлювач (H_2) і реакційні гази. На властивості і параметри покриття (мікротвердість, товщина, фазовий склад, структуру) впливають реагенти парогазової суміші, тиск суміші і швидкість подачі.

Недоліки цього методу полягають в наступному:

1. виділення активних реагентів призводить до того, що покриття стає більш крихким, знижується адгезія з твердим сплавом, змінюються фізико-механічні властивості і теплофізичні властивості;

2. зміцнений ріжучий інструмент методом хімічного осадження покриттів не використовують в наступних технологічних операціях різання:

- різання важкооброблюваних матеріалів;

- чорнове фрезерування;
- нарізування широкохідного різьблення для газових труб.

1.2.2 Метод фізичного осадження покриттів

Методи фізичного осадження покриття (PVD) засновані на випаровуванні речовини в вакуумний простір камери з подачею реакційного газу (азот, кисень, метан та ін.). Різниця методів фізичного осадження покриття полягає в принципах фізичного випаровування речовини, різного ступеня іонізації пароіонного потоку, конструктивних особливостях установок. Серед методів фізичного осадження покриття найбільшого поширення набули: конденсація речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням (технологія КІБ) і його різновид «Ion Bond» - США (технологія КІБ); магнітронно-іонне розпилення (метод МІР), яке використовується фірмою «Бальцерс» - Швейцарія і його різновид МіРР (Росія); іонне плакування і його різновид (метод АРЕ), розроблений в Каліфорнійському університеті США.

Всі ці технології універсальні, оскільки можна варіювати температурою в зонах нанесення покриттів [1, 2].

Покриття можна розглядати як деяке проміжне технологічне середовище між інструментальним і оброблюваних матеріалами, за допомогою якого можна досить ефективно керувати властивостями основи: твердість, теплостійкість, тріщиностійкість, фізико-хімічна пасивність по відношенню до оброблюваного матеріалу. Функціональними параметрами процесу різання: рівень деформування зрізаного шару, сили різання, температури, термомеханічні напруги і т.д. і інтенсивністю зношування інструменту [6].

Як показано в роботах [7, 8, 19, 21, 22, 23, 24], найбільш ефективно властивостями ріжучого інструменту з покриттям можна керувати за рахунок варіювання хімічним складом покриття, його структурою і типом зв'язку з інструментальним матеріалом. У свою чергу, вказані параметри будуть сильно залежати від методу нанесення покриття і технологічних умов формування вихідних властивостей. Зокрема, вплив на структуру і дефектність покриття,

тип зв'язку з інструментальною матрицею може здійснити субструктура, забрудненість і дефекти приповерхневих шарів [1, 2, 9, 22, 25, 26].

Синтез покриттів здійснюється за рахунок електродугового випарника, тобто з плазми електродугового розряду. Системи вакуумно-дугового випаровування застосовують на будь-яку основу (інструментальний матеріал), включаючи, полутеплостойкі штампові сталі і кераміку, тому що в процесі синтезу температурні дані можуть варіюватися в дуже широких межах ($100 \div 1000^\circ\text{C}$).

Переваги методу фізичного осадження покриття:

1. метод дозволяє синтезувати покриття на основі одинарних, подвійних, потрійних систем нітридів, карбідів, боридів, силіцидів і їх сумішей: (Ti, Cr) N; (Ti, Nb, Cr) N, (Ti, Nb, Cr) C;

2. метод дозволяє отримувати багат шарові покриття, що мають більш збалансоване співвідношення таких найважливіших характеристик, як в'язкість, твердість; більш стійких до руйнування при додатку циклічних навантажень; більш високу тріщиновитривалість;

3. метод має високу продуктивність процесу і малу тривалість синтезу покриттів щодо хімічного осадження покриття (CVD).

Однак метод фізичного осадження покриття має недоліки, а саме:

- в процесі випаровування металу (особливо з низькою атомною вагою - Ti, Al), утворюється крапельна фаза з матеріалу катода, яка осідає на поверхню покриття і знижує його якість;

- в процесі конденсації покриття, як на крайках, так і на поверхні ріжучого інструменту, виникають мікродуги, які призводять до ерозії (електроерозії), а гострі ріжучі кромки можуть заокруглитися, тобто поверхня стає більш крихкою.

1.2.3 Іонна імплантація

Серед ефективних методів поліпшення фізичних, механічних і хімічних властивостей поверхневого шару одне з перших місць займає іонна імплантація, що представляє собою іонно-вакуумну технологію [2].

Суть методу іонної імплантації полягає в бомбардуванні поверхні інструментального матеріалу іонами, що мають енергію близько 5 – 40 кВ, в результаті якої відбувається впровадження іонів і атомів легуючого елемента. Ефект зміцнення досягається як за рахунок збільшення щільності дефектів кристалічної будови інструментального матеріалу, закріплення цих дефектів атомами легуючих елементів, так і за рахунок формування додаткової кількості дрібнодисперсних карбідних, нітридних та інтерметалічних структур. Слід зазначити, що технологія іонної імплантації є найбільш перспективною з точки зору створення композиційних матеріалів з оптимальним набором поверхневих властивостей.

Впровадження елементів, таких як N_2 і C , впливає на механічні властивості поверхні. При цьому спотворюється кристалічна решітка і підвищується твердість. Межі зерен оксидів і кордони дислокаційних блоків являють собою канали швидкої дифузії для імплантованих атомів. Іонна імплантація - коли в матеріалі одночасно йде окислення і з'являються напруги. В результаті спостерігається наступні ефекти зміцнення:

1. Впровадження на глибину до 700 нм бомбардованих іонів, в результаті чого утворюється дрібнодисперсне зміцнення фази (нітридна, карбідна, карбонітридна тощо);
2. В результаті миттєвого розігрівання і охолодження відбувається мікрозакалювання, з утворенням типових гартівних структур;
3. Відбувається дисоціація основних елементів, що входять до складу повітря, їх миттєва іонізація з подальшим насиченням поверхні іонами, підвищеної рухливості (N^+ , O^+ , C^+). В результаті відбувається підвищення твердості на 30 – 40% і зносостійкості;
4. Можливість отримання практично будь-якої комбінації «носії - легуючий елемент, або легуючі елементи»;
5. Простота управління іонним пучком і можливість обробки локальних ділянок поверхні;
6. Відсутність викривлення деталей навіть малої жорсткості.

Своєрідний механізм зношування ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі.

Зношування зміцненого шару глибиною до 700 нм настає швидко, вже на стадії припрацьованого зношування. Іонна імплантація дозволяє збільшити стійкість інструмента в 1,5 - 4 рази без збільшення радіусу заокруглення різальних крайок, що надзвичайно важливо для чистових операцій обробки різанням.

Техніко-економічна оцінка цього ефекту в залежності від режиму обробки показала, що імплантація найбільш доцільна при чистових режимах.

1.2.4 Лазерне термозміцнення

В даний час застосовують досить багато локальних термічних методів зміцнення поверхні - газотермічний, газополум'яний, світлопроменевий, електродуговий, плазмовий, індукційний, які дозволяють підвищити міцність, твердість і зносостійкість поверхневого шару і в цілому стійкість різального інструмента. Кожна з технологій локального термічного зміцнення має свої переваги і недоліки, які визначають ефективні техніко-економічні сфери її застосування [27, 28].

Хімічне осадження дозволяє отримувати на підкладці локальну металізацію складних обрисів з малими розмірами, що обчислюються декількома мікрометрами.

У порівнянні з перерахованими локальними методами лазерне термозміцнення ріжучого інструменту відрізняється наступними істотними перевагами:

- більш високий ступінь локальності обробки і прецизійності в дозованому вкладенні енергії в деталь, що зміцнюється при термічній обробці, дозволяє зберегти геометричні розміри зміцнюваного ріжучого інструменту в мікронному полі допуску і уникнути подальшої механічної обробки;

- високі швидкості нагрівання і охолодження ($\sim 10^3 - 10^5$ °C/c) забезпечують більш високу твердість і зносостійкість поверхневого шару;

- термічна обробка без оплавлення поверхні може застосовуватися як фінішна операція і після неї не потрібне подальше механічне доведення - шліфування;

- процес лазерного зміцнення досить легко піддається автоматизації [27, 28].

Серед перерахованих вище методів лазерне зміцнення забезпечує найбільше підвищення зносостійкості. Зміцнення поверхні при лазерній обробці засноване на ефекті автозакалювання, тобто швидкого нагріву і охолодження поверхневого шару. Лазерне термозміцнення поверхневого шару може здійснюватися безперервним або імпульсним випромінюванням на двох режимах: без оплавлення або з оплавленням поверхневого шару. Імпульсне лазерне зміцнення дозволяє одержати більш високий приріст твердості поверхневого шару, але меншу глибину [28].

Лазерна обробка поверхні металів і сплавів відноситься до локальних методів термічної обробки за допомогою висококонцентрованих джерел нагріву. У зв'язку з цим лазерний промінь як джерело нагріву при термічній обробці матеріалів має риси, властиві всім іншим висококонцентрованим джерелам, а також і свої перераховані нижче особливості та переваги:

1. Висока концентрація енергії, що підводиться, і локальність дозволяють проводити обробку тільки поверхневої ділянки матеріалу, без нагрівання решти обсягу і порушення його структури і властивостей, що призводить до мінімального викривлення. В результаті очевидні економічні та технологічні переваги. Крім того, висока концентрація енергії, що підводиться дозволяє провести нагрівання та охолодження оброблюваного обсягу матеріалу з великими швидкостями при дуже малому часі впливу. В результаті можна отримати унікальні структури і властивості обробленої поверхні.

2. Можливість регулювання параметрів лазерної обробки в широкому інтервалі режимів дозволяє розробити великий ряд методів поверхневої лазерної обробки, причому в кожному методі можна легко регулювати структуру поверхневого шару, його властивості, такі як твердість,

зносоустійкість, шорсткість, а також геометричні розміри оброблених ділянок та ін.

3. Відсутність механічних зусиль на опрацьований матеріал дає можливість обробляти крихкі конструкції.

4. Можливість обробки на повітрі, легкість автоматизації процесів, відсутність шкідливих відходів при обробці тощо визначають високу технологічність лазерного променя.

5. Можливість транспортування випромінювання на значні відстані і підведення його за допомогою спеціальних оптичних систем в важкодоступні місця дозволяє проводити обробку в тих випадках, коли інші, в тому числі і за допомогою висококонцентрованих джерел нагріву, застосувати неможливо.

Одним з перспективних способів підвищення стійкості ріжучого інструменту для металообробки є імпульсне лазерне зміцнення робочих крайок. Лазерне зміцнення (гарт) дозволяє істотно підвищити мікротвердість, теплостійкість, ізностойкість поверхневого шару ріжучої кромки інструменту, що є гарною передумовою підвищення стійкості інструменту [28].

Незважаючи на приклади успішного застосування процесу термозміцнення імпульсними лазерами цей метод має ряд недоліків:

- 1) низька продуктивність, обумовлена малою частотою проходження імпульсів сучасних лазерних установок і малими розмірами лазерної плями;
- 2) мала глибина зміцнення через обмежену тривалість імпульсу;
- 3) нерівномірність властивостей поверхні, обумовлена нерівномірним щільністю енергії в плямі, а також «чешуйчатостью» будови поверхні, наявністю зон відпустки, що в ряді випадків не дозволяє отримати хороші експлуатаційні властивості.

Застосування імпульсного лазерного випромінювання для зміцнення ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі.

Істотний недолік методу - порушення вихідної шорсткості поверхневого шару вимагає проведення додаткової фінішної механічної обробки.

1.2.5 Електроіскрове зміцнення

Зміцнення нарізного інструменту здійснюють методом нанесення зносостійкого покриття у вигляді електроіскрового легування на ріжучу поверхню інструменту. Інструмент для нарізування різи встановлюють в спеціальне оснащення, виготовлене з високотемпературних матеріалів. Покриття наносять на всю довжину передньої ріжучої поверхні у вигляді смуги шириною $H = (2,0-2,5) h$ від лінії вершин нарізного профілю, де h - висота нарізного профілю, і товщиною шару 35-70 мкм при забезпеченні підвищеного відведення тепла від вершин різьбових ріжучих профілів. В результаті зменшуються матеріальні та енергетичні витрати на виготовлення, і підвищується термін придатності різенарізальних інструментів [1, 2].

Суть методу полягає в наступному:

1. Відбувається насичення поверхні легуючими елементами або їх сполуками приповерхневих шарів інструментального матеріалу на глибину до 0,5 мм, в результаті чого відбувається підвищення твердості швидкорізальної сталі, знижується схильність до фізико-хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом і таким чином підвищується зносостійкість інструментального [21];
2. Внаслідок дуже короткого часу нагрівання локальних шарів інструментального матеріалу і їх миттєвого охолодження відбувається своєрідне гартування приповерхневих шарів, в результаті чого відбувається підвищення твердості і зносостійкості інструментального матеріалу.

Перевага полягає в тому, що нанесення зносостійкого покриття у вигляді смуги на передню ріжучу поверхню в 2-3 рази скорочує площу покриття, утворюючи суцільний шар покриття і мінімальні залишкові внутрішні напруження.

Принцип методу полягає у впливі на робочу поверхню інструменту індентором, який складається з твердих сплавів групи ВК (ВК3, ВК4) або тугоплавких металів 4 - 6 груп (Ti, V, Cr, W).

В результаті електроіскрових розрядів відбувається насичення (легування) поверхні інструментального матеріалу, елементами з катода, що підвищують твердість і зносостійкість інструментального матеріалу.

Ефективність процесу визначається оптимальним поєднанням таких параметрів, як:

$$T = f(V_e, F, I_p, U_p), \quad (1.1)$$

де V_e - швидкість переміщення індентора; F - частота вібрації катода; I_p - струм розряду; U_p - напруга розряду.

Однією з переваг електроіскрового методу обробки матеріалів є те, що при певних умовах різко підвищуються властивості міцності поверхні заготовки: твердість, зносостійкість, жаростійкість і ерозійна стійкість. Цю особливість використовують для підвищення зносостійкості різального інструменту, штампів, прес-форм і деталей машин, зміцнюючи металеві поверхні електроіскровим способом.

При електроіскровому зміцненні застосовують зворотну полярність (заготовка - катод, інструмент - анод), обробку проводять в повітряному середовищі і, як правило, з вібрацією електрода. Основні переваги електроіскрового способу нанесення покриття полягає в наступному: покриття мають велику міцність зчеплення з матеріалом основи; поверхні, що покриваються, не вимагають попередньої підготовки; можливе нанесення не тільки металів і їх сплавів, а й їх композицій; на обмежених ділянках оброблюваної поверхні можливо проводити найскладніші мікро металургійні процеси.

Процеси, що відбуваються при електроіскровому зміцненні, складні і є предметом ретельних досліджень. Сутність зміцнення полягає в тому, що при електроіскровому розряді в повітряному середовищі відбувається полярне перенесення матеріалу електрода на заготівлю. Перенесений матеріал електрода легує метал заготовки і, хімічно з'єднуючись з дисоційованим атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом заготовки, утворює дифузний зносостійкий зміцнений шар. При цьому в шарі виникають складні хімічні сполуки, нітриди і карбонітриди і формується загартована структура.

При електроіскровому зміцненні мікротвердість може бути доведена до 230 МПа, висота мікронерівностей обробленої поверхні до $Ra = 2,5$ мкм. Товщина шару покриття складає 0,003 - 0,2 мм.

Після зміцнення інструменту рекомендується вигладжувати його поверхню алмазними колами, шліфувальною шкуркою або доводити поверхню електродом з електрографіту.

Всі перераховані вище методи застосовують для отримання однорідної структури покриттів, яка поліпшує фізико-механічні та теплофізичні властивості ріжучого інструменту в процесі обробки. Покриття може помітно поліпшити властивості інструментального матеріалу з точки зору підвищення його опірності мікро - та макроруйнування з одного боку, однак з іншого боку, покриття може сприяти зменшенню контактних навантажень, зниженню потужності теплових джерел і сприятливому перерозподілу теплотоку, тим самим зменшуючи термомеханічну напруженість ріжучої частини інструменту. Таким чином, покриття можна розглядати як своєрідне проміжне технологічне середовище між контактуючими поверхнями інструментального та оброблюваного матеріалів з унікальною здатністю одночасно підвищувати опірність контактних майданчиків інструменту руйнування і знижувати термомеханічне навантаження, що приводить до такого руйнування.

В результаті аналізу особливостей промислової експлуатації ріжучого інструменту з покриттям можна відзначити наступне.

По-перше, інструмент з покриттям помітно дорожче інструменту без покриття, що вимагає більш високої культури виробництва, використання незношеного верстатного обладнання, ретельного економічного аналізу доцільності використання інструменту з покриттям.

По-друге, найбільш доцільно експлуатувати інструмент з покриттям на швидкості, що перевищує швидкість різання звичайного інструмента на 30 ÷ 60%. Такі швидкості відповідають оптимальній економічній швидкості різання, що мінімізує інтенсивність зношування і витрати на обробку різанням.

По-третє, в даний час промисловість використовує різноманітний ріжучий інструмент з покриттям, що отримується різними технологічними

методами, що вимагає від заводських технологів знань областей найбільш раціонального використання такого інструменту. Ефективність інструменту з покриттям при різних умовах обробки сильно залежить від методу отримання покриття навіть одного хімічного складу [27].

1.3 Застосування зносостійких покриттів

Покриття в машинобудуванні мають широкий розвиток, однак покриття методом фізичного осадження покриття та хімічного осадження покриття найчастіше використовуються для зміцнення всього спектра номенклатури ріжучого інструменту, оскільки мають високу твердість і низький коефіцієнт тертя.

Наприклад, для захисту від окислення тугоплавкі метали можуть бути покриті жаростійкими сплавами типу Hf - Ta або Nb - Ti - Al - Cr, які мають високу тріщиностійкість і стійкість до ударних навантажень. Якщо для захисту матеріалів з малим вмістом вуглецю використовувати покриття, що містять тантал, то на кордоні виділиться TaC, який погіршує адгезію покриття.

Покриття, нанесені методом плазмового осадження, використовують для штампувального інструменту. Для підвищення стійкості матеріалів в умовах абразивного і адгезійного зносу, а також зносу при ударному навантаженні використовували фізичне осадження покриття.

Буровий інструмент зміцнюють методом хімічного осадження покриття, щоб забезпечити працездатність в умовах стирання і корозії при високих температурах (понад 1100°C).

У той же час покриття мають значну крихкість, що знижують експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим може бути використана комбінована обробка, а на сьогоднішній день така модифікація практично себе вичерпала.

Крім зносостійких покриттів є теплозахисні покриття, які також широко застосовуються в промисловості.

Теплозахисні покриття повинні володіти високою ерозійною і корозійною стійкістю для запобігання перегріву, тому їх застосовують для двигунів. Як

правило, використовують оксидне покриття, товщина якого не повинна перевищувати 1 мкм. Крім двигунів зміцнюють камери згоряння газових турбін і вихлопні труби. Для зміцнення крайок вирубних пуансонів зі сталей У8 і У10 використовують метод термозміцнення імпульсними лазерами. Наприклад, для зміцнення пуансонів на бічну поверхню наноситься кілька рядів плям з перекриттям при $K_{\text{п}} = 0,5$. Така схема зміцнення дозволяє зберегти зміцнений шар після переточувань. Стійкість пуансонів збільшується в $2 \div 5$ разів. На відміну від пуансонов матриці в більшості випадків зміцнюють з лицьової поверхні, тому після їх переточки необхідно повторне зміцнення.

Незважаючи на приклади успішного застосування процесу термозміцнення імпульсними лазерами цей метод має ряд недоліків:

- 1) низьку продуктивність, обумовлену малою частотою проходження імпульсів сучасних лазерних установок і малими розмірами лазерної плями;
- 2) малу глибину зміцнення через обмежену тривалість імпульсу;
- 3) нерівномірність властивостей поверхні, обумовлена нерівномірною щільністю енергії в плямі, а також «лускатість» будови поверхні, наявністю зон відпустки, що в ряді випадків не дозволяє отримати хороші експлуатаційні властивості.

Доцільно застосовувати локальне зміцнення поверхонь тертя в тих випадках, коли застосування інших традиційних методів зміцнення неможливо, наприклад, через велике викривлення деталі або через труднощі підведення теплоти тощо.

Зазначене різноманіття факторів, що впливають на покриття, залежить від співвідношення фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу і покриття. При низьких і середніх температурах це визначає адгезійну міцність, при високих - характер і інтенсивність твердофазних і рідиннофазних дифузійних реакцій, контактено-реактивне плавлення.

Вельми актуально встановлення функціональних зв'язків між технологічними параметрами процесу формування зносостійкого покриття і зношуванням інструменту. Ці завдання до теперішнього часу не вирішені через порівняно низьку довговічності покриття.

Для підвищення довговічності різального інструменту з покриттям, необхідний новий метод нанесення покриття, що сприяє збільшенню запасу міцності і жорсткості, зниження схильності ріжучої частини інструменту до втрати формостійкості і термопластичного прогину при додаванні термомеханічних напружень, що виникають в процесі різання. Необхідний новий тип покриття, з добавками, у вигляді пластичного матеріалу, що має низький модуль пружності і зсуву, для релаксації напружень. Таким чином, виявлення і встановлення закономірностей зв'язують технологічні параметри нанесення функціональних покриттів зі зносостійкістю і довговічністю інструментів, розробка і всебічне дослідження нових методів формування дифузійних покриттів, що забезпечують високі ріжучі властивості, релаксацію термомеханічних напруг, гальмування поверхневого розтріскування є досить актуальною.

1.4 Кінетика і механізм зношування ріжучого інструменту зі зносостійким покриттям

Аналіз кінетики зношування ріжучого інструменту з покриттям, що отримується методом конденсації речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням, показав, що, незважаючи на значний внесок покриття в зниження інтенсивності зношування контактних майданчиків і підвищення стійкості ріжучого інструменту, їх ефективність помітно нижче за очікувану [1, 2]. Зокрема в роботі [8] показано, що довговічність покриттів за технологією конденсації речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням (PVD) і (CVD) на контактних майданчиках інструменту зі швидкорізальної сталі становить 0,5-5% від періоду стійкості інструменту.

Короткий аналіз тенденцій вдосконалення ріжучого інструменту традиційними методами дозволяє затвердити, що методи такого вдосконалення в значній мірі вже вичерпані, особливо в зв'язку з неможливістю збалансованого створення властивостей, пов'язаних з твердістю, теплостійкістю і зі зносостійкістю з одного боку і в'язкістю і міцністю - з іншого.

Ефективним напрямком створення ріжучого інструменту є поверхневе зміцнення.

За даними робіт [4, 7, 8, 9, 29] така ситуація є типовою для багатьох типів інструменту (свердла, мітчики, протяжки, швидкорізальні пластини тощо). Початкові акти руйнування покриттів спостерігаються вже в період припрацьовочного зношування інструменту, а інтенсивність руйнування покриття збільшується з ростом термомеханічних навантажень.

Серед багатьох причин руйнування покриття на контактних майданчиках інструменту: мікроповзучість локальних об'ємів інструментального матеріалу і схильність ріжучої частини інструменту до пружних прогинів і втрати формостійкості. Останнє обумовлено зростанням нормальних контактних напружень по передній поверхні σ_γ , при деякому зниженні дотичних напруг τ_γ і постійних значеннях напруг σ_α і τ_α діючих на контактній площині задньої поверхні. Крім того, для інструменту з покриттям відзначена тенденція зміщення епюри максимальних напруг до ріжучої кромки, що свідчить про тенденції ріжучого інструменту з покриттям до зниження пластичної (в'язкої) міцності [12].

Дійсно, відповідно до виразу:

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3(C_1\sigma_\gamma + \tau_\alpha)^2 + \sigma_\alpha^2}} \quad (1.2)$$

де n_T - запас пластичної міцності інструменту; σ_T - межа плинності інструментального матеріалу; C_1 - коефіцієнт, який визначається експериментально ($C_1 \leq 1$), збільшення нормальної напруги σ_γ при незмінних значеннях напруг τ_α , σ_α призводить до зменшення запасу пластичної міцності ріжучого інструменту.

Ще однією причиною передчасного руйнування покриття на контактних майданчиках ріжучого інструменту є виникнення критичних напружень на межі розділу «покриття - основа» при термомеханічному навантаженні контактних майданчиків інструменту. Ці напруги сильно залежать від різниці теплофізичних і фізико-механічних властивостей матеріалів зносостійкого

покриття і інструмента, власних мікронапруг інструментального матеріалу після повної термообробки і заточування різального інструменту.

Для ефективної роботи ріжучого інструменту з покриттям необхідно усунення або зменшення причин, що призводять до передчасного руйнування покриття.

Значний внесок у вивчення механізму зношування ріжучого інструменту з покриттям в залежності від умов його отримань внесені роботами [5, 7, 22, 23, 30]. Зокрема було показано, що в процесі припрацьовочного зношування ріжучого інструменту покриття помітно знижує термомеханічне навантаження на контактні площадки інструменту [6, 9, 15]. В результаті відбувається своєрідне зміцнення шарів безпосередньо прилягають до покриття і сприятлива з позицій кращого опору зношування перебудова структури. Після часткового або повного руйнування покриття опрацьований матеріал безпосередньо вступає в контакт з інструментальним матеріалом. Інтенсивність зношування останнього істотно знижується.

Ю.Н. Внуків [30] також розглянув особливості механізму зношування швидкоріжучого інструменту зі зносостійким покриттям при безперервному різанні конструкційних сталей з середніми і великими товщинами зрізу:

1. При початковому контакті стружки з передньою поверхнею для інструменту з покриттям, зменшується довжина контакту стружки з передньою поверхнею C_γ , збільшується кут зсуву φ , і, в зв'язку з цим, знижується коефіцієнт поздовжньої деформації стружки ξ і сила стружкоутворення R . Однак середній контактний тиск σ_γ збільшується, тому що скорочення площі контакту за рахунок зменшення довжини контакту відбувається в більшій мірі, ніж зниження нормальної складової сили $P_{N\gamma}$.

2. Через 0,5 - 2 хв. роботи інструменту відбувається прорив (руйнування) покриття у місці початку формування лунки і стружка починає безпосередньо контактувати з основою. Однак умови контактного тертя в цьому випадку відрізняються від умов контактування стружки з інструментом без покриття більш високими значеннями середніх контактних тисків σ_γ .

3. Збільшення нормальних навантажень при терті веде до підвищення площі фактичного контакту в лунці, яка прагне до нормальної, а сила тертя може досягати граничних величин. У цих умовах зрушення в контактних шарах стружки виносяться за вершини мікронерівностей контактної поверхні інструменту на поверхню найменшого опору зрушенню матеріалу стружки. Іншими словами, при підвищенні середнього контактного тиску спостерігається повне загальмування контактного шару стружки, а межа, яка визначає її рух, піднімається вище гребінців мікронерівностей поверхні швидкоріжучої сталі, тобто реалізується пластичний зсув в матеріалі стружки.

У разі зміцнення матеріалу основи, отримання при цьому криволінійних форм контактуючих поверхонь (лунки), загальмований шар, що складається з безлічі зміцнених прошарків, може досягати значних розмірів і бути досить стійким.

4. Утворений загальмований шар в інструменті з покриттям щільно прилягає до задньої сторони лунки. В цьому випадку реалізується внутрішнє тертя в матеріалі стружки, що сходить.

Таким чином, стійкий загальмований шар оброблюваного матеріалу, що сформувався у ріжучого інструмента з покриттям, охороняє задню стінку лунки від контакту зі стружкою, що сходить, і відсуває джерела тепловиділення від її поверхні, що помітно збільшує зносостійкість і стійкість різального інструмента.

Останнє різко знижує ефективність застосування інструменту з покриттям, тому для підвищення його працездатності необхідно: підвищення якості покриття, застосування мастильно-охолоджувальної рідини і комбінованих методів зміцнення з метою підвищення якості покриттів.

Виявлення особливості зношування інструменту з різними варіантами покриттів зумовлюють області їх ефективного використання при металообробці.

Механізм формування поверхневих шарів при міцнісній обробці з нанесенням покриття пов'язаний з дифузією матеріалу покриття в поверхню. Основним фактором, що характеризує зміцнюючий ефект, є силовий фактор,

який впливає на напружено-деформований стан поверхні, а також на шорсткість.

Зміна поверхневих властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів, і можливість їх варіювання в досить широких межах шляхом використання покриттів різного складу, будови і структури, дозволяють управляти найважливішими функціональними параметрами процесу різання. До таких параметрів можна віднести характеристики стружкоутворення, контактних і теплових процесів, зношування контактних майданчиків інструменту. Нарешті, спрямована зміна основних показників процесу різання дозволяє в достатній мірі впливати і на такі параметри, як стійкість інструменту, продуктивність, довговічність, точність і якісні показники готових деталей.

При розробці різального інструменту зі зносостійким покриттям дуже важливо усвідомити вимоги до покриття, виходячи з умов його руйнування на контактних майданчиках інструменту і ролі в складних процесах їх зношування. Перша вимога, якій має задовольняти покриття - здатність чинити опір руйнуванню при напрузі до 4000 МПа. Друга вимога - здатність покриття зберігати свої властивості при температурі $200 \div 1100^{\circ}\text{C}$, тобто температурі, що виникає в процесі різання. Одночасно необхідно враховувати різну залежність властивостей (модуль пружності, коефіцієнти Пуассона, лінійного розширення, твердість тощо) покриття і інструментального матеріалу від температури.

Безпосередніми причинами зношування контактних майданчиків інструменту є інтегрально протікаючі процеси абразивного, адгезійного, адгезійно-втомного, корозійно-окисного, дифузійного зношування. Якщо опір абразивного зношування досить ефективно може бути підвищено шляхом збільшення твердості контактних майданчиків, то адгезійно-втомні і дифузійні види зношування інструменту в значній мірі залежать від кристалохімічних структур інструментального та оброблюваного матеріалів.

При виражених адгезійних видах зношування інструменту, що зазвичай протікають при різанні з малими і середніми швидкостями різання (температура $350 \div 550^{\circ}\text{C}$), відбувається відрив або зріз найдрібніших часток

інструментального матеріалу під дією сил адгезії. Інтенсивність руйнування і виникнення «містків» адгезії досить велика. Роль покриття в цих умовах повинна зводитися до зменшення інтенсивності схоплювання контактних майданчиків інструменту з оброблюваним матеріалом, а саме покриття повинне досить ефективно чинити опір втомного руйнування. Зниження інтенсивності адгезійного зношування інструменту з покриттям може бути досягнуто шляхом збільшення відношення твердості композиції «покриття і опрацьований матеріал» $HV_{п.і.м} / HV_{о.м}$ до відношення твердості композиції «інструментальний і опрацьований матеріал» $HV_{і.м} / HV_{о.м}$ і твердості композиції «покриття і інструментальний матеріал» $HV_{п.і.м} / HV_{і.м}$.

У міру зростання швидкості різання в зоні обробки виникає температура, що перевищує $600 \div 700^{\circ}\text{C}$, активізуються інтердифузійні процеси, що призводять до взаємного дифузійного розчинення компонентів інструментального та оброблюваного матеріалів. В результаті інтердифузії відбуваються структурні перетворення в локальних приповерхневих шарах інструментального матеріалу, що, в свою чергу, призводить до їх знеміцнення, хрупкості. Одночасно зростають напруги в площині зсуву, як наслідок зміцнення об'ємів оброблюваного матеріалу, що призводить до руйнування роззміцнених структур інструментального матеріалу. Тому у покриття повинна бути висока опірність твердо - і рідкофазним дифузійним реакціям з оброблюваним матеріалом. У цьому випадку роль покриття повинна зводитися до «бар'єрної» функції, що може бути досягнуто введенням до складу покриття елементів з малою дифузійною рухливістю при температурі, що відповідає температурі, що виникає в процесі різання.

Ділянки пружного (дискретного) контакту між контактуючими поверхнями інструментального та оброблюваного матеріалів піддаються впливу активних реагентів з навколишнього середовища. В результаті відбувається інтенсивне окислення і корозія ділянок пружного контакту інструменту. Роль покриття в цих умовах полягає в підвищенні опору інструментального матеріалу високотемпературній корозії і окисленню [30].

Виходячи з концепції покриття, як проміжного технологічного середовища між інструментальним і оброблюваним матеріалами, були сформульовані вимоги до зносостійкого покриття, що наноситься на ріжучий інструмент. Ці вимоги визначаються службовим призначенням інструменту, необхідністю узгодження властивостей матеріалів покриття і інструмента і підходом до композиції покриття - інструментальний матеріал як єдиного композиційного тіла. Крім того, обраний склад покриття повинен забезпечуватися відповідними технологічними умовами отримання та відповідати загальному підходу до покриття як матеріалу, що працює в умовах важкого навантаження [30].

Найбільш важливою функцією покриття при взаємодії з оброблюваним матеріалом є управління процесом різання і термомеханічним навантаженням ріжучої частини інструменту. Взаємодія покриття на контактній площадці передньої поверхні зі зрізаним шаром визначає характер протікаючих контактних процесів і, зокрема, такі характеристики, як довжина контакту, контактні деформації, потужність теплового джерела на передній поверхні, контактні напруги, напруги зсуву тощо. Взаємодія покриття на контактній площині задньої поверхні з оброблюваним матеріалом впливає на потужність теплового джерела на задній поверхні, характер формування приповерхневих шарів оброблюваних деталей, пружній наслідок і, таким чином, сильно впливає на якісно-точнісні характеристики оброблюваних деталей.

Зазначене різноманіття факторів, на які впливає покриття в великій мірі, залежить від фізико-хімічної спорідненості оброблюваного матеріалу і покриття. При низьких і середніх температурах ця спорідненість визначає міцність адгезії, при високих - характер і інтенсивність твердофазних і рідиннофазних дифузійних реакцій, контактно-реактивне плавлення.

При низьких і середніх швидкостях різання відбувається взаємодія контактуючих поверхонь в умовах слабкої зміни вихідних властивостей контактуючих матеріалів. При середніх температурах і контактних напругах виникає адгезійна взаємодія між покриттям і оброблюваним матеріалом при їх дискретному контакті, що дозволяє зовнішньому середовищі досить вільно

проникати в зону контактування. При високих швидкостях різання температура зростає, збільшується межа плинності контактних шарів оброблюваного матеріалу, встановлюється суцільний контакт, знижується швидкість відносного ковзання, різко зростає можливість хімічних реакцій і дифузії між покриттям і оброблюваним матеріалом. При такому характері взаємодії покриття і оброблюваного матеріалу висока ймовірність одночасної дії адгезійного, адгезійно-втомного, абразивного, корозійно-окисного, дифузійного видів зношування ріжучого інструменту.

Працездатність інструменту зі зносостійкими покриттями в значній мірі залежить від умов його експлуатації і визначається такими критеріями, як середнє значення часу різання (стійкість) \bar{T} і коефіцієнт його варіації V_T . Тому в значній мірі визначаються умови експлуатації і, зокрема, працездатність інструменту, яка визначається середньою стійкістю і коефіцієнтом його варіації:

$$v = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{T}}. \quad (1.3)$$

Обробка нержавіючих і жароміцних сталей характеризується наступними особливостями:

1. Високим зміцненням матеріалу в процесі деформації при різанні. Підвищена зміцнюваність жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів пояснюється особливостями будови їх кристалічної решітки. Вони мають більше можливих напрямків ковзання і тому є більш пластичними, чим сталі феррито-перлітною групи. Внаслідок цього при пластичній деформації нержавіючих і жароміцних сталей значення їх межі міцності на розрив можуть зростати до двох разів.

2. Малою теплопровідністю оброблюваних матеріалів. Це призводить до зменшення стоку тепла в деталь і, як наслідок, до збільшення кількості тепла, яке переходить в різець, до концентрації тепла в зоні різання і підвищення температури різання. Теплопровідність нержавіючих і жароміцних сталей в 5 - 6 разів нижче, ніж у вуглецевої сталі 45 і в 3 - 4 рази нижче, ніж у

легованих. При точінні жароміцних сплавів навіть незначна зміна швидкості різання приводить до значного підвищення температури різання.

3. Спроможність зберігати вихідну міцність і твердість при підвищених температурах, що призводить до високого питомого навантаження на контактні поверхні інструменту в процесі різання - до 6000- 10000 МПа.

4. Підвищена вібростійкість руху різання, обумовлена високою зміцнюваністю нержавіючих і жароміцних матеріалів при нерівномірності протікання процесу їх пластичного деформування.

Виникнення вібрацій призводить до змінних силових і теплових навантажень на робочі поверхні інструменту, отже, до мікро- і макровикришуванню різальних крайок.

Обробка різанням високоміцних загартованих сталей характеризується малою пластичною деформацією при стружкоутворенні внаслідок дуже високого опору деформації цих сталей. При обробці цих матеріалів через високі значення механічних характеристик виникають великі значення сил різання і високі температури різання. Питома сила різання має такі ж значення, як і при обробці нержавіючих і жароміцних сталей.

Перераховані особливості обробки високоміцних, загартованих, нержавіючих і жароміцних сталей визначають їх низьку оброблюваність різанням.

В.Н. Подураєв характеризує обробку нержавіючих і жароміцних сплавів наступним чином: «Мала теплопровідність цих матеріалів призводить до різкого зниження відводу тепла в стружку і оброблювану заготовку, а, отже, підвищення температури в зоні контакту ріжучої частини інструменту і заготовки з активізацією процесів адгезії і дифузії». В результаті цього значно збільшується знос інструменту і явища налипання (схоплювання), що викликають руйнування різальних крайок [31, 32]. Інтенсифікації цих процесів сприяють підвищені механічні характеристики оброблюваного матеріалу при високій температурі, велика стираюча здатність матеріалів, а також змінний вплив цих факторів, обумовлене вібраціями.

Розглядаючи особливості оброблюваності різанням жароміцних сплавів, В.А. Кривоухов зазначає, що низька оброблюваність жароміцних сплавів, що мають низьку теплопровідність, пояснюється їх здатністю зберігати свої високі механічні властивості при підвищених температурах. Висока контактна температура, що розвивається на поверхні ріжучого інструменту при великому тиску, сприяє «злипання» оброблюваного матеріалу і матеріалу інструмента, що призводить до швидкого зносу останнього [33].

Високі контактні навантаження на ріжучий інструмент і високі температури різання при точінні важкооброблюваних матеріалів, очевидно, будуть сприяти деформації ріжучих пластин.

Аналогічні висновки робить Венкатеш В.С. Він пише, що «утворення лунок в твердосплавних різцях з покриттям, як видно, відбувається внаслідок пластичної деформації. Пластична деформація, в свою чергу, викликає випинання, в результаті чого має місце сильний знос задньої ріжучої грані інструменту».

Досліджувався вплив пластичної міцності твердих сплавів на їх ріжучі властивості при точінні жароміцних важкооброблюваних матеріалів. Було встановлено, що опірність твердого сплаву деформації істотно впливає на стійкість інструменту. У більшості випадків пластини з меншою величиною деформації мали велику стійкість. Виняток становили пластини з найменшою величиною деформації, у яких через недоімочну крихку міцність були викришування і відколи.

Про значний вплив деформації ріжучого клина на знос інструменту зазначалося в роботі [33]. Автори встановили, що деформація ріжучої пластини в залежності від умов навантаження ріжучої кромки полягає в опусканні передньої поверхні і вилущеними задньої або передньої поверхонь (див. рис. 1.1).

Деформація великих ділянок різальної крайки, найчастіше спостерігається при точінні високоміцних сталей. Це призводить до штучного збільшення фаски зносу на задній поверхні і помітного скорочення стійкості інструменту. Тому однією з основних характеристик ріжучих властивостей

пластин з твердих сплавів може бути межа плинності при зрізі або стисненні при високих температурах.

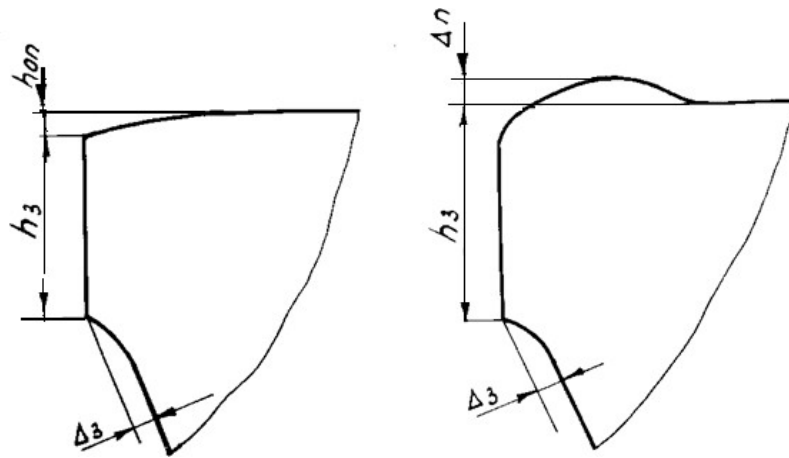


Рисунок 1.1 – Види деформації ріжучого клина

Широкі дослідження повзучості твердих сплавів в статичних умовах при різних температурах проводив Креймер Г.С. [45]. Він визначив залежність швидкості повзучості від температури, зернистості сплавів, вмісту кобальту в сплаві тощо.

Аналіз літературних даних показує, що основними причинами виходу з ладу твердосплавних пластин при обробці високоміцних загартованих, нержавіючих і жароміцних сталей зі зносостійкими покриттями можуть бути: руйнування покриттів в результаті високих контактних силових і температурних навантажень і деформація твердосплавної основи, яка веде до зростання контактної площадки на задній поверхні інструменту.

Загальним недоліком всіх перерахованих вище робіт є те, що при описаних випробуваннях одночасно протікають два процеси, що визначають стійкість інструменту: власне знос твердого сплаву і деформація ріжучого клина. Тому виділити деформацію в «чистому вигляді» і оцінити її вплив на працездатність інструменту при обробці звичайними твердими сплавами не представляється можливим. З цієї точки зору «ідеальним» є інструмент з покриттям. Покриття, тривалий час різання присутнє на робочих поверхнях інструменту, оберігає твердосплавну основу від контакту з оброблюваним

матеріалом і від її інтенсивного зносу. При цьому знос самого покриття практично не впливає на зростання майданчика контакту не задньої грані.

На рис. 1.2 показана класифікація зносу інструменту, запропонована фірмою Sandvik Coromant (Швеція).

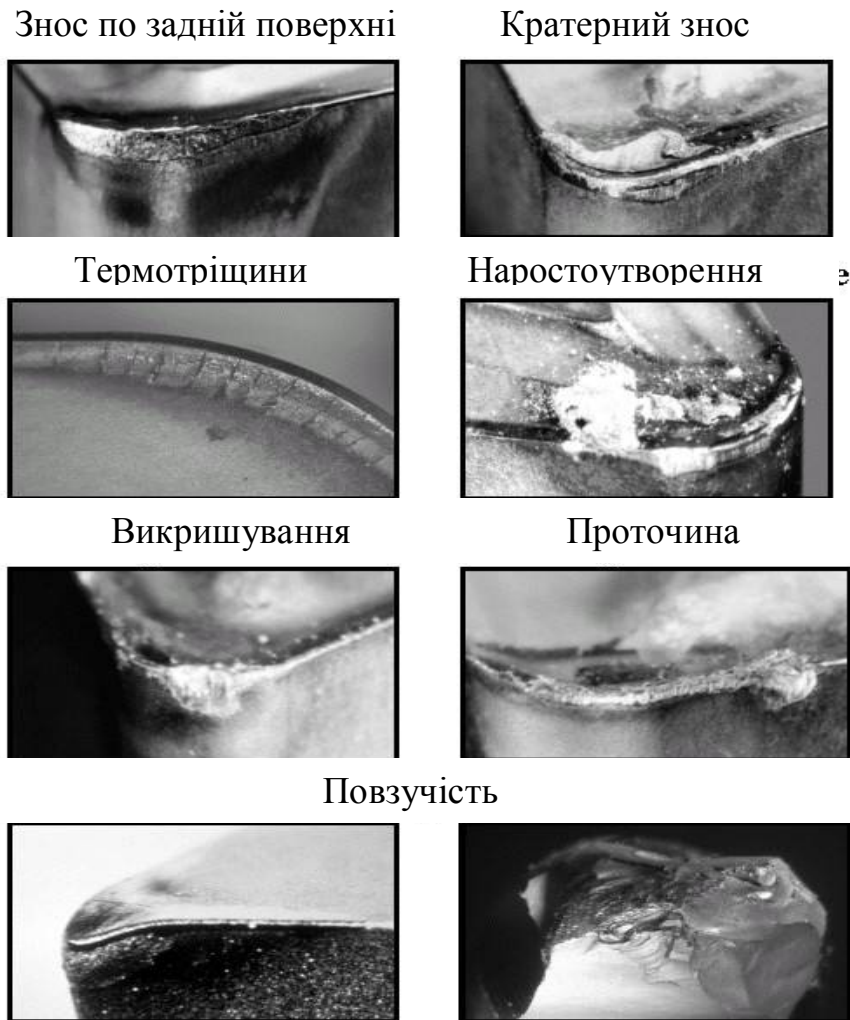


Рисунок 1.2 – Класифікація зносу інструменту

З огляду на розмаїття форм зносу і деформування ріжучої частини інструменту, що спостерігаються візуально, оцінити знос інструменту шляхом вимірювання його геометричних розмірів є складним завданням.

На рис. 1.3 представлені ознаки зносу інструменту, що візуально спостерігаються, відповідно до класифікації Г. І. Грановського [34, 35]. Мірою зношеності інструмента може служити лінійний, а також масовий знос. Беручи за показник лінійний знос, про зношеність задньої поверхні інструмента судять за максимальною шириною майданчику зносу h_3 , а передньої поверхні - по

максимальній глибині лунки зносу $h_{л}$. При чистовій розмірній обробці зношеність інструменту зручно оцінювати лінійним розмірним зносом, що характеризує зміщення вершини або перехідного леза інструменту в напрямку, перпендикулярному до обробленої поверхні, в результаті зносу його задніх поверхонь.

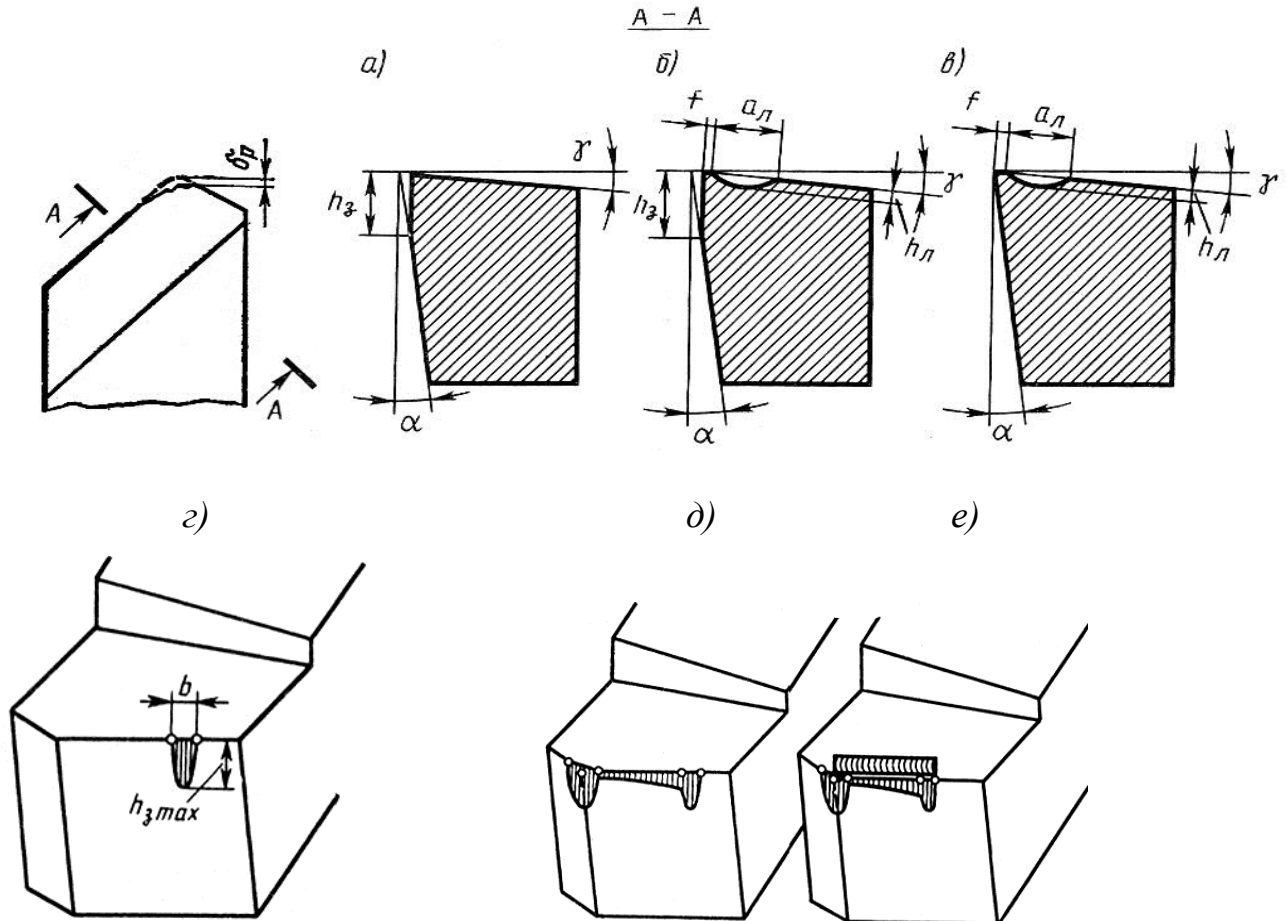


Рисунок 1.3 – Ознаки зносу ріжучих інструментів, що візуально спостерігаються:

а) фаска зносу на задній поверхні, б) фаска зносу на задній поверхні і лунка на передній поверхні, в) лунка зносу на передній поверхні, г) проточина, д) комбінований знос по задній поверхні, е) всі ознаки зносу відзначені одночасно

Стандарт ФРН DIN в якості основних характеристик зносу пропонує ширину площадки зносу по задній поверхні V_B , глибину лунки K_T , відстань K_M від середини лунки зносу до ріжучої кромки (див. рис. 1.4 а, б) [36].

Згідно з американським стандартом ANSI / ASME B94.55-1985 головна ріжуча кромка, з метою вимірювання параметрів зносу, розділяється на три зони (див. рис. 1.4 в): зона С - закруглена частина ріжучої кромки вершини різця, зона N - область зношеної ріжучої кромки довжиною b_w , дальня від вершини різця, зона В - пряма частина ріжучої кромки, що залишилася між зоною С і зоною N. Для твердосплавних різців рекомендуються наступні критерії: середня ширина фаски зносу $VB_B = 0,3$ мм, максимальна ширина фаски зносу $VB_{Bmax} = 0,6$ мм. Крім того, в якості критерію оцінки зносу при чистовому точінні може використовуватися шорсткість поверхні і довжина проточіни («вуса») $VB_N = 1$ мм.

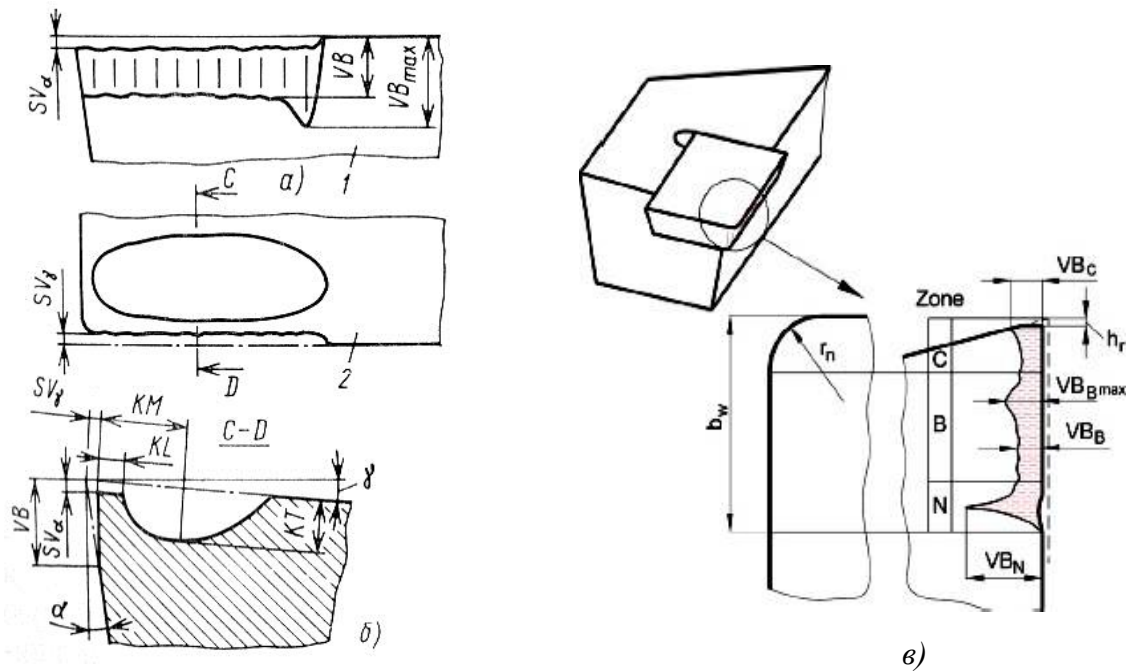


Рисунок 1.4 – Межі осередків зносу ріжучого інструменту:

а) знос по задній грані згідно DIN [34], б) лункообразний знос згідно DIN [34], в) знос по задній грані відповідно до стандарту ANSI / ASME B94.55 - 1985 [36]

Максимальний лінійний знос може бути досить надійною характеристикою при розробці промислових норм допустимих зносів і норм витрат інструменту на переточування. Для дослідження ж фізичної природи зносу інструментів більш об'єктивною характеристикою є масовий знос - маса

зношеної частини інструменту в мг, якій пропорційна робота сил тертя, що витрачається на перетворення інструментального матеріалу в продукт зношування.

При використанні масових заходів прагнуть врахувати всю масу продуктів зношування ножа різця за період його роботи. Простіше розрахувати об'єм зношеної частини різця за результатами обміру видимих ознак зносу.

Тоді маса зношених контактних майданчиків може бути визначена за формулою:

$$m = \rho V, \quad (1.4)$$

де ρ - щільність інструментального матеріалу, V - об'єм зношеної частини різця.

У якості більш універсального критерію зношування інструменту А.Д.Макаров [37, 38] пропонує використовувати швидкість розмірного зносу інструменту, яка визначає, наскільки коротшає вершина інструменту в напрямку, перпендикулярному оброблюваній поверхні, за період нормального зносу:

$$v_h = \frac{dh_r}{dT} = \frac{h_r - h_n}{T - T_n} = \frac{vsh_{on}}{100} \quad (\text{мкм/хв.}), \quad (1.5)$$

де h_r і h_n - поточний і початковий радіальні знос, відповідно; T і T_n - загальний і початковий час експлуатації, відповідно; h_{on} - відносне поверхневе спрацювання - величина радіального зносу на 1000 см^2 обробленої поверхні:

$$h_{on} = \frac{(h_r - h_n)100}{(l - l_n)s} \quad (\text{мкм}/1000\text{см}^2), \quad (1.6)$$

де l_n - початковий оброблену ділянку заготівлі; l - загальна довжина обробленої поверхні.

Тоді питома стійкість інструменту, що визначає, яку ділянку поверхні оброблено інструментом за 1 мкм його радіального зносу, розраховується за формулою:

$$T = \frac{d\Pi}{dh_r} = \frac{1}{h_{on}} = \frac{(l - l_n)s}{(h_r - h_n)100} \quad (10^3 \text{ см}^2/\text{мкм}) \quad (1.7)$$

Відносно поверхнєве спрацювання і питома стійкість інструменту є універсальними характеристиками зносу різця, так як вони дозволяють виконувати порівняння різноманітних інструментальних матеріалів для різних сполучень швидкостей різання і подач.

А.Д. Макаров, А.С. Кондратов, В.С. Кушнер [37, 38, 39] та ін. Дослідники пропонують використовувати диференціальну характеристику зносу інструменту - інтенсивність зношування поверхонь інструменту, або відносний знос:

$$\delta_{L_3} = \frac{dh_3}{dL}, \delta_{L_n} = \frac{dh_n}{dL}. \quad (1.8)$$

Використання інтенсивності зношування особливо необхідно в тих випадках, коли залежності параметрів зносу від шляху різання нелінійні і, отже, інтенсивності зношування не постійні протягом періоду стійкості. Це можна спостерігати при обробці нікелевих і титанових сплавів [33].

В.С. Кушнером показано [3, 4], що при постійній геометрії інструменту і незначній зміні режимів різання між інтенсивностями зношування при фіксованій ширині фаски зносу $h_3 = 0,8$ мм і відповідними розрахунковими температурами існує тісний зв'язок, який може бути апроксимований статечними функціями виду:

$$\frac{\delta_L - \delta_0}{\delta_1 - \delta_0} = \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right)^m, \quad (1.9)$$

де δ_L - інтенсивність зношування інструменту на передній і задній поверхнях різального леза; δ_1 - максимальна раціональна інтенсивність зношування інструменту на передній і задній поверхнях різального леза; δ_0 - мінімальна інтенсивність зношування інструменту на передній і задній поверхнях різального леза; θ - температури поверхні інструменту: θ_0 і θ_1 - температури, що відповідають значенням інтенсивностей зношування δ_0 і δ_1 ; m - показник ступеня.

У роботах А. Д. Макарова і його школи використовувалася модель І.В.Крагельського [40], що виражає зв'язок інтенсивності зносу і механічних

властивостей поверхонь тертя при пластичному контакті у вигляді (Л. Ш. Шустер [41, 42]):

$$J_h \approx \left(\frac{\sigma_T + 2\tau_a}{\sigma_T - 2\tau_a} \right)^{t/2} / \left[\delta^t (HB)^{1 + \frac{t+1}{2\nu}} \right] \quad (1.10)$$

Тут інтенсивність зносу J_h обчислюється як товщина зношеного шару, яка припадає на одиницю шляху тертя; σ_m - межа плинності приконтаткних шарів тіла, що зношується; τ_a - межа міцності адгезійних зв'язків при зрізі, обумовлена молекулярною взаємодією в зонах фактичного контакту (при заданій температурі); δ - відносне подовження при розриві; HB – твердість; t - показник кривої втоми; ν - показник, що залежить від геометричних характеристик контакту.

Щодо існування мінімуму залежності $\delta_L(\theta)$ і пояснення причин зростання інтенсивності зношування при зменшенні температури немає єдиної точки зору. Так, поряд з даними про різко виражений мінімум, характерний для обробки нікелевих і титанових сплавів [43] є дані авторів Такеяма і Мурата про вельми незначні зміни інтенсивності зношування при зменшенні температури [44] при обробці жароміцного сплаву твердим сплавом P10.

А.Д.Макаровим сформульована, що отримала широку популярність і викликала безліч суперечок, гіпотеза про те, що мінімум інтенсивностей зношування інструменту відповідає постійній (оптимальній) температурі різання [37].

Однак є експериментальні дані [3], що свідчать про зміну «оптимальної» температури при істотній зміні форми ріжучого леза і режимів різання. Вони втім, не суперечать і експериментальними даними Макарова і його правилу, яке хоч і не зовсім точно сформульовано, але відображає справедливе твердження, що при різних комбінаціях швидкості різання, подачі і глибини різання може бути знайдена постійна температура в зоні різання (оптимальна температура), відповідна оптимальним швидкостям різання. Але говорити тільки про температуру, при аналізі інтенсивності зносу, не правомірно, оскільки зношування викликають також і сили різання. Проблемою є як визначення оптимальної температури, так і знаходження цих комбінацій режимів різання,

які визначають сили різання. Крім того, з практичної точки зору не вигідно працювати на оптимальній швидкості різання, оскільки вона є досить низькою і не забезпечує високої продуктивності обробки.

Проблема в тому, тобто руйнування твердих сплавів під дією напруг, що циклічно змінюються, більш низьких, ніж межа міцності, освячена також в монографіях Г.С. Креймера [45], В.І. Третьякова [46], В.І. Туманова [47], М.Г. Лошака [48]. В області досліджень міцності інструменту проведені роботи Г.Н.Титовим, Г.Г.Іноземцева, І.П. Третьякова, Г.І. Грановського, А.А. Авакова, М.В. Касьяна, А.І. Каширіна, М.М. Зорева, Т.Н. Лоладзе, А. І. Бетанелі, Б.П. Прібилова, Л.Г. Кукліна, В.І. Сігалова, В.В. Серебровського, Л.Г. Хаєта, М.Ф. Полетика, Є.П. Степанова та ін. Однак до теперішнього часу, багато питань, пов'язаних з міцністю ріжучої частини інструменту, вирішені недостатньо повно.

При різанні процес накопичення пошкоджень має той же механізм, що і при втомному навантаженні. На початковій стадії процесу відбувається накопичення пружних спотворень кристалічної решітки, потім руйнуються мікроскопічні обсяги матеріалу з утворенням мікротріщин, які далі розвиваються до макротріщин, приводячи до руйнування матеріалу [1]. Тому при моделюванні зношування інструменту в процесі різання можна використовувати методику розрахунку на довговічність при циклічному навантаженні.

Згідно з цією методикою передбачається, що існує гранична крива, що характеризує втрату несучої здатності інструменту, див. рис. 1.5.

Якщо взяти за основу криву втомної міцності, то фізичний зміст її наступний: в точці на кривій з координатами (σ_i, N_i) втрачається несуча здатність конструкції при навантаженні з напругою σ_i і кількістю циклів навантаження N_i . При цьому пошкодженість конструкції приймається за одиницю. При роботі ріжучим інструментом змінюються умови його експлуатації: режими різання, опрацьований матеріал тощо. Оцінка пошкодження інструменту вимагає врахування змін амплітуди і середньої напруги циклу, що викликається зміною умов обробки.

Тому застосовується методика лінійного підсумовування пошкоджень, (правило Майнера [49]), згідно з яким кожне навантаження при певних умовах

різання вносить свою частку в пошкодженість, яка визначається відношенням n_i до N_i , де n_i - кількість циклів навантаження при заданих умовах обробки (σ_n), N_i - граничне число циклів для тих же умов обробки.

Руйнування (втрата несучої здатності) настає коли $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$, і ця сума може змінюватися в діапазоні від 0,71 до 1,49 [49].

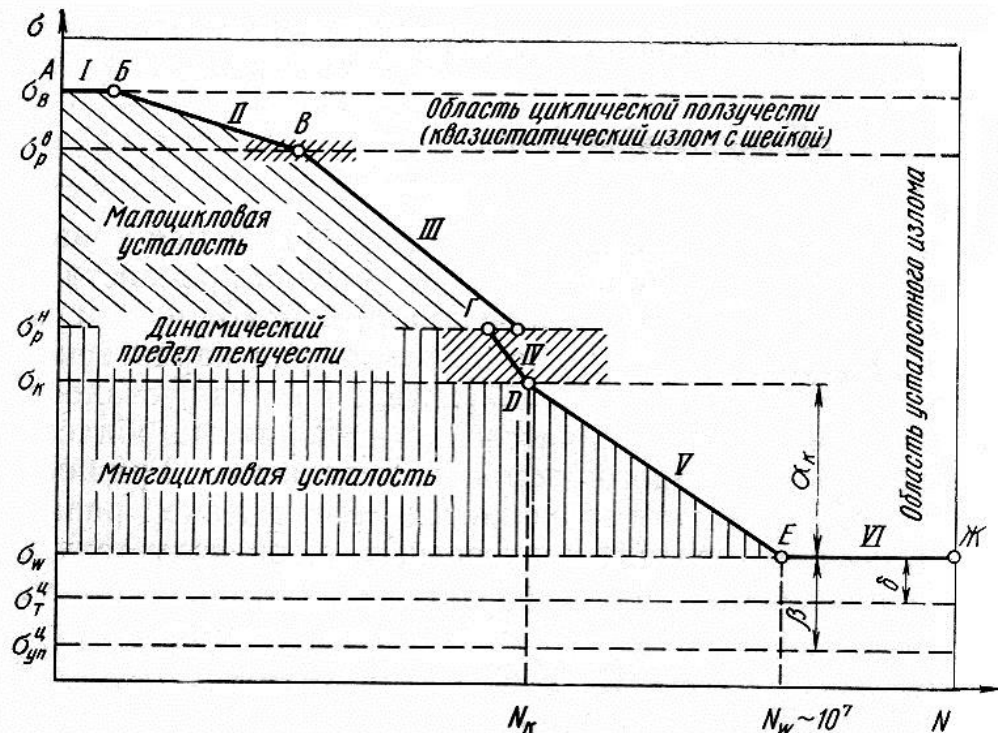


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення повної кривої втоми:

σ_B – межа міцності, σ_p^B – напруга верхнього розриву (перший вид розриву), σ_p^H – напруга нижнього розриву (другий вид розриву), σ_k – критичне напруження (третій вид розриву), σ_ω – межа втоми, σ_T^{II} – циклічний межа плинності, $\sigma_{ун}^{II}$ – циклічний межа пружності, N_k – критичне число циклів навантаження, α_σ , β – константи

Розрахунок на міцність від втоми на основі граничних кривих втомного руйнування розроблено для умов одновісного напруженого стану. Так як ріжуча частина інструменту в процесі експлуатації знаходиться в складному напруженому стані, що змінюється в процесі роботи, то критерій втомної міцності повинен відображати різну частоту і амплітуду коливань складових тензора напружень і різні їх поєднання. Порівняння ряду критеріїв, наведених в

літературі, не дають однозначного визначення меж несучої здатності інструменту. Одночасно зі зміною напруг під дією силових навантажень ріжуча частина інструмента піддається змінним тепловим навантаженням, що має велике значення при втомному руйнуванні інструментальних матеріалів.

Загальне співвідношення, що описує зміну пошкодження конструкційного матеріалу $\omega(t)$ в процесі експлуатації деталі, в тому числі ріжучого інструменту, що зношується, можна представити у вигляді [47]:

$$\omega_{кр} \geq \omega(t) = \omega_{\tau} + \int_0^t J(x_i, \tau) d\tau \quad (1.11)$$

де $\omega_{кр}$ – критичне значення пошкоженості; ω_{τ} – технологічна пошкоженість матеріалу; $J(X_i, t)$ – інтенсивність зміни пошкодження в момент часу t , що залежить від енергетичних факторів впливу на матеріал X_i - температури, навантажень, фізико-хімічних процесів.

З аналізу умов взаємодії інструменту з оброблюваною заготовкою в зоні різання проф. Барзовим А.А. показано доцільність використання кінетичної концепції міцності, що розвивається академіком Журкова С.Н. і його школою [50, 51]. Основна залежність цієї теорії має вигляд:

$$t_p = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{k\theta} \quad (1.12)$$

де t_p – час до руйнування матеріалу, в якому діє розтягуюча постійна напруга σ при температурі θ ; k – постійна Больцмана; τ_0 – постійна, по порядку величини близька до періоду теплових коливань атомів; γ – структурний коефіцієнт, який має ймовірний характер і фізично відображає середню величину перенапруги на міжатомних зв'язках; U_0 – енергія активації розриву міжатомних зв'язків, чисельно рівна (або близька) до енергії сублімації.

З урахуванням принципу лінійного підсумовування пошкоджень (принципу Бейлі), вперше використаного в технології механічної обробки при визначенні стійкості інструменту при нестационарних режимах різання проф. Ярославцевим В.М. [50], поточне значення технологічної пошкоженості для N -операції представлено у вигляді:

$$\omega_t = \omega_0 + \sum_{K=1}^{N-1} \omega_K + \int_0^t \frac{d\tau}{\tau_0 \exp \frac{U_0 \gamma \sigma}{k\theta}}$$

$$0 \leq \omega_T(t) \leq \omega_{кр} = 1 \quad (1.13)$$

Зазначене співвідношення якісно розкриває зміст інтенсивності зміни пошкодження в момент часу t і дозволяє розрахунковим шляхом визначити ω_T у припущенні визначеності параметрів U_0 , γ , $\sigma(t)$.

Очевидну складність викликає визначення деяких еквівалентних значень постійних U_0 , γ , що описують процес зношування інструменту. Фізично обгрунтованим видається додаток кінетичної теорії міцність твердих тіл, запропонованої академіком С.М. Журковим, до одиничних актів руйнування окремих мікрочасток при зношуванні інструменту.

Слід також зазначити, що експериментальні дослідження тимчасової залежності міцності акад. С.Н. Журкова з співробітниками проводилися для найпростішого випадку - розтягування тонких дротів. Однак навіть в цьому випадку розширення температурного інтервалу або збільшення діапазону напруг часто призводило до відхилення експериментальних даних від співвідношення. Не вдалося знайти також і перехід від одновісного розтягу до інших видів навантаження [50]. Крім цього для визначення довговічності в даний час застосовують кінетичну теорію міцності, яка спирається на фундаментальні підстави статичної фізики. Особливістю тимчасових ефектів в кінетичній теорії міцності є їх універсальний характер, що призводить до висновку про їх єдину причину - термофлуктуаційну обумовленість. Довговічність згідно Журкова С.Н. є однією з найважливіших характеристик міцності матеріалу, і в цьому сенсі, відіграє цілком самостійну роль у вибірці матеріалу для ріжучого інструменту, причому будь-якого (різець, свердло тощо). Хоча, слід зазначити, ця характеристика відрізняється від інших міцнісних характеристик, що фігурують в довідниках (наприклад: модуль Юнга, твердість тощо). За своїм змістом довговічність носить прогностичний характер.

1.5 Мета та завдання дослідження

В результаті аналізу, встановлено, що для підвищення довговічності різального інструменту при обробці деталей, може бути використаний метод нанесення локального дифузійного покриття з полікристалічної структурою, який знижує ризик крихкого руйнування ріжучого клина інструмента при дії циклічних механічних і термічних навантажень.

В якості основного об'єкта досліджень розглядалися різці з механічним кріпленням чотиригранних пластин зі швидкорізальної сталі і твердого сплаву, що обгрунтовано їх широким промисловим використанням, універсальністю і технологічністю при виготовленні.

Для досягнення встановленої мети роботи сформульовані такі завдання дослідження і намічені шляхи їх вирішення:

- розробити новий метод підвищення довговічності різального інструменту шляхом нанесення локального дифузійного покриття;
- розробити теоретичну модель напружено-деформованого стану для порівняльної оцінки впливу локального дифузійного і суцільного покриття на фізико-механічні властивості поверхневого шару;
- розробити метод нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент і визначити оптимальні фактори, що збільшують довговічність ріжучого інструменту в умовах експлуатації;
- розробити обладнання і технологію для нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент;
- встановити функціональні зв'язки між композицією локального дифузійного покриття, технологічними параметрами процесу його формування і довговічністю ріжучого інструменту;
- встановити вплив локального дифузійного покриття на фізико-механічні та ріжучі властивості інструментального матеріалу.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ НА РІЖУЧИЙ ІНСТРУМЕНТ

Підвищення ефективності обробки здійснюється як шляхом зменшення опору матеріалу різання, так і шляхом збільшення опору інструменту зносу.

Зменшення опору матеріалу різанню досягнуте в результаті:

- роззмцнюючої термообробки;
- попереднього нагрівання;
- зменшення поверхневого натягу при адсорбції поверхнево-активних речовин;
- зниження кута тертя інструменту за рахунок застосування змазок.

Збільшення опору інструменту зносу досягнут в результаті:

- поверхневого зміцнення (у тому числі шляхом нанесення тонких захисних покриттів);
- охолодження інструмента (поливанням рідиною або підведенням її за допомогою інструменту);
- зменшення напруженості в інструменті за рахунок раціоналізації його конструкцій.

У машинобудуванні для зменшення опору зносу і збільшення продуктивності використовують ріжучий інструмент із суцільним покриттям. Однак суцільне покриття, що наноситься на ріжучий інструмент, руйнується в результаті високих контактних силових і температурних навантажень.

Однією з причин передчасного розбиття покриття є виникнення критичних напруг на межі розділу «покриття – основа» при термомеханічному навантаженні контактних майданчиків інструмента. Ці напруги залежать від різниці теплофізичних та фізико-механічних властивостей матеріалів зносостійкого покриття та інструмента, власних мікронапруг інструментального матеріалу після повної термообробки.

Для підвищення довговічності ріжучого інструменту з покриттям необхідний новий метод нанесення покриття, що сприяє збільшенню запасу міцності та жорсткості, зниженню схильності ріжучого клина інструменту до втрати формостійкості та термопластичних прогинів при застосуванні

термомеханічних напруг, що виникають у процесі обробки.

Нанесення дифузійного покриття на ріжучий інструмент впливає не тільки на механічні його властивості, збільшуючи зносостійкість, але і міцність інструменту в цілому, за рахунок збільшення його жорсткості [52, 53]. Однак використання локального (коміркового) дифузійного покриття полегшує умови для релаксації напруг на поверхнях ріжучого інструменту. Такий перерозподіл напруг збільшує тріщиностійкість покриття в цілому, в тому числі обумовлене наявністю розподілених за покриттям перешкод поверхневому розповсюдженню його тріщин у вигляді меж з комірчастою структурою без покриття. Накладення на технологічні, що мають випадковий характер, неоднорідності рельєфу ріжучої кромки геометрично впорядкованого покриття призводить до дозування її робочої частини з періодичним чергуванням найбільш напружених зон у вигляді виступів з покриттям. І менш напружені зони у вигляді впадин без покриття. При цьому можливість зміни геометричних характеристик комірчастості на стадії нанесення покриття передбачає можливість регулювання співвідношення між довжиною вищевказаних зон по довжині контакту ріжучої кромки інструмента. Відзначимо, що подібна можливість відсутня для випадку технологічних неоднорідностей, розглянутих у роботах Барзона А.А. [54] стосовно проблеми фрикційного зношування з участю локальних зон фактичного контакту, спрощувальна версія представлена на рисунку 2.1.

Локальним (комірчастим) покриттям будемо називати геометрично впорядковану сукупність локальних зон з покриттям і області без покриття між ними. Однією з мотивацій такого структурування покриття є можливість використання ефекту гальмування, і навіть зупинки, що утворилася в процесі експлуатації покриття локальної тріщини методом створення на шляху її поширення кордону розділу зі зниженим значенням модуля пружності. При цьому загальне зменшення модуля пружності зразка за рахунок комірчастості покриття може служити інтегральною характеристикою його здатності перешкоджати поширенню тріщин. Передбачається, що пористість покриття буде сприяти збільшенню його експлуатаційної стійкості до деформаційних

модифікаціям за рахунок незалежності деформаційних пошкоджень окремих його осередків.

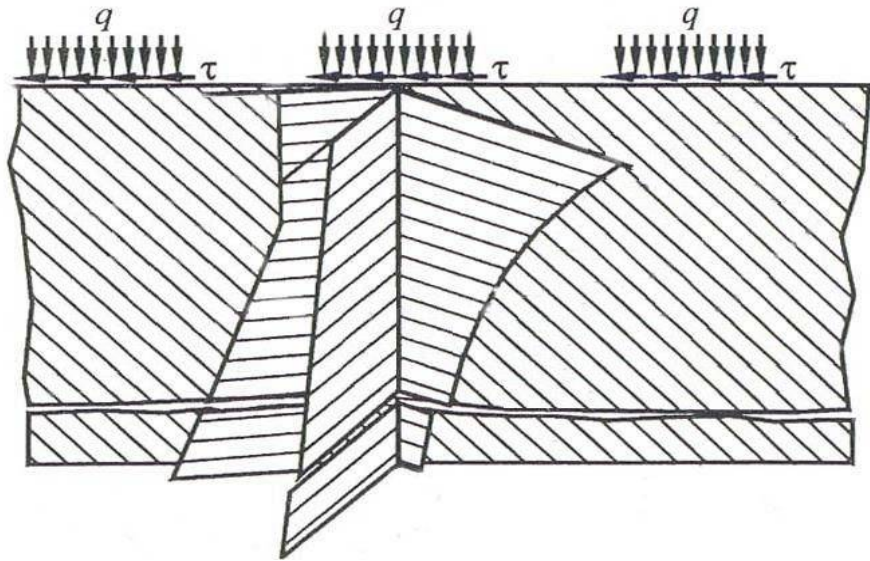


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема зносу контактної поверхні з урахуванням вихідної пошкоженості матеріалів

Особливістю комірчастої моделі зразка (див. рис. 2.2) є визначення його властивостей за допомогою визначення властивостей однієї комірки.

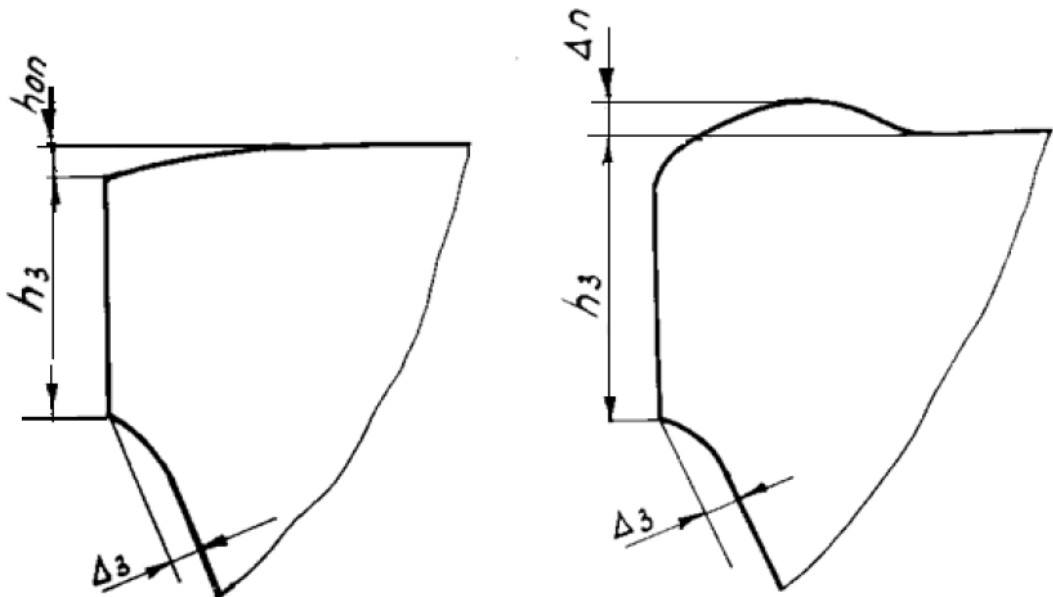


Рисунок 2.2 – Види деформуючого покриття

2.1 Розробка теоретичної моделі зразка з локальним дифузійним покриттям для оцінки впливу локально дифузійного і суцільного покриття на довговічність

Зважаючи на відсутність відомих публікацій в порівнянні властивостей суцільних і локальних (комірчастих) покриттів в якості першого кроку було здійснено теоретичний аналіз впливу комірчастості покриттів на властивості міцності зразка по відношенню до деформації розтягування. Аналіз проводився на основі теоретичної моделі пружного деформування зразка з довільного інструментального матеріалу з вихідною геометрією прямокутного паралелепіпеда довжиною L_H , шириною H_H і товщиною h_H (див. рис. 2.3).

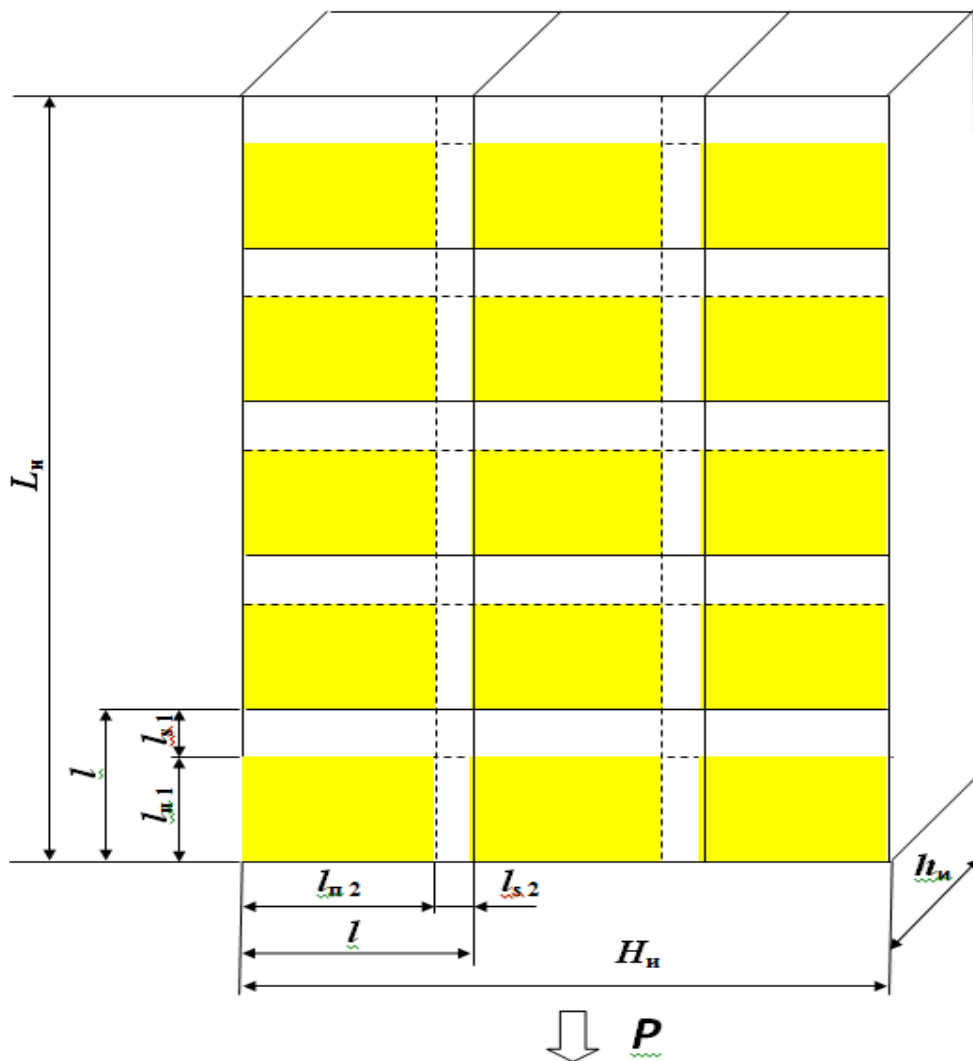


Рисунок 2.3 – Теоретична модель плоского зразка з локальним (комірчастим) покриттям

При цьому передбачалося, що поверхня $L_{II} \times H_{II}$ недеформованого зразка може бути представлена у вигляді набору умовних квадратних комірок зі стороною l , коли

$$L_{II} = n_1 \cdot l \text{ та } H_{II} = n_2 \cdot l, \quad (2.1)$$

де n_1 та n_2 – відповідно кількість елементарних комірок в поздовжньому і поперечному напрямках по відношенню до розтягуючого навантаження P .

Припустимо, що на одну з поверхонь зразка нанесено зносостійке покриття товщиною h_{II} з використанням маскувальної сітки, а поперечні і поздовжні маскуючі смуги, що утворюються, мають ширину l_{S1} і l_{S2} відповідно. При цьому геометрія узгоджена з умовними комірками таким чином, що всередині кожної комірки поверхня покриття має вигляд примикаючого до її лівого нижнього кута прямокутника зі сторонами l_{II1} і l_{II2}

$$l_{II1} = l - l_{S1}$$

в напрямку діючого навантаження i

$$l_{II2} = l - l_{S2}$$

в поперечному до неї напрямку (див. рисунок 1.3), де $l_{II1} \times l_{II2}$ – розміри прямокутної площі з покриттям для елементарної комірки, h_{II} – товщина покриття.

Результатом описаних геометричних ідеалізацій є можливість об'ємного уявлення елементарної комірки у вигляді умовного набору трьох прямокутних паралелепіпедів №1, №2 та №3, що мають різні площини поперечних перерізів S_i і поздовжні розміри l_i^* (див. рис. 2.4).

На рис. 2.4 показані площі основ прямокутних паралелепіпедів №№1, 2 та 3, що утворюють елементарну комірку з урахуванням наявності покриття, при цьому $h_{II} \ll h_{II}$. Наповненням паралелепіпедів №2 і №3 служить інструментальний матеріал, а паралелепіпеда №1 – інструментальний матеріал і матеріал покриття. Таким чином, паралелепіпед №1 сам може розглядатися як складений з двох прямокутних паралелепіпедів №1' і №1'', що мають однакові поздовжні розміри l_i^* , але мають різні поперечні перетини і наповнення.

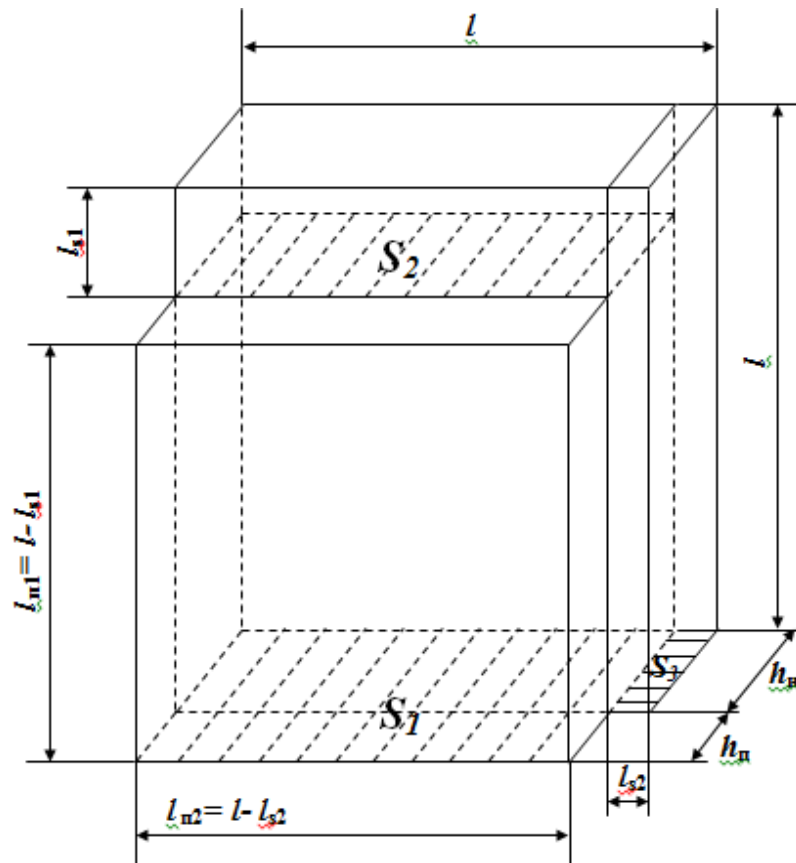


Рисунок 2.4 – Модель однієї елементарної комірки ідеалізованого плоского зразка

При цьому:

$S = l \cdot h_n = S_1' + S_3$ – площа основи елементарної комірки без покриття;

$S_1 = S_1' + S_1'' = (1 + h_n/h_n) \cdot (1 - l_{s2}/l) \cdot S$ – площа основи паралелепіпеда №1;

$S_1' = l_{n2} \cdot h_n = (1 - l_{s2}/l) \cdot S$ – площа основи паралелепіпеда №1' (наповнювач – інструментальний матеріал);

$S_1'' = l_{n2} \cdot h_n = h_n/h_n (1 - l_{s2}/l) \cdot S$ – площа основи паралелепіпеда №1'' (наповнювач – покриття);

$S_2 = l_{n2} \cdot h_n = (1 - l_{s2}/l) \cdot S = S_1'$ – площа основи паралелепіпеда №2;

$S_3 = l_{s2} \cdot h_n = (l_{s2}/l) \cdot S$ – площа основи паралелепіпеда №3.

Виходячи, з вищесказаного можна відзначити, що ідеалізована модель поздовжнього деформування плоского зразка з локальним покриттям має такі припущення:

– навантаження розтягування P рівномірно розподілене по складеним з

- елементних комірок поздовжнім смугам довжиною L_{II} в кількості n_2 ;
- поздовжні і поперечні деформації всіх елементарних комірок рівні між собою і відбуваються без порушення геометричної структури, зображеної на рисунку 2.3, а значить і загальних кордонів дотичних поверхонь інструментального матеріалу і покриття;
 - інструментальний матеріал і покриття розглядаються як суцільні однорідні середовища.

Тоді вираз для навантаження, що припадає на одну смугу, так само як і на одну елементарну комірку, має вигляд:

$$p = P / n_2 = (P / H_{II}) \cdot l, \quad (2.2)$$

і для відносної поздовжньої деформації ε однієї поздовжньої смуги, маємо:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{II}}{L_{II}} = \frac{n_1 \cdot \Delta l}{n_1 \cdot l} = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2.3)$$

При цьому ефективна жорсткість по відношенню до розтягування для всього зразка K_E виявляється пов'язаною з ефективною жорсткістю однієї комірки k_E співвідношенням:

$$K_E = P / \varepsilon = (p / \varepsilon) \cdot n_2 = k_E \cdot n_2, \quad (2.4)$$

де K_E – ефективна жорсткість для всього зразка; k_E – ефективна жорсткість для однієї елементарної комірки.

$$K_E = E_{III} \cdot S = (E_{III} / E_{II}) \cdot k_{II}, \quad (2.5)$$

де E_{II} – модуль Юнга інструментального матеріалу; E_{III} – ефективний модуль Юнга для зразка з інструментального матеріалу з локальним покриттям поверхні; $k_{II} = E_{II} \cdot S$ – жорсткість для однієї елементарної комірки без покриття.

Очевидно, що ефективна жорсткість однієї елементарної комірки повинна визначатися через жорсткості паралелепіпедів №№ 1', 1'', 1, 2 і 3, що входять до її складу. Визначимо k_{IE} виразом:

$$k_{IE} = E_{III} \cdot S_1' = (E_{III} / E_{II}) \cdot (1 - l_{s2} / l) \cdot k_{II}, \quad (2.6)$$

де k_{IE} – ефективна жорсткість для паралелепіпеда №1 (комплекс з №1' і №1''); E_{III} – ефективний модуль Юнга для зразка з інструментального матеріалу з суцільним покриттям поверхні.

При цьому:

$k_1' = E_{II} \cdot S_1' = (1 - l_{S2}/l) \cdot k_{II}$ – жорсткість паралелепіпеда №1’;

$k_1'' = E_{II} \cdot S_1'' = [(E_{II}/E_{II}) \cdot (h_{II}/h_{II})] \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot k_{II}$ – жорсткість паралелепіпеда №1’’;

E_{II} – модуль Юнга матеріалу покриття;

$k_2 = E_{II} \cdot S_2 = (1 - l_{S2}/l) \cdot k_{II} = k_1'$ – жорсткість паралелепіпеда №2;

$k_{12E} = E_{12E} \cdot S_1' = (E_{12E}/E_{II}) \cdot (1 - l_{S2}/l) \cdot k_{II}$ – ефективна жорсткість для комплексу з паралелепіпедів №1 і №2; E_{12E} – ефективний модуль Юнга для комплексу з паралелепіпедів №1 і №2;

$k_3 = E_{II} \cdot S_3 = (l_{S2}/l) \cdot k_{II}$ – жорсткість для паралелепіпеда №3.

Для визначення характеристик міцності властивостей елементарної комірки при розтягучому навантаженні, висловимо поздовжнє навантаження p , що діє на елементарну комірку, за допомогою суми двох складових рис. 2.5.

$$p = p_{12} + p_3 \quad (2.7)$$

де p_{12} – компонента p , що діє на комплекс з паралелепіпедів №1 і №2; p_3 – компонента p , що діє на паралелепіпедів №3.

Крім того:

$$p_{12} = p_{12}' + p_{12}'', \quad (2.8)$$

де p_{12}' – компонента p_{12} , що діє на комплекс з паралелепіпедів №1’ і №2 (наповнення тільки з інструментального матеріалу); p_{12}'' – компонента p_{12} , що діє на паралелепіпед №1’’ (наповнення тільки з матеріалу покриття).

Принциповою особливістю даної моделі є зіставлення деформації пружного розтягування суцільного і локального покриття, модуль пружності E і коефіцієнт Пуассона μ , що формально виступають в ролі інтегральної характеристики. Такий підхід дозволяє максимально абстрагуватися від комплексу індивідуальних властивостей покриттів, що значно ускладнює теоретичний аналіз, і використовувати в якості базової основи зіставлення взаємозв'язок величини E_{IIIS} з її двома граничними значеннями E_{II} і E_{IIP} , що регулюється геометричними параметрами екрануючої сітки. При цьому апріорі передбачається задоволення покриттів вимозі відсутності деформаційних пошкоджень типу тріщин і відшарувань, а величина E_{IIP} формально виступає в ролі інтегральної характеристики впливу суцільного покриття, що враховує в неявній формі весь комплекс

його індивідуальних властивостей. Більш того, описана ідеалізована модель так само може бути застосована і до випадку симетричного розташування локального покриття на двох протилежних поверхнях зразка, що впливає лише на чисельне значення величини E_{III} .

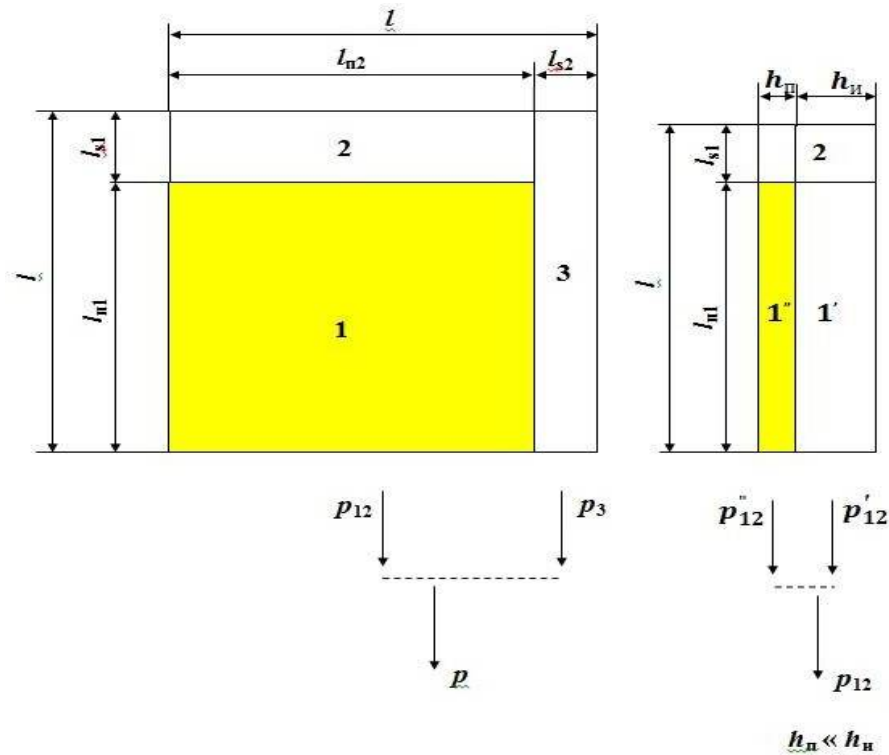


Рисунок 2.5 – Силві компоненти розтягувального навантаження P

Крім цього за допомогою ідеалізованої моделі можна оцінити вплив комірчатості покриття на величину коефіцієнта Пуассона.

Оскільки покриття не є самостійним матеріалом, а працює як композиція з основою, то в розглянутій ідеалізованій моделі використовуються такі ефективні «композиційні» величини як модуль пружності і коефіцієнт Пуассона для зразка з інструментального матеріалу з суцільним покриттям поверхні E_{III} , і μ_{III} , в сукупності з характеристиками інструментального матеріалу E_{II} , і μ_{II} , що визначають ефективні характеристики зразка з інструментального матеріалу з локальним покриттям поверхні E_{III} і μ_{III} .

Відзначимо, що відсутність покриття на бічних гранях, пов'язаних з товщиною зразка, яка мається на увазі, означає анізотропію його пружних

властивостей щодо поперечних деформацій по ширині H_{II} і товщині h_{II} (див. рис. 2.3). Деформації по ширині H_{II} характеризує величина коефіцієнта Пуассона μ_{IIIS} , а деформації по товщині h_{II} визначаються величиною коефіцієнта Пуассона інструментального матеріалу μ_{II} .

Формальним регулятором деформаційних змін ширини ΔH_{II} , як і довжини ΔL_{II} , є поверхня з наявністю локального дифузійного покриття, що призводить до наявності меж (області без покриття), що перешкоджають поверхневому поширенню тріщин в покритті.

Величинам L_{II} та H_{II} поставимо у відповідність абсолютні деформації ΔL_{II} и ΔH_{II} :

$$L_{II} \rightarrow \Delta L_{II} = n_1 \cdot \Delta l, \quad \Delta l = \Delta l_{II1} + \Delta l_{S1} - \text{поздовжні деформації};$$

$$H_{II} \rightarrow \Delta H_{II} = n_2 \cdot \Delta l_{\perp}, \quad \Delta l_{\perp} = \Delta l_{II2} + \Delta l_{S2} - \text{поперечні деформації}$$

де Δl , Δl_{\perp} – відповідно поздовжня і поперечна (по ширині) деформації однієї елементарної комірки.

Конкретизуємо основні допущення:

1. Деформації носять пружний характер (працює закон Гука):

$$\frac{\Delta L_{II}}{L_{II}} = \frac{P}{K_E} \rightarrow \frac{\Delta l}{l} = \frac{p}{k_E};$$

$$\frac{\Delta H_{II}}{H_{II}} = -\mu_{IIIS} \frac{\Delta L_{II}}{L_{II}} \rightarrow \frac{\Delta l_{\perp}}{l} = -\mu_{IIIS} \frac{\Delta l}{l}.$$

2. Впливом деформацій на жорсткості можна знехтувати.
3. Деформації не призводять до викривлень прямокутності виділених геометричних структур і до зсувів їх взаємних меж:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{k_E} = \frac{p_{12}}{k_{12E}} = \frac{p_3}{k_3}.$$

– умови однаковості відносних поздовжніх деформацій у паралелепіпеда №1 і у складових його паралелепіпедів №1' і №1'':

$$\Delta l = \Delta l_{II1} + \Delta l_{S1}, \quad \Delta l_{S1} = \frac{p_{12}}{k_2} \Delta l_{S1}$$

(компонента p_{12} діє як на комплекс з паралелепіпедів №1 і №2, так і на кожен з них окремо);

– умови подання абсолютної поздовжньої деформації елементарної комірки в цілому у вигляді суми абсолютних поздовжніх деформацій паралелепіпедів №1 і №2;

$$\frac{\Delta l_{\Pi 2}}{l_{\Pi 2}} = -\mu_{III} \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = \mu_{II} \frac{\Delta l_{S1}}{l_{S1}};$$

– умови однаковості відносних поперечних деформацій паралелепіпедів №1 і №2 (мається на увазі допустимість застосування ефективного коефіцієнта μ_{III} як по відношенню до паралелепіпеда №1', так і по відношенню до паралелепіпеда №1'');

$$\Delta l_{\perp} = \Delta l_{\Pi 2} + \Delta l_{S2}, \quad \Delta l_{S2} = -\mu_{II} \frac{\Delta l}{l} \Delta l_{S2};$$

– умови подання абсолютної поперечної деформації елементарної комірки в цілому у вигляді суми абсолютних поперечних деформацій паралелепіпедів №1 і №3.

Визначимо напруження розтягу для кожної елементарної комірки (паралелепіпеда):

$$\sigma_1' = \frac{k_1'}{S_1'} \cdot \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = E_{II} \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = \frac{P_{12}'}{S_1'} \quad \text{– для паралелепіпеда №1'};$$

$$\sigma_1'' = \frac{k_1''}{S_1''} \cdot \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = E_{II} \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = \frac{P_{12}''}{S_1''} \quad \text{– для паралелепіпеда №1''};$$

$$\sigma_{1E}' = \frac{k_{1E}'}{S_1'} \cdot \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} = E_{II} \frac{\Delta l_{\Pi 1}}{l_{\Pi 1}} \quad \text{– ефективна напруга для паралелепіпеда}$$

№1 (комплекс з №1' і №1''),

$$\sigma_2 = \frac{k_2}{S_2} \cdot \frac{\Delta l_{S1}}{l_{S1}} = E_{II} \frac{\Delta l_{S1}}{l_{S1}} \quad \text{– для паралелепіпеда №2,}$$

$$\sigma_{12E} = \frac{k_{12E}}{S_1'} \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_{12E} \frac{\Delta l}{l} \quad \text{– ефективна напруга для комплексу}$$

паралелепіпедів №1 і №2, причому:

$$\sigma_{1E} = \sigma_2 = \sigma_{12E} = \frac{P_{12}}{S_1'};$$

$$\sigma_3 = \frac{k_3}{S_3} \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_{II} \frac{\Delta l}{l} = \frac{p_3}{S_3} \text{ – для паралелепіпеда №3.}$$

Тоді ефективна напруга для елементарної комірки в цілому дорівнюватиме:

$$\sigma_E = \frac{k_E}{S_3} \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_{III} \frac{\Delta l}{l} = \frac{p}{S}. \quad (2.9)$$

Скорочення і узагальнення формулювань залежностей можна здійснити шляхом використання безрозмірних змінних:

$$x_1 = \frac{\Delta l_{.S1}}{l}, \quad x_2 = \frac{\Delta l_{.S2}}{l}; \quad (2.10)$$

$$Y_{III1} = \frac{E_{III1}}{E_{II}}, \quad M_{III1} = \frac{\mu_{III1}}{\mu_{II}} \text{ – для } x_2 = 0 \text{ (залежність тільки від } x_1);$$

$$Y_{III2} = \frac{E_{III2}}{E_{II}}, \quad M_{III2} = \frac{\mu_{III2}}{\mu_{II}} \text{ – для } x_1 = 0 \text{ (залежність тільки від } x_2);$$

$$A = \frac{E_{III}}{E_{II}} - 1, \quad B = \frac{\mu_{II}}{\mu_{III}} - 1, \quad (2.11)$$

де А і В – ефективні параметри двуграничного підходу «відсутність покриття – суцільне покриття», що використовуються при розгляді локального покриття.

Покриття, що характеризуються збільшеними значеннями модуля Юнга і меншими значеннями коефіцієнта Пуассона, (див. табл. 2.1) [55, 56], ніж матеріал металевої основи, звідки випливає:

$$\begin{cases} E_{III} > E_{II} \\ \mu_{III} < \mu_{II} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_{III} \in |E_{II}; E_{III}| \\ \mu_{III} \in |\mu_{III}; \mu_{II}| \end{cases}. \quad (2.12)$$

Зіставлення пружних властивостей технічно чистих металів, (див. табл. 2.2 і рис. 2.6) свідчить про те, що зразок з металу з великим значенням модуля пружності E (більш жорсткий) зовсім не обов'язково характеризується меншим значенням коефіцієнта Пуассона μ (меншим поперечним стисненням при поздовжньому розтягуванні).

Таблиця 2.1 – Зіставлення пружних властивостей металів і їх сполук, що використовуються в якості покриттів

Основний метал	Сполука	Гратка	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	
	-	ГЕК	110	0,33	
	TiC	КУБ	460	0,19	
			494	-	
	TiN	КУБ	256	0,25	
			390-500	-	
TiO ₂		205	-		
Zr	-	ГЕК	84-97	0,35	
	ZrC	КУБ	355	0,19	
			401	-	
	ZrN	КУБ	400	0,24	
			300-450	-	
ZrO ₂		190	-		
Hf	-	ГЕК	79-150	0,29	
	HfC	КУБ	359	0,18	
			480	-	
	HfN	КУБ	-	0,28	
			480	-	
V	-	КУБ	139-170	0,36	
	VC	КУБ	430	-	
			495	-	
	VN	КУБ	-	0,25	
			350-460	-	
Nb	-	КУБ	91-160	0,39	
	Nb ₂ C	КУБ	345	0,21-0,23	
	NbC	КУБ	479	-	
	NbN	ГЕК	493	0,26	
			400-483,6	-	
Ta	-	КУБ	190	0,35	
	TaC	КУБ	440	-	
			550	-	
	Ta ₂ Cr	ГЕК	291	0,24	
	TaN	ГЕК	587	0,26	
			575,8	-	
	Ta ₂ N	ГЕК	-	0,25	
	Cr ₇ C ₃	ГЕК	380	-	
	Cr ₃ C ₂	РОМ	369,8	-	
CrN	КУБ	330	-		
		319,8	-		

	Cr ₂ N	ГЕК	310	-
Mo	-	КУБ	300-330	0,31
	Mo ₂ C	ГЕК	544	-
			530,7	-
W	-	КУБ	350-400	0,3
	WC	ГЕК	710	0,19
			737	-
	W ₂ C	ГЕК	428	-

Таблиця 2.2 – Загальна залежність $\mu(E)$ для металів при $t = 20^\circ C$

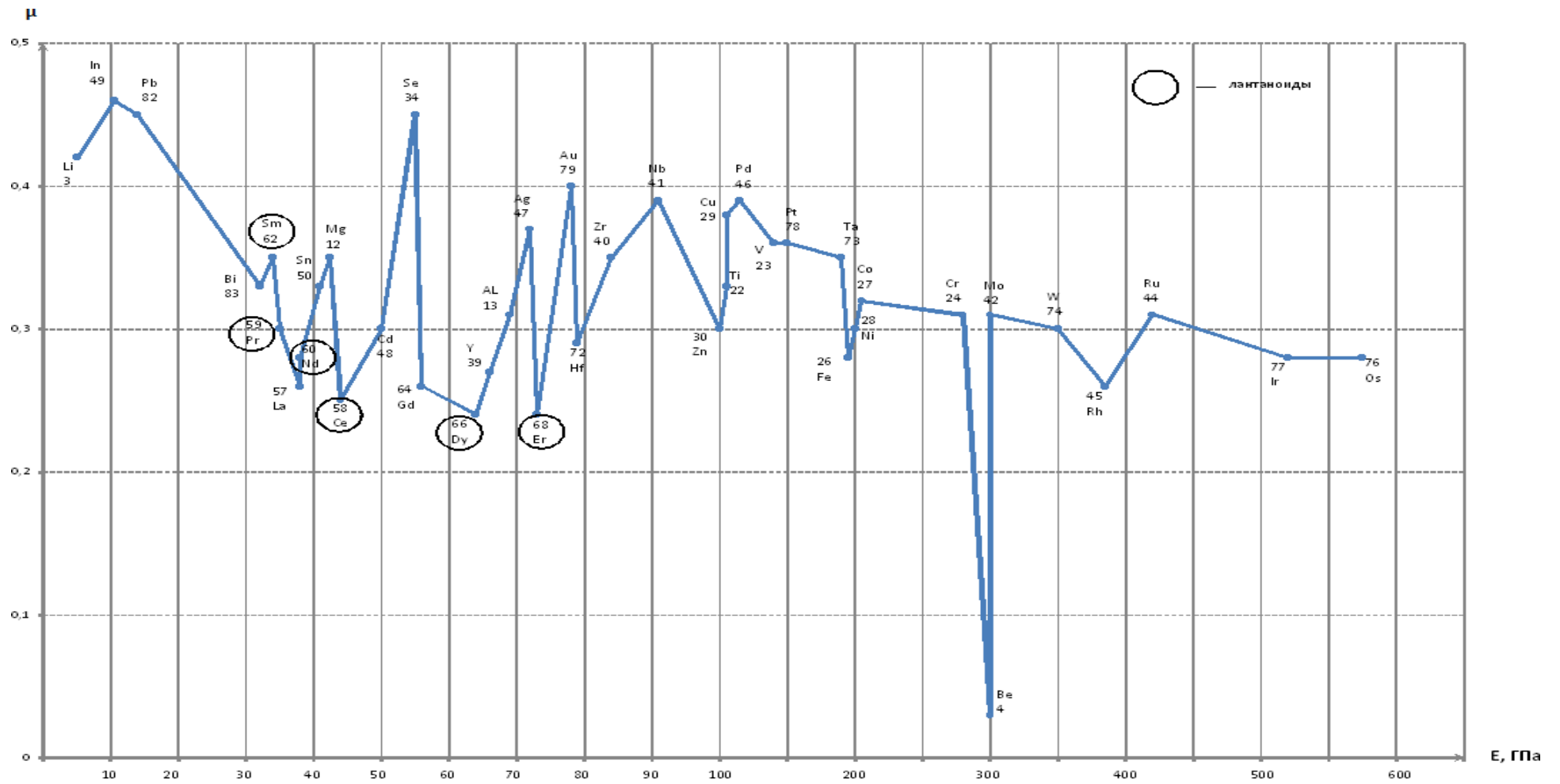
Метал	E , ГПа	μ	r , нм	Реш.	Пер.	Ряд	Гр.	n
Цезій (Cs)	1,75	-	0,262	ОЦК	6	VIII	I	55
Рубідій (Rb)	2,5	-	0,248	ОЦК	5	VI	I	37
Літій (Li)	5	0,42	0,157	ОЦК	2	II	I	3
Талій (Tl)	8	-	0,171	ГЕК	6	IX	III	81
Індій (In)	10,5	0,46	0,166	ТЕТ	5	VII	III	49
Свинець (Pb)	14-18	0,45	0,175	ГЦК	6	IX	IV	82
Ітербій (Yb)	18	-	0,193	ГЦК	6	VIII	III	70
Кальцій (Ca)	26	-	0,197	ГЦК	4	IV	II	20
Вісмут (Bi)	32	0,33	0,182	РМЭ	6	IX	V	83
Самарій	34-55	0,35	0,180	РМЭ	6	VIII	III	62
Празеодим (Pr)	35-98	0,3	0,182	ГЕК	6	VIII	III	59
Лантан (La)	38	0,26	0,187	ГЕК	6	VIII	III	57
Неодим (Nd)	38	0,28	0,182	ГЕК	6	VIII	III	60
Олово (Sn)	41-55	0,33	0,158	ТЕТ	5	VII	IV	50
Магній (Mg)	42,5-45	0,35	0,160	ГЕК	3	III	II	12
Церій (Ce)	44	0,25	0,182	ГЦК	6	VIII	III	58
Телур (Te)	44	-	0,170	ГЕК	5	VII	VI	52

Продовження табл. 2.2

Кадмій (Cd)	50-53	0,3	0,156	ГЕК	5	VII	II	48
Селен (Se)	55	0,45	0,160	ГЕК	4	V	VI	34
Гадоліній (Gd)	56-98	0,26	0,179	ОЦК	6	VIII	III	64
Сурма (Sb)	57-78	-	0,161	РМЭ	5	VII	V	51
Тербфій (Tb)	57,5	-	0,177	ГЕК	6	VIII	III	65
Диспрозфій (Dy)	64-98	0,24	0,177	ГЕК	6	VIII	III	66
Ітрій (Y)	66	0,27	0,181	ГЕК	5	VI	III	39
Гольмій (Ho)	67	-	0,176	ГЕК	6	VIII	III	67
Алюміній (Al)	69-72	0,31	0,143	ГЦК	3	III	III	13
Срібло (Ag)	72-83,5	0,37	0,144	ГЦК	5	VII	I	47
Ербій (Er)	73-115	0,24	0,176	ГЕК	6	VIII	III	68
Торій (Th)	74-80	-	0,180	ГЦК	7	X	III	90
Золото (Au)	78-83	0,4	0,144	ГЦК	6	IX	I	79
Гафній (Hf)	79-150	0,29	0,159	ГЕК	6	VIII	IV	72
Германій (Ge)	82	-	0,139	АЛМ	4	V	IV	32
Цирконій (Zr)	84-97	0,35	0,160	ГЕК	5	VI	IV	40
Ніобій (Nb)	91-160	0,39	0,145	ОЦК	5	VI	V	41
Цинк (Zn)	100-130	0,3-0,35	0,137	ГЕК	4	V	II	30
Титан (Ti)	110	0,33	0,146	ГЕК	4	IV	IV	22
Мідь (Cu)	110-130	0,38	0,128	ГЦК	4	V	I	29
Кремній (Si)	110-160	-	0,118	АЛМ	3	III	IV	14
Паладій (Pd)	115-125	0,39	0,137	ГЦК	5	VI	VIII ₃	46
Ванадій (V)	139-170	0,36	0,131	ОЦК	4	IV	V	23
Платина (Pt)	150-175	0,36	0,139	ГЦК	6	VIII	VIII ₃	78

Продовження табл. 2.2

Тантал (Ta)	190	0,35	0,146	ОЦК	6	VIII	V	73
Залізо (Fe)	195-205	0,28	0,126	ОЦК	4	IV	VIII ₁	26
Марганець (Mn)	200	-	0,130	КУБ	4	IV	VII	25
Нікель (Ni)	200-220	0,3-0,4	0,124	ГЦК	4	IV	VIII ₃	28
Кобальт (Co)	206	0,32	0,125	ГЕК	4	IV	VIII ₂	27
Уран (U)	210	-	0,120	РОМ	7	X	III	92
Хром (Cr)	280-315	0,31	0,127	ОЦК	4	IV	VI	24
Берилій (Be)	300	0,03	0,113	ГЕК	2	II	II	4
Молібден (Mo)	300-330	0,31	0,140	ОЦК	5	VI	VI	42
Бор (B)	345	-	0,097	ТЕТ	2	II	III	5
Вольфрам (W)	350-400	0,3	0,141	ОЦК	6	VIII	VI	74
Родій (Rh)	385	0,26	0,137	ГЦК	5	VI	VIII ₂	45
Рутеній (Ru)	420-500	0,31	0,134	ГЕК	5	VI	VIII ₁	44
Реній (Re)	475	-	0,137	ГЕК	6	VIII	VII	75
Іридій (Ir)	520-500	0,28	0,136	ГЦК	6	VIII	VIII ₂	77
Осмій (Os)	575	0,28	0,136	ГЕК	6	VIII	VIII ₁	76

Рисунок 2.6 – Графік залежності $\mu(E)$ для чистих металів

Графік залежності $\mu(E)$ на рис. 2.6, побудований з використанням даних з табл. 2.2, носить пилоподібний характер і не демонструє явно вираженої закономірності.

Наявність певної слабо вираженою кореляції в вимірах E і μ виявляється при порівнянні залежностей $E(n)$ і $\mu(n)$, де n – порядковий номер елемента в таблиці Менделєєва (табл. 2.3 і графічно на рис. 2.7), («провали» μ в області «піків» E), згідно з якими лише залежність $E(n)$ носить цілком чіткий періодичний характер. Графік залежності $r(n)$, де r – атомний радіус елемента, свідчить про наявність зустрічних тенденцій в періодичних змінах r і E .

Таблиця 2.3 – Пружні властивості металів в світлі періодичної таблиці Менделєєва

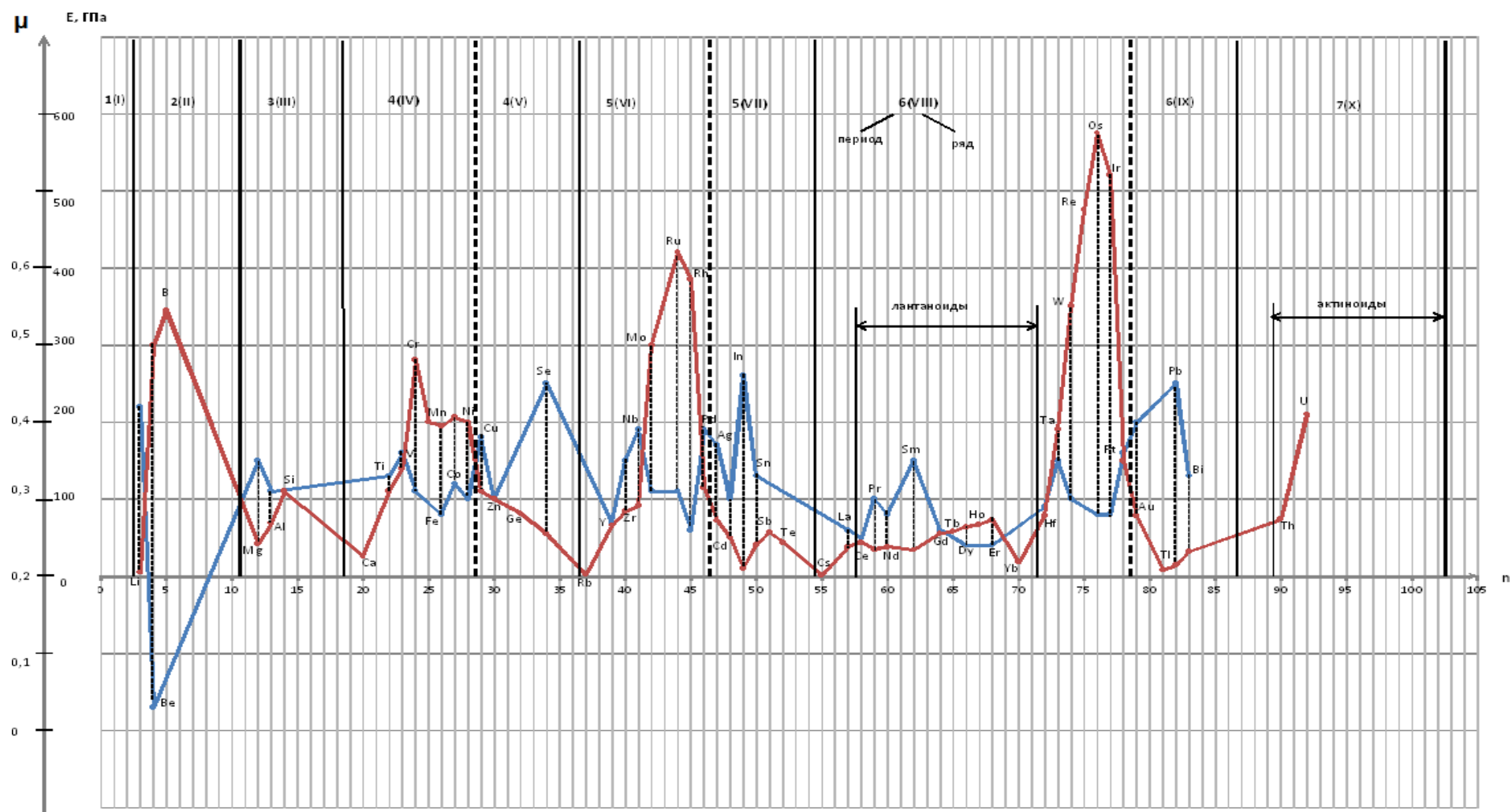
Метал	n	Період	Ряд	Група	r , нм	Реш.	E , ГПа	μ
Літій (Li)	3	2	II	I	0,157	ОЦК	5	0,42
Берилій (Be)	4	2	II	II	0,113	ГЕК	300	0,03
Бор (B)	5	2	II	III	0,097	ТЕТ	345	-
Магній (Mg)	12	3	III	II	0,16	ГЕК	42,5-45	0,35
Алюміній (Al)	13	3	III	III	0,143	ГЦК	69-72	0,31
Кремній (Si)	14	3	III	IV	0,118	АЛМ	110-160	-
Кальцій (Ca)	20	4	IV	II	0,197	ГЦК	26	-
Титан (Ti)	22	4	IV	IV	0,146	ГЕК	110	0,33
Ванадій(V)	23	4	IV	V	0,131	ОЦК	139-170	0,36
Хром (Cr)	24	4	IV	VI	0,127	ОЦК	280-315	0,31
Марганець (Mn)	25	4	IV	VII	0,13	КУБ	200	-
Залізо (Fe)	26	4	IV	VIII ₁	0,126	ОЦК	195-205	0,28
Кобальт (Co)	27	4	IV	VIII ₂	0,125	ГЕК	206	0,32
Нікель (Ni)	28	4	IV	VIII ₃	0,124	ГЦК	200-220	0,3-0,4
Мідь (Cu)	29	4	V	I	0,128	ГЦК	110-130	0,38

Продовження табл. 2.3

Цинк (Zn)	30	4	V	II	0,137	ГЕК	100-130	0,3-0,35
Германій (Ge)	32	4	V	IV	0,139	АЛМ	82	-
Селен (Se)	34	4	V	VI	0,16	ГЕК	55	0,45
Рубідій (Rb)	37	5	VI	I	0,248	ОЦК	2,5	-
Ітрій (Y)	39	5	VI	III	0,181	ГЕК	66	0,27
Цирконій (Zr)	40	5	VI	IV	0,160	ГЕК	84-97	0,35
Ніобій (Nb)	41	5	VI	V	0,145	ОЦК	91-160	0,39
Молібден (Mo)	42	5	VI	VI	0,140	ОЦК	300-330	0,31
Рутеній (Ru)	44	5	VI	VIII ₁	0,134	ГЕК	420-500	0,31
Родій (Rh)	45	5	VI	VIII ₂	0,137	ГЦК	385	0,26
Паладій (Pd)	46	5	VI	VIII ₃	0,137	ГЦК	115-125	0,39
Срібло (Ag)	47	5	VII	I	0,144	ГЦК	72-83,5	0,37
Кадмій (Cd)	48	5	VII	II	0,156	ГЕК	50-53	0,3
Індій (In)	49	5	VII	III	0,166	ТЕТ	10,5	0,46
Олово (Sn)	50	5	VII	IV	0,158	ТЕТ	41-55	0,33
Сурма (Sb)	51	5	VII	V	0,161	РМЭ	57-78	-
Телур (Te)	52	5	VII	VI	0,17	ГЕК	44	-
Цезій (Cs)	55	6	VIII	I	0,262	ОЦК	1,75	-
Лантан (La)	57	6	VIII	III	0,187	ГЕК	38	0,26
Церій (Ce)	58	-	-	-	0,182	ГЦК	44	0,25
Празеодим (Pr)	59	-	-	-	0,182	ГЕК	35-98	0,3
Неодим (Nd)	60	-	-	-	0,182	ГЕК	38	0,28
Самарій (Sm)	62	-	-	-	0,18	РМЭ	34-55	0,35
Гадоліній (Gd)	64	-	-	-	0,179	ОЦК	56-98	0,26

Продовження табл. 2.3

Тербій (Tb)	65	-	-	-	0,177	ГЕК	57,5	-
Диспрозій (Dy)	66	-	-	-	0,177	ГЕК	64-98	0,24
Гольмій (Ho)	67	-	-	-	0,176	ГЕК	67	-
Ербій (Er)	68	-	-	-	0,176	ГЕК	73-115	0,24
Ітербій (Yb)	70	-	-	-	0,193	ГЦК	18	-
Гафній (Hf)	72	6	VIII	IV	0,159	ГЕК	79-150	0,29
Тантал (Ta)	73	6	VIII	V	0,146	ОЦК	190	0,35
Вольфрам (W)	74	6	VIII	VI	0,141	ОЦК	350-400	0,3
Реній (Re)	75	6	VIII	VII	0,137	ГЕК	475	-
Осмій (Os)	76	6	VIII	VIII ₁	0,136	ГЕК	575	0,28
Іридій (Ir)	77	6	VIII	VIII ₂	0,136	ГЦК	520-590	0,28
Платина (Pt)	78	6	VIII	VIII ₃	0,139	ГЦК	150-175	0,36
Золото (Au)	79	6	IX	I	0,144	ГЦК	78-83	0,4
Талій (Tl)	81	6	IX	III	0,171	ГЕК	8	-
Свинець (Pb)	82	6	IX	IV	0,175	ГЦК	14-18	0,45
Вісмут (Bi)	83	6	IX	V	0,182	РМЭ	32	0,33
Актиній (Ac)	89	7	X	III	-	-	-	-
Торій (Th)	90	-	-	-	0,180	ГЦК	74-80	-
Уран (U)	92	-	-	-	0,12	РОМ	210	-

Рисунок 2.7 – Зілежності $E(n)$ і $\mu(n)$ для металів

У таблиці 2.1 показані порівняльні дані по E і μ для металів і їх сполук, що використовуються в якості покриттів, показують, що сполуки у вигляді карбідів, нітридів і оксидів володіють, в порівнянні з основним металом, істотно більшими значеннями E і меншими значеннями μ .

Таким чином, покриття, характеризуються значно більшими значеннями E і меншими значеннями μ , ніж матеріал металевої основи. В результаті композиція «основа-покриття» володіє великими значеннями модуля пружності E_{III} і меншими значеннями коефіцієнта Пуассона μ_{III} , ніж основа.

Наслідками прийнятих визначень і співвідношень є вирази:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1' = (1 - x_2) \cdot k_H \\ k_1'' = \frac{E_{III}}{E_H} \cdot \frac{h_{II}}{h_H} (1 - x_2) \cdot k_H \\ k_{IE} = (1 + A)(1 - x_2) \cdot k_H = k_1' + k_1'' \\ k_2 = (1 - x_2) \cdot k_H = k_1' \\ k_{12E} = \frac{k_{IE} k_2}{x_1 k_{IE} + (1 - x_1) k_2} = \frac{k_{IE}}{1 + Ax_1} = \frac{(1 + A)(1 - x_2)}{1 + Ax_1} \cdot k_H \\ k_3 = x_2 \cdot k_H \\ k_E = Y_{III} \cdot k_H = k_{12E} + k_3 \end{array} \right. , \quad (2.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{III} = 1 + \frac{A(1 - x_1)(1 - x_2)}{1 + Ax_1} \\ M_{III} = 1 - \frac{A(1 - x_1)(1 - x_2)}{1 + B(1 - x_1)} \end{array} \right. , \quad (2.14)$$

$$h_{II} = A \cdot \frac{E_H}{E_{II}} h_H , \quad (2.15)$$

де h_n – ефективна товщина покриття в ідеалізованій моделі, оскільки A – ефективний параметр.

Очевидно $h_{II} \ll h_H$ при $\frac{E_H}{E_{II}} \gg A = A \cdot \frac{E_{III}}{E_H} - 1$ при $E_{II} \gg E_{III} - E_H$.

Граничні випадки для Y_{III} і M_{III}

Відсутність покриття:

$$x_1 = x_2 = 1$$

Суцільне покриття:

$$x_1 = x_2 = 0$$

(достатньо тільки $x_1=1$ або тільки $x_2=1$)

$$\begin{array}{ccc}
 \downarrow & & \downarrow \\
 \left\{ \begin{array}{l} Y_{III} = \frac{E_{III}}{E_{II}} = 1 \\ M_{III} = \frac{\mu_{III}}{\mu_{II}} = 1 \end{array} \right. & & \left\{ \begin{array}{l} Y_{III} = \frac{E_{III}}{E_{II}} = 1 + A = \frac{E_{III}}{E_{II}} \\ M_{III} = \frac{\mu_{III}}{\mu_{II}} = 1 - \frac{B}{1+B} = \frac{1}{1+B} = \frac{\mu_{III}}{\mu_{II}} \end{array} \right. \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \left\{ \begin{array}{l} E_{III} = E_{II} \\ \mu_{III} = \mu_{II} \end{array} \right. & & \left\{ \begin{array}{l} E_{III} = E_{III} \\ \mu_{III} = \mu_{III} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Далі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1' = E_{II} \frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{E_{II}}{1 + Ax_1} \cdot \frac{\Delta l}{l} \\ \sigma_1'' = E_{II} \frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{E_{II}}{1 + Ax_1} \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{h_{II}}{h_{II}} \frac{AE_{II}}{1 + Ax_1} \cdot \frac{\Delta l}{l} \\ \sigma_{1E} = E_{III} \frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{E_{III}}{1 + Ax_1} \cdot \frac{\Delta l}{l} = \sigma_1' + \frac{h_{II}}{h_{II}} \sigma_1'' = \frac{(1 + A)E_{II}}{1 + Ax_1} \cdot \frac{\Delta l}{l} \\ \sigma_2 = \sigma_{12E} = \sigma_{1E} \\ \sigma_3 = E_{II} \cdot \frac{\Delta l}{l} \\ \sigma_E = \frac{k_E}{S} \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{k_{12E} + k_3}{S} \cdot \frac{\Delta l}{l} = (1 - x_2)\sigma_{12E} + x_2\sigma_3 = Y_{III}E_{II} \cdot \frac{\Delta l}{l} = E_{III} \cdot \frac{\Delta l}{l} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Паралелепіпед №1 з поверхневим покриттям, що входить до складу елементарної комірки, характеризується відносною поздовжньою деформацією $\Delta l_{II} / l_{II}$, меншою при $x_1 \neq 0$ і $A \neq 0$, ніж відносна поздовжня деформація елементарної комірки $\frac{\Delta l}{l}$:

$$\frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{1 + Ax_1} \leq \frac{\Delta l}{l}$$

Відповідно деформація $\Delta l_{II}/l_{II}$, враховуючи припущення даної моделі,

що ідеалізується, відноситься і безпосередньо до самого поверхневого покриття, тобто до напруги σ_{IIIS} , яке діяло б в зразку із суцільним покриттям σ_{III} , якби його відносна деформація дорівнювала відносній деформації локальної області $\frac{\Delta l_{II1}}{l_{II1}}$ покриття при локальному покритті σ_{IIIS} , де:

$\sigma_{IIIS} = \sigma_I''$ та $\sigma_{II} = \sigma_I'' |_{x_1=0}$, зв'язані співвідношенням:

$$\frac{\sigma_{IIIS}}{\sigma_{II}} = \frac{\frac{\Delta l_{II1}}{l_{II1}}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{1}{1 + Ax_1},$$

тобто

$$\sigma_{IIIS} = \frac{\sigma_{II}}{1 + Ax_1} = \sigma_{II} \left(1 - \frac{Ax_1}{1 + Ax_1} \right) \leq \sigma_{II},$$

а зниження σ_{IIIS} порівняно з σ_{II} пов'язано зі збільшенням довговічності покриття.

Відзначимо, що з точки зору деформацій елементарної комірки випадки з $x_1 = 1$ або з $x_2 = 1$, зазвичай мають на увазі повну відсутність покриття, можуть бути інтерпретовані і як наявність нескінченно вузьких поперечних (при $x_1 = 1$) або при поздовжніх (при $x_2 = 1$) смуг покриття, які характеризуються тим не менш кінцевими відносними деформаціями. Наприклад, при $x_1 = 1$ маємо:

$$l_{II1} = 0, \quad l_{S1} = l;$$

$$\Delta l_{II1} = 0, \quad \Delta l_{S1} = \Delta l;$$

$$\frac{\Delta l_{II1}}{l_{II1}} = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{1 + A} = \frac{E_{II}}{E_{III}} \frac{\Delta l}{l}, \quad \frac{\Delta l_{S1}}{l_{S1}} = \frac{\Delta l}{l}.$$

З математичної точки зору випадок, коли відношення двох нескінченно малих (Δl_{II1} і l_{II1}) є кінцевим числом, досить звичайний.

Паралелепіпед №1 в разі $x_1 = 1$ вироджується в нескінченно тонкий шар біля основи елементарної комірки, а розтягуючі напруги приймають вид:

$$\sigma_1' = \frac{E_{II}}{1+A} \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{E_{II}^2}{E_{III}} \cdot \frac{\Delta l}{l};$$

$$\sigma_1'' = E \frac{E_{II}}{1+A} \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{E_{II} E_{II}}{E_{III}} \cdot \frac{\Delta l}{l};$$

$$\sigma_{1E} = \sigma_2 = \sigma_{12E} = \sigma_3 = \sigma_E = E_{II} \cdot \frac{\Delta l}{l}.$$

Зіставлення суцільного і локального покриттів з точки зору діючих на них напруг, що розтягують, при однаковому значенні ефективної напруги σ_E (при однаковій величині сторонньої сили, що розтягує P , оскільки $\sigma_E = \frac{P}{S} = \frac{P}{n_2 S} = \frac{P}{n_2 l h_{II}} = \frac{P}{H_{II} h_{II}}$) призводить до ситуації протилежної тій, яка мала місце зіставлення при однаковій величині $\Delta l/l$: при $x_1 \neq 1$, $x_2 \neq 0$ і $A \neq 0$ напруги, що розтягує, для локального покриття перевищують напруження розтягу для суцільного покриття. Дійсно:

<p>Суцільне покриття:</p> $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_E}{E_{III}}$ \downarrow $\frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_E}{E_{III}}$ \downarrow $\sigma_{II} = E_{II} \frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{E_{II}}{E_{III}} \cdot \sigma_E$	<p>Локальне покриття:</p> $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_E}{E_{III}} = \frac{1+A}{Y_{III S}} \cdot \frac{\sigma_E}{E_{III}}$ \downarrow $\frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{1+A x_1} = \frac{1+A}{(1+A x_1) Y_{III S}} \cdot \frac{\sigma_E}{E_{III}} =$ $= \frac{1}{1 - \frac{A}{1+A} x_2 (1-x_1)} \cdot \frac{\sigma_E}{E_{III}}$ \downarrow $\sigma_{II} = E_{II} \frac{\Delta l_{II}}{l_{II}} = \frac{\sigma_{II}}{1 - \frac{A}{1+A} x_2 (1-x_1)} \geq \sigma_{II}$
--	---

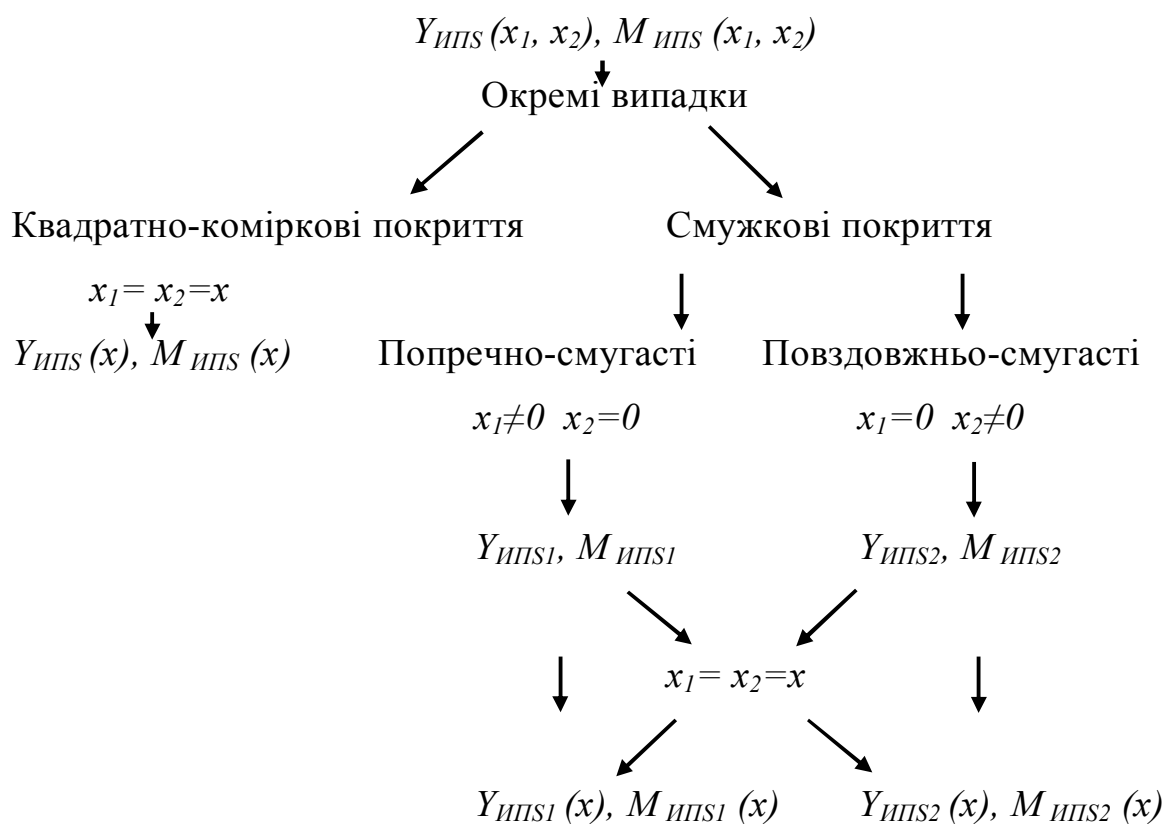
Процес формування покриття призводить до появи в ньому великих залишкових напружень, які збільшуються в міру зростання товщини покриття і знижують його міцність [57]. Саме ці напруги є причиною руйнування

більшості покриттів.

Відомі технологічні прийоми, що дозволяють регулювати залишкові напруги в покриттях, а, отже, і їх міцність, наприклад, шляхом зниження модуля пружності покриття введенням в покриття добавок пластичного матеріалу, які сприяють релаксації напружень в покритті внаслідок пластичної деформації [57].

Оскільки структура покриття грає велику роль в зниженні залишкових напруг, то, зокрема, бажано створення структур покриттів, що мають м'які прошарки. Такого роду рухливі кристалічні структури мають низькі модулі пружності і зсуву, що сприяє релаксації напружень. До такого типу належить і локальне дифузионне покриття – структура з наявністю м'яких включень у вигляді областей без покриття.

Схематично умовна класифікація покриттів, з точки зору розглянутої теоретичної моделі локального (пористого) покриття, може бути представлена у вигляді:



На цій схемі:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС}}(x_1, x_2) = 1 + \frac{A(1-x_1)(1-x_2)}{1+Ax_1} \\ M_{\text{ИПС}}(x_1, x_2) = 1 - \frac{B(1-x_1)(1-x_2)}{1+B(1-x_1)} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС}}(x) = 1 + \frac{A(1-x)^2}{1+Ax} \\ M_{\text{ИПС}}(x_1, x_2) = 1 - \frac{B(1-x_1)(1-x_2)}{1+B(1-x_1)} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС1}} = 1 + \frac{A(1-x_1)}{1+Ax_1} \\ M_{\text{ИПС1}} = 1 - \frac{B(1-x_1)}{1+B(1-x_1)} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС1}} = 1 + \frac{A(1-x_1)}{1+Ax} \\ M_{\text{ИПС1}} = 1 - \frac{B(1-x)}{1+B(1-x)} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС2}} = 1 + A(1-x_2) \\ M_{\text{ИПС2}} = 1 - \frac{B}{1+B}(1-x_2) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС2}} = 1 + A(1-x_2) \\ M_{\text{ИПС2}} = 1 - \frac{B}{1+B}(1-x) \end{array} \right.$$

Приклади залежностей $Y_{\text{ИПС}}(x)$, $Y_{\text{ИПС1}}(x)$ і $Y_{\text{ИПС2}}(x)$ чисельно представлені в табл. 2.4 і графічно на рис. 2.8.

Таблиця 2.4 – Чисельне представлення залежностей $Y_{\text{ИПС}}(x)$, $Y_{\text{ИПС1}}(x)$ і $Y_{\text{ИПС2}}(x)$ для значень параметра $A = 3; 7$

x	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
A=3	$Y_{\text{ИПС}}$	4,0	3,354	2,869	2,200	1,774	1,491	1,300	1,171	1,087	1,035	1,008	1,0
	$Y_{\text{ИПС1}}$	4,0	3,478	3,077	2,500	2,105	1,818	1,600	1,429	1,290	1,176	1,081	1,0
	$Y_{\text{ИПС2}}$	4,0	3,850	3,700	3,400	3,100	2,800	2,500	2,200	1,900	1,600	1,300	1,0
A=7	$Y_{\text{ИПС}}$	8,0	5,680	4,335	2,867	2,106	1,663	1,389	1,215	1,107	1,042	1,010	1,0
	$Y_{\text{ИПС1}}$	8,0	5,714	4,706	3,333	2,581	2,105	1,778	1,538	1,356	1,212	1,096	1,0
	$Y_{\text{ИПС2}}$	8,0	7,650	7,300	6,600	5,900	5,200	4,500	3,800	3,100	2,400	1,700	1,0

Додатково на рис. 2.9 і в табл. 2.5 представлені залежності $Y_{\text{ИПС}}(x)$ для $A = 0,1; 0,2$ і $M_{\text{ИПС}}(x)$ для $B = 0,1; 0,2$ впливають на локальне покриття для параметра характеризує модуль пружності і коефіцієнт Пуассона.

Таблиця 2.5 – Чисельне уявлення залежностей $Y_{\text{ИПС}}(x)$ для $A = 0,1; 0,2$ і $M_{\text{ИПС}}(x)$ для $B = 0,1; 0,2$

	X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A=B=0,1	$Y_{\text{ИПС}}$	1,1	1,08	1,063	1,048	1,035	1,024	1,015	1,008	1,004	1,001	1
	$M_{\text{ИПС}}$	0,909	0,926	0,941	0,954	0,966	0,976	0,985	0,991	0,996	0,999	1
A=B=0,2	$Y_{\text{ИПС}}$	1,2	1,159	1,123	1,092	1,067	1,045	1,029	1,016	1,007	1,002	1
	$M_{\text{ИПС}}$	0,833	0,863	0,89	0,914	0,936	0,955	0,97	0,983	0,992	0,998	1

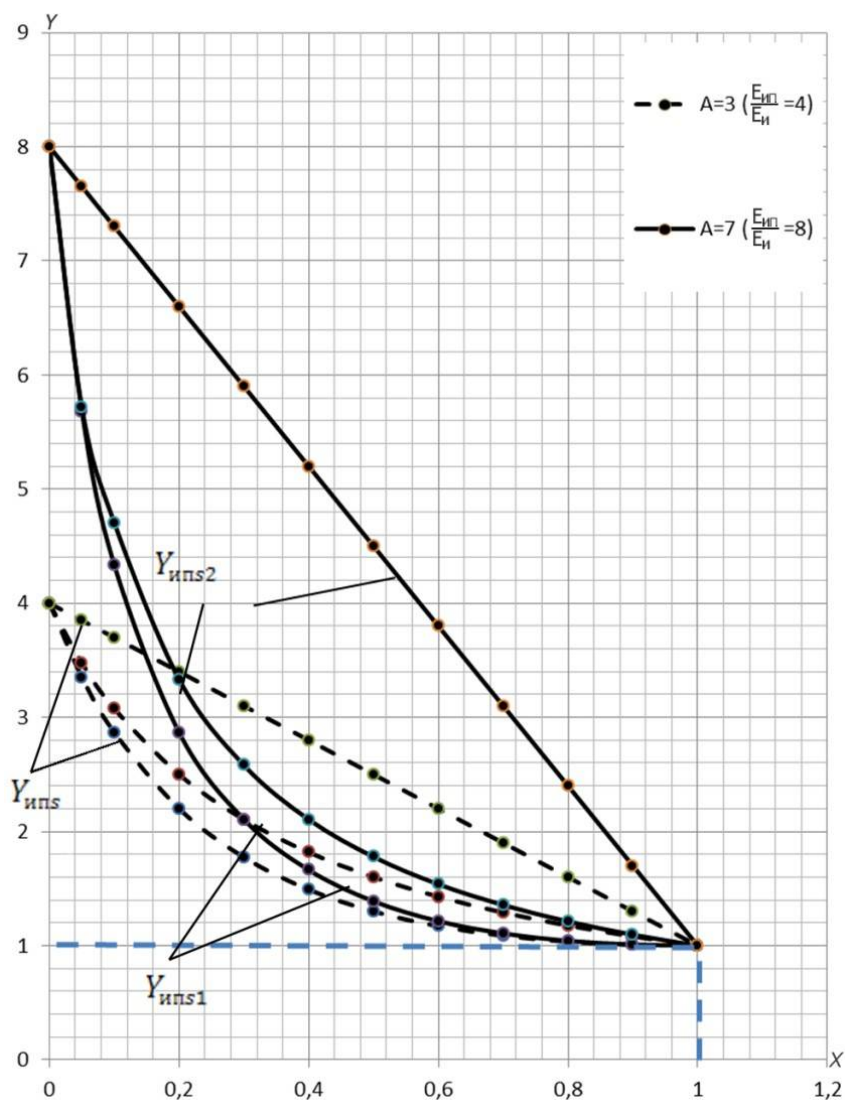


Рисунок 2.8 – Графіки залежностей $Y_{\text{ИПС}}(x)$, $Y_{\text{ИПС1}}(x)$ і $Y_{\text{ИПС2}}(x)$
для $A = 3; 7$

Згідно використаної концепції двуграничності наведені залежності в абсолютних значеннях демонструють тенденції змін модуля Юнга (зменшення) і коефіцієнта Пуассона (збільшення) для переходу від суцільного покриття при $x = 0$ до повної відсутності покриття при $x = 1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{\text{ИПС}}(x=0) = Y_{\text{ИПС1}}(x=0) = Y_{\text{ИПС2}}(x=0) = 1 + A = \frac{E_{\text{ИП}}}{E_{\text{H}}} \\ Y_{\text{ИПС}}(x=1) = Y_{\text{ИПС1}}(x=1) = Y_{\text{ИПС2}}(x=1) = 1 \\ \downarrow \\ E_{\text{ИПС}}(x=0) = E_{\text{ИПС1}}(x=0) = E_{\text{ИПС2}}(x=0) = E_{\text{ИП}} \\ E_{\text{ИПС}}(x=1) = E_{\text{ИПС1}}(x=1) = E_{\text{ИПС2}}(x=1) = E_{\text{H}} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ИПС}}(x=0) = M_{\text{ИПС1}}(x=0) = M_{\text{ИПС2}}(x=0) = \frac{1}{1+B} = \frac{\mu_{\text{ИП}}}{\mu_{\text{И}}} \\ M_{\text{ИПС}}(x=1) = M_{\text{ИПС1}}(x=1) = M_{\text{ИПС2}}(x=1) = 1 \\ \downarrow \\ \mu_{\text{ИПС}}(x=0) = \mu_{\text{ИПС1}}(x=0) = \mu_{\text{ИПС2}}(x=0) = \mu_{\text{ИП}} \\ \mu_{\text{ИПС}}(x=1) = \mu_{\text{ИПС1}}(x=1) = \mu_{\text{ИПС2}}(x=1) = \mu_{\text{И}} \end{array} \right.$$

Відзначимо, що використання смужкових покриттів призводить до можливості поширення тріщин уздовж смуг.

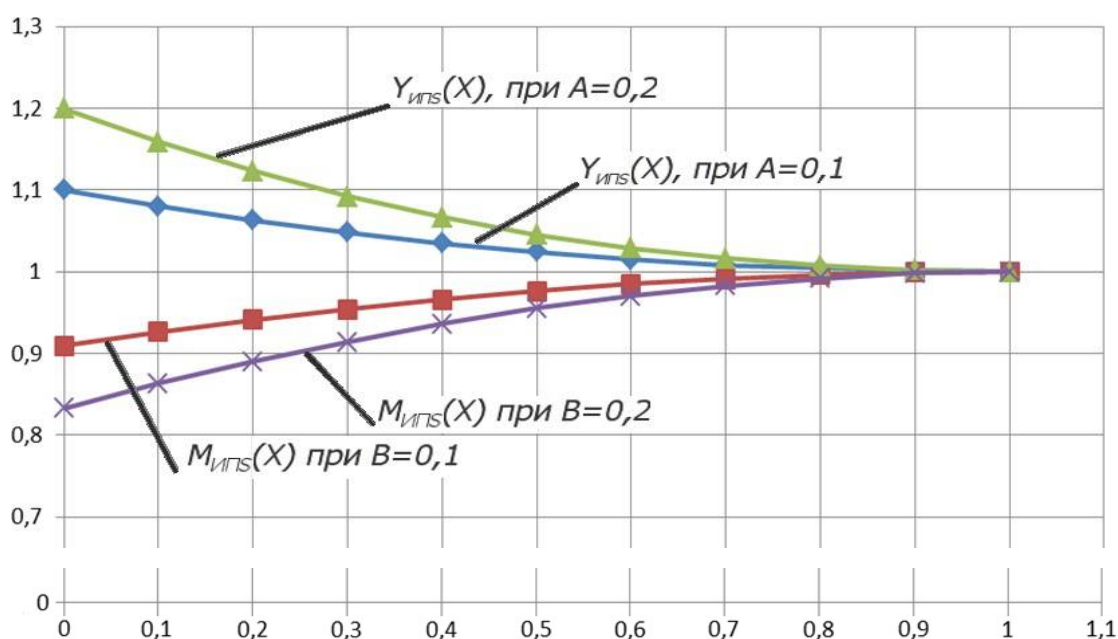


Рисунок 2.9 – Графіки залежностей $Y_{\text{ИПС}}(x)$ для $A = 0,1; 0,2$ і

$M_{\text{ИПС}}(x)$ для $B = 0,1; 0,2$

2.2 Розробка методики і критерії оцінки довговічності різального інструменту з локальним дифузійним покриттям

На основі отриманих результатів теоретичної моделі локального дифузійного і суцільного покриття визначимо довговічність ріжучого інструменту по Журкову С.Н., тобто визначимо часовий інтервал роботи ріжучого інструменту, обумовленого дією термофлуктуаційного механізму руйнування навантажених міжатомних зв'язків. У роботах [51, 61] наведені приклади модифікації формули Журкова С.Н., для розрахунку довговічності

різального інструменту в різних умовах їх експлуатації. Вони привели до радикальної зміни поглядів на фізичну природу міцності твердих тіл і до можливості приведення кількісних оцінок впливають на міцність фізичних величин на основі функціональних взаємозв'язків, що відображаються вихідним варіантом формули Журкова С.Н.:

$$t_{Д max} = t_0 \exp \frac{U_0}{kT}, \quad (2.17)$$

при $t_{Д} = t_{Д max} \exp\left(-\frac{\Omega\sigma}{kT}\right),$

де σ – прикладена напруга, U_0 – енергія активації процесу руйнування (необхідна для первинного акту руйнування у вигляді розриву міжатомних зв'язку і зазвичай ототожнюється з енергією сублимації в перерахунку на один міжатомний зв'язок), Ω – активаційний об'єм (обсяг області локалізації первинного акту руйнування з урахуванням впливу на нього дефектності матеріалу виробу), k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура за Кельвіном, $t_0 \approx 10^{-13}$ с (час, що вважається достатнім для розриву міжатомних зв'язку). Виходячи з припущення, що для суцільного і пористого покриття всі величини, крім напруги σ , мають одне і те ж значення.

Позначивши довговічність локального дифузійного покриття $t_{дпс}$, а довговічність суцільного покриття – $t_{дп}$, тоді:

$$t_{дп} = t_{дп max} \cdot \exp\left(-\frac{\Omega_{п}\sigma_{п}}{kT}\right), \quad (2.18)$$

причому в рамках прийнятого допущення $t_{дп} = t_{дпс max}$.

Отримавши з теоретичної моделі ефективну напруга локального дифузійного покриття:

$$\begin{aligned} t_{дп} &= t_{дпс max} \cdot \exp\left(-\frac{\Omega_{п}\sigma_{п}}{kT}\right) = t_{дп max} \exp\left(-\frac{\Omega_{п}\sigma_{п}}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{Ax_1}{1+Ax_1} \cdot \frac{\Omega_{п}\sigma_{п}}{kT}\right) = \\ &= t_{дп max} \cdot \exp\left(\frac{Ax_1}{1+Ax_1} \cdot \frac{\Omega_{п}\sigma_{п}}{kT}\right) \end{aligned}$$

Або

$$\frac{t_{ДПС}}{t_{ДП}} = \left(\exp \frac{\Omega_{II} \sigma_{II}}{kT} \right)^{\frac{Ax_1}{1+Ax_1}} = \left(\frac{t_{ДП \max}}{t_{ДП}} \right)^{\frac{Ax_1}{1+Ax_1}} \geq 1. \quad (2.19)$$

Згідно кінетичної теорії міцності процес руйнування носить термофлуктуаційний характер, коли «головним дійовим чинником при руйнуванні виявляється тепловий рух атомів, що породжує енергетичні флуктуації, тоді як зовнішня сила забезпечує спрямованість розривної дії флуктуацій, без чого не може розвиватися руйнування» [51, 62]. Необхідність переходу від статичної концепції міцності до кінетичної простежується при розгляді явища зносу, що трактують як вид руйнування [51], інтенсивність якого залежить від твердості, від енергоємності інструментального матеріалу [51]. Таким чином, в контексті формули Журкова С.Н. характеристикою енергоємності інструментального матеріалу по відношенню до зносу служить ефективна молярна енергія активації U_{ef} , що визначається різницею [50]:

$$U_{ef} = U_0 - \Omega\sigma, \quad (2.20)$$

де U_{ef} – ефективна молярна енергія активації за рахунок зовнішніх і внутрішніх сил; U_0 – енергія активації процесу руйнування (без зовнішньої сили); Ω – активаційний об'єм (обсяг області локалізації первинного акту руйнування з урахуванням впливу на нього дефектності матеріалу виробу); σ – прикладена напруга.

Ототожнюючи довговічність ріжучого інструменту t_d з періодом його стійкості з формули Журкова С.Н. отримуємо вираз для ефективної молярної енергії активації U_{ef} :

$$U_{ef} = \frac{RT}{0,434} \lg \left(\frac{T_{CT}}{\tau_0} \right), \quad (2.21)$$

де $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с (час, що вважається достатнім для розриву міжатомних зв'язку); T_{CT} – стійкість різального інструменту, сек; T – середнє значення температури ріжучої кромки інструменту за Кельвіном; R – газова постійна 8,317 Дж / моль·град.

Таким чином, кінетичний підхід до проблеми зносу ріжучого інструменту дозволяє на основі єдиного підходу, шляхом використання

модификаційної формули Журкова С.Н., встановити взаємозв'язок між періодом стійкості ріжучого інструменту T_{cm} , середньою температурою його ріжучої кромки T і відповідної їм ефективної величиною молярної енергоємності U_{ef} процесу зносу.

У таблиці наведено результати досліджень двадцяти твердосплавних чотиригранних пластин IC50M з різними варіантами покриттів. Розрахунки параметра середнього значення температури ріжучої кромки інструменту за Кельвіном T приблизні, тому що не враховують зміну потужності теплових джерел від тертя по контактних площадках передньої і задньої поверхонь. Не враховується залежність диференціального параметра для нано-шарів. Проте, в першому наближенні дані представлені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Варіації ефективної молярної енергії активації U_{ef} при поперечному точінні сталі 40X(HB220) різцем з твердосплавною пластиною IC50M: $v = 190$ м/хв; $s = 0,4$ мм/об; $t = 2$ мм

Інструментальний матеріал	T_{cm} , хв	h_z , мм	T , К	U_{ef} , кДж/моль
IC50M – суцільне покриття (TiN)	2,08	0,08	973	280,973
IC50M – локальне дифузійне покриття (MeO–O ₂)	2,52	0,074	973	282,779
IC50M – без покриття	2,08	0,077	975	281,551

Отримані дані дозволяють відзначити наступне: чим більше ефективної молярної енергії активації U_{ef} , тим період стійкості різального інструменту вище. Таким чином, $U_{efn} > U_{ef}$ ефективна молярна енергія активації у ріжучого інструменту з локальним дифузійним покриттям більше, ніж з у ріжучого інструменту з суцільним покриттям (TiN).

3 РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ДИФУЗІЙНОГО ПОКРИТТЯ НА РІЖУЧІЙ ІНСТРУМЕНТ. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що крихке руйнування робочої частини різального інструменту, що відбувається у відсутності скільки-небудь помітного залишкового деформування, є найбільш частим випадком його відмови [1]. Таким чином, час безперервної роботи інструменту до відмови внаслідок крихкого руйнування, характеризує його довговічність в заданому режимі обробки. З точки зору кінетичної концепції руйнування, що акцентує увагу на вплив часового чинника на міцність, довговічність служить однією з найважливіших характеристик міцності матеріалу (але не виробу в цілому з урахуванням усіх його конструкційних особливостей). Однак для ріжучого інструменту його міцністі характеристики знаходяться в прямій залежності від міцності матеріалу, в тому числі від довговічності, яка визначається формулою Журкова – базовою формулою кінетичної теорії міцності [51]. У зв'язку з цим, в якості альтернативного прикладу, відзначимо використання поняття довговічності як одного з критеріїв міцності на рівні чистої феноменології, без звернення до формули Журкова, щодо покриттів на контактних майданчиках ріжучого інструменту і її експериментальну оцінку в роботі [1].

Разом з тим розгляд дифузійного покриття в якості об'ємного модифікатора властивостей інструментального матеріалу [1] дозволяє використовувати «матеріалознавчий» підхід до композиції пористого покриття з основою і формулу Журкова для теоретичної оцінки тенденцій впливу локальності покриття на довговічність зразків, що сказано у другому розділі. Міцність матеріалу і виготовленого з нього виробу є хоча і пов'язаними, але аж ніяк не тотожними поняттями. З цієї причини формула Журкова, що характеризує властивості міцності матеріалу, не містить будь-яких вказівок щодо способів врахування впливу на енергію активації

(процесу руйнування) і відповідний їй активаційний об'єм конструктивних особливостей виробу, масштабного ефекту, а також впливу агресивного середовища (в тому числі такого, що формується процесом різання).

Об'єднання «матеріалознавчого» підходу, впливу суцільного покриття на ефективні пружні властивості його композиції з основою, зі структурними особливостями комірчастої композиції дозволило, на рівні теоретичної моделі, показати зниження напружень, що діють на локальні зони з покриттям, що збільшують їх довговічність. За рахунок комірчастості покриття, основа отримує можливість «дихати», що покращує її властивості міцності і передбачає наявність можливості екстраполяції тенденцій позитивного впливу локальності (комірчастості) покриття на різальний інструмент [51].

Використання більш складних теоретичних моделей і розрахунків на їх основі, з метою подальшого зіставлення з результатами експлуатаційних перевірок на реальному ріжучому інструменті, не представляється доцільним, принаймні, на існуючому рівні розвитку кінетичних уявлень про міцність. Як обґрунтування такого висновку відзначимо три його передумови:

– багато неясності в концепціях кінетичної теорії міцності (починаючи з відсутності теоретичного висновку основного рівняння цієї теорії з модельних уявлень, однаковою математичної формули для оцінки часу очікування флуктуації з енергією, достатньою для руйнування в мікроскопічному масштабі і для руйнування мікроскопічного тіла) [52];

– навіть по відношенню до зразків «довговічності однакових зразків, що випробовуються при одній і тій самій нарузі при ідентичних умовах, можуть відрізнятися до 100 разів» [51];

– відсутність переконливого способу узгодження статистичних реалій експерименту, більш описуваних формалізмом Вейбулла, з детерміністським підходом у визначенні довговічності за формулою Журкова.

Використання в роботі формалізму найпростішої теоретичної моделі стало вихідним пунктом якісного обґрунтування міцнісної доцільності пористого структурування дифузійного покриття у вигляді впорядкованої сукупності локальних областей з покриттям, відокремлених один від одного структурою пористого типу без покриття. Це забезпечує рухливість локальних зон з дифузійним покриттям в умовах деформаційних змін і знижує ефективний модуль пружності для композиції такого покриття з основою, при збереженні міцності дифузійного зчеплення з нею, порівняно з випадком суцільного покриття основи. У свою чергу зниження ефективного модуля пружності сприяє полегшенню умов релаксації напружень [1].

Геометричні особливості поверхневого рельєфу композиції зумовлюють відповідні неоднорідності деформаційних змін, а самі межі локальних областей з покриттям виступають в ролі перешкод для поверхневого поширення тріщин, що утворюються в покритті в ході експлуатації ріжучого інструменту. Крім того, збільшення жорсткості інструмента за рахунок нанесення локального дифузійного покриття, в поєднанні з супутнім збереженням запасу пластичних властивостей за рахунок його комірчастості, знижує схильність ріжучої частини інструменту до втрати формотривкості і пружним прогинам при прикладанні термомеханічних напружень, що виникають в процесі різання. Також локальність частково компенсує різницю коефіцієнтів термічного розширення між покриттям і основою.

З урахуванням вищесказаного використання локального (пористого) дифузійного покриття може розглядатися в якості ефективного методу підвищення довговічності різального інструменту і деталей.

3.1 Теоретичні передумови формування локального дифузійного покриття на робочих поверхнях інструменту

Взаємозв'язок властивостей локального покриття на

інструментальному матеріалі, умов експлуатації ріжучого інструменту і причин його відмов в процесі експлуатації дозволяє сформулювати робочі пропозиції по спрямованій модифікації властивостей інструментального матеріалу для підвищення працездатності інструменту, які полягають в:

- розробці принципів формування локального дифузійного покриття на ріжучому інструменті і робочих поверхнях деталей;
- розробці технології нанесення локального дифузійного покриття;
- підвищенні втомленого опору інструментального матеріалу за рахунок локального дифузійного покриття.

З урахуванням різниці рівня термомеханічного впливу на контактну площадку ріжучого інструменту в залежності від умов його експлуатації, відмови сильно розрізняються. Систематизація видів відмови, наприклад, для швидкоріжучого інструменту винесена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація інструментів зі швидкорізальної сталі за умовами експлуатації і видам відмови для вибору технології зміцнення

Умови експлуатації інструмента	Характер навантаження, вид відмови інструмента	Особливості різального інструмента	Типові представники інструмента, класифікації груп
1	2	3	4
Область 1 (t_{xs}) \leq 1,5-2мм ² ; $V \leq 20$ м/хв.	Низькі значення термомеханічних навантажень ($P_z \leq 1000\text{Н}$, $T \leq 200^\circ\text{C}$), відсутність упругопластичних прогинів ріжучого клина інструмента, відмови внаслідок абразивного і адгезійного зношування.	Підвищення твердості і зниження її адгезійної активності шляхом додаткової обробки.	Різьбонарізний інструмент (мітчики, плашки). Чистові зенкери, розгортки, протяжки, шевери. Група I.
Область 2 (t_{xs}) \leq 3-5мм ² ; $V \leq 20$ м/хв.	Середні значення термомеханічних навантажень ($P_z \leq 3000\text{Н}$, $T \leq 250^\circ\text{C}$). Слабкі упругопластичні прогини ріжучого клина інструмента, відмови внаслідок абразивного і адгезійного зношування	Підвищення твердості при зростанні її адгезійної активності по відношенню до інструментального матеріалу.	Фасонні різці, зуборізні долбяки, протяжки. Група I і II
Область 3 (t_{xs}) $>$ 5 мм ² ; $V \leq 20$ м/хв	Підвищення напруги при середньому термічному навантаженні ($P_z > 3000\text{Н}$; $T \cong 250 - 300^\circ\text{C}$), схильність	Застосування ріжучого інструменту ефекту не має.	Відрізні різці, свердла, п/ч зенкери, фасонні різці.

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
	до виражених пружнопластичних прогинів ріжучого клина інструмента, що призводять до крихкого руйнування ріжучого клина інструмента.		Група II.
Область 4 ($t_{xs} \leq 0,1-2\text{мм}^2$; $V \leq 40$ м/хв.	Середнє значення термомеханічних навантажень ($P_z \leq 1000\text{Н}$, $T \leq 400^\circ\text{C}$), нестійке наростоутворення, виражені адгезійні втомні процеси. Адгезионно-утомлююче зношування з формуванням фронту підповерхневих тріщин, слабкі пружно-пластичні прогини ріжучого клина інструмента.	Підвищення опірності втомному руйнуванню. Формування зони підвищеної тріщиностійкості.	Кінцеві фрези, фасонні тристоронні і модульні фрези, свердла, РИ для обробки зубчастих колес методом зуботочення, долбяки. Група I і II.
Область 5. ($t_{xs} \leq 3-5\text{мм}^2$. $V \leq 40$ м/хв.	Середні значення термомеханічних навантажень ($P_z \leq 1000\text{Н}$, $T \leq 400-450^\circ\text{C}$), стійке наростообразование. Адгезионне, адгезионно-утомлююча зношування з формуванням підповерхневих тріщин. Упругопластические прогини ріжучого інструменту.	Підвищення опірності втомного руйнування. Формування зони підвищеної тріщиностійкості	Відрізнi і фасонні різці, свердла, кінцеві фрези, пазові тристоронні фрези, фрези для різьбофрезування, черв'ячні фрези. Група I і II.
Область 6. ($t_{xs} > 5,0\text{мм}^2$. $V \leq 400$ м/хв.	Високі термомеханічні навантаження ($P_z > 3000\text{Н}$, $T > 450^\circ\text{C}$) з високою ймовірністю пластичного руйнування ріжучого клина інструмента. Відмови внаслідок процесів повзучості і динамічної рекристалізації ріжучого клина інструмента, які призводять до високої ймовірності пластичного руйнування ріжучого інструменту.	Обмеження за рахунок крихкої міцності ріжучого клина інструмента.	Відрізнi резці, свердла з $D_{св} > 20\text{мм}$. Група II.
Область 7. ($t_{xs} \leq 0,1-2\text{мм}^2$. $V > 40$ м/хв.	Високі термомеханічні навантаження ($P_z \leq 1000\text{Н}$, $T > 500^\circ\text{C}$). Адгезійний знос з високою ймовірністю	Підвищення опірності руйнуванню, в умовах виражених	Відрізнi різці, свердла, високошвидкісні черв'ячні фрези,

	пластичного руйнування ріжучого клина інструмента внаслідок процесів повзучості і динамічної рекристалізації.	пластичних деформацій ріжучого клина інструмента, необхідно формування термостабілізуючої зони більшої глибини при збереженні рівня міцності ріжучого клина інструмента.	ріжучий інструмент для нарізування конічних колес. Група I і II.
Область 8. (t_{xs}) \leq 3-5 мм ² ; V>40м/мин.	Високі термомеханічні навантаження ($P_z \leq 3000\text{H}$, $T > 500^\circ\text{C}$). Інтенсивні процеси повзучості внаслідок процесів динамічної рекристалізації сталі в межах ріжучого клина інструмента. Відмови через пластичне руйнування ріжучого клина інструмента.	” - “	Свердла, кінцеві фрези, відрізні різці. Група II.
Область 9. (t_{xs})>5,0 мм ² ; V>40 м/хв.	Екстремальні термомеханічні навантаження ($P_z \leq 3000\text{H}$, $T > 500^\circ\text{C}$). Відмови наслідок пластичного руйнування ріжучого клина інструмента	Застосування ріжучого інструменту ефекту не має.	Свердла, кінцеві фрези, відрізні різці. Група II

Огляд даних табл. 3.1 показує, що можуть бути встановлені обмеження на можливості використання швидкоріжучого інструменту в умовах екстремального термомеханічного навантаження ріжучого клина інструмента, (див. табл. 3.1 області 3, 6, 9). Наприклад, в зазначених областях крихке руйнування ріжучого клина інструмента відбувається або внаслідок недостатньої крихкої міцності при екстремальних значеннях діючих напружень, або пов'язані з явищем повзучості, динамічної рекристалізації і формування фронту підповерхневих тріщин. В останньому випадку зберігаються деякі можливості інструментального матеріалу

чинити опір повзучості при зростанні термомеханических навантажень. Для областей 1, 4, 7 навпроти можливості підвищення опірності вище.

Зокрема, в умовах різкого збільшення термомеханических навантажень на ріжучі кромки інструменту надзвичайно важливо максимально зменшити ймовірність розміцнення інструментального матеріалу в межах контактних зон.

При використанні ріжучого інструменту і деталей з локальним покриттям пред'являються особливі вимоги до умов обробки, верстатного обладнання, конструкції ріжучого інструменту, його геометрії. Найбільш ефективно ріжучий інструмент з локальним покриттям працює в умовах, які мінімізують або виключають наростоутворення, а також при швидкостях різання, що знижують інтенсивність адгезіоно-втомних процесів.

Одним з напрямків підвищення працездатності покриттів для ріжучого інструменту і деталей є застосування локального дифузійного покриття в якості ефективного проміжного середовища між інструментальним і оброблюваним матеріалами (див. рис. 3.1 і 3.2).

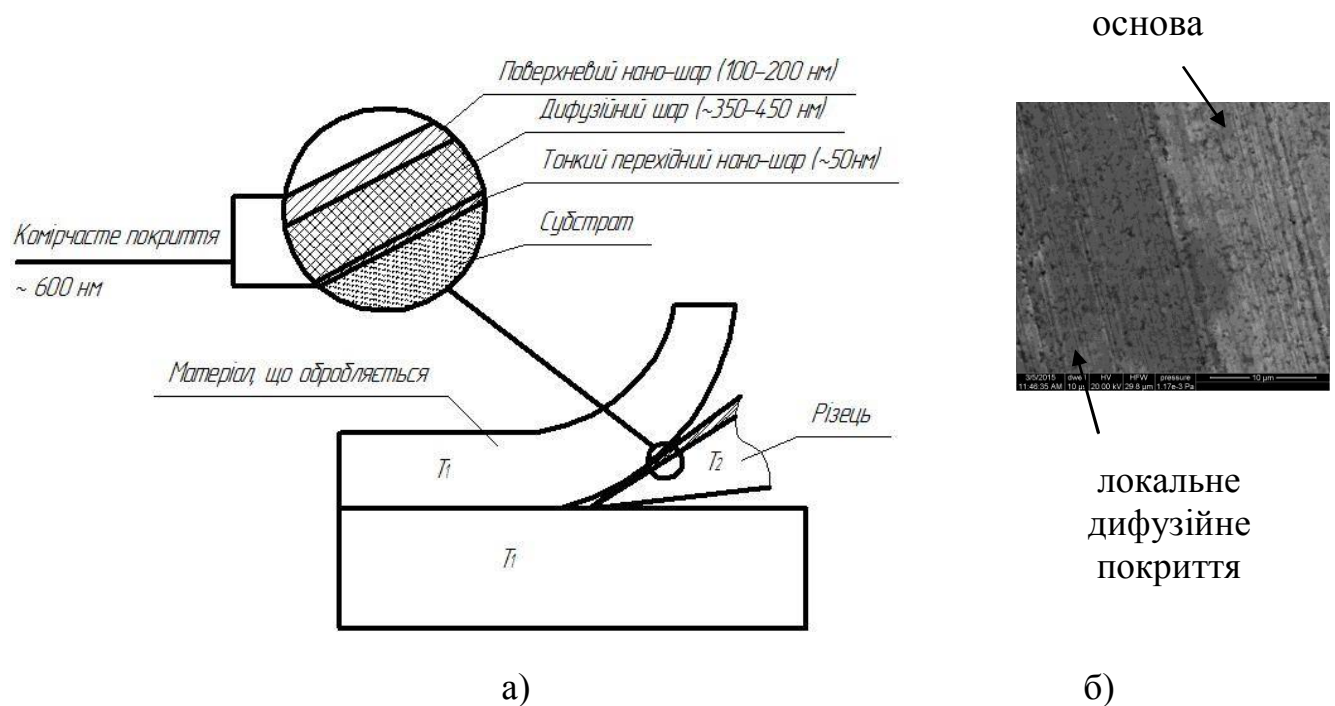


Рисунок 3.1 – Структура локального дифузійного покриття:

- а) – глибинна структура одиничного локального елемента;
- б) – поверхнева структура одиничного локального елемента



Рисунок 3.2 – Зображення лінійно-впорядкованої сукупності локальних елементів дифузійного покриття на передній поверхні ріжучої пластини

Відповідно до такого підходу, в роботі сформульовані положення про підвищення довговічності різального інструменту з локальним дифузійним покриттям при збереженні запасу пластичності інструменту, згідно з якими локальне покриття повинне:

- підвищувати жорсткість інструментального матеріалу, але при цьому перешкоджати поверхневому поширенню тріщин в покритті, що утворюються під впливом термомеханічних напружень;
- забезпечити підвищення опірності втомного руйнування, особливо в умовах підвищених контактних напружень, циклічного навантаження ріжучої частини інструменту (операції переривчастого різання).

Узагальнення переваг пористої структури зносостійкого дифузійного покриття на контактних майданчиках ріжучого інструменту, що дозволяє сформулювати їх у вигляді наступних робочих гіпотез:

1. Локальне дифузійне покриття, порівняно з суцільним покриттям, має здатність до зниження напруги, що припадають на локальні композиції покриття з основою, полегшенню умов їх релаксації, а також до часткової компенсації різниці фізико-механічних характеристик між інструментальним матеріалом і локальним покриттям, що знижує ризик крихкого руйнування ріжучого клина інструмента при дії циклічних навантажень.

2. Переваги локального дифузійного покриття визначаються ступенем узгодження його параметрів з параметрами основи, представленої ріжучим клином з інструментального матеріалу, що встановлюється експериментально.

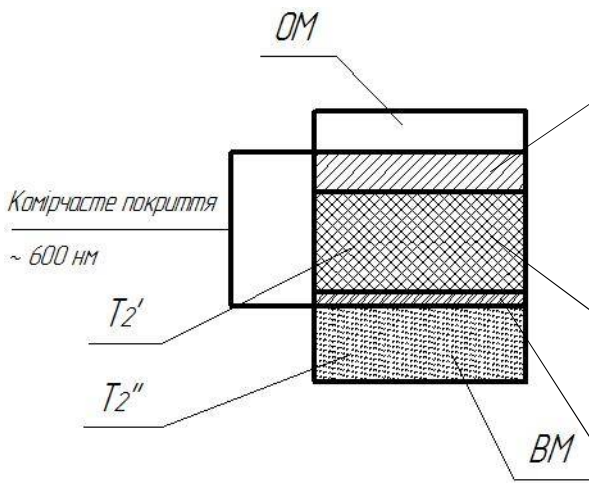
На основі зазначеного підходу була сформульована методика нанесення локального дифузійного покриття, розроблено обладнання і технологія для її реалізації.

Комірчасте структурування дифузійного покриття не робить, порівняно з суцільним покриттям, відчутного впливу на якісний склад елементів, що його утворюють. Істотне спрощення технології обробки поверхні досягається використанням в якості матеріалу покриття елементів потоку стисненого повітря, активованого проходженням через область коронного розряду при атмосферному тиску. При цьому, в своїй основі, склад покриття визначається параметрами так званої стандартної атмосфери на рівні моря, для якої прийнято [58] стандартний барометричний тиск повітря $p_c = 760$ мм рт. ст. = 101325 Па, стандартна температура $T_c = 288,15$ К, стандартна концентрація $n_c = 25,471 \cdot 10^{24}$ м⁻³, стандартна щільність $\rho_c = 1,225$ кг/м³ при молярній масі повітря $\mu_c = 28,96442$ кг/кмоль і його приблизному складі, що включає: N₂ (78,084%), O₂ (20,947%), Ar (0,934%), CO₂ (0,034%), Ne (1,818 · 10⁻³ %), He (5,24 · 10⁻⁴ %), CH₄ (2 · 10⁻⁴ %), Kr (1,14 · 10⁻⁴ %), H₂ (5 · 10⁻⁵ %), Xe (8,7 · 10⁻⁶ %), O₃ ((2 ÷ 7) · 10⁻⁶ %).

Наявність в повітрі молекулярних компонентів нітрогену, кисню і сполук карбону дозволяє говорити про можливість входження до складу покриття нітридів, оксидів і карбідів. Композиції утворюються у взаємодії з покривним матеріалом позитивно або негативно заряджених іонів N₂⁺, N⁺, O₂[±], O[±], CO₂[±], CO[±] і ін. На рис. 3.3 приведена очікувана принципова схема дифузійного покриття, одержуваного впливом активованого повітряного потоку на основу, з умовно виділеними межами пошарової дифузійної самоорганізації і зазначенням вимог, що пред'являються до шарів.

Відповідно до робочих гіпотез сформульовано положення про локальне дифузійне покриття, яке як і суцільне, в своїх локальних комірках суцільності складається з тонкого перехідного нано-шару (ТНШ); дифузійного шару (ДШ) і поверхневого нано-шару (ПНШ), причому кожен з шарів має свої функції.

Дифузійний шар (ДШ) сприяє зростанню запасу пластичності інструменту і жорсткості інструментального матеріалу, що, в свою чергу, знижує схильність ріжучого клина інструмента до втрати формотривкості і пружним прогинам під впливом термомеханічних напружень, що виникають при різанні і, таким чином, знижує ймовірність крихкого руйнування покриття.



Шари	Рекомендовані композиції	Найважливіші вимоги
ПНШ	Оксидні сполуки MeO-O ₂ Fe _x O ($x \sim 0,84-0,96$), Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ ; WO ₂ (δ); Co ₃ O ₄ (II,III), CoO(II), WO _{2,90} ; WO _{2,72} ; TiO, Ti ₂ O та ін.	1. $T_p = T_2 - T_1 \geq 0$ для пари «OM – ПНШ» 2. Max: HV, $\sigma_{\text{п}}$
ДШ	Сполуки Me-MeO W-W _x O _{3n-2} , Co-Co _x O _{3n-2} , Ti-Ti _x O _{3n-2} , Fe-Fe _x O _{3n-2} та ін.	$\Delta T_p = T_2' - T_2'' \square$ 0 для пар «ПНШ – ДШ», «ДШ – ТНШ».
ТНШ	Зміцнюючі фази FeO(α); FeO(β), FeO(γ); WO ₃ (α); WO ₃ (β), WO ₃ (γ), TiO (α), та ін.	Недопустиме формування фаз типу α' - (Me) _y O _x , Me – W, Ti, Fe, Co та ін.

Рисунок 3.3 – Принципова схема шарів дифузійного покриття:

тонкий перехідний нано-шар (ТНШ); дифузний шар (ДШ);

поверхневий нано-шар (ПНШ)

Поверхневий нано-шар (ПНШ) підвищує опірність втомного руйнування, особливо в умовах підвищених контактних напружень і циклічного навантаження ріжучої частини інструменту (операції переривчастого різання).

Тонкий перехідний нано-шар забезпечує сумісність з інструментальним матеріалом, зберігаючи при цьому міцність інструментального матеріалу.

Дифузійне локальне покриття може бути різним, оскільки для кожного матеріалу формування покриття буде носити свій індивідуальний характер, в залежності від хімічного складу інструментального матеріалу, (див. рис. 3.3).

Розроблена для цієї технології експериментальна установка має уніполярну позитивну корону. Кількість позитивних іонів, що породжуються іонізацією атмосферних компонентів, зазвичай істотно перевищує кількість негативних іонів (домінуюча нітратна компонента взагалі електропозитивна і не утворює негативних іонів). Це є однією з причин використання в експериментальній установці уніполярної позитивної корони, що формується в привершинній області голчастого електрода, що грає роль анода (нейтралізатора приходять на нього негативно заряджених частинок у вигляді електронів і негативних іонів), що знаходиться під високим позитивним потенціалом. Так званий чохол коронного розряду, обмежений областю лавинних процесів, що безпосередньо примикає до вершини голчастого електрода, містить носії заряду обох знаків, тоді як дрейфова область позитивної корони, що розташовується за чохлам, доступна лише для позитивних іонів, просторовий заряд яких виконує функцію регулятора процесу їх надходження в цю область [59, 60].

На рисунку 3.4 представлена принципова електрична схема розрядного проміжку з позитивно коронуючим голчастим електродом. Принципова електрична схема даної установки показує, що струм I

газорозрядного проміжку замикається через зовнішній ланцюг, де в ролі його носіїв виступають вільні електрони, що нейтралізують заряд позитивних іонів, що надходять на електрод.

Неоднорідність поля, що є необхідною умовою виникнення уніполярного коронного розряду, призводить до зосередження іонізаційних процесів в так званому чохлі корони, що безпосередньо примикає до коронуючого електроду і характеризується наявністю сильного поля.

$$I(x) = \Gamma(x) + \Gamma^+(x) = \Gamma(0) = \Gamma^+(d) = I;$$

$$\Gamma(x) = I_e(x) + I_i^-(x) \approx I_e(x);$$

$$I_i^-(x) \ll I_e(x); \Gamma(d) = \Gamma^+(0) = 0.$$

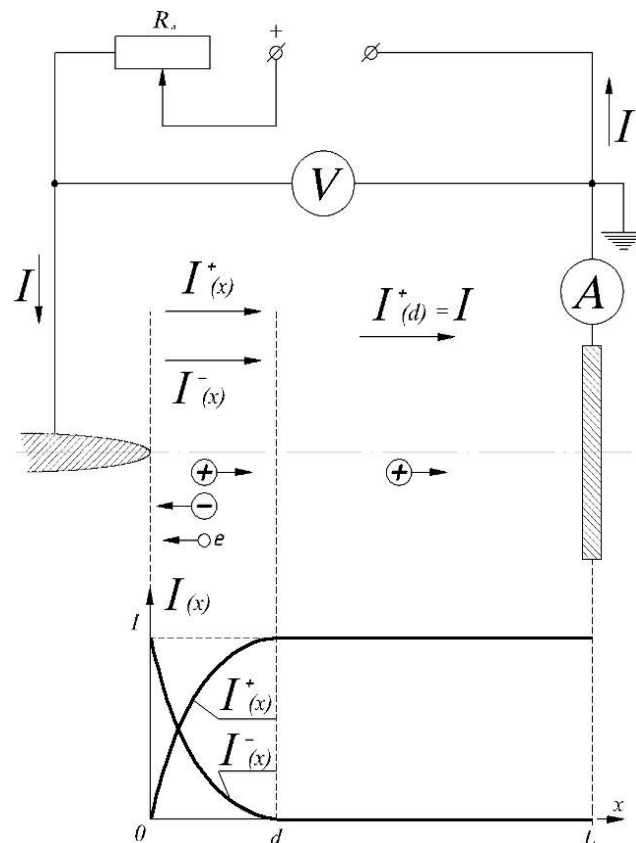


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема розрядного проміжку з позитивно коронуючим голчастим електродом

3.2 Метод нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент

Дифузійне насичення поверхні молекулами і іонами активованого

електричним коронним розрядом стисненого повітря, володіє істотною перевагою в порівнянні з насиченням з парогазової фази, так як має:

- велику швидкість насичення;
- можливість термодифузійного насичення поверхні без додаткової депасивуючої обробки;
- повну екологічну безпеку процесу обробки;

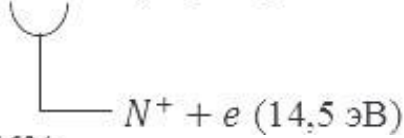
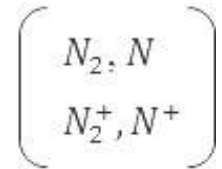
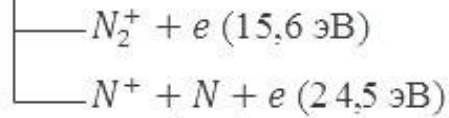
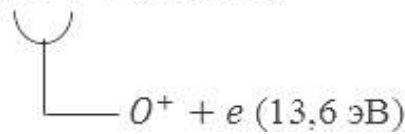
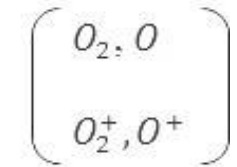
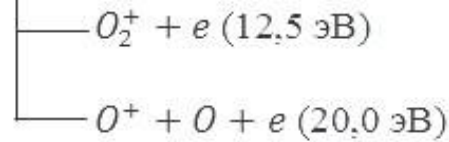
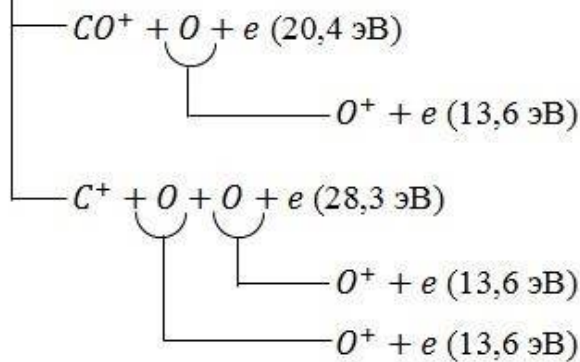
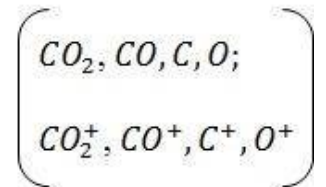
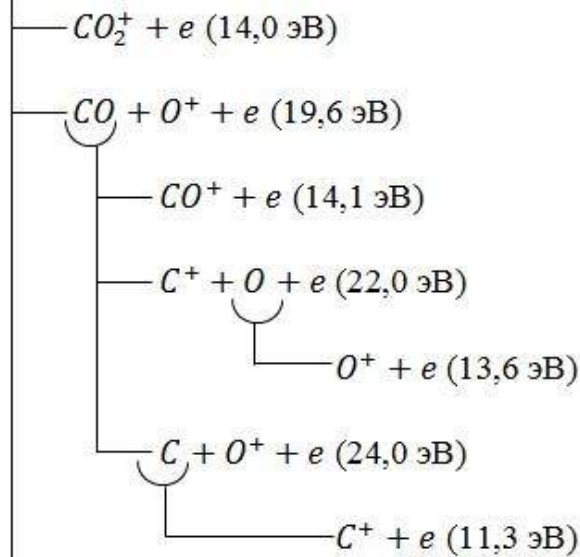
Проведений раніше огляд характеру і природи відмов інструменту свідчить про велику роль локального дифузійного покриття на довговічність ріжучого інструменту і деталі, причому, як було показано вище, при підвищенні термомеханічних навантажень на контактні площадки інструменту роль комірчатості покриття зростає, підвищуючи довговічність інструменту [62, 63, 64]. Тому в даній роботі найбільшу увагу приділено ролі локального дифузійного покриття і особливостям його формування.

Значне спрощення плазмових методів нанесення покриття досягається використанням газового розряду при атмосферному тиску, в даному випадку шляхом дифузійного насичення поверхні іонами, які отримуються активацією повітряного потоку уніполярним коронним розрядом.

Наявність в повітрі нітрогену, кисню і сполук карбону (CO_2) дозволяє припустити можливість входження до складу покриття нітридів, оксидів і карбідів, що утворюються при синтезі покриття.

Основу іонної активації повітря складають:

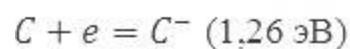
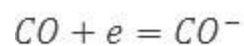
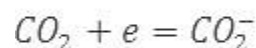
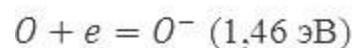
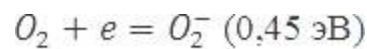
- процеси іонізації з утворенням позитивних іонів (в дужках вказані порогові енергії іонізації):

1) N_2 ; 78,084%2) O_2 ; 20,9476%3) CO_2 ; 0,0314% - двуокись углерода (CO – окись углерода)

– процеси електронної спорідненості з утворенням негативних іонів (в дужках наведені приклади енергії спорідненості, що вивільняється):

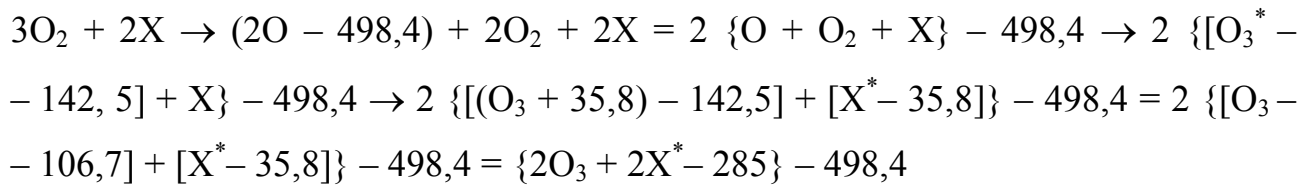
Кількість позитивних іонів, що породжуються іонізацією атмосферних компонентів, зазвичай істотно перевищує кількість негативних іонів, оскільки азотна компонента електропозитивна і не утворює негативних іонів, то хемосорбція електронегативного кисню з утворенням оксидної плівки буде перешкоджати хемосорбції азоту і утворення нітридів. Це в свою чергу, полегшує дифузію іонів (або атомів) кисню через поверхневий шар з утворенням дифузійного внутрішнього покриття оксидного типу. Незначний вміст оксиду вуглецю (IV) CO_2 в атмосфері, не дає вкладу вуглецевої складової до складу покриття.

Крім позитивних іонів дрейфова зона розрядного проміжку містить як молекули повітря, що не прореагували, так і зарядово-нейтральні продукти газового розряду. До числа останніх відносяться, наприклад, молекули озону O_3 і перекису водню H_2O_2 , що є, внаслідок наявності надлишкової, відповідно порівняно з O_2 і H_2O , атома кисню, сильними окислювачами, легко віддають свій зайвий атом. Присутність в безпосередній близькості від працюючої установки таких хімічно активних продуктів її діяльності здатне надавати не тільки негативний вплив на здоров'я оператора, при перевищенні норм ГДК, а й призводити до займання горючих елементів оточення.

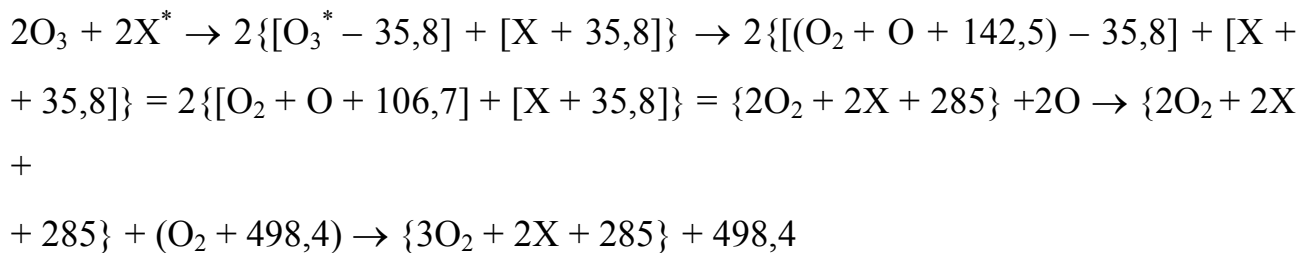


Утворення молекул O_3 і H_2O_2 обумовлено хімічними реакціями в ході дисоційно-рекомбінаційних зіткнень зі споживанням енергії газового

розряду. Процеси утворення і розкладання озону, розглядаються, з точки зору взаємних перетворень між двома системами. Одна з яких складається з трьох грам-молекул кисню, а інша з двох грам-молекул озону, що здійснюються за участю двох грам-молекул так званого третього тіла X (наприклад, це можуть бути молекули знову ж кисню, або нітрогену), які виступають в ролі регуляторів переходів між збудженими і стабільними станами озону, відповідно характеризуються стандартною ентальпією утворення озону (142,5 кДж/моль) і енергією дисоціації зв'язку O – O₂ (106,7 кДж/моль). Ці процеси можуть бути описані наступними послідовностями реакцій:



– ендотермічний (з поглинанням енергії) цикл утворення озону;

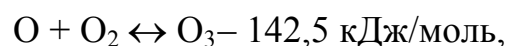


– екзотермічний (з виділенням тепла) цикл розкладання озону, де * – збуджений стан.

Наведена схематика носить умовно збалансований характер із зазначенням тільки чисельних значень енергетичних складових в розмірності кДж/моль, де 498,4 кДж/моль – молярна енергія дисоціації зв'язку O – O;

$$35,8 \text{ кДж/моль} = (142,5 - 106,7) \text{ кДж/моль}.$$

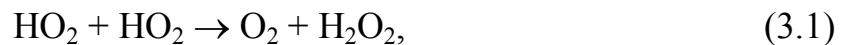
Для атомно-молекулярного газового середовища з наявністю O і O₂ більш коротким формулюванням процесів утворення і розкладання озону служить:



яка не містить компоненти X з огляду на її посередницької («прихованої») рольової функції. Тим не менш надходження озону з відкритого газорозрядного

проміжку в навколишнє середовище залежить від X-компоненти і визначається перевищенням інтенсивності утворення молекул озону в стабільному стані над інтенсивністю переведення їх у збуджений стан з наступним розпадом. Гранично допустима концентрація (ГДК) вмісту озону в повітрі визначена санітарними нормами як $10^{-5}\%$ ($= 10^{-7}$), що при стандартній щільності атмосфери $\rho_c = 0,123 \cdot 10^7 \text{ мг/м}^3$ відповідає величині $0,123 \text{ мг/м}^3$.

В якості основного джерела утворення атмосферного пероксиду водню служить рекомбінація гідропероксидних радикалів [70]:



які утворюються, наприклад, в реакціях гідроксильного радикала OH з O_3 :



У тропосфері концентрація OH визначається величиною [65] $(0,5 - 5) \cdot 10^6 \text{ 1/см}^3$, що становить $(1,96 - 19,6) \cdot 10^{-12} \%$ від стандартної концентрації $n_c = 25,471 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$. Стосовно до газового розряду утворення двох гідроксильних радикалів відбувається в реакції [66]:



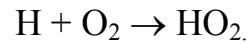
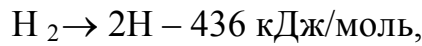
що, з урахуванням вищесказаного, вже дає підстави для припущення про наявність H_2O_2 в продуктах коронного розряду, що породжується послідовністю реакцій $(3.3) \rightarrow (3.2) \rightarrow (3.1)$.

Слід зазначити, що реакція з участю двох радикалів OH:



що здається вельми привабливою для інтерпретації механізму утворення пероксиду водню в газовому розряді, не отримала підтвердження при проведенні дослідницьких робіт по її обґрунтуванні для випадку утворення H_2O_2 при горінні водню [66].

Іншим джерелом виникнення гідропероксидних радикалів можуть служити реакції, аналогічні розглянутим для випадку утворення озону і пов'язані з розкладанням молекулярного водню і подальшим об'єднанням атомарного водню з молекулярним киснем [65]:



Однак незалежно від конкретики реакцій, що приводять у результаті до виникнення пероксиду водню H_2O_2 , всі вони пов'язані з необхідністю наявності однієї з основних вихідних компонент – гідрогену, концентрація якого $n_{\text{C}}(\text{H}_2)$ в повітрі значно нижче концентрації кисню $n_{\text{C}}(\text{O}_2)$, що є основною вихідною компонентою в утворенні озону:

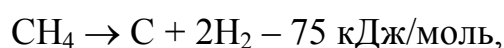
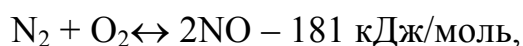
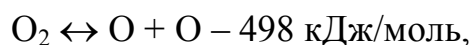
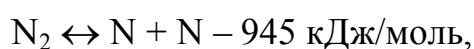
$$\frac{n_{\text{C}}(\text{H}_2)}{n_{\text{C}}(\text{O}_2)} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{21} = 2,4 \cdot 10^{-6}.$$

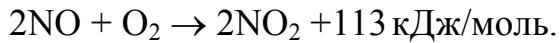
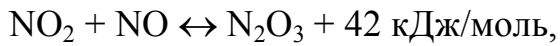
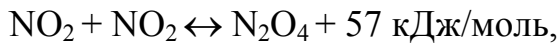
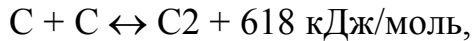
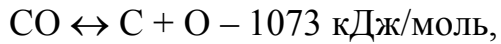
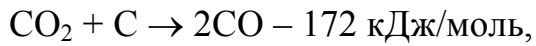
Різного роду «водневі доповнення», наприклад, від його змісту в атмосферному метані CH_4 ($n_{\text{C}}(\text{CH}_4) = 2 \cdot 10^{-4} \%$), не роблять істотного впливу на картину співвідношення. Використання для попередньої порівняльної оцінки концентрацій озону $n_{\text{Г.Р.}}(\text{O}_3)$ і пероксиду водню $n_{\text{Г.Р.}}(\text{H}_2\text{O}_2)$ в продуктах малопотужного газового розряду припущення про домінуючу роль співвідношення концентрацій основних вихідних компонент, призводить до висновку, що

$$\frac{n_{\text{Г.Р.}}(\text{H}_2\text{O}_2)}{n_{\text{Г.Р.}}(\text{O}_3)} \ll 1$$

тобто вихід H_2O_2 , порівняно з виходом O_3 , очікувано, вкрай незначний. У зв'язку з цим подальший розгляд механізмів утворення і розкладання пероксиду водню, стосовно коронного газового розряду потребує додаткових досліджень, що виходять за рамки теми, не представляється доцільним.

Проте, на додаток до вищесказаного, можна відзначити, що в короні газового розряду можливі і інші зарядово-нейтральні реакції, наприклад, імовірно, такі як:





На рисунку 3.5 схематично представлена фізико-хімічна модель технології нанесення локального покриття. Іонна активація повітря позитивної короною установки збільшує хемосорбційну активність, причому інтенсифікація процесу оксидування приповерхневого шару зберігає функцію блокування процесу азотування.

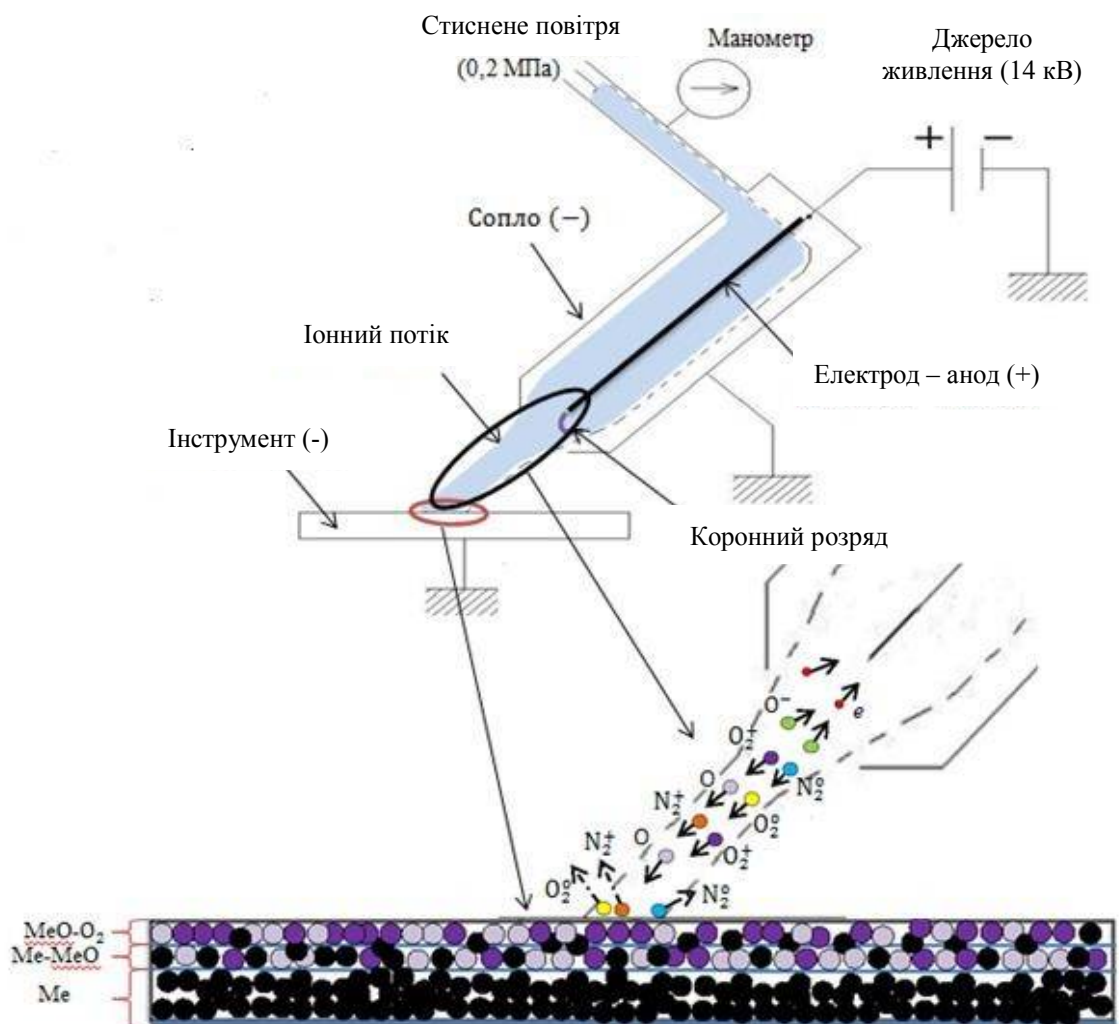


Рисунок 3.5 – Фізико-хімічна модель технології нанесення локального покриття

Блокування процесу утворення нітридів іонами кисню на електроді установки сприяє нейтралізації позитивних іонів азоту повітря. Розпилення нейтралізованої азотної складової іонізованого потоку і бомбардувальне очищення поверхні, в свою чергу, полегшує дифузію іонів (або атомів) кисню в поверхневий шар з утворенням дифузійного внутрішнього покриття оксидного типу.

Метал акумулює енергію, внутрішня енергія поверхневого шару істотно зростає. Ця прихована енергія розподілена в металі нерівномірно, і, в основному, сконцентрована в дефектах кристалічної решітки.

Молекули кисню впроваджується в кристалічну решітку металу і утворюють тверді розчини і, тим самим, підвищуються твердість і міцність поверхневого шару інструментального матеріалу.

Поверхневий шар металу швидко заповнюється хемосорбованим окислювачем і утворюється тонкий шар окисленого металу. При знижених температурах після хемосорбованого кисню за рахунок ванн-дер-Ваальсових сил може виникнути і фізична адсорбція молекул кисню. Якщо між металом і киснем є хімічна спорідненість (оксид термодинамічно стабільний), то плівка, що складається з хемосорбованого кисню, перетворюється в оксидну плівку. Метал і кисень в оксидній плівці створюють іонні зв'язки. В такому випадку дуже швидко виникає шар хемосорбованого кисню і в той же час в оксидах формується значне електричне поле. На поверхні розділу $Me-MeO$ утворюються катіони, а на поверхні розділу $MeO-O_2$ утворюються аніони кисню. Електричне поле сприяє міграції катіонів до поверхні розділу $MeO-O_2$. Таким чином, будь-який кристал, що знаходиться при температурі, відмінній від нуля, завжди буде містити певну кількість дефектів структури. Метал переходить в термодинамічно нестійкий нерівноважний стан з підвищеною внутрішньою енергією. При підвищенні температури оксиди переходять в більш стабільний стан, що відповідає більш високому вмісту кисню в металі.

Підвищення вмісту кисню в поверхневому шарі в формі твердого розчину впровадження супроводжується збільшенням питомого обсягу, формуванням залишкових стискаючих напружень, підвищенням твердості і зносостійкості. Цим пояснюється зміцнення матеріалів при їх обробці.

Для оцінки активаційної ефективності корони в якості постачальника однозарядних позитивних аеронів скористаємося поняттям коефіцієнта іонізації K_i^+ , визначивши його як відношення усередненої концентрації утворених позитивних іонів n_i^+ до концентрації стандартної атмосфери $n_C = 25,47 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$:

$$K_i^+ = \frac{n_i^+}{n_C}.$$

З точки зору реєстрованих струмів коефіцієнт K_i^+ зручно оцінювати у вигляді відношення щільності струмів, створюваних спрямованим рухом однорідного повітряного потоку зі швидкістю v в випадках його часткової та повної іонізації:

$$K_i^+ = \frac{j_i^+}{j_C^+}.$$

$$\text{де } j_i^+ = e \cdot n_i^+ \cdot v, j_C^+ = e \cdot n_i^+ \cdot v \quad (3.4)$$

Такого роду оціночна ідеалізація дає уявлення про порядок величини K_i^+ .

В табл. 3.2 в якості прикладів наведені чисельні значення j_C^+ , реалізовані по (3.4) при різних значеннях v .

Таблиця 3.2 – Чисельні значення щільності струму, що створюються одновимірним рухом щільністю іонізованого повітряного потоку

$v, \text{ м/с}$	100	200	300	400	500	1000
$j_C^+, \text{ мкА/см}^2$	$4,08 \cdot 10^{10}$	$8,16 \cdot 10^{10}$	$12,24 \cdot 10^{10}$	$16,32 \cdot 10^{10}$	$20,4 \cdot 10^{10}$	$40,8 \cdot 10^{10}$

Величезні значення j_C^+ з табл. 3.2 свідчать про незначність коефіцієнта K_i^+ , якщо $j_i^+ \sim$ сотень мкА/см²:

$$K_i^+ \sim 10^{-9} - 10^{-8} = (10^{-7} - 10^{-6}) \%$$

При щільності стандартної атмосфери $\rho_C = 1,225 \cdot 10^6$ мг/м³ для очікуваних концентрацій і щільностей позитивних іонів відповідно отримуємо:

$$n_i^+ \sim K_i^+ \cdot n_C = (2,547 - 25,47) \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3,$$

$$\rho_i^+ \sim K_i^+ \cdot \rho_C = (1,23 - 12,3) \cdot 10^{-3} \text{ мг/м}^3.$$

Визначення щільності заряду τ_i^+ :

$\tau_i^+ = e \cdot n_i^+ = e \cdot K_i^+ \cdot n_C = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (2,547 - 25,47) \cdot 10^{16} = (0,41 - 4,1) \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^3$
може бути інтерпретовано в контексті наявності у кожної частинки повітря ефективного заряду

$$R_{ef} = e \cdot K_i^+ = (1,6 - 16) \cdot 10^{-28} \text{ Кл},$$

оскільки

$$\tau_i^+ = e \cdot n_i^+ = e_{ef} \cdot n_C.$$

При стандартній масі частинки повітря:

$$m_C = \frac{\rho_C}{n_C} = \frac{1,225}{25,47 \cdot 10^{24}} = 48,1 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

(маси для порівняння: 1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг; $m(\text{N}_2) = 2 \cdot 14$ а. е. м. = $46,5 \cdot 10^{-27}$ кг; $m(\text{O}_2) = 2 \cdot 16$ а. е. м. = $53,1 \cdot 10^{-27}$ кг; $0,78 \cdot m(\text{N}_2) + 0,21 \cdot m(\text{O}_2) = 47,4 \cdot 10^{-27}$ кг) на неї припадає питомий заряд q^+ , рівний:

$$q_C^+ = \frac{e_{ef}}{m_C} = (3,33 - 33,3) \cdot 10^{-27} \text{ Кл/кг}.$$

В якості порівняння зазначимо, що для промислових порошкових пневмоелектричних розпилювачів з коронуючими електродами, які використовуються для напилення покриттів, вимогою є наявність питомої заряду у напилюються частинок не менше $0,7 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг [60].

З точки зору представлення вольт-амперної характеристики коронуючого електрода узагальненням виду [60].

$$I = G \cdot V \cdot (V - V_K) \quad (3.5)$$

будь-який конкретний режим з напругою ($V > V_K$) і струмом I формально може бути реалізований різними взаємопов'язаними значеннями, що залежить від геометрії міжелектродного проміжку коефіцієнта G , мкА/кВ² і напруги запалювання корони V_K , обумовленими, наприклад, залежністю

$$G(V_K) = \frac{I}{V \cdot (V - V_K)} \quad (3.6)$$

У табл. 3.3 чисельно і на рисунку 3.6 графічно залежність (3.6) визначена для умовного робочого режиму з $V = 15$ кВ і $I = 400$ мкА.

Таблиця 3.3 – Чисельні значення коефіцієнта міжелектродного проміжку і напруги запалювання корони

V_K , кВ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G , мкА/кВ ²	1,778	1,905	2,051	2,222	2,424	2,667	2,963	3,333	3,810	4,444
V_K , кВ	10	12	14	15						
G , мкА/кВ ²	5,333	8,889	26,667	∞						

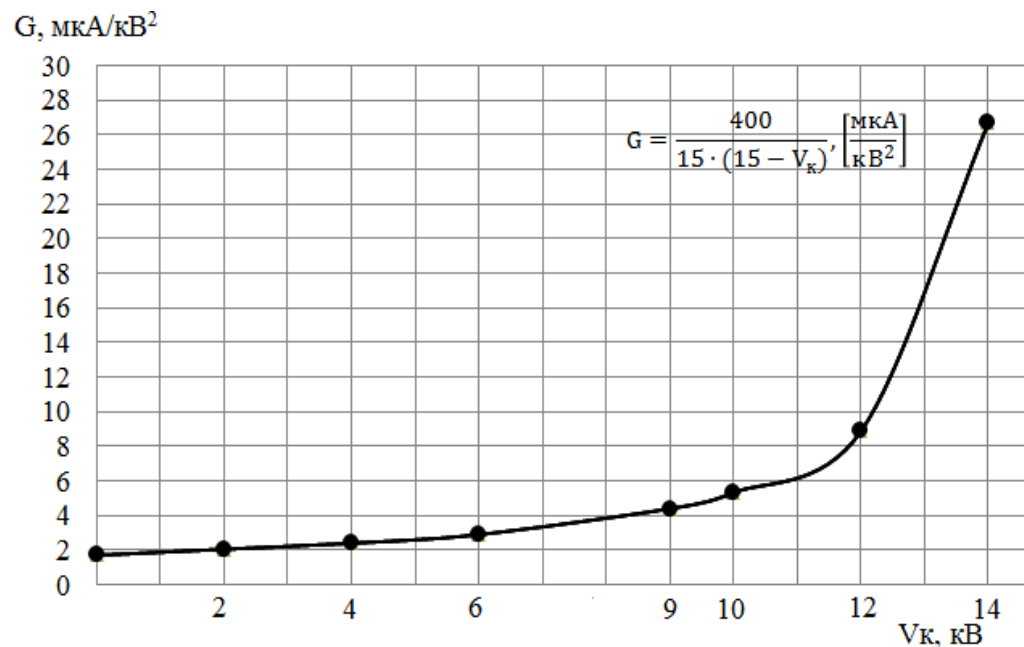


Рисунок 3.6 - Приклад графічного представлення залежності $G(V_K)$, що формально узгоджує можливі значення G і V_K , що забезпечують реалізацію режиму з $I = 400$ мкА при $V = 15$ кВ

З графіка (див. рис. 3.6) за відомим з експерименту значенням V_K легко знаходиться відповідне йому значення коефіцієнта G , єдине для всіх режимів на вольт-амперній характеристиці. Таким чином, співвідносний з реальною системою електродів аналітичний вираз для вольт-амперної характеристики (3.5) коронного розряду знаходить числову конкретику на основі використання оціночного значення V_K і вимірювання струму коронуючого електрода при напрузі, обраному в якості робочого, шляхом зіставлення характеристик самого покриття в різних режимах його нанесення. Наприклад, значенням $V_K = 4\text{кВ}$ за даними з табл. 3.3 відповідає значення

$G = 2,424 \text{ мкА/кВ}^2$ і вираз для вольт-амперної характеристики набуває вигляду $I = 2,424 \cdot V \cdot (V - 4) \text{ мкА}$ з чисельним відображенням в табл. 3.4 і графічним на рис. 3.7. З метою зіставлення в таблиці 3.4 також наведені значення I для $V_K = 3\text{кВ}$ і $V_K = 5\text{кВ}$ з відповідними їм значеннями $G = 2,222 \text{ мкА/кВ}^2$ і $G = 2,667 \text{ мкА/кВ}^2$, що дозволяють оцінити вплив змін в значеннях V_K на величину струму I для $V \neq 15\text{кВ}$ (теоретичне узгодження значень G і V_K , здійснене для $V_K = 15\text{кВ}$, забезпечує при цій напрузі незмінність розрахункового значення $I = 400 \text{ мкА}$ незалежно від V_K).

Таблиця 3.4 – Чисельні значення вольт-амперної характеристики від міжелектродного проміжку

V, кВ		3	4	5	6	7	9	12	15	16	18
I, мкА	$V_K=3\text{кВ},$ $G=2,22\text{мкА/кВ}^2$	0	8,89	22,22	40	62,22	119,99	239,98	400	462,18	599,9
	$V_K=3\text{кВ},$ $G=2,22\text{мкА/кВ}^2$	0	0	12,12	22,09	50,90	109,08	237,70	400	465,41	610,8
	$V_K=3\text{кВ},$ $G=2,22\text{мкА/кВ}^2$	0	0	0	16	37,34	96,01	224,03	400	469,39	624,08

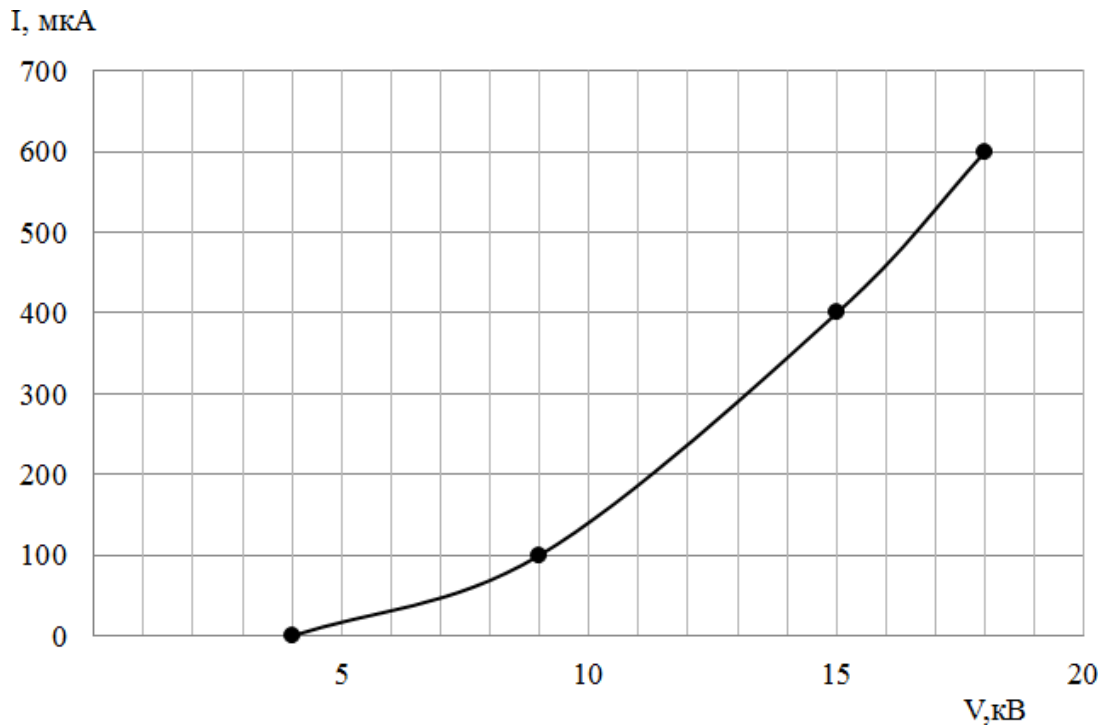


Рисунок 3.7 – Приклад графічного представлення вольт-амперної характеристики

Оскільки основним об'єктом дослідження є не безпосередньо коронний розряд, а властивості утвореного з його допомогою покриття, то саме вони служать критерієм вибірки робочого режиму нанесення. Це в значній мірі знімає проблеми, характерні для струмових вимірювань в умовах позитивної корони. Різного роду нестабільності властиві горінню позитивної корони. Візуально вони проявляються як динамічні нерівномірності світіння у вигляді вихідних з вістря коронуючого електрода ниток – стримерів, що світяться, спалахові режими світіння тощо, призводять до появи токового «брязкоту», що при деяких умовах переходять в періодичні імпульси, що володіють постійною складовою, з частотами до 10 кГц [59], навіть при незмінності розрядної напруги. Вплив струмових нестабільностей від передпочаткових стримерів, що посилюється внеском від шорсткостей коронуючою частиною поверхні голчастого електрода, в свою чергу може призводити до розкиду в експериментально визначених значеннях напруги запалювання корони V_K .

3.3 Загальна методика проведення досліджень

Для формування локального дифузійного покриття на різальний інструмент був використаний позитивний уніполярний коронний розряд, що формується в приверхівній області голчастого електрода.

Схема проведення робіт з відпрацювання технології представлена на рисунку 3.8.

Розроблено кілька варіантів технологій нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент, зокрема виготовлений зі швидкорізальної сталі або з твердого сплаву, а також на титанові зразки деталі, які можна застосовувати в одній технологічній установці.

Формування локального дифузійного покриття, одержуваного впливом на основу активованим повітряним потоком, що проходить через коронний розряд, з умовно виділеними межами пошарової дифузійної самоорганізації виконували на установці, в яку входить пристрій для створення іонізованої повітряної протоки «УІВ-1» і електромеханічний блок електроерозивного верстата «Ельфа». При формуванні локального дифузійного покриття використовували спеціальний голчастий анод з жорсткою регламентацією. Як матеріал анода використовували вольфрам.

Найбільш суттєвою перевагою локального дифузійного покриття, порівняно з суцільним покриттям, є збільшення довговічності різального інструменту по відношенню до крихкого руйнування його ріжучої кромки.

Формування на поверхні ріжучої частини інструменту жорстких областей локальних покриттів, розділених м'якими областями без покриття, сприяє збільшенню її пластичних властивостей і зниження напруги в покритті. Це призводить до зменшення ймовірності його руйнування, в тому числі за рахунок наявності перешкод поверхневому поширенню тріщин в жорсткому покритті, що створюються м'якими проміжками без покриття, що розмежовують області локальних покриттів. Зниження в комірчастому покритті, що розглядається як цілісна структура, що включає м'які проміжки без покриття, ефективного значення модуля пружності,

порівняно з його значенням в суцільному покритті, сприяє релаксації напружень.

Розташування зразків в проведених експериментах дозволили отримати інформацію по оптимізації процесу нанесення локального дифузійного покриття. Це дало можливість продовжити дослідження з точки зору «дослідження кінетики зношування». Як зразки використовували пластини квадратної форми 18x18x8мм Р6М5 з твердістю HRC62 і Р6М5К5 з твердістю HRC65 і пластини прямокутної форми 11,6x9,5x4,0 мм: IC50M, IC3028, IC9015, IC9025. Крім ріжучого інструменту був оброблений «зразок деталі» з титанового сплаву ВТЗ-1. Після нанесення локального дифузійного покриття, ріжучий інструмент (твердосплавні і швидкорізальні пластини) досліджували на довговічність при різних режимах обробки, а «зразок деталі» з титанового сплаву після нанесення дифузійного покриття досліджували на механічні властивості.

3.3.1 Методика визначення ріжучих властивостей

Об'єкти досліджень. Вимоги, що пред'являються до ріжучого інструменту, досить складні. Зразки з інструментальних матеріалів повинні відповідати наступним вимогам:

- бути невеликими за розміром для нанесення локального дифузійного покриття;
- мати форму і розміри, відповідні для проведення металографічних і металлофізичних досліджень їх властивостей як після нанесення покриттів, так і після здійснення процесу різання;
- забезпечувати можливість використання їх в якості ріжучих елементів як при випробуваннях на стійкість, так і в дослідженнях фізичних явищ в процесі різання, причому їх геометричні параметри повинні відповідати реальним інструментам з тих же марок інструментальних матеріалів.

Крім того, дуже важлива ідентичність властивостей зразків для надійного відтворення результатів при дублюванні.

Цим вимогам відповідають багатогранні непереточувані пластини. Дійсно, вони мають невеликі розміри, і при нанесенні локального дифузійного покриття (в ідентичних умовах) можна отримати достатню кількість зразків для будь-яких досліджень; їх можна попередньо загострити за будь-якою геометрією, а наявність кількох різальних крайок вимагає меншої загальної кількості пластинок.

Виходячи з цього, була розроблена спеціальна конструкція непереточуваних швидкорізальних пластинок, що мають в плані квадратну форму розміром 18x18x8мм з кутом $\alpha = 18^\circ$, $r = 1,5$ мм, (див. табл. 3.5). При їх виготовленні зі стандартних і експериментальних марок сталей було приділено особливу увагу на забезпечення ідентичності їх властивостей. Заготовки кожної марки були з однієї болванки. Термообробка проведена за рекомендованими для цих марок сталей режимам, в суворо однакових умовах.

Таблиця 3.5 – Геометричні параметри різучих інструментів

Конструкція пластинок	Робочі кути інструментів, град						Радіус при вершині r , мм
	γ	α	ϕ	ϕ_1	α_1	λ	
Квадрат 18x18x8	8	18	45	15	10	0	1,5

Після термообробки була виміряна твердість пластинок і проведено відбраковування тих з них, які відрізнялися від середнього значення твердості більш ніж на одиницю HRC.

За єдиною технологією виконана і заточка пластинок: по задніх поверхнях на універсально-заточному верстаті спочатку кругом ($V = 25$ м/с; $S = 0,005$ мм/дв.хід) з ручною поздовжньої подачею, а потім ельборовим ($V = 25$ м/с; $S = 0,0025$ мм/дв.хід) також з ручною поздовжньої подачею. По передній поверхні – на пласкошліфовальному верстаті з інтенсивним охолодженням послідовно абразивним електрокорундовим кругом ($V = 18$ м/с; $S = 2$ м/хв; $t = 0,02$ мм) і ельборовим кругом (режими ті ж) з подальшим виходжування.

Всього за вказаною технологією було виготовлено і випробувано понад 30 платівок. Для їх закріплення були використані спеціальні конструкції державок.

Як об'єкт досліджень були також використані твёрдосплавні пластини IC50M, IC3028, IC9015, IC9025, а також «зразок деталі» з титанового сплаву BT3-1.

Устаткування. Всі стійкісні випробування при поздовжньому точінні і дослідження функціональних параметрів різання проведені на верстаті фірми Jesco Machinery 1650ENC з ЧПУ (див. рис. 3.8). Верстат має систему Fagor 800TGI і укомплектований трикомпонентним динамометром «9257 ВА» з вбудованим підсилювачем заряду, датчиком акустичної емісії «Kistler 8152B2», акселерометром «Kistler 8614A1000M1» з підсилювачем сигналу «Kistler 5127B». Все це дає автоматизований прийом інформації про динамічні і віброакустичні процеси при різанні в реальному масштабі часу і обробку цієї інформації з метою визначення фізичних критеріїв, що характеризують стан технологічної операції.



Рисунок 3.8 – Станок фірми Jesco Machinery 1650ENC с ЧПУ

У систему збору та обробки даних входить: комп'ютер Panasonic CF-28PB, 800 МГц Pentium Processor, 256MB RAM, 30GB HDD.

Кольоровий дисплей – промислове виконання; вбудований аналогово-цифровий перетворювач, який має 8 аналогових вхідних каналів SubD 9-role, можливість автоматичного коректування зміщення нуля. Можлива частота вибірки від 156,25 до 80000 вибірок в секунду. При використанні 8 вхідних каналів частота вибірки до 10000 вибірок в секунду на канал. Для прийому та первинної обробки даних застосовується програма Mlab. Для подальшої обробки даних використовується програма MGraph, що дозволяє швидко проводити обробку великих масивів з результатами вимірів.

Зусилля різання, отримані на динамометрі «9257 ВА» фіксувалися акселерометром «Kistler 8614A1000M1». В процесі проведення досліджень проводилися ретельні спостереження за характером і величиною зносу робочих поверхонь ріжучого інструменту.

Надійність і довговічність інструменту оцінювали за середнім значенням стійкості \bar{T} , коефіцієнту варіації стійкості v_T , інтенсивності зношування J :

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}; v_T = \frac{\sigma}{T}; \sigma = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}{n} \right]}; J = \frac{h_3}{V \cdot T_M},$$

де n — число дублів випробувань; $T_M = \frac{L}{n \cdot S}$ — машинний час; L — довжина шляху інструменту, що включає довжину заготовки, врізання і перебіг; n, s — число обертів і подача.

Оцінку коефіцієнтів варіації стійкості інструменту з локальним дифузійним покриттям, із суцільним покриттям і без зміцнення виконували за критерієм Стьюдента:

$$t = \frac{v_T - v_{ДСП}}{\left(\frac{v_T}{2n} \right) - \left(\frac{v_{ДСП}}{2 \cdot n_{ДСП}} \right)},$$

де $v_T, v_{ДСП}$ — коефіцієнт варіації стійкості для контрольного інструменту та інструменту з локальним дифузійним покриттям; $n, n_{ДСП}$ — число дублів

випробувань контрольного ріжучого інструменту і ріжучого інструменту з локальним дифузійним покриттям.

Для оцінки значень стійкості інструменту, що різко виділяються, використовували критерій Гіббса:

$$Q = \frac{T_{max} - T}{S}$$

при $Q > Q_{кр}$ значення T_{max} відкидали як таке, що містить грубу помилку.

Оброблювані матеріали. Основний обсяг досліджень виконано при обробці конструкційної вуглецевої сталі 40X і титанового сплаву ВТ6 (для вивчення фізичних явищ в процесі різання заготовки зі сталі 45 і сталі 40X вирізані з однієї болванки). Їх твердість вказана в таблицях і графіках результатів випробувань.

Заготовки для поздовжнього точіння – прутки $d = 120 - 200$ мм, довжиною $L = 600$ мм. Припуск знімали до співвідношення $L/d < 8$. При точінні сталей після термообробки використовували труби з товщиною 15 – 30 мм.

Методика випробувань. Кожен дослід при проведенні стійкісних випробувань дублювали від 3-х до 6 разів в залежності від завдань досліджень і умов обробки. Остаточне значення стійкості розраховували за методом найменших квадратів. В одному з дублів фіксували динаміку розвитку зносу по передній і задній поверхні.

Розміри майданчиків зносу вимірювалися на інструментальному мікроскопі МІМ-8 з ціною поділки 0,001 мм (див. рис. 3.9). Фотографування майданчиків зносу проводилося на «POLYVAR» фірма REICYER (Австрія) за допомогою фотоапарата «Олімпус» моделі 100 – ЄС.

Критерій зносу пластин у всіх випадках був обраний по задній поверхні, зазвичай до $h_3 = 0,5$ мм. Досягнення такої величини зносу при роботі швидкорізальними і твердосплавними пластинами означає практично повне використання їх ріжучих властивостей.



Рисунок 3.9 – Інструментальний мікроскоп МІМ-8

3.3.2 Методика дослідження фізико-механічних властивостей локального дифузійного покриття

Для визначення фізичних властивостей локального дифузійного покриття були проведені дослідження по мікротвердості, а також шорсткості і модуля пружності Юнга.

Вимірювальна апаратура. Контроль інструменту з локальним покриттям здійснювався за допомогою візуального огляду зовнішнього вигляду, а також за допомогою скануючого наноіндентора Hysitron TI 750 Ubi (США), (див. рисунок 3.10).

Прилад дозволяє наносити ультрамікротверді відбитки, здатні оцінити мікротвердість дуже тонких покриттів (до 0,05 мкм). Дані по твердості оцінювалися за шкалою HV. За допомогою мікрокомп'ютера «Сенсор» визначалося середнє значення параметрів відбитків за кількома вимірами. Діапазон вимірювань максимальної сили навантаження 10 мкН – 12000 мкН. Було проведено 15 вимірювань.



Рисунок 3.10 – Скануючий наноіндикатор Nysitron TI 750 Ubi

Товщина нанесеного локального дифузійного покриття визначалася за відтарованою шкалою. Використовуваний в приладі лічильник Гейгера перетворює відображені бета-промені в електричні імпульси, які передаються на ЕОМ. Отримана інформація розпізнається на ЕОМ і перетворює ці дані, відповідно до команд оператора, розшифровує і видає інформацію.

За базовий параметр локального дифузійного покриття використовували контроль за мікротвердістю і мікроструктурою, а також розподіл елементів по глибині шару.

Скануючий наноіндентор Nysitron TI750 UBI є прецизійним приладом дослідного класу, призначеним для виконання повного спектра наномеханічних випробувань з високою чутливістю і передовими робочими характеристиками. Прилад дозволяє сканування поверхні при проведенні квазистатичних випробувань з високою швидкістю проведення вимірювань і стабільно високою якістю. Він має ємнісний датчик-перетворювач. Датчик об'єднує в собі електростатичний привід і вимір переміщень за рахунок ємнісного датчика в одному пристрої.

Контролер дозволяє забезпечувати рівень навантаження на зразок $<1\text{нН}$, глибину індентування 5 мкм , дозвіл за глибиною становить $0,02\text{ нм}$, при цьому точність позиціонування 50 нм , а також надшвидкий зворотний зв'язок з частотою 78 кГц . Прилад дозволяє здійснювати комплексні процедури вимірювань, такі як: твердість, модуль пружності, шорсткість, товщина нанесеного покриття, а так само надає можливість для користувача встановлювати частоту на свій розсуд в діапазоні до 30 кГц .

Автоматизовані виміри на TI 750 Ubi можуть виконуватися при двох масштабах. П'єзосканер, який використовували для візуалізації в режимі СЗМ, може використовуватися в якості трьохкоординатного позиціонування для прецизійної установки зонда. Це, в свою чергу, дозволяє проводити вимірювання на дуже точно вибраних ділянках зразка.

За допомогою інтерфейсу ClickMode можна задавати масиви точок для набору статистики, а так само для порівняння механічних властивостей в різних частинах зразка. Використання опції сервоприводу предметного столика відкриває можливість проведення вимірювань на великих майданчиках або об'єднання декількох майданчиків в послідовності. А інтуїтивно зрозумілий інтерфейс дозволяє задавати масиви сканування практично будь-якої форми за лічені хвилини.

Функція автоматизації дозволяє виробляти послідовно тисячі вимірювань без втручання користувача. Ця обставина так само дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок виключення з процесу набору статистичного розподілу користувача.

Наноіндентор використовується для:

- визначення мікротвердості;
- визначення модуля Юнга;
- визначення шорсткості;
- визначення адгезійної міцності покриттів;
- оцінки стійкості до стирання;
- отримання картини рельєфу поверхні (аналогічно АСМ).

Вибір швидкості подачі проводиться процесором за обраним діапазоном вимірювання зусилля і заданого контрольного навантаження. Дотик вістря алмазу поверхні зразка реєструється по початку зростання зусилля в пристрої вимірювання зусилля.

Процесор призупиняє швидкість подачі, підбиваючи фактичну величину контрольного зусилля з заздалегідь обраною швидкістю до попередньо визначеної величині зусилля, і потім утримує це контрольне зусилля на період всього процесу виробництва відбитка. Вістря алмазу подається до поверхні зразка з різною швидкістю. Швидкість подачі визначається пультом управління, який знаходиться на зовнішній панелі приладу, на основі заданого контрольного зусилля і обраного діапазону вимірювання. По закінченню цього обраного часу утримання алмаз повертається в неробочий стан. Отриманий відбиток, (див. рис. 3.11) залишається на зразку, а твердість фіксується на пульті управління.

Даний прилад дозволяє отримати субмікронну точність на поверхні зразка. Компактні розміри відбитків і відмінні динамічні показники датчика-перетворювача дозволяють добиватися неперевершеної термостабільності і швидкості встановлення їх в задане положення, що вкрай необхідно для високопродуктивних вимірювань.

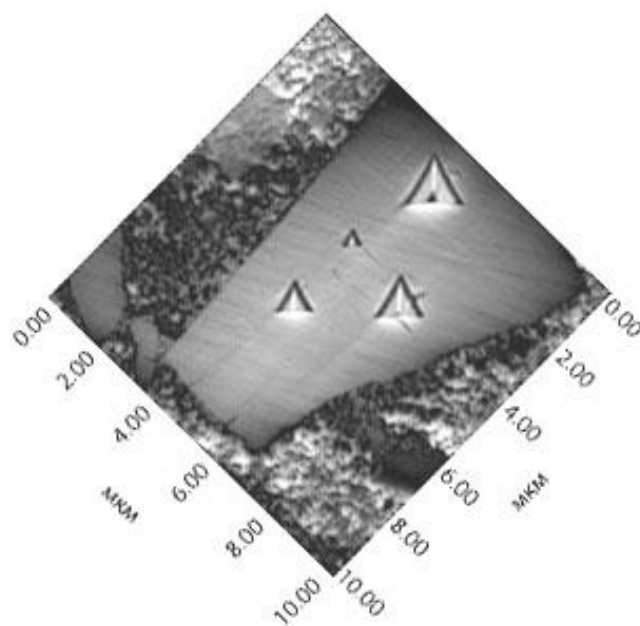


Рисунок 3.11 – Розташування відбитків на досліджуваному зразку

4 КІНЕТИКА І МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ З ЛОКАЛЬНИМ ДИФУЗІЙНИМ ПОКРИТТЯМ

4.1 Дослідження ріжучих властивостей інструменту з локальним дифузійним покриттям

Ріжучі властивості інструменту в значній мірі визначаються умовами експлуатації і, зокрема, такими параметрами, як час напрацювання на відмову (час різання). З урахуванням досить сильних варіаційних розбросів часу різання критеріями оцінки ріжучих властивостей інструменту з локальним покриттям служили середнє значення часу різання (стійкість) T і коефіцієнт його варіації v_T .

Дослідження ріжучих властивостей інструменту з локальним покриттям проводили при поздовжньому точінні конструкційних сталей 45 і 40Х.

Об'єктами досліджень служили різці з механічним кріпленням чотиригранних швидкорізальних і твердосплавних пластин (див. розділ 3).

В роботі проведені дослідження ріжучих властивостей інструменту, як зі швидкорізальної сталі, так і твердого сплаву з локальним дифузійним покриттям, із суцільним покриттям і без покриття. При проведенні експериментів використовували таку методику.

Кінетику розвитку комірок зношування контактних майданчиків інструменту вивчали шляхом візуального спостереження і фотографування на вимірювальному пристрої, що складається з двох мікроскопів МБС-9, (див. рис. 4.1).

Обидва мікроскопа закріплювали на пристосування таким чином, що їх оптичні осі утворювали нормалі з передньої і задньої поверхнями досліджуваної пластини, яка встановлюється в державці на поворотному столику.

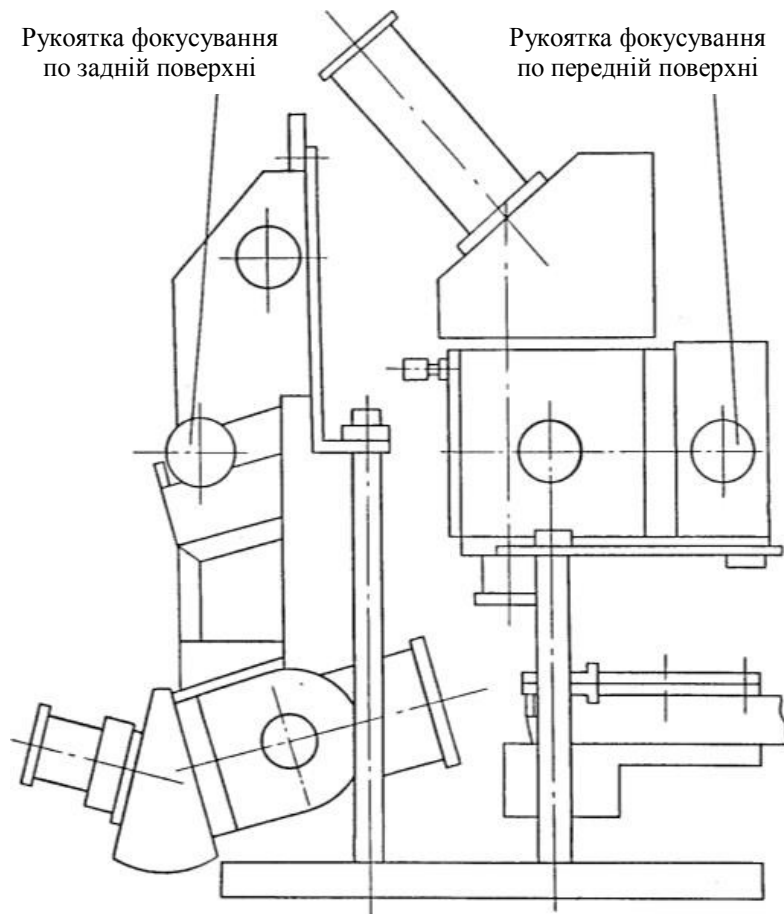


Рисунок 4.1 – Вимірювальний пристрій МБС-9

Оснащення мікроскопів окулярами зі шкалою (ціна поділки 25 мкм) дозволило визначати розміри досліджуваних об'єктів. Пристосування дозволяло не тільки спостерігати за розвитком осередків зношування, але фотографувати їх з збільшенням до 100 за допомогою фотокамери «Осупрус IS-100», яка встановлюється на окуляри. Для оцінки розмірів спостережуваних об'єктів окуляри мікроскопів були оснащені сіткою або шкалою з ціною поділки 25 мкм.

Крім того, контактні ділянки вивчали і фотографували на металографічному (МІМ-6) і електронносканувальному (РЕММА 202М) мікроскопах, що дозволяло оцінювати стан ріжучої кромки інструменту.

Велику увагу приділяли статистичній обробці результатів дослідження ріжучих властивостей інструменту з швидкорізальної сталі і тврдосплавним пластинам з локальним дифузійним покриттям.

Оцінку апроксимацій регресійних ліній проводили за методом найменших квадратів за умовою:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}) \rightarrow \min$$

де Y_i – експериментальне значення величини; \bar{Y} – теоретичне значення досліджуваного параметра.

З урахуванням монотонного характеру залежності $\bar{T} = f(v)$ (точіння, фрезерування швидкорізальним і твердосплавним інструментом при варіюванні швидкості різання в межах $V = 5 - 190$ м/хв), функцію $\bar{T} = f(v)$ апроксимували прямою в подвійній логарифмічній шкалі виду:

$$Y = \bar{Y} + K(X - \bar{X})$$

де $\bar{Y} = K(X - \lg C_V)$ і; C_V – постійна; x, y – координати заданої точки.

Математична обробка даних експериментальних досліджень включала оцінку середніх значень \bar{X}, \bar{Y}

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i; \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

де n – число дублів випробувань (зазвичай $n = 10 - 15$);

$$K = \frac{\sum x - \sum x \cdot \sum y / n}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n}$$

$$\lg C_V = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{K}$$

Довіреність інтервалу середнього значення часу різання до відмови ріжучого інструменту \bar{T} і коефіцієнта його варіації v_T оцінювали за методикою, представленою в розділі 2.

4.2 Дослідження параметрів процесу різання і ріжучих властивостей інструменту з локальним дифузійним покриттям

Для встановлення особливостей процесу різання і зношування інструменту зі швидкорізальної сталі і твердого сплаву з локальним покриттям в порівнянні з відповідними параметрами контрольного

інструменту були проведені широкі дослідження процесу точіння і фрезерування, результати яких викладаються в цьому розділі.

Працездатний стан інструменту визначається багатьма факторами. Але, перш за все в значній мірі залежить від опірності контактних майданчиків інструменту зношування і руйнування при взаємодії з оброблюваним матеріалом. Зношування контактних майданчиків обумовлено декількома одночасно діючими механізмами – абразивним, адгезійно-втомним, хіміко-окислювальним і дифузійним. Залежно від умов різання і характеру контактної взаємодії (безперервний, переривчастий, нестационарний) один з діючих механізмів зношування може стати превалюючим і може визначати довговічність інструменту [67, 68, 69, 70, 71].

Дослідження кінетики і механізмів зношування інструменту з різними варіантами покриттів проводили для різних умов різання при безперервному (поздовжнє і поперечне гостріння) і переривчастому (торцеве фрезерування). Дослідження ріжучих властивостей були проведені для інструменту зі швидкорізальними і твердосплавними пластинами з локальним дифузійним покриттям.

Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$ і характер зношування інструменту з швидкорізальними і твердосплавними пластинами з локальним дифузійним покриттям представлені на рисунках 4.2 – 4.11.

Встановлено, що ріжучий інструмент з локальним дифузійним покриттям, показав кращі результати, ніж контрольний інструмент і інструмент із суцільним покриттям, по опору розміцнення під дією нагрівання на ділянках приробітного і встановленого зношування.

Порівняння кривих $\bar{h}_3 = f(\tau)$, (див. рисунки 4.3 – 4.8) дозволяють відзначити, що на стадії приробітного зношування, локальне дифузійне покриття знижує термомеханічні навантаження на контактній площадці інструменту, ефективно гальмує зношування по задній поверхні різального інструменту.

Були проведені дослідження на різних режимах обробки різними інструментальними матеріалами, а також із застосуванням мастильно-охолоджувальної рідини.

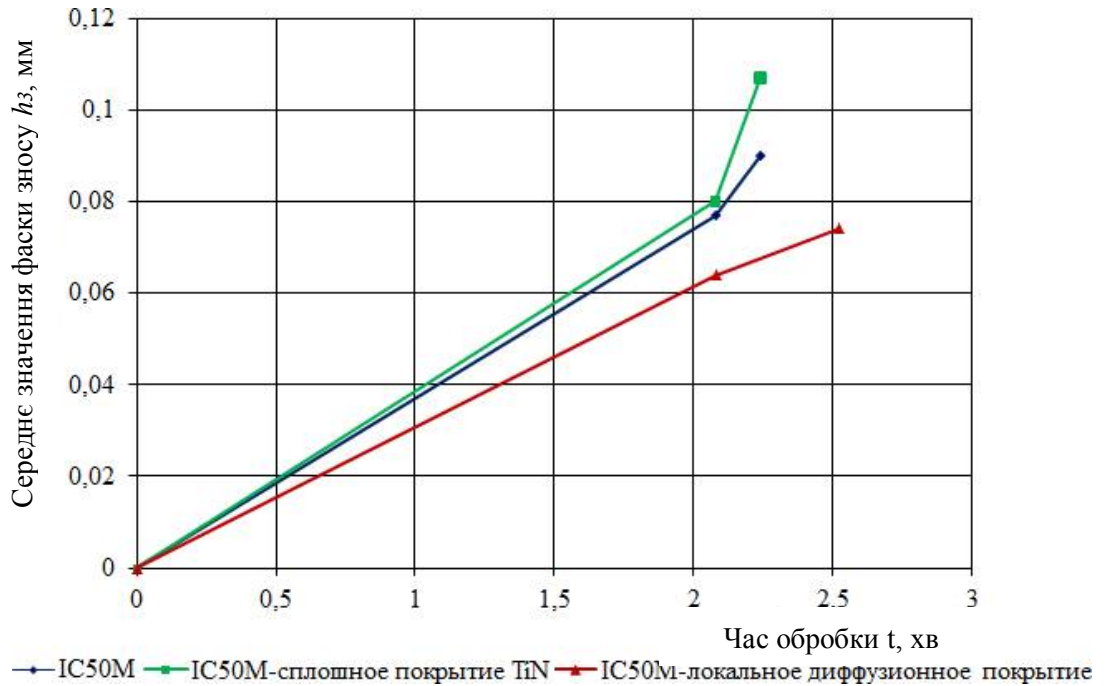


Рисунок 4.2 – Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$, отримані при поперечному точінні сталі 40X (HB220) різцем з твердосплавною пластинною IC50M:

$$v = 190 \text{ м/хв}; s = 0,4 \text{ мм/об}; t = 2 \text{ мм}$$

На рисунку 4.3 показаний осередок зношування ріжучого інструменту, як з локальним дифузійним покриттям, так і без покриття.

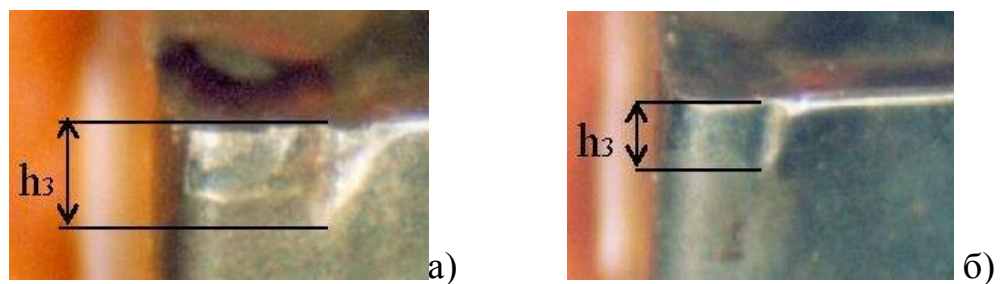


Рисунок 4.3 – Характер зношування контактної площадки задньої поверхні твердосплавних пластини різця (IC50M) при точінні сталі 40X

$$(v = 190 \text{ м/хв}; t = 2 \text{ мм}; s = 0,4 \text{ мм/об.}):$$

а – без покриття; б – з локальним дифузійним покриттям

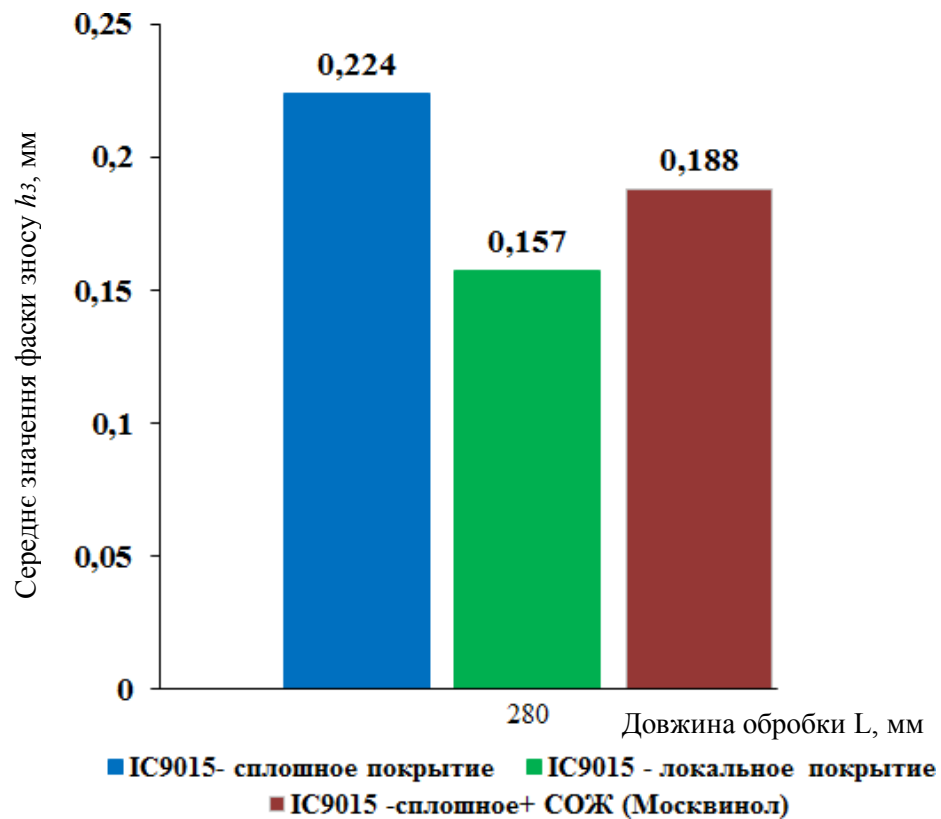


Рисунок 4.4 – Залежність зносу твердосплавних пластин IC9015 від довжини обробки при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220):

$$v = 225 \text{ м/хв}; s = 0,2 \text{ мм/об}; t = 1 \text{ мм}$$

На рисунку 4.5 показаний осередок зношування ріжучого інструменту, як з локальним дифузійним покриттям, так і з суцільним покриттям.

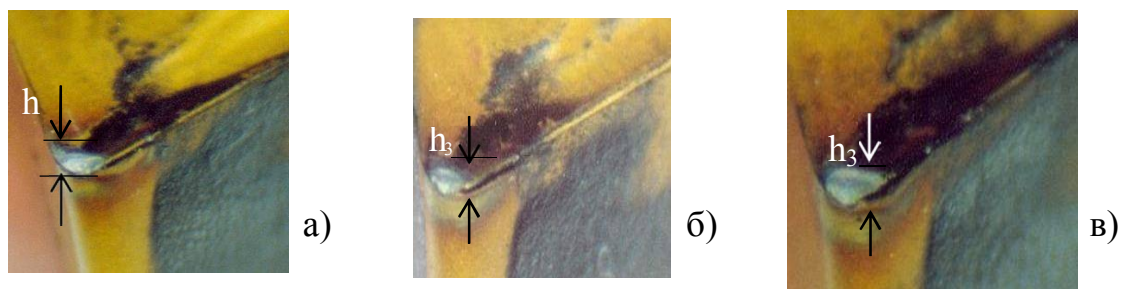


Рисунок 4.5 – Характер зношування контактної площадки задньої поверхні твердосплавних пластини ріжучого інструменту (IC9015) при точінні сталі 40X ($v = 225 \text{ м/хв}; s = 0,2 \text{ мм/об}; t = 1 \text{ мм}$):

а – суцільне покриття; б – локальне дифузійне покриття;

в – застосування МОР (Москвинол)

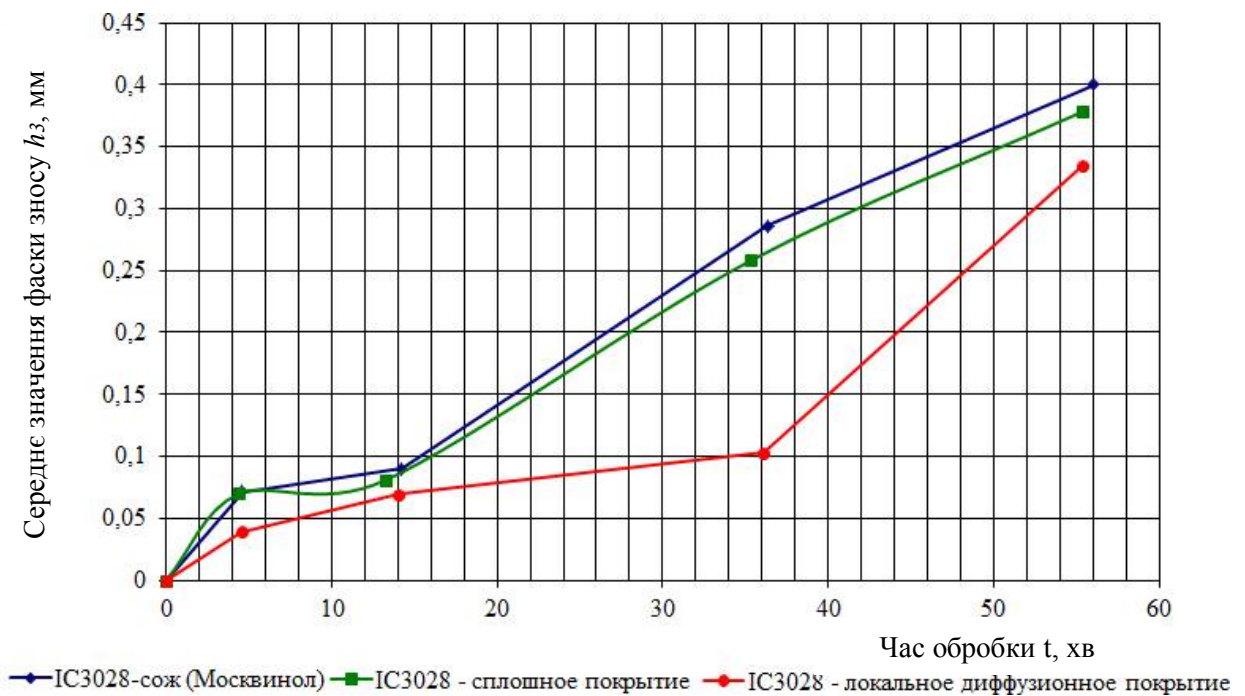


Рисунок 4.6 – Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$, отримані при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) твердосплавними пластинами IC3028:

$$v = 150 \text{ м/хв}; s = 0,2 \text{ мм/об}; t = 1 \text{ мм}$$

На рисунку 4.7 показаний осередок зношування ріжучого інструменту, як з локальним дифузійним покриттям, так і без покриття.

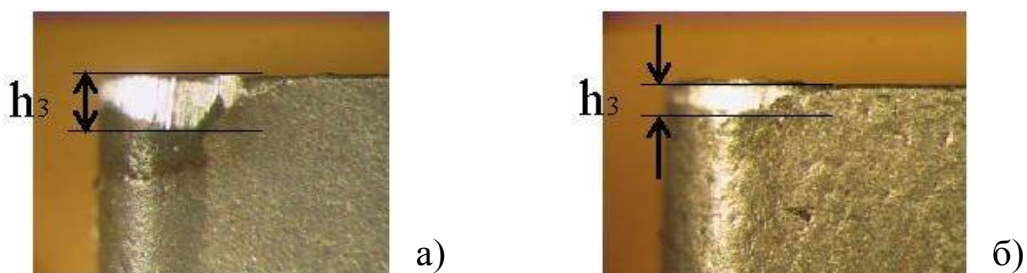


Рисунок 4.7 – Характер зношування контактної площадки задньої поверхні твердосплавних пластини ріжучого інструменту (IC3028) при точінні сталі 40X ($v = 150 \text{ м/хв}; s = 0,2 \text{ мм/об}; t = 1 \text{ мм}$):
а – суцільне покриття; б – локальне диффузионное покриття

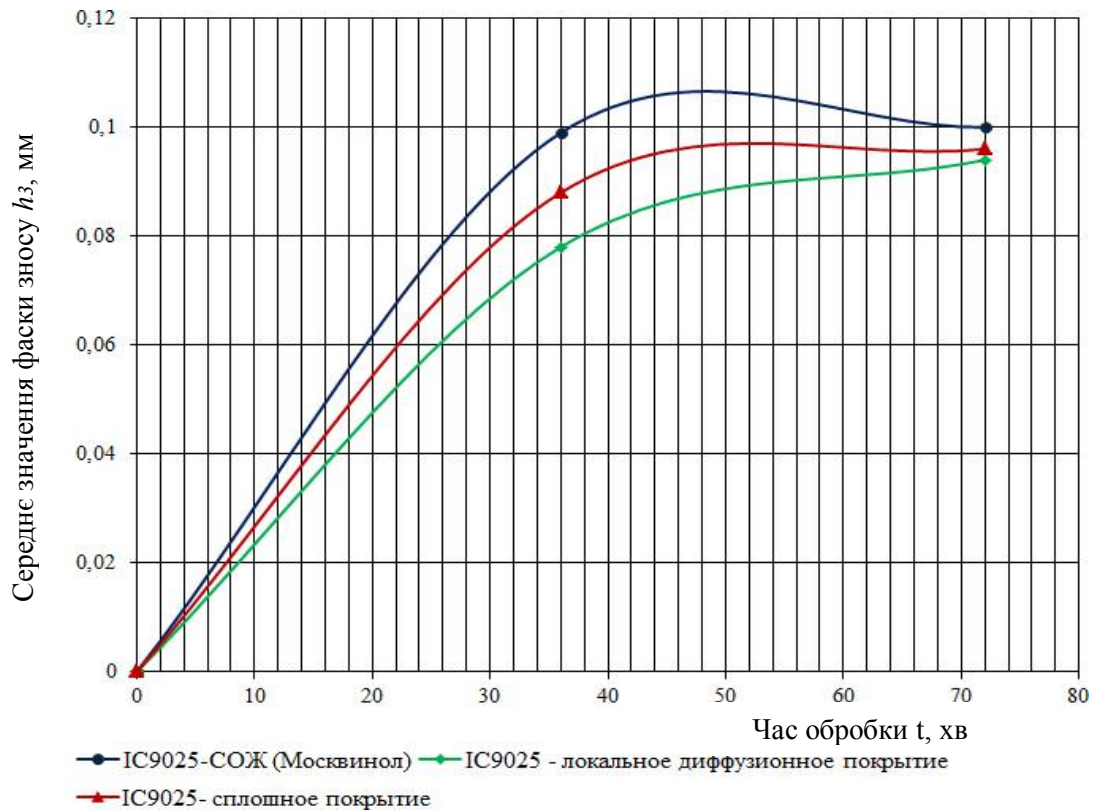


Рисунок 4.8 – Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$, отримані при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) твердосплавними пластинами IC9025: $v = 190$ м/хв; $s = 0,4$ мм/об; $t = 2$ мм

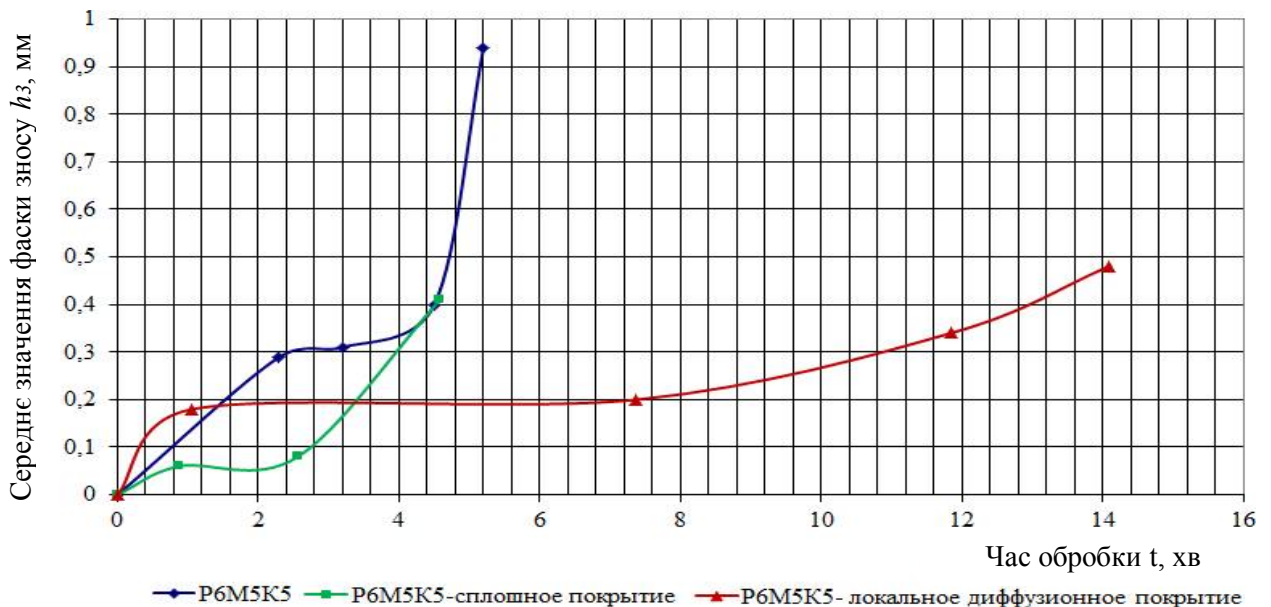


Рисунок 4.9 – Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$, отримані при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) з $v = 80$ м/хв; $s = 0,175$ мм/об; $t = 1,0$ мм різцем зі швидкорізальною пластиною P6M5K5

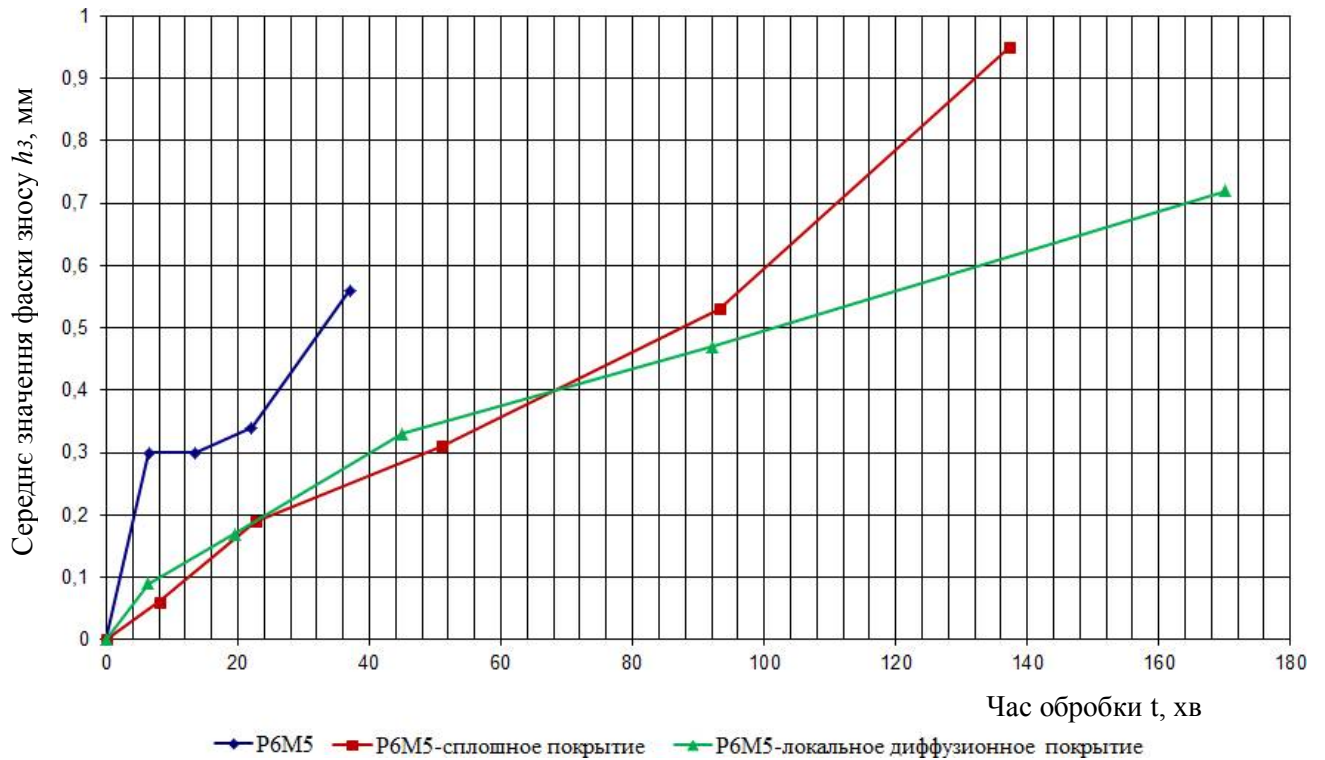


Рисунок 4.10 – Узагальнені криві $\bar{h}_3 = f(\tau)$, отримані при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) з $v = 65$ м/хв; $s = 0,175$ мм/об; $t = 1,0$ мм різцем з швидкорізальною пластиною Р6М5

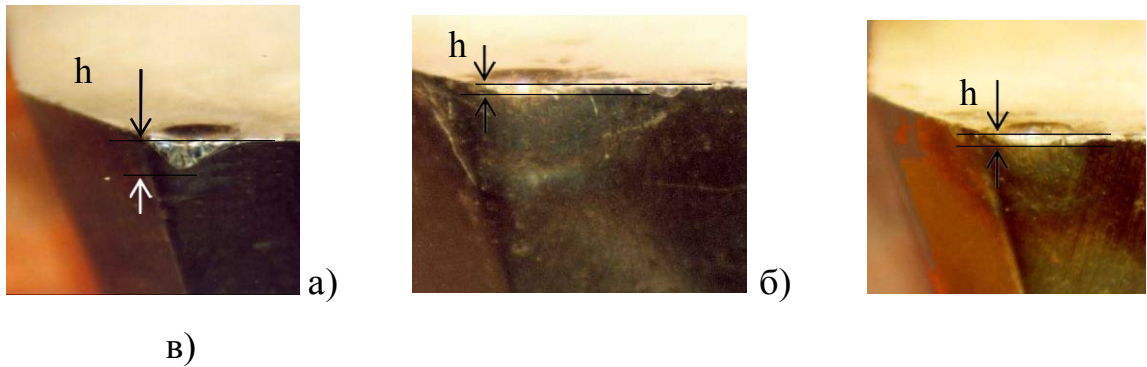


Рисунок 4.11 – Характер зношування контактної площадки задньої поверхні швидкорізальної пластини (Р6М5) при точінні сталі 40X ($v = 65$ м/хв; $s = 0,175$ мм/об; $t = 1,0$ мм):

а – без покриття; б – локальне дифузійне покриття;
в – суцільне покриття

Встановлено, що ріжучий інструмент з локальним дифузійним покриттям, підвищує зносостійкість різців з твердосплавними пластинами IC50M при поперечному точінні, сталі 40X (HB220) в 3-4 рази в порівнянні

з пластинами без покриття і в 1,8-2,5 рази в порівнянні з суцільним покриттям; а зносостійкість різців з твердосплавними пластинами IC3028, IC9015 і IC9025 при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) в 1,5 рази в порівнянні з пластинами із суцільним покриттям з використанням мастильно-охолоджувальної рідини і в 1,8 - 2 рази в порівнянні з пластинами з суцільним покриттям без мастильно-охолоджуючої рідини.

Встановлено, що різучий інструмент з локальним дифузійним покриттям, (див. рисунки 4.9 – 4.10) підвищує зносостійкість різців з швидкорізальними пластинами P6M5, P6M5K5 при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) в 4-5 разів у порівнянні з пластинами без покриття і в 1,5-3 рази в порівнянні з суцільним покриттям.

Локальне дифузійне покриття дозволяє підвищити довговічність і зносостійкість інструменту за рахунок оксидного шару. У процесі механічної обробки при підвищеній температурі оксиди переходять в більш стабільний стан, заповнюючи вакансії в решітці [59, 72, 73]. Відбувається процес відновлення основи після окислення. Підвищений вміст кисню в поверхневому шарі в формі твердого розчину впровадження супроводжується збільшенням питомого обсягу, формуванням залишкових стискаючих напружень.

Таким чином, можна відзначити, що атоми і іони активованого повітря під дією коронного розряду осідають на поверхності інструментального матеріалу і змінюють кристалічну решітку (подрібнення структури, збільшення щільності кристалічної будови, текстурування тонких приповерхневих шарів) [57, 67, 86].

Зазначена вище мінімальна інтенсивність зношування при точінні сталі 40X, пов'язане з двома факторами:

1. Вихідна структура швидкорізальних і твердосплавних пластин з локальним дифузійним покриттям володіє підвищеною опірністю зношування внаслідок зміцнення поверхні.

2. Енергетичний вплив процесу різання на контактній площадці інструменту з локальним дифузійним покриттям істотно нижче відповідного впливу на контактні площадки інструменту без покриття.

3. Тому для ріжучого інструменту з локальним дифузійним покриттям знижується рівень термомеханічного впливу на ріжучий інструмент. Це призводить до своєрідного додаткового зміцнення структури інструментального матеріалу.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

Всі дослідницькі роботи, представлені в даній роботі, проводилися в металографічних лабораторіях. У зв'язку з цим необхідно передбачити створення сприятливих умов для проведення експериментів на робочому місці.

Створення комфортних метеоумов. Мікроклімат на робочому місці в приміщенні лабораторії нормується з урахуванням температури повітря, його відносної вологості і швидкості руху. Основним показником є температура; вологість і вентиляція - супутні показники, що підсилюють її дію. Рекомендується періодично коригувати параметри системи опалення з урахуванням пори року [74]. Регулювання повітряного середовища здійснюється за допомогою вентиляції. Для зменшення рухливості повітря усуваються можливі причини виникнення протягів (відкриті кватирки, зазори між рамами тощо.).

Умови освітлення. Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і працездатності очей. Для створення природного освітлення в приміщенні використовують світлові прорізи в стінах (вікна). Електричне освітлення необхідно для проведення робіт в темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення. У якості штучних джерел світла рекомендується використовувати лампи розжарювання і люмінесцентні лампи. Приймаємо освітлення двох видів: робоче (для проведення робіт в звичайних умовах) і аварійне (для тимчасового продовження робіт або евакуації працюючих при раптовому відключенні робочого освітлення) [74, 75]. Аварійне освітлення передбачається з незалежним джерелом живлення або при автоматичному перемиканні на нього у випадку аварії.

Захист від шуму. При проведенні металографічних досліджень використовується різне обладнання (шліфувальні і полірувальні верстати,

електронний мікроскоп), експлуатація якого супроводжується шумом. Шум викликає зміни в нервовій системі, впливає на психіку людини, серцево-судинну систему, погіршує сон [74 – 77]. Робота в умовах постійного шуму може викликати головний біль, запаморочення, ослаблення уваги. Шум є причиною швидкого розвитку втоми і зниження працездатності. Встановлений в лабораторії рівень звукового тиску при частоті 1000 Гц складає 60 дБ - при шумі, що виникає всередині приміщення, і 45 дБ - при шумі, проникаючому ззовні [76]. Для захисту від шумових впливів застосовують звукоізолюючі огорожі установок, які відображають більшу частину світлової енергії, що падає на них. Наприклад, верстати розташовуються в місцях, відгороджених глухими перегородками від решти лабораторії. Також для зниження шуму агрегатів використовують звукоізолюючі кожухи, в які укладають їх шумливі вузли. Люди, які безпосередньо працюють біля верстатів, повинні використовувати спеціальні вкладиші, типу беруші.

Захист від шкідливих речовин і пилу. При проведенні дослідницьких робіт виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що застосовуються в роботі. Всі забруднюючі повітря речовини надають шкідливої дії, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину; але навіть і в менших кількостях вони шкідливі, якщо знаходяться в організмі в незвичайних концентраціях або станах. Також при роботі може виникнути і безпосередній контакт зі шкідливими речовинами. При шліфуванні і поліруванні зразків повітря забруднюється металевим пилом. У зв'язку з багатокомпонентним складом досліджуваної сталі забруднення повітря може викликати різні реакції. Ряд металів (хром в даній сталі) може привести до алергічних захворювань - бронхіальна астма, ураження шкіри, очей, носа тощо [76 – 77]. Багато металу, в тому числі, залізо, ванадій, молібден, кремній, марганець, а також фосфор є біологічними мікроелементами, що знаходяться в крові, печінці, м'язах в дуже невеликих кількостях (10^{-3} - $10^{-2}\%$) [77]. Недолік або надлишок мікроелементів у порівнянні з нормальним вмістом призводить до порушень тих чи інших функцій

організму. Для запобігання розповсюдження пилу дослідна лабораторія розташовується в окремому приміщенні, ізольованому дверима від сусідніх робочих місць. Також передбачене регулярне вологе прибирання для видалення осілих частинок пилу. При проведенні робіт виникає необхідність в застосуванні хімічних сполук різної небезпеки, зокрема для травлення зразків (трихлористе залізо, пікринова кислота). Для захисту від шкідливих випарів передбачена місцева витяжна вентиляція, призначена для видалення забрудненого повітря безпосередньо від джерела утворення виділень. Даний вид вентиляції представлений в лабораторіях у вигляді укриттів і витяжних шаф. Для очищення повітря від шкідливих виділень і продуктів дихання людей передбачена загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція, повітря для якої забирається з чистої зони. Додатково використовуються засоби індивідуального захисту. Для захисту рук при роботі з травителями застосовують кислототривкі рукавички, які повинні тісно прилягати до шкіри.

Захист від електричного струму. Причинами ураження електричним струмом є зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і проводами; дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена; дотик струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції; дотик до металевих частин обладнання, випадково опинилися під напругою [74 – 77]. Небезпека електричних поразок створює працююче від мережі обладнання, освітлювальні прилади і електрична проводка. Дія електричного струму на організм може викликати різні електричні травми (електричний опік, металізацію шкіри, електричний знак та ін.), тому передбачають заходи захисту від ураження електричним струмом. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. Для захисту від дотику здійснюють недоступне розташування струмоведучих частин (на висоті, під підлогою або приховано в стінах). Незахищені струмоведучі частини, до яких можливий дотик людей надійно захищають. Застосовувані проводи та кабелі повинні відповідати умовам експлуатації обладнання. Для виключення мережі при короткому замиканні використовують швидкодіючий релейний захист і

вимикачі, настановні автомати і плавкі запобіжники. Для захисту працюючого в разі дотику до металевих частин електричної установки, випадково опинилися під напругою, застосовують захисне заземлення.

Захист від електромагнітних випромінювань. Виникаючі при використанні струмів високої частоти електромагнітні поля різних частотних діапазонів представляють певну професійну шкідливість, тому необхідно вживати заходів щодо захисту від їх впливу на організм. Надійним методом захисту є екранування [75]. Металеві частини установок і систем водоохолодження заземляють, щоб не допустити ураження струмом. Проводи, кабелі та інші струмопровідні частини огорожують. Повинна бути виключена можливість їх нагріву. Передбачають пристрої (рубильники, вимикачі), що забезпечують відключення від мережі. Обов'язкова загальна вентиляція приміщень (з витяжкою з верхньої зони приміщення в робочу зону). Приміщення високочастотних установок забороняється захищувати металевими предметами. Повинні бути дотримані вимоги електробезпеки.

Захист від пожежі. Пожежі становлять значну небезпеку, так як заподіюють великі пошкодження і матеріальний збиток, тому запобігання пожеж є важливим завданням. Для зменшення небезпеки виникнення і поширення пожеж велике значення має раціональне пристосування і розташування лабораторій і виходів з них [77]. Обов'язкова наявність вентиляції, так як її відсутність може стати причиною задимлення приміщень і ускладнює боротьбу з пожежею. У вентиляційних пристроях не повинен накопичуватися пил; швидкість руху повітря повинна бути такою, щоб зважені в повітрі частки не осідали. Обов'язкова наявність повідомлюючої пожежної сигналізації в будівлі. Кожна лабораторія повинна бути оснащена вогнегасником для усунення пожежі, що починається. У будівлі забезпечують можливість швидкої безпечної евакуації людей у разі виникнення загоряння. З коридору рекомендується проектувати, як правило, не менше двох евакуаційних виходів. Пожежну небезпеку можуть представляти електричні пристрої в разі перевантаження або короткого замикання. Для запобігання

цього необхідні: правильний монтаж і експлуатація мереж і агрегатів, дотримання правил їх експлуатації.

5.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету [74 – 77].

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках [76].

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також [77]:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути

[76]:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;
- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі [77]:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю - покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

5.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння [74 – 77].

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром

захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

5.3 Вимоги охорони праці під час роботи

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути [76, 77]:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захаращувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220V електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захащували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

5.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займисті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

5.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій [75].

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі [75, 76]:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна проблема підвищення довговічності різального інструменту в умовах автоматизованого виробництва на основі застосування локального дифузійного покриття.

1. Розроблено концепцію формування локального дифузійного покриття на різучі інструменти.

2. Розроблено теоретичну модель зразка з локальним покриттям, що дозволяє, з точки зору концепції двумежності («суцільне покриття – повна відсутність покриття»), оцінювати вплив композиції з областей з покриттям і без покриття, що утворюють комірчасту структуру на модуль пружності і коефіцієнт Пуассона.

Показано, що використання локальності призводить до зменшення ефективного значення модуля Юнга зразка порівняно зі зразком із суцільним покриттям, що призводить до поліпшення його пластичних властивостей, що сприяють релаксації напружень. Також показано, що характер впливу локальності покриття на властивості міцності плоского зразка при розтягуванні, в рамках зроблених ідеалізацій і припущень, повністю визначається впливом на властивості міцності однієї елементарної комірки.

Встановлено, що локальність покриття призводить до збільшення його довговічності за рахунок зниження розтягуючих напруг в областях з покриттям.

3. Розроблено основи технології одержання локального дифузійного покриття для підвищення довговічності різального інструменту.

4. Розроблено математичну модель процесу нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент та визначені оптимальні фактори, що збільшують довговічність в умовах експлуатації і мінімізують інтенсивність зношування.

5. Показано, що розроблена технологія нанесення локального дифузійного покриття на різальний інструмент дозволяє:

– підвищити зносостійкість різців з швидкорізальними пластинами P6M5, P6M5K5 при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) в 4-5 разів у порівнянні з пластинами без покриття і в 1,5-3 рази в порівнянні з суцільним покриттям;

– підвищити зносостійкість різців з твердосплавними пластинами IC50M при поперечному точінні сталі 40X (HB220) в 3-4 рази в порівнянні з пластинами без покриття і в 1,8-2,5 рази в порівнянні з суцільним покриттям;

– підвищити зносостійкість різців з твердосплавними пластинами IC3028, IC9015 і IC9025 при поздовжньому точінні сталі 40X (HB220) в 1,5 рази в порівнянні з пластинами із суцільним покриттям з використанням мастильно-охолоджувальної рідини і в 1,8-2 рази в порівнянні з пластинами із суцільним покриттям;

Механічні випробування показали, що розроблена технологія нанесення локального дифузійного покриття дозволяє збільшити тривалу пластичність і підвищити міцність від втоми на 30 – 50% деталей з титанових сплавів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 330 с.
2. Чекалова, Е.А. Интенсификация обработки: учебное пособие / Е.А. Чекалова. – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2007. – 127 п.с. Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений.
3. Горелов, В.А. Исследование влияния округления режущей кромки на температуры и силы резания при точении титановых сплавов / В.А. Горелов, В.С. Кушнер // Резание и инструмент в технологических системах: меж. науч.- тех. сборник. – Харьков, 2003. – С. 43 – 46.
4. Горелов, В.А. Влияние условий термомеханического нагружения на напряжения и деформации режущего лезвия / В.А. Горелов, В.С. Кушнер // Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – №8. – С. 51 – 53.
5. Васин, С.А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
6. Горелов, В.А. Термомеханический анализ обработки резанием жаропрочных сплавов / В.А. Горелов // Омский научный вестник, 2006. – №10. – С. 24 – 28.
7. Верещака, А.С. Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дис. д-ра тех. наук: 05.03.01/ Верещака Анатолий Степанович. – М., 1986. – 520 с.
8. Григорьев, С.Н. Повышение работоспособности инструмента из быстрорежущей стали путем КПО: дис. канд. тех. наук: 05.03.01/ Григорьев Сергей Николаевич. – М., 1988. – 188 с.

9. Касьянов, С.В. Исследование режущих свойств и разработка путей дальнейшего развития инструментов с износостойкими покрытиями: дис. канд. тех. наук: 05.03.01/ Касьянов Станислав Вячеславович – М., 1979. – 241 с.
10. Синопальников, В.А. Затупление быстрорежущего инструмента и способы повышения его работоспособности / В.А. Синопальников // Материалы семинара. Обработка конструкционных материалов резанием с применением СОЖ. – М.: МДНТП, 1978. – С. 62 – 67.
11. Хае́т, Л.Г. Прочность режущего инструмента / Л.Г. Хае́т. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.
12. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
13. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник /И. Артингер. – М.: Metallургия, 1982. – 312 с.
14. Бетанели, А.И. Прочность и надежность режущего инструмента /. А.И. Бетанели. – Саброте Сакартвело. – Тбилиси: 1973. – 304 с.
15. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями /А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 190 с.
16. Кабалдин, Ю.Г. Структурно энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 12. – С. 62 – 68.
17. Кузьменко, Ю.Н. Повышение качества режущего инструмента из быстрорежущей стали / Ю.Н. Кузьменко, В.М. Рябикина и др. // Бюллетень. ЦНИИЧМ. Черметинформаця. – 1987. – №17. – С. 12 – 24.
18. Anschutr, E. Fortschritte in der spanenden Fertigngstechnik / E. Anschutr // Tr fur metal bearbeitung. – 1988. – Vol. 82. – №3. – p.7 – 12.
19. Внуков, Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков. – Киев: Изд-во «Техника», 1992. – 144 с.

20. Остафьев, В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.

21. Чекалова, Е.А. Разработка концепции, оборудование и технология комбинированной ионно-плазменной обработки режущего инструмента / Е.А. Чекалова, А.С. Верещака, Л.Г. Дюбнер // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 96» «Высокие технологии в машиностроении». – Харьков. ХГПУ. – 1996. – С. 177 – 186.

22. Чекалова, Е.А. Основные аспекты применения совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями / Е.А. Чекалова, А.С. Верещака, Ф. Лират, Л. Дюбнер // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер-98» «Высокие технологии в машиностроении». – Харьков. ХГПУ. – 1998. – С. 21 – 24.

23. Чекалова, Е.А. Повышение эффективности сверл из быстрорежущей стали путем комбинированной ионно-плазменной обработки / Е.А. Чекалова, А.С. Верещака // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 2000» «Резание и инструмент в технологических системах». – Харьков. ХГПУ. – 2000. – С. 250 – 253.

24. Чекалова, Е.А. Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод повышения эффективности инструмента из быстрорежущей стали / Е.А. Чекалова // Сб. трудов научного симпозиума «Интерпартнер – 2001». – Харьков. НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 223 – 227.

25. Чекалова, Е.А. Разработка методики повышения эффективности сверл из быстрорежущей стали с покрытием / Е.А. Чекалова // «IV международный конгресс» «Конструкторско-технологическая информатика 2000». – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – 2000. – С. 247 – 249.

26. Чекалова, Е.А. Азотирование в плазме несамостоятельного газового разряда – метод улучшения экологии и повышение эффективности инструмента из быстрорежущей стали / Е.А. Чекалова // Сб. трудов конференции. «Международная научно-практическая конференция 2001» – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – 2001. – С. 798 – 802.

27. Чекалова, Е.А. Технологические процессы электрофизических и электрохимических методов обработки: учебное пособие / Е.А. Чекалова. – М.: Изд-во ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2007. – 204 с.

28. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология в 7 кн.: 6 кн. Основы лазерного термоупрочнения / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.

29. Чекалова, Е.А. Повышение эффективности процесса ионного азотирования инструмента из быстрорежущей стали / Е.А. Чекалова // «II Международная конференция» «Прогрессивная техника и технология – 2001» – Киев. Севастополь. – 2001. – С. 78 – 80.

30. Внуков, Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования условий их трения с обрабатываемым материалом и реализации новых технологических возможностей: дис. д-ра тех. наук: 05.03.01/ Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 301 с.

31. Подураев, В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В. Н. Подураев, А. А. Барзов, В. А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 54 с.

32. Подураев, В. Н. Стойкость инструмента при прерывистом резании / В. Н. Подураев, В. М. Ярославцев // Станки и инструмент. – 1969. – №10. – С. 25–28.

33. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 406 с.

34. Грановский, Г. И. О методике измерения и критерии износа режущих инструментов / Г. И Грановский // Вестник машиностроения. 1963. – № 9. – С. 45 – 51.

35. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник для машиностроения и приборостроения специализированных вузах / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304с.

36. Astakhov, V. The assessment of cutting tool wear / V Astakhov // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2004. – № 44. – p. 637 – 647.

37. Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
38. Макаров, А. Д. Методика ускоренных стойкостных испытаний инструмента при резании / А. Д. Макаров // Труды Рыбинского авиационно-технического института. 1975. – № 3. – С. 178-183.
39. Кондратов, А. С. Параметры системы СПИД и технологические условия максимальной технико-экономической производительности обработки деталей на станках токарной группы / А. С. Кондратов // Методические материалы НИАТ. 1981. – 48 с.
40. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский –2-е. изд. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
41. Постнов, В. В. Процессы на контактных поверхностях, износ режущего инструмента и свойства обработанной поверхности / В. В. Постнов, Б. У. Шарин, Л. Ш. Шустер. – Свердловск, Изд-во Уральского ун-та, 1988. – 224 с.
42. Шустер, Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л. Ш. Шустер – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.
43. Макаров, А. Д. Оптимизация процесса резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
44. Армарево, И. Обработка металлов резанием / И. Армарево, Р. Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
45. Креймер, Г.С. Прочность твердых сплавов / Г. С. Креймер. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
46. Третьяков, В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
47. Туманов, В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама – кобальт / В. И. Туманов. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.
48. Лошак, М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М.Г. Лошак. – Киев: Наукова думка, 1984. – 328 с.

49. Остафьев, В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
50. Иванова, В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
51. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 535 с.
52. Новиков, И. И. Физическая механика реальных материалов / И. И. Новиков, В. А. Ермишкин. – М.: Наука, 2004. – 310 с.
53. Чекалова, Е. А. Экологически чистая газодинамическая обработка поверхности детали с целью повышения качества / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – №1 (15) т.2. – С. 119 – 123.
54. Барзов, А. А. Эмиссионная технологическая диагностика / А. А. Барзов. – М.: – Машиностроение, 2005. – 384 с.
55. Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 217 с.
56. Арзамасов, Б. Н. Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 230 с.
57. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 304 с.
58. Волков, А. И. Справочник по общей и неорганической химии / А. И. Волков, И. М. Жарский. – Минск: Букмастер, 2013. – 224 с.
59. Рейзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю.П. Рейзер. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
60. Бортник, И. М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И. М. Бортник; под общ. ред. И. П. Верещагина. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 704 с.
61. Зуев, Л.Б. Физика прочности и экспериментальная механика: учебное пособие / Л. Б Зуев, С.А. Баранникова. – Новосибирск: Наука, 2011. – 350 с.

62. Леб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Л. Леб. – М. – Л.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1950. – 211 с.
63. Капцов, Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах / Н. А. Капцов. – М.: Библиотека ХНЦ центральное хранилище основной фонд, 1947. – 157 с.
64. Чекалова, Е. А. Проблемы экологии в металлообрабатывающем производстве / Е. А. Чекалова // Вестник машиностроения. – 2005. – № 1. – С. 69 – 70.
65. Топалова, О.В. Химия окружающей среды: учебное пособие /О.В. Топалова, Л.А. Пимнева. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 160 с.
66. Некрасов, Б.В. Основы общей химии / Б.В. Некрасов. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 1т. 656 с.
67. Чекалова, Е.А. Проблемы экологии в металлообрабатывающем производстве / Е. А. Чекалова // ИТО: инструмент-технология-оборудование. – 2005. – № 4.– С. 30.
68. Чекалова, Е. А. Повышение эффективности быстрорежущего инструмента путем применения, ионизированного воздуха / Е. А. Чекалова, В. И. Власов // Сб. трудов конференции: «Международная конференция «Производство, технология, экология – 2003». – М.:МГТУ «Станкин». – 2003. –С. 666 – 667.
69. Чекалова, Е. А. Повышение эффективности лезвийной обработки применением экологически чистых сред / Е. А. Чекалова, А. С. Верещака, А. К. Кириллов // Сб. трудов научного симпозиума: «Интерпартнер – 97» «Высокие технологии в машиностроении. Тенденции развития, менеджмент, маркетинг». - Харьков. ХГПУ. – 1997. С. 45 – 46.
70. Чекалова, Е. А. Механическая обработка с применением активированного воздуха / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // 77-я Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле – тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» –

М.:МГТУ «МАМИ». – 2012. – С. 27 – 29.

71. Чекалова, Е. А. Механическая обработка с использованием озонированной среды / Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин, В. И. Власов //Технология машиностроения – 2004. – № 5.– С. 22 – 24.

72. Чекалова, Е. А. Технология механической обработки в озонированной среде / Е. А. Чекалова, Н. Н. Ромина // ИТО: инструмент-технология-оборудование. – 2005. – № 9. – С. 21 – 22.

73. Бертеньев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бертеньев, Ю. П. Федыко, А. И. Григоров. – Л.: Машиностроение, 1988. – 215 с.

74. Основи охорони праці: підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. – Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.

75. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халі мовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.

76. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навч. закладів / За ред. М.П. Гандзюка – К.: Каравела, 2004. – 408 с.

77. Голінько В.І. Г 60 Основи охорони праці: підручник / В.І. Голінько; М-во освіти і науки України; Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.