

УДК 658.56:006.85  
УКПШ  
№ держреєстрації 0116U002624  
Інв. №

**Міністерство освіти і науки України**  
Сумський державний університет  
(СумДУ)  
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, тел. (0542) 33-41-08,  
info@sci.sumdu.edu.ua

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Проректор з наукової роботи  
д-р. фіз.-мат. наук, професор

\_\_\_\_\_ А. М. Черноус

**ЗВІТ**  
**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНІ АСПЕКТИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ**  
**В СИСТЕМІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**  
**МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБНИЦТВ**  
(проміжний)

Начальник НДЧ  
канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Д. І. Курбатов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Керівник НДР  
зав. кафедри технології  
машинобудування, верстатів та інструментів  
д-р. техн. наук, професор

В. О. Залога  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

2017

Рукопис закінчено 23 грудня 2017 р.  
Результати роботи розглянуті на вченій раді СумДУ,  
протокол від 28 грудня 2017 р. № 4

**СПИСОК АВТОРІВ**

Керівник НДР, гол. наук. співроб., д-р техн. наук	_____ _____	В. О. Залога (реферат, вступ, висновок, розділи 1, 2, 3, 4)
Відповідальний виконавець, старш. наук. співроб. канд. техн. наук	_____ _____	О. В. Івченко (розділ 1, 2, 3, 4, висновок)
Виконавці: Наук. співроб., д-р техн. наук	_____ _____	Дядюра К. О. (розділ 3)
Наук. співроб., канд. техн. наук	_____ _____	В. О. Іванов (розділи 1, 2)
Наук. співроб., канд. філло. наук	_____ _____	В. О. Дорда (розділи 1, 2)
Мол. наук. співроб.	_____ _____	О. О. Залога (розділ 1, 2, 3, 4)
Інженер, канд. техн. наук	_____ _____	Д. О. Жигилій (розділи 1, 2, 3)
Інженер	_____ _____	К. А. Іванова (розділ 2)

Інженер	_____	Т. Г. Давидова
	_____	(розділ 1)
Інженер	_____	Н. В. Сущенко
	_____	(розділ 1)
Інженер	_____	В. Г. Фортонюк
	_____	(розділ 1)
Лаборант	_____	Р. О. Залога
	_____	(розділ 1, 4)
Лаборант	_____	А. С. Павлова
	_____	(розділ 1, 4)
Лаборант	_____	М. Л. Сивоконь
	_____	(розділ 3)
Лаборант	_____	О. В. Бублик
	_____	(розділ 4)

## РЕФЕРАТ

Звіт: 174 с., 36 рис., 16 табл., 173 джерела.

### ЛЕЗО МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ, ЯКІСТЬ, ІНФОРМАЦІЯ, СИСТЕМИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

Об'єкт дослідження – сукупність процесів з інструментального забезпечення промислових виробництв подвійного призначення.

Предмет дослідження – теорія оцінки зносу, стійкості, ресурсу та продуктивності різальних інструментів з врахуванням невизначеності цих показників в реальних виробничих умовах.

Мета проекту – є розроблення наукових і методологічних основ оцінювання якості (технологічних властивостей) покупних різальних інструментів та прогнозування їх стану безпосередньо у процесі оброблення.

Методи дослідження: теоретичні дослідження базуються на використанні принципів TQM під час управління якістю інформаційної системи інструментальної підготовки виробництва. Для вирішення наукових завдань були використані фундаментальні положення основ теорії управління якістю, теорії ухвалення рішень, кваліметрії, технології машинобудування й інструментального виробництва. Для аналізу, збору та обробки інформації використовувалися методи статистичного аналізу й експертних оцінок.

У ході виконання науково-дослідної роботи на основі логіко-структурного аналізу та опрацювань статистичних даних щодо діяльності машинобудівних підприємств з дрібносерійним та одиничним типом виробництва та за допомогою встановлених принципів і методів формування баз даних створена система техніко-економічних показників якості металорізального інструменту, що купується, з урахуванням невизначеності інформації для конкретних виробничих умов машино-будівного підприємства.

Теоретичні положення доведені до рівня конкретних методик і практичних рекомендацій, які створюють умови для впровадження у виробництво.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	7
1 Дослідження процесу формування контактної зони інструмент – оброблювальна поверхня в умовах адгезії та встановлення залежності якості лез різального інструменту від адгезійної складової сили тертя.....	11
1.1 Загальні положення.....	11
1.2 Показники якості різального інструменту.....	12
1.2 Показники якості змінних багатогранних пластин у процесі їх експлуатації.....	16
1.3 Дослідження патентної інформації стосовно методів оцінювання якості змінних непереточуваних багатогранних пластин .....	20
1.4 Фактори, що впливають на вибір ЗБП .....	27
1.4.1 Табличний метод.....	27
1.4.2 Планування експерименту .....	28
1.4.3 Імітаційне моделювання.....	29
1.5 Методи дослідження контактних явищ у процесі різання.....	29
1.6 Висновок .....	34
2 Методи визначення показників якості, що впливають на прийняття рішень щодо вибору різального інструменту.....	36
2.1 Метод визначення коефіцієнту тертя різального інструменту.....	36
2.2.1 Методика дослідження трибологічної взаємодії інструментального та конструкційного матеріалів .....	36
2.2.2 Математична модель індентора для визначення трибологічних властивостей інструментального та конструкційного матеріалів.....	41
2.2 Дослідження деформаційної складової тертя, методика моделювання .....	46
2.3 Методика дослідження радіусу округлення лез різальних інструментів з використанням інтерферометра .....	49
2.4 Методика дослідження радіусу округлення лез різальних інструментів з	

	6
використанням растрового електронного мікроскопа .....	53
2.3 Висновок .....	58
3 Проведення теоретичних досліджень застосування скінчено-елементного аналізу стосовно прогнозування ресурсу лезового металорізального інструменту для виконання конкретного виробничого завдання .....	59
3.1 Планування проведення експерименту.....	59
3.2 Дослідження сили супротиву ковзанню для різних пластин .....	66
4 Експериментальне дослідження величини зношування різального леза по задній поверхні .....	69
4.1 Висновок .....	70
Висновки .....	71
Перелік джерел посилання .....	73
Додаток А Табличний метод визначення факторів, що впливають на вибір змінних багатограних пластин.....	77

## ВСТУП

Звіт виконувався в рамках НДР № 51.20.01-01.16/18.3Ф.

Проект направлено на створення науково-методологічних основ управління процесом інструментального забезпечення виробництв дрібносерійних багатомономенклатурних підприємств машинобудівного комплексу в умовах використання покупного різального інструменту на основі: проведення входного контролю, що базується на не руйнівному експрес оцінюванні якості лез інструменту й форсованих методів оцінки його стійкості та застосуванні скінчено-елементного аналізу стосовно прогнозування ресурсу інструменту з урахуванням техніко-економічних показників виробництва та виконання вимог виробничого завдання. Реалізації запропонованих науково-методологічних основ стане базою знань для прикладних досліджень з розробки проекту стандарту щодо експрес оцінювання якості лез інструменту, що купується.

**Актуальність теми.** За останні 30–40 років істотно поширилось використання в сучасних конструкціях нових матеріалів з особливими властивостями (жаростійких, зносостійких, підвищеної твердості та ін.), для обробки яких все ширше використовуються в промисловості: нові інструментальні матеріали (порошкові інструментальні сталі, безвольфрамові тверді сплави, кермети, композиційні матеріали, надтверді інструменти з покриттями та ін.); прогресивні технології (швидкісне та надшвидкісне різання, різання з вібраціями, сухе різання, комбіновані види обробки та ін.); прогресивне технологічне обладнання (верстати з ЧПК, багатоцільові верстати (оброблюючі центри), роторні верстати та ін.).

Розвиток машинобудування нерозривно пов'язаний з виробництвом нових матеріалів. У всі часи від використання природних і створених людиною матеріалів залежали міцність, надійність і довговічність виконаних з них деталей, виробів та машин.

Вироби, що випускаються в даний час працюють, як правило, у відносно важких експлуатаційних умовах. Відомі марки сталей і чавунів вже не задовольняють вимогам, що висуваються до різних виробів багатьох галузей техніки. Умови роботи сучасних машин і приладів висувають вимоги міцності і стійкості матеріалів в широкому діапазоні температур від  $-269$  до  $1000$  °C і вище.

Необхідність вирішення найважливіших технічних завдань, пов'язаних з економним витрачанням матеріалів для сучасної техніки, обумовлює подальший розвиток науки про матеріали.

Великими досягненнями в теорії і практиці матеріалознавства ознаменувався ХХ ст.: були створені високоміцні матеріали для деталей та інструментів; розроблені композиційні та керамічні матеріали, триплекс і ситалли; відкриті надпровідники, що застосовуються в енергетиці та інших галузях техніки; створені матеріали за допомогою нанотехнологій; широке застосування одержали полімерні матеріали та ін. Удосконалювалися способи зміцнення деталей пластичним деформуванням, термічної і хіміко-термічною обробкою.

Постійно розробляються і все більше застосовуються різні покриття виробів та інструментів, що дозволяють значно поліпшити якість поверхонь і їх захист від агресивних середовищ. Внаслідок свого складу і технології виготовлення твердосплавні пластини мають великий розкид фізико-хімічних характеристик, що призводить до великого розкиду зносостійкості, який для пластинок однієї марки, але різних партій виготовлення може відрізнятись в десятки разів, в межах однієї партії виготовлення в кілька разів, для різних вершин однієї і тієї ж пластинки – 1,5–3 рази.

Все це призвело до неможливості використання існуючих рекомендацій щодо вибору різального інструменту, інструментального матеріалу та режимів різання для виконання даного технічного завдання. Тому на даний момент є актуальною задача створення методу вибору різального інструменту для виконання заданого технічного завдання, який задовольняв би всім умовам



виготовлення продукції (висока продуктивність, висока якість, економічність тощо) на машинобудівному підприємстві.

Успішне вирішення завдання підвищення ефективності машинобудівного підприємства у сучасних умовах, поряд з пошуком нових технічних рішень, вимагає створення комплексної системи забезпечення його якісними інструментами, у т. ч. різальними, шляхом оптимізації їхніх показників якості як під час проектування й виготовлення інструментів своїми силами, так і під час надійного оцінювання рівня працездатності покупних інструментів та ступеня забезпечення ними найкращих (високопродуктивних) технологічних і експлуатаційних параметрів під час механічної обробки в умовах конкретного виробництва машинобудівної продукції.

Створення нових засобів і методів оцінювання якості різального інструменту та принципів їх нормативного забезпечення є актуальним науково-фундаментальним завданням, вирішення якого дозволяє підвищити продуктивність і надійність технологічної системи, значно скоротити терміни технологічної підготовки виробництва та запуску нових виробів, забезпечити конкурентоспроможність продукції машинобудування.

**Мета та завдання роботи.** Удосконалення методології інструментального забезпечення машинобудівного виробництва в умовах використання покупного металорізального інструменту.

Для досягнення встановленої мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

1. Дослідження процесу формування контактної зони інструмент – оброблювальна поверхня в умовах адгезії та встановлення залежності якості лез різального інструменту від адгезійної складової сили тертя.

2. Дослідження можливості застосування теорії прикладної статистики, а саме методу бутстрепу та статистики інтервальних даних, щодо встановлення законів розподілу показників стійкості металорізального інструменту.

3. Проведення теоретичних досліджень застосування скінчено-елементного аналізу стосовно прогнозування ресурсу лезового металорізального інструменту для виконання конкретного виробничого завдання з урахуванням техніко-економічних показників відповідного підприємства оборонного комплексу.

4. Проведення експериментальних досліджень застосування скінчено-елементного аналізу стосовно прогнозування ресурсу лезового металорізального інструменту для виконання конкретного виробничого завдання з урахуванням техніко-економічних показників відповідного підприємства.

**Об'єкт дослідження** – сукупність процесів з інструментального забезпечення промислових виробництв подвійного призначення..

**Предмет дослідження** – теорія оцінки зносу, стійкості, ресурсу та продуктивності різальних інструментів з врахуванням невизначеності цих показників в реальних виробничих умовах.

# **1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КОНТАКТНОЇ ЗОНИ ІНСТРУМЕНТ – ОБРОБЛЮВАЛЬНА ПОВЕРХНЯ В УМОВАХ АДГЕЗІЇ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЯКОСТІ ЛЕЗ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ВІД АДГЕЗІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ СИЛИ ТЕРТЯ**

## **1.1 Загальні положення**

Відомо, що на сучасному етапі розвитку промислового виробництва у зв'язку з суттєвим збільшенням номенклатури виробів та зменшенням їх кількості у партіях, що замовляються, стає нераціональним виготовлення різальних інструментів й інструментального оснащення «своїми» силами, у результаті чого суттєво зросла питома вага покупних інструментів та оснащення, виготовлених спеціалізованими виробництвами (фірмами). Створення і виготовлення новітніх конкурентоспроможних зразків продукції машинобудівного виробництва, у тому числі оборонного комплексу України, постійно вимагає вирішення проблеми вибору як інструментів, так і їх постачальників, оскільки на цьому ринку представлені десятки торгівельних марок та дистриб'юторів, а також постійно розробляються і все більше застосовуються різні покриття виробів та інструментів, що дозволяють значно поліпшити якість поверхонь і їх працездатність. Крім того, відомо [1], що внаслідок свого специфічного складу і технології виготовлення (порошкова металургія) твердосплавні пластини мають досить великий розкид фізико-хімічних характеристик, що призводить до великого розкиду зносостійкості, який для пластинок однієї марки, але різних партій виготовлення може відрізнятись в десятки разів, і навіть в межах однієї партії виготовлення – в кілька разів.

Все це часто призводить до майже неможливого використання існуючих рекомендацій щодо вибору інструментального матеріалу для різального інструменту та режимів різання для виконання конкретного (заданого) технічного завдання. Тому на даний момент актуальною є задача створення експромт – методу оцінювання різальних властивостей інструменту у відповідності з заданим

технічним завданням, і прийняття управлінського рішення щодо придбання найкращого (раціонального) із можливих (запропонованих) варіантів на ринку, такого різального інструменту, який би задовольняв на відповідному машинобудівному підприємстві всім умовам виготовлення продукції: задана якість продукції, висока продуктивність, економічність тощо.

Таким чином, успішне вирішення завдання підвищення ефективності машинобудівного підприємства у сучасних умовах, поряд з пошуком нових технічних рішень, вимагає створення комплексної системи забезпечення його якісними інструментами, у т. ч. різальними, шляхом оптимізації їхніх показників якості як при проектуванні і виготовленні інструментів своїми силами (у випадку, якщо це на даному виробництві має місце), так і надійного оцінювання рівня працездатності покупних інструментів та ступеня забезпечення ними найкращих (високопродуктивних) технологічних і експлуатаційних параметрів при механічній обробці в умовах конкретного виробництва машинобудівної продукції.

## **1.2 Показники якості різального інструменту**

В роботі основна увага приділяється показникам якості під час вибору інструмента для фінішних (чистових (напівчистових)) процесів механічного оброблення, тобто саме тих технологічних операцій, на яких формуються основні техніко економічні показники конкурентоздатної продукції. Відомо [2], що фінішні (чистові) етапи механічної обробки різанням мають специфічні умови – відносно великі швидкості різання, малі глибини різання та подачі (товщини різання). Такі умови (режими різання) аргументовані необхідністю отримання оброблених поверхонь деталей з параметрами відносно високої точності та шорсткості. Очевидно, що при роботі на фінішних операціях інструмент не буде відчувати високих навантажень (малі глибини різання), тобто у цих умовах суттєво зменшується роль вимоги щодо його міцності. Разом з тим, у зв'язку з характерними для чистових етапів механічної обробки відносно великими швидкостями різання та малими товщинами зрізів, забезпечення високої *якості* (працездатності) різального інструменту в значній мірі залежить від його

зносостійкості та гостроти різальної кромки (РК) [2, 3, 4], тобто для фінішних операцій характерним є суттєво зростаюча, можна стверджувати, що вирішальна, роль саме тих параметрів, від яких залежать ці два фактори. Відомо, що на зносостійкість різального інструменту головним чином впливає такий його параметр, як: коефіцієнт тертя [3], а на радіус округлення РК – будова (структура) інструментального матеріалу [4] і конструкція та технологія виготовлення різальної частини інструменту (щодо непереточуваного збірного інструменту – різальних пластин). Таким чином, у даній роботі прийнято, що саме ці параметри будуть у визначальній мірі характеризувати якість різального інструменту.

Якість – це ступінь, з якою сукупність власних характеристик задовольняється вимогами ДСТУ ISO 9000. Якість продукції та послуг організації визначають здатністю задовольняти замовників, а також передбаченим і непередбаченим впливом на відповідні зацікавлені сторони ДСТУ ISO 9000. Наприклад, у відповідності з ДСТУ ISO 9000 якість різального інструменту характеризується сукупністю властивостей, що обумовлюють придатність інструменту до процесу різання із забезпеченням заданих форм, розмірів і якості поверхонь деталі при певній продуктивності праці, прийнятних витратах трудових, матеріальних і грошових коштів тощо.

Збірний різальний інструмент відноситься до того класу продукції, яка після часткової витрати свого ресурсу може відновлюватися, тобто до групи ремонтованих виробів. Для цієї групи виробів рекомендується оцінка таких основних показників: призначення, як: надійність, ергономічність, естетичність, технологічність, транспортабельність, уніфікація, патентно-правова та екологічна безпека [5, 6].

Щодо інструменту номенклатура умовно простих властивостей вибирається з урахуванням призначення і умов його використання, а також вимог повноти, операційності, декомпозованості, відновлювальності, мінімальності і вимірюваності.

У ряді випадків структуру властивостей має сенс впорядкувати у вигляді дерева. Така впорядкована схема, яка містить тільки найважливіші властивості, наприклад, для збірного інструменту представлена на рис. 1.1.

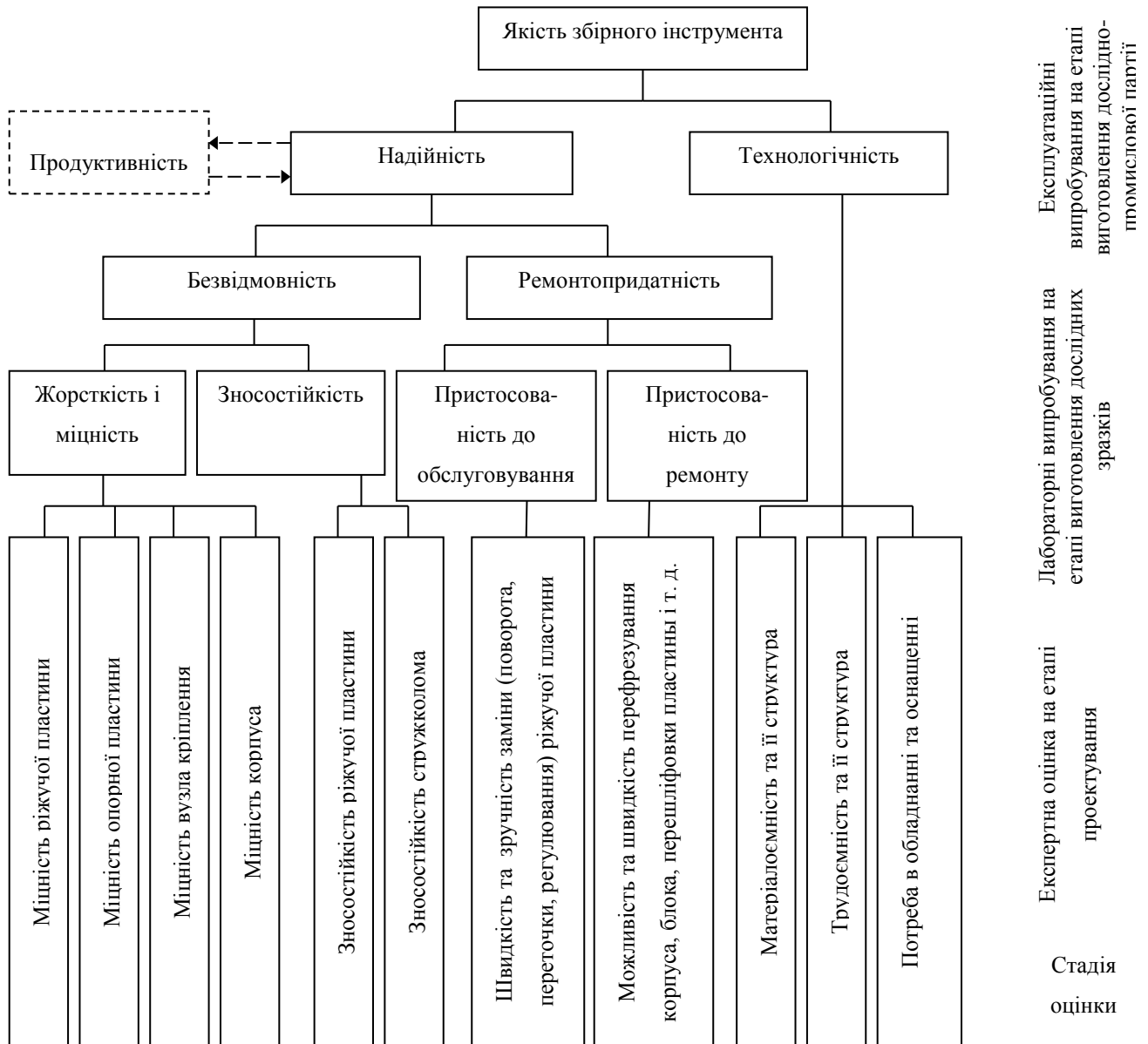


Рисунок 1.1 – Дерево властивостей, які складають якість збірного інструменту [7]

Треба відмітити, що властивості призначення і надійності тісно пов'язані між собою через продуктивність. Щодо інструменту, підвищення продуктивності (при інших рівних умовах) призводить, як правило, до зниження його надійності. Продуктивність процесу різання (продуктивність по основному часу), безвідмовність і довговічність інструменту обумовлені одними і тими ж умовно простими властивостями: міцність і зносостійкість інструменту. У зв'язку з цим

можливі два способи аналізу якості конструкції інструменту на стадії проектування: по продуктивності при постійній надійності і за показниками надійності при одній і тій же продуктивності. За умови дотримання вимоги операційності для аналізу якості інструменту в більшості випадків доцільно використовувати другий спосіб оцінки.

Властивості універсальності і гнучкості впливають на ремонтпридатність, обумовлюючи необхідність і час заміни інструменту або його елементів при зміні відповідних технологічних переходів (операцій) обробки. Ергономічні та естетичні властивості також багато в чому визначають пристосованість інструменту до зміни (заміни) і налагодження. Тому в трансформованій схемі для оцінки якості інструменту на стадії його проектування зазначені властивості враховуються в ремонтпридатності. Властивості уніфікації інструменту значно впливають на технологічність. Тому в трансформованій схемі властивості уніфікації враховані в трудомісткості.

Деякі властивості, передбачені загальною методикою оцінки якості продукції, з метою зменшення числа врахованих властивостей можна представити як обмежувальні. Наприклад, для різальних інструментів такою обмежувальною властивістю може бути безпека, так як саме та конструкція інструменту, наприклад, різця, що не забезпечує при утворенні зливної стружки необхідного її дроблення, і створює небезпеку для здоров'я верстатника, а на деяких, наприклад, важких верстатах навіть і загрозу його життю, не може бути позитивно оцінена навіть за будь-яких інших переваг.

Серійний випуск інструменту є майже неможливим і без його патентного захисту, який також можна також вважати обмежувальною властивістю.

Оскільки в даній роботі йдеться про чистові етапи обробки, при яких мають місце розглянуті вище специфічні режими різання, можна прийняти, що саме зносостійкість і гострота різальної кромки (малі  $\rho$ ) можуть виступати у процесі оцінювання якості збірного твердосплавного різального інструменту (чому присвячена дана робота) основними критеріями, що будуть у визначальній мірі

впливати на подальший вибір різальних пластин для покупних твердосплавних інструментів.

## **1.2 Показники якості змінних багатогранних пластин у процесі їх експлуатації**

Вимоги до якості будь-якого виду продукції, у т. ч. й елементів різальних інструментів, є об'єктом постійної уваги, як споживачів продукції, так і її виробників (розробників і виробників). Як вже було зазначено вище, показники надійності продукції є одними з ключових елементів, що характеризують її якість.

Відомо [8], що під надійністю розуміють властивість виробу зберігати в установлених межах часу значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання, транспортування та інших дій. Треба мати на увазі, що надійність виробу є комплексною властивістю виробу, яка в залежності від його призначення і умов експлуатації може включати: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереженість, стійкість роботи, режимну керованість, живучість тощо. Найчастіше при оцінці якості технічних виробів визначають значення таких одиничних показників властивостей, як: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість.

Системне вивчення функціонування інструменту в реальних виробничих умовах з неминучістю призводить до розуміння того, що всі явища, пов'язані з процесами різання металів є стохастичними [9]. Тому центральне місце в теорії надійності різального інструменту займає місце вивчення законів розподілу стійкості різального інструменту у відповідності з прийнятими умовами його експлуатації [10, 11].

Аналіз різних джерел, де розглядається стійкість різального інструменту, показує, що під терміном «стійкість», як правило, мають на увазі два терміни, які мають більш вузьке смислове значення: середній період стійкості і повний період стійкості різального інструменту.



Середній період стійкості різального інструменту – математичне очікування значення періоду стійкості різального інструменту до його відмови].

У даному випадку, під відмовою розуміється або неможливість подальшого здійснення різання, або досягнення граничного значення одного з критеріїв (показників процесу різання), що можуть визначати відносну непрацездатність відповідної різальної кромки (леза інструменту). Критерій відмови різального інструменту (леза) визначається залежно від вимог до обробки при виконанні конкретної технологічної операції [3]. Наприклад, на операціях остаточної (фінішної) обробки різальним інструментом, де основними вимогами до обробки можуть бути допуски розмірів, форми та розташування оброблених поверхонь, критерієм відмови є їх гранично допустиме значення. Дуже часто у якості критерію відмови лез різального інструменту на операціях фінішної обробки приймають також критерій технологічного зношування [3], під яким розуміють такий, при якому роботу інструменту припиняють за технологічними обмеженнями: різке збільшення шорсткості обробленої поверхні, виникнення вібрацій, збільшення сил різання, досягнення гранично допустимого зносу тощо.

Повний період стійкості різального інструменту – сума періодів стійкості різального інструменту від початку різання новим інструментом до досягнення граничного стану [2]. Повний період стійкості з достатньою точністю визначають за формулою

$$T_{\Sigma} = \kappa T ,$$

де  $T$  – період стійкості, хв – напрацювання однієї різальної кромки до її відмови (затуплення);  $\kappa$  для непереточуваного інструменту, наприклад, твердосплавної пластини, – число різальних кромки (вершин, граней).

Таким чином, у загальному випадку стійкість є властивість інструменту виконувати задані функції, зберігаючи експлуатаційні показники у заданих межах протягом певного проміжку часу або напрацювання.

Зіставлення наведених визначень стійкості з термінологією, запропонованою [6], дозволяє зробити висновок, що визначення середнього періоду стійкості відповідає характеристика надійності – *напрацювання на відмову*, а терміну повний період стійкості – *ресурс працездатності*. Залежно від того, яке з визначень стійкості приймається, інструмент можна розглядати як відновлювальну систему, тобто систему з відновленням, або як систему з резервуванням.

В результаті багато численних досліджень [8, 9, 13 та ін.] розсіювання стійкості інструменту, вибору законів розподілу і їх трансформації, під впливом різних факторів в якості одного з головних показників надійності різального інструменту було запропоновано використовувати коефіцієнт варіації стійкості, який є обернено пропорційним числу періодів стійкості до руйнування інструменту.

В роботах О. В. Івченка [13, 14], Г. П. Клименко [16] велика увага приділена таким показником безвідмовності інструменту, як гамма-відсоткова стійкість. У цих роботах показано, що без його використання не можна правильно оцінити якість інструменту: з одного боку він більш чутливіше, ніж середня стійкість, реагує на похибки виготовлення, а з іншого – на заходи з удосконалення матеріалу, конструкції або технології виготовлення інструменту.

Для визначення номенклатури показників надійності змінних багатогранних пластин – ЗБП, скористаємося методикою, яка приведена в «Нормування показників надійності технічних засобів» [17], у відповідності з якою за основними характерними ознаками експлуатації ЗБП можуть бути розбиті на чотири групи призначення:

- група 1 – ЗБП загального призначення, що працюють в умовах значної невизначеності параметрів процесу (чорнова обробка, універсальне устаткування і т. п.);
- група 2 – ЗБП, які використовуються в процесах, що мають певні обмеження (автоматизоване виробництво, чистова обробка і т. п.);
- група 3 – ЗБП, які використовуються на операціях чистової обробки;

- група 4 – ЗБП для прецизійної обробки і ЗБП, поломка яких призводить до непридатності заготовки в цілому.

За характером навантаження ЗБП можна розбити на дві експлуатаційні групи:

- група 1 – ЗБП, експлуатовані в широкому діапазоні навантажень;
- група 2 – ЗБП, експлуатовані в вузькому діапазоні навантажень.

До першої групи відносять експлуатований інструмент, оснащений ЗБП загального призначення для роботи, в основному, на універсальному обладнанні. До другої групи відносять спеціальний інструмент, оснащений ЗБП, спроектований для виконання певної операції.

Однак характер навантаження накладає додаткові вимоги на форму, в якій застосовується відповідний нормований показник. Для першої експлуатаційної групи нормовані показники зручно представити у вигляді функції від навантажувальних факторів (параметричний показник):

$$\bar{T}\{T_p; P(T)\} = f(x_1; x_2; \dots, x_n), \quad (1.1)$$

де  $\bar{T}$  - ...;  $T_p$  - ...;  $P(T)$  - ...;  $x_1; x_2; \dots, x_n$  – фактори, що впливають на стійкість інструменту, такі як: швидкість різання, подача, глибина різання.

Для другої експлуатаційної групи нормовані показники надійності доцільно представити у вигляді відповідних стійкісних показників, таких як :зносостійкість пластини або зносостійкість стружколома.

Таким чином, призначення норм стійкості для переважної більшості інструментів може проводитися шляхом побудови функції [12]:

$$T[\text{або } T_p, P(T)] = f(a_1, \dots, a_n; \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n). \quad (1.2)$$

де  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – константи, які визначають шляхом обробки табличних даних нормативів по режимах різання;  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$  - ....

Після попереднього призначення норм надійності треба періодично проводити відповідні коригування з урахуванням технічного вдосконалення. Для

цього будуються залежності значень нормованих показників від часу з подальшою екстраполяцією їх до найближчих контрольних випробувань.

### 1.3 Дослідження патентної інформації стосовно методів оцінювання якості змінних непереточуваних багатограних пластин

В ході роботи над проектом було проведено дослідження патентних баз на предмет інформації щодо методів оцінювання якості ЗБП. Результати пошуків наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати пошуків інформації в патентних базах

	Назва	Джерело	Автор	Сутність методу	Примітки
1	2	3	4	5	6
1	Спосіб випробування різального інструменту на зносостійкість	Патент № 14366	Скібін В. В., Гах В. М., Гузенко В. С., Черномаз В. М.	Винахід відноситься до області обробки матеріалів різанням і може бути використано при випробуваннях різального інструменту. Метою винаходу є розширення діапазону досліджуваних подач і скорочення трудомісткості процесу.	
2	Спосіб контролю якості різального інструменту	Патент № 21776	Остаф'єв Д. В., Остаф'єв С. В.	Винахід відноситься до обробки металів різанням і може бути використано для визначення якості покриття різального інструменту. Як прототип обраний спосіб визначення зносу інструменту, що полягає в тому, що визначається максимальна величина ЕРС різання перехідного процесу, і потім, в процесі різання, знаходять відношення поточного ЕРС	Недоліком способу є низька точність, так як використовується тільки один параметр оцінки - ЕРС різання.

1	2	3	4	5	6
				різання стаціонарного процесу до максимального значення ЕРС різання перехідного процесу.	
3	Спосіб реалізації активного методу вимірювання і корегування зносу інструменту з використанням лазерних приладів на основі інтегрованої системи автоматизації виробництва штампів	Патент № 111088	Кудряшов В. О.	Спосіб реалізації активного методу вимірювання і корегування зносу інструменту з використанням лазерних приладів на основі інтегрованої системи автоматизації виробництва штампів, що полягає у використанні оптичних методів вимірювання та автоматичного управління корегуванням за зоною обробки деталей, який відрізняється тим, що застосовують розроблений вимірювальний канал активного лазерного приладу, що дає можливість візуально представити весь процес вимірювання: від вимірюваної деталі штампа до показань замірів на цифровому індикаторі, а також метрологічної оцінки та корегування зносу інструменту активними лазерними засобами вимірювання.	
4	Пристрій для вимірювання швидкості зносу різального інструмента	Патент № 70582	Демченко М. О., Волобуєва Г. В., Заєць В. С., Шевченко В. В., Заєць С. С., Матвієнко С. М.	Пристрій для вимірювання швидкості зносу різального інструмента містить термопару, що утворюється	До недоліків належить те, що вимірювання зношування інструмента можливо при

1	2	3	4	5	6
				<p>різальним інструментом і оброблюваною деталлю. Державку різального інструмента охоплює магнітний сердечник з обмоткою. Між державкою різального інструмента і магнітним сердечником розміщена ізоляційна прокладка. Підсилювач з'єднаний з обмоткою магнітного сердечника.</p>	<p>обробці деталей з металевих сплавів, які мають властивість проводити електричний струм, а також визначені показники температури при різанні.</p>
5	Спосіб визначення зносу різального інструмента	Патент №75978	Кузьменко А. Г., Стецьків О. П., Сторощук В. А.	<p>Винахід відноситься до області машинобудування і може бути використаний для дослідження на знос пар тертя матеріалу різального інструмента по оброблюваному матеріалу. Відомий метод зворотного обертання шпинделю для дослідження на знос металорізальних різців. Випробування проводиться на токарному верстаті типу ТВ 320. Деталь виконується у вигляді сталеві труби діаметром 46,1мм, товщина стінки 1,05мм. Навантаження на різець виконується не кінематично від подачі супорта, а силове через спеціальний важіль.</p>	<p>Недолік методу, що він не дозволяє проводити дослідження на знос інструменту (паперорізальні ножі, висікальні ножі), коли оброблюваний матеріал є пластичний (папір, шкіра, гума, полімери) і в процесі дослідження не відтворюються тиски, які виникають при різанні.</p>
6	Спосіб контролю якості різального	Патент № 99027	Філон М. Ю., Шевченко В. В.,	Спосіб контролю якості різального	

1	2	3	4	5	6
	інструменту при обробці деталей на верстатах з системою числового програмного керування		Андреев О. О.	інструменту, який включає вимірювання максимальної величини сигналу акустичної емісії в зоні різання при перехідному процесі, який відрізняється тим, що перед обробкою заготовки на ній не потрібно знімати фаску і сигнали вимірюють в двох зонах, а саме додатково вимірюють мінімальну величину сигналу акустичної емісії в зоні різання та інфрачервоного випромінювання із зони сходу стружки при перехідному процесі.	
7	Пристрій контролю стану різального інструменту	Патент №15565	Остаф'єв В. О., Скицюк В. І., Клочко Т. Р.	Відноситься до області верстатобудування і може бути використано для визначення стану свердел в багатопшпіндельних головках при металообробці в умовах автоматизованого виробництва.	Недоліком цього пристрою є необхідність допрацювання конструкції різального інструменту.
8	Метод визначення ударної мікротвердості металів та їх сплавів за котречком	Патент № 110576	Котречко О. О.	Належить до механічних випробувань матеріалів, зокрема до визначення ударної мікротвердості поверхневих шарів металевих виробів після хіміко-термічної обробки, лазерного і плазмового наплавлення, металізації, наклепу тощо.	Недоліком є те, що втиснення піраміди з кутом при вершині $\alpha=136^\circ$ у досліджуваних виріб під час переходу від пружних до пластичних деформацій супроводжується значним

1	2	3	4	5	6
					наклепом металу. При цьому величина наклепу постійно зростає, отримані значення твердості металу перевищують дійсні. а
9	Стенд для контролю якості збірного металорізального інструменту	Патент РФ №2023542	Шустиков А.Д., Азаров В.А., Мышлевский Л.М.	Винахід відноситься до машинобудування, точніше - до обробки металів різанням. Мета винаходу - підвищення надійності роботи стану, розширення діапазону режимів його роботи і можливості роботи як в статичному, так і в динамічному режимах, прискорення обробки експериментальних даних шляхом автоматизації випробувань. При контролі різальна пластина не зношується. Пристрій дозволяє проводити контроль усіх випущених інструментів, зменшується трудомісткість проведення випробувань, не потрібна витрата металу на виготовлення спеціальних зразків і витрата електроенергії на привід обертання заготовки при різанні.	Недоліки - невисока точність контролю якості, відсутність даних про дійсний напрямку і величиною деформації різальної кромки в цьому напрямку, а також неможливість зміни сили, що розвивається навантажувальним пристроєм по заданому закону, що знижує продуктивність, надійність і точність вимірювання, погіршує порівнянність одержуваних результатів і стабільність показань .



1	2	3	4	5	6
10	Спосіб контролю фізико-механічних властивостей виробів	Патент РФ №2138038	Семашко Н.А., Мокрицька Е.Б., Філоненко Сергій Федорович, Мокрицький Б.Я, Вахрушев О.М.	Винахід відноситься до акустичних методів неруйнівного контролю фізико-механічних і експлуатаційних властивостей виробів, переважно виробів з покриттями, в тому числі металорізального інструменту зі зносостійкими покриттями за якістю зчеплення покриття з основою.	
11	Спосіб визначення зносу різального інструменту	Патент РФ №2478929	Григорьев С. М., Козочкін М. П., Філатов В. В., Порватов А. М.	Винахід відноситься до області металообробної промисловості і може бути використано для визначення зносу різального інструменту верстатів з ЧПУ, що функціонують в умовах автоматизованого виробництва. За співвідношенням амплітуд цих сигналів визначають знос різального інструменту. Додатково здійснюють формування додаткового електричного сигналу, пропорційного активної потужності головного приводу верстата. У виділених діапазонах частот сигналів визначають їх ефективні амплітуди.	До основного недоліка відомого з рівня техніки рішення слід віднести недостатню точність визначення зносу різального інструменту в процесі різання через те, що не враховується вплив на знос інструменту локального зміни твердості по перетину заготовки.
12	Пристрій для вимірювання	Патент РФ №2263300	Белолопотков Д.А., Добровинский	Винахід відноситься до електровимірювально	Недоліком даних пристроїв є

1	2	3	4	5	6
	знос різального інструменту		И.Р., Медведик Ю.Т., Чувикин Б.В.	ї техніки і може бути використано для контролю зносу різального інструменту.	неможливість придушення двох некротних частот перешкод і їх гармонік, наприклад, частоти мережі і частоти обертання шпинделя верстата для контролю розмірів деталей віброакустичним методом в машинобудуванні
13	Спосіб визначення стійкісних параметрів рухомого і обертового різального інструменту	Патент РФ №2298455	Кабалдін Ю.Г., Щетинін В. С., Хвостиков О. С.	Винахід відноситься до області обробки матеріалів на верстатах-автоматах і автоматичних лініях. Спосіб включає здійснення різання, зняття з хвильового приймача, встановленого на корпусі шпиндельного вузла, за допомогою п'єзоелектричного датчика сигналу акустичної емісії, формування безперервного сигналу, по якому судять про знос інструменту.	Недолік відомих способів полягає в тому, що відомі способи застосовні для стаціонарного інструменту, нерухомо встановленого на верстаті, що ускладнює або робить неможливим їх застосування для обертового інструменту на верстатах-автоматах і автоматичних лініях.

Можна зробити висновок, що на цей час вже існує досить багато методів оцінювання якості лез різальних інструментів, які ґрунтуються на різноманітних теоріях (теорія акустичної емісії, теплового стану інструменту, НДС леза різального інструменту та ін.) та передбачають проведення великої кількості експериментів або дозволяють моніторити в реальному часі стан різальної кромки. Разом з тим, аналіз показав, що всі відомі на даний час методи або зовсім не можуть бути використані в умовах придбання (закупівлі) різального інструменту, або потребують великих часових, матеріальних та фінансових витрат, що може суттєво знижувати конкурентоспроможність виробництва в цілому.

#### **1.4 Фактори, що впливають на вибір ЗБП**

У якості основних факторів, що впливають на вибір різальних пластин, що пропонуються на ринку відповідності з їхнім призначенням та ціною, необхідно у відповідності із заданими умовами прийняти параметри режиму різання: глибину різання, подачу та швидкість різання. Розглянемо методи визначення цих факторів.

##### **1.4.1 Табличний метод**

Для табличного методу доцільно скористуватися довідником технолога - машинобудівника за редакцією Косілової А. Г. та Мещерякова Р. П. [18], у відповідності з яким глибина різання  $t$  та подача  $S$  обираються в залежності від виду обробки, оброблюваного й інструментального матеріалів та вимог до точності розмірів й шорсткості обробленої поверхні, а швидкість різання  $V$  розраховується за відповідними емпіричними формулами.

Таким чином, вхідним є параметри: одержуваної деталі (матеріал заготовки; шорсткість, точність деталі); геометричні параметри різця (радіус при вершині); а також коефіцієнти, що враховують матеріал заготовки, стан її поверхні, матеріал інструменту; стійкість інструмента та ін.

В якості прикладу розглянемо алгоритм вибору параметрів режиму різання для чистового точіння заготовок із чорних металів (сталі та чавуну) з метою виготовлення деталей з параметрами шорсткості одержуваних поверхонь  $Ra \geq 0,8$  мкм.

Глибина різання  $t$ . Для заданих умов  $t = 0,1 - 0,4$  мм

Подача  $S$ . Обирається в залежності від необхідних параметрів шорсткості одержуваної поверхні та від радіуса при вершині різця по таблиці 1 (Додаток Б).

Швидкість різання  $V$  розраховують за емпіричною формулою:

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v$$

У даній формулі коефіцієнт  $C_v$  і показники ступенів  $x$ ,  $y$ ,  $m$  вибираються за таблицею 6 (Додаток Б). Для одноінструментної обробки приймається середнє значення стійкості  $T$ . Можна прийняти стійкість в межах 30-60 хв [19]. Коефіцієнт  $K_v$  являється добутком коефіцієнтів, враховуючих вплив матеріалу заготовки  $K_{mv}$  (табл.2, Додаток Б), стану поверхні  $K_{pv}$  (табл. 4, Додаток Б), матеріалу інструмента  $K_{iv}$  (табл. 5, Додаток Б).

#### 1.4.2 Планування експерименту

При плануванні експерименту, у якості параметру режиму різання приймаються ті ж глибина різання, подача та швидкість різання, а у якості відгуку (здобутку) – величина площадки зношування пластини по задній поверхні  $h_3$ .

Потім обирається план експерименту. У даному випадку прийнято центральний симетричний ортогональний композиційний план. Для його реалізації потрібно здійснити відповідну низку розрахунків: ядра плану, центральної точки плану, «зоряних точок» плану, плечей «зоряних точок», загальної кількості дослідів в експерименті, константи перетворення.

Після цього, відбувається формування полінома. Спочатку розраховується коефіцієнт полінома, потім оцінюється статистична значимість коефіцієнтів, що характеризують відтворюваність проведених експериментів. У випадку його відтворюваності, можна переходити до наступного пункту – розрахунку коефіцієнтів регресії. Якщо ж дослід не відтворюваний, необхідно обрати інший тип плану експерименту. Після одержання значень коефіцієнтів регресії, можна переходити до оцінки їх значущості за допомогою критерію Стюдента. Після

запису полінома в кодованому вигляді та декодування цього запису, одержується залежність зношування ЗБП по задній поверхні від глибини різання, подачі та швидкості різання, за допомогою якої можна приймати необхідне (можливе) управлінське рішення з точки зору призначення режиму різання.

#### 1.4.3 Імітаційне моделювання

Спочатку проводиться експеримент з визначення адгезійних властивостей інструментального матеріалу. Після цього робиться оцінка наявних даних щодо інструментального матеріалу, та оброблюваного матеріалу. Якщо даних недостатньо, проводяться експерименти з визначення механічних (деформаційних, фрикційних, міцнісних тощо) та фізико-хімічних (температура плавлення, теплопровідність, теплове розширення та ін.) властивостей інструментального та оброблюваного матеріалу. У випадку достатності даних можна переходити до комп'ютерного моделювання процесу різання. Після оцінки отриманих результатів треба проводити натурний експеримент за наведеною у попередньому параграфі методикою планування, що надасть змогу приймати необхідне (можливе) управлінське рішення з точки зору вибору різального інструменту.

### 1.5 Методи дослідження контактних явищ у процесі різання

Загальні уявлення про механіку стружкоутворення при різанні металів можна коротко охарактеризувати схемою, наведеною на рисунку 1.2.

Відомо [20], що процес перетворення зрізаного шару в стружку в загальному випадку являє собою процес спрямованого руйнування матеріалу заготовки лезом шляхом створення напружено-деформованого стану в зрізаному шарі і заготовці, що супроводжується пружними і пластичними деформаціями, утворення тріщин і подальшого руйнування, яке в залежності від стану матеріалу при умовах обробки може бути або в'язким, або крихким [21]. При цьому лезо безпосередньо контактує зі зрізаним шаром, стружкою і заготовкою, що призводить до виникнення контактних процесів на його поверхнях, а в області, розташованій біля різальної кромки, застійної зони, яка за певних умов може перетворитися в наріст.

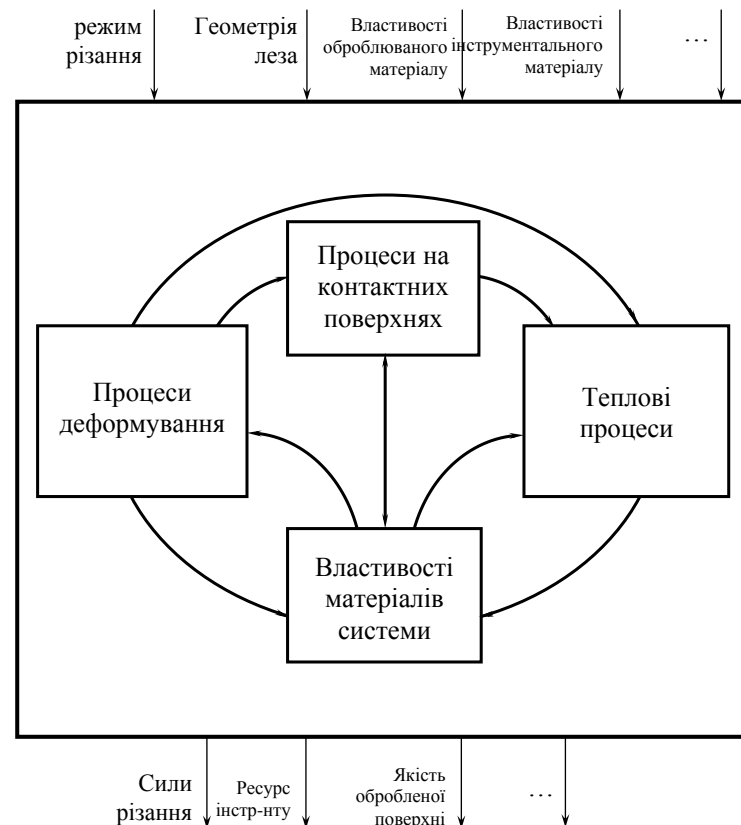


Рисунок 1.2 – Прийнята фізична модель процесів в зоні стружкоутворення

Таким чином, у системі різання при описаних вище процесах відбувається робота, що витрачається на деформування і руйнування матеріалу зрізаного шару при перетворенні його в стружку, і робота, головним чином пов'язана з тертям на контактних поверхнях [22; 23; 24] та ін. У відповідності з першим законом термодинаміки вся робота сил різання  $A_p$  витрачається на збереження енергії пружної деформації  $\Delta U$  (в прирізцевих шарах стружки, поверхневому шарі заготовки, контактних шарах інструменту) і виділення теплоти в системі  $Q$  [25], що приводить до процесів поширення теплоти в системі різання і підпорядковано рівнянню теплопровідності і теплового балансу [26]. Згідно з дослідженнями Г. І. Іванова та П. А. Ребіндера, частка поглиненої енергії пружної деформації  $\Delta U$  в процесі різання при традиційно застосовуваних швидкостях складає 3%, а решта переходить в теплоту, яка виділяється в основному в зонах А, Б, В (рис. 1.3 а), а також по поверхнях контакту інструмента з заготовкою та стружкою (рис. 1.3 б,в).

Навіть найгладкіші металеві поверхні в субмікроскопічному масштабі є шорсткими і при зіткненні контактують своїми виступаючими ділянками. На цих

ділянках локальні тиски стають достатніми для забезпечення пластичної деформації. В результаті цієї пластичної деформації оголюються нові поверхні, метали приходять в безпосередній контакт хімічно чистими поверхнями і між ними встановлюються адгезійні зв'язки.

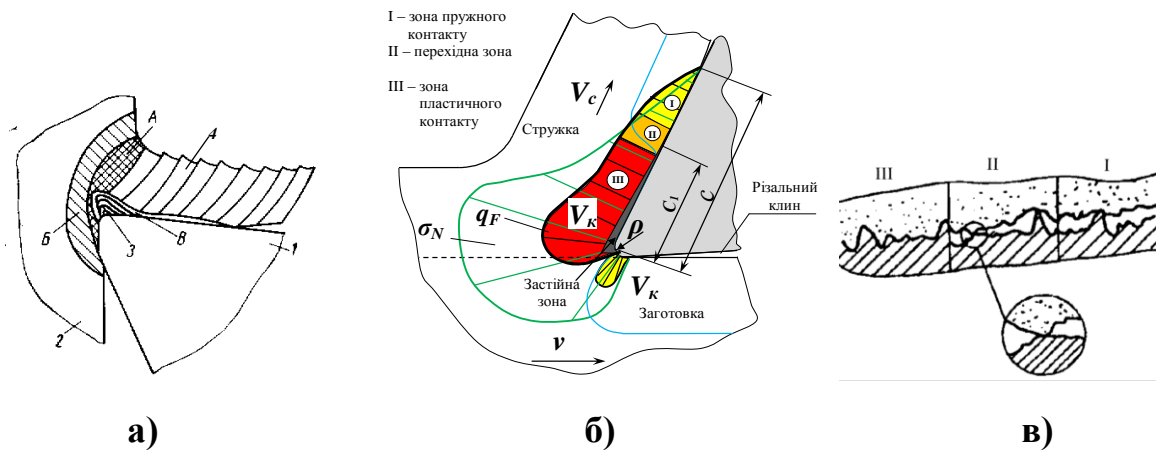


Рисунок 1.3 – Схема (а) зони стружкоутворення при різанні матеріалів (1 – лезо інструменту; 2 – заготовка; 3 – наріст; 4 – стружка) та характерний розподіл контактних напружень  $\sigma_N$ ,  $q_F$  і відносної швидкості ковзання  $V_k$  на контактних поверхнях леза (б) та зони контакту стружки з передньою поверхнею леза інструменту (в)

Для оцінювання деформаційних і адгезійних процесів, що супроводжують фрикційну взаємодію поверхонь (передньої поверхні леза інструменту 1 та стружки 4), що переміщуються відносно одна одної в умовах високих тисків і температур, характерних для процесів різання, розглянемо ті ділянки передньої поверхні, де реалізуються умови тертя спокою, тобто утворюється застійна зона (рис. 2.3б).

Авторадіофотограми відносно нерухомих поверхонь під навантаженням, спрямованим нормально до площини розділу, показують, що в тому випадку, коли металеві поверхні притуляються один до одного, за певних умов можуть утворюватися містки зв'язків (схоплювання) (рис. 1.4), які складаються з контактуючих матеріалів (нова формація).

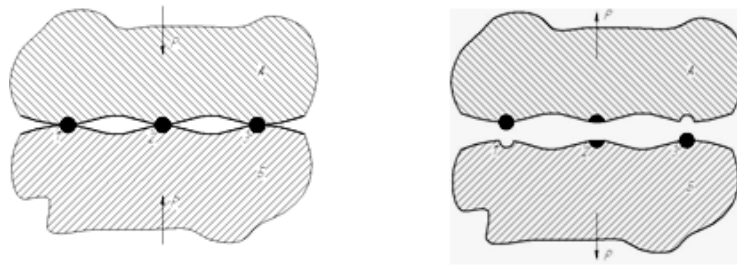


Рисунок 1.4 – Схема утворення та руйнування адгезійних містків зв'язків

При роз'єднанні поверхонь ці містки зв'язків можуть руйнуватися або безпосередньо по новій формації, або з відділенням її з якоїсь із контактуючих поверхонь (рис. 1.4). Таким чином, руйнування містків адгезійних зв'язків може супроводжуватися перенесенням з однієї поверхні на іншу металевих частин, величини яких значно більше в порівнянні з розмірами атомів. Подібні експерименти говорять про те, що в області контакту завжди утворюються адгезійні зв'язки, які розриваються при поділі поверхонь. Для виникнення адгезії ("містків" міцних металевих зв'язків) необхідно, по-перше, достатнє зближення поверхонь, щоб почали діяти атомні і молекулярні сили, і, по-друге, щоб шляхом пластичної деформації була вилучена поверхнева плівка, яка складається з оксидів і зміцненого (наклепаного) металу, і в результаті цього мав місце контакт двох чистих металів, тобто без наявності будь-якого третього (твердого, рідкого або газоподібного) середовища. Відомо, що адгезія є результатом утворення інтерметалічних зв'язків між контактуючими тілами і залежить від їх здатності створювати між собою хімічні сполуки і тверді розчини. Чим більше спорідненість (за хімічним складом) контактуючих матеріалів, тим (за інших рівних умов) ймовірність адгезії вище. Очевидно, що зі збільшенням тиску і, в певних межах, температури в зоні контакту (розм'якшення) зростає як ймовірність утворення містків схоплювання, так і ступінь їх утримання на контактуючих поверхнях (див. рис. 1.3 б, в). На ділянках  $C_1$  (рис. 1.3 б) та II (частково) і III (рис. 1.3 в) можливі переміщення в застійній зоні характеризуються внутрішнім тертям (адгезійна складова коефіцієнта тертя), а контакт стружки, що переміщується по передній поверхні на ділянці  $C - C_1$  (рис. 1.3 б) та ділянках I (частково) та II (рис. 1.3в) і передній поверхні характеризується зовнішнім тертям, тобто



деформаційною складовою коефіцієнта тертя. Співвідношення між цими складовими коефіцієнта тертя значною мірою визначає напружений стан системи різання, сили і температуру різання, зношування леза та ін. Разом з тим, слід зазначити, що загальноприйнятим вважається, по-перше те, що частка деформаційної складової в середньому коефіцієнті тертя, як правило, незначна, не перевищує 10-15 %, і їй можна знехтувати, і, по-друге, розділити експериментальним шляхом ці складові неможливо. Для експериментального визначення складових коефіцієнта тертя найбільше застосування знайшли схеми, запропоновані Л. Ш. Шустером і Ю. М. Внуковим.

За схемою, запропонованою Шустером Л. Ш. (рис. 1.5 а), адгезійна складова відсутня, оскільки тиск менше критичного, при якому утворюються містки адгезійних зв'язків, і площа адгезійного контакту  $F_a$  практично близька до нуля.

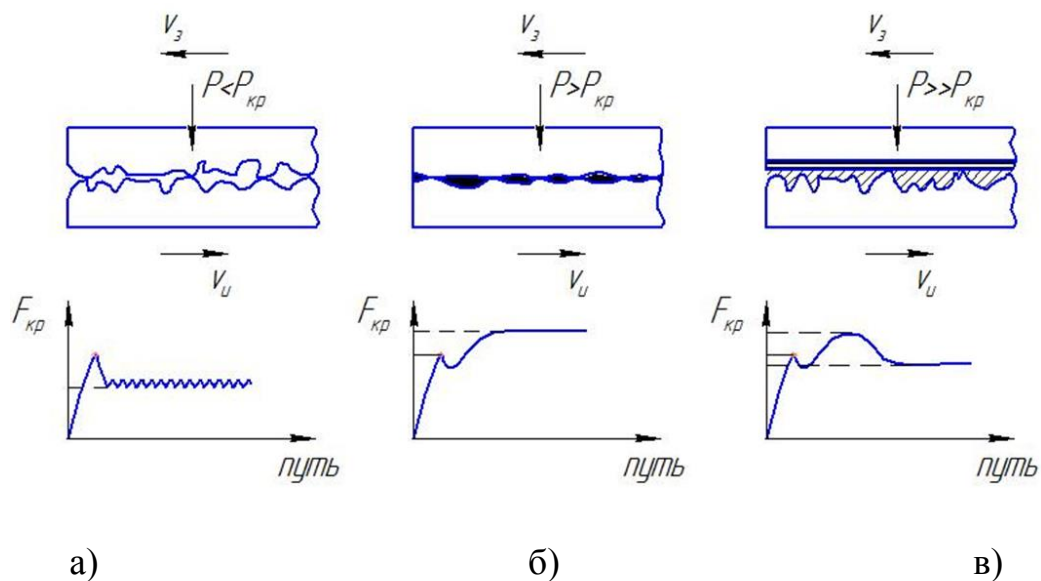


Рисунок 1.5 – Формування контактної зони в умовах адгезії:

а) за Шустером Л. Ш.; б) за Внуковим Ю. М.; в) за Криворучком Д. В.

З рисунка 1.5 видно, що на початку шляху площа контакту  $F$  дещо зростає за рахунок зменшення висоти мікронерівностей і при «вирівнюванні» мікропрофілю контактуючих поверхонь за рахунок як зменшення висоти мікронерівностей поверхні зразка, виготовленого з оброблюваного матеріалу і має меншу твердість, так і «заповнення» цим матеріалом мікро западин на поверхні індентора, виготовленого з матеріалу інструмента, вона стабілізується. Таким чином, за

допомогою схеми, запропонованої Шустером Л. Ш., можна визначити тільки молекулярну і деформаційну складові коефіцієнта тертя, оскільки при такій схемі навантаження внутрішнє тертя відсутнє.

За схемою, запропонованою Внуковим Ю. М. (рис. 1.5 б), тиск на зразок з оброблюваного матеріалу і індентор (з матеріалу інструменту) перевищує критичне значення  $P_{кр}$ , що дозволяє добитися виникнення великої кількості містків адгезійних зв'язків. Тому при  $P > P_{кр}$  після «вирівнювання» мікропрофілю контактуючих поверхонь, площа контакту зростає за рахунок адгезійних зв'язків і досягає значення  $F_a = F_{кр}$ , тобто при практичній відсутності ділянок із зовнішнім тертям. Таким чином, між поверхнями зразка та індентора виникає «прошарок», який отримав назву застійної зони, в якій можливі переміщення з коефіцієнтом внутрішнього тертя (адгезійна складова).

За схемою ж, яка запропонована Криворучком Д. В. (рис. 1.5 в) в Сумському державному університеті, тиск між індентором і зразком значно перевищує критичний тиск  $P \gg P_{кр}$ . Особливість такої схеми навантаження полягає в тому, що за рахунок великих тисків застійна зона з досить великою міцністю «прикріплюється» як до поверхні зразка, так і до поверхні індентора, особливо за наявності мікровпадін на ній, заповнених матеріалом зразка. Якщо міцність цих зв'язків вище міцності матеріалу застійної зони, то при відносному переміщенні зразка та індентора руйнування відбувається по застійній зоні, внаслідок чого площа адгезійного контакту з внутрішнім тертям (адгезійна складова) зменшується (рис. 1.5 в), а частка ділянок, на яких має місце зовнішнє тертя (деформаційна складова) зростає.

## 1.6 Висновок

Велика частка витрат сучасного машинобудівельного виробництва припадає на розробку та закупку металорізального інструменту. Для оптимізації цих витрат необхідно виділити основні показники якості інструмента, на які звертають увагу при підготовці виробництва. Патентний пошук показав, що питання оцінки якості різального інструмента є доволі розповсюдженим, та те, що велика кількість вчених

працює над ним. Але всі випробовування пов'язані або з руйнуванням матеріалу інструмента, або займають багато часу, чи потребують дорогого обладнання. В сучасних реаліях виробники не можуть собі дозволити таких витрат часу та коштів. З метою оптимізації витрат, потрібно визначити фактори, що впливають на вибір інструменту (параметри режиму різання), та методи їх оцінювання, наприклад: табличний, планування експерименту та імітаційне моделювання.

У процесі визначення степеню працездатності, відповідно, і найкращого (раціонального) варіанту вибору різального інструменту, необхідно крім технологічних показників (режиму різання) враховувати специфічні явища, які мають місце на контактних поверхнях леза різального інструменту.

## 2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИБОРУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

### 2.1 Метод визначення коефіцієнту тертя різального інструменту

#### 2.2.1 Методика дослідження трибологічної взаємодії інструментального та конструкційного матеріалів

Основною проблемою відомих способів вимірювання адгезійної складової є неможливість стабілізації мікрорельєфу поверхні контртіла (менш міцного тіла) зі збереженням режиму зовнішнього тертя. Для дослідження причин цього явища виконано моделювання ковзання гладкого контртіла відносно шорсткого індентора за схемою м'якого навантаження (навантаження силою постійної величини).

Динаміка контактної взаємодії продемонстрована на рисунку 2.1.

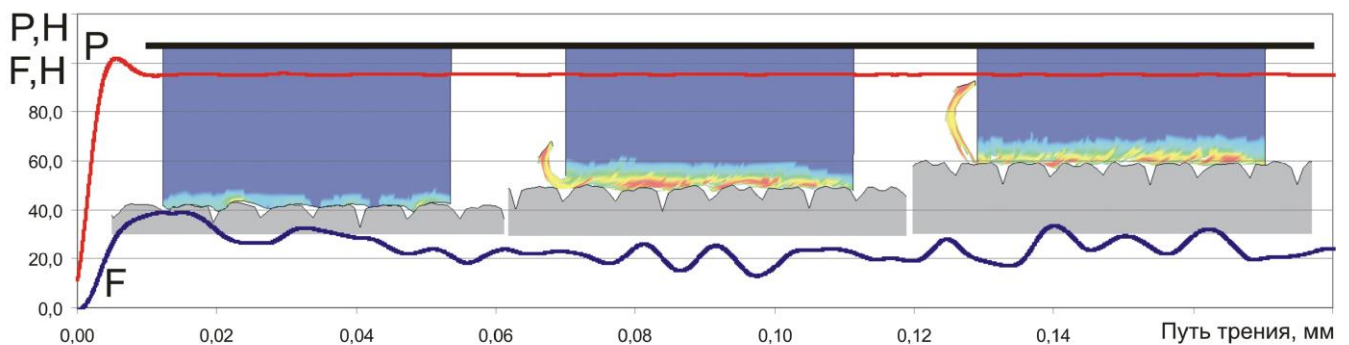


Рисунок 2.1 – Зміна поверхні контакту в процесі відносного ковзання індентора по контртілу при м'якій схемі навантаження (розподіл пластичних деформацій:

синій колір – 0; червоний колір – 2.0)

Після впровадження індентора з силою  $P$  відбувається відносне ковзання двох тіл. Нерівності, «занурені» в поверхню контртіла, призводять до її деформації і зміцнення. Зі збільшенням відносного зсуву відбувається руйнування поверхні контртіла за рахунок видалення деформованих частинок його матеріалу з поверхні і збільшення фактичної площі контакту. Під дією постійної за величиною нормальної сили процес впровадження нерівностей в контртіло повторюється, хоча і на меншу глибину. З кожним циклом фактична площа контакту збільшується,

пластична деформація поверхні збільшується. Весь процес супроводжується руйнуванням поверхні. У деякий момент часу досягається рівновага, яка характеризується стабілізацією фактичної площі контакту, але постійним руйнуванням поверхні контртіла – внутрішнім тертям. Таким чином, при реалізації м'якої схеми навантаження фактично неможливим є забезпечення стабілізації фактичної площі контакту при відсутності руйнування поверхні контртіла (внутрішнього тертя), яке істотно знижує точність ідентифікації адгезійної складової сили тертя ковзання.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати жорстку схему навантаження поверхні контакту переміщенням індентора з одночасним контролем нормальної сили і моменту тертя. Проведене моделювання динаміки контактної взаємодії тіл показало (рис. 2.1), що після впровадження індентора в поверхню контртіла на глибину, яка забезпечує задану нормальну силу, і початку ковзання також як і при м'якій схемі навантаження в перші моменти часу відбувається пластична деформація поверхневих шарів контртіла з подальшим їх руйнуванням. Однак при жорсткому навантаженні відносне положення індентора і контртіла по нормалі один до одного залишаються незмінними і визначаються початковим впровадженням. Тому подальшого впровадження нерівностей індентора у вже укріплену поверхню контртіла на глибину, здатну спричинити руйнування поверхні, не виникає і спостерігається ковзання з незмінною фактичною площею контакту, нормальною силою і силою тертя. Цей стан триває до втрати поверхнею контртіла здатності чинити опір руйнуванню через накопичення руйнувань. Видима стабілізація дає можливість визначення всіх необхідних параметрів для ідентифікації адгезійної складової.

Запропоновано такий алгоритм (рис. 2.2): а) при нормальній температурі проводяться випробування на адгезіометрі, який реалізує тертя сферичного індентора з інструментального матеріалу відносно зразка з оброблюваного матеріалу при різних тисках в умовах жорсткого навантаження; б) визначається середня дотична напруга опору ковзанню; в) за відомими параметрами  $R_p$ ,  $t_m$  мікрорельєфу індентора розраховується  $\mu_d$  для прийнятих умов випробувань;

г) визначаються  $\tau_0$ ,  $\beta_0$  шляхом вирахування деформаційної складової дотичного напруження та екстраполяції отриманих залежностей на нульовий тиск і їх апроксимації рівнянням за умови  $T < T_k$ :

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \tau_d = \mu_d \cdot \sigma_n, \tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}, \quad (2.1)$$

д) проводять випробування на адгезиметрі при температурах  $T = 600^\circ \text{C}$ ,  $700^\circ \text{C}$  і  $800^\circ \text{C}$  за одного тиску і розраховують константи  $k_b$ ,  $T_k$ , апроксимуючи отриману залежність рівнянням (2.1).

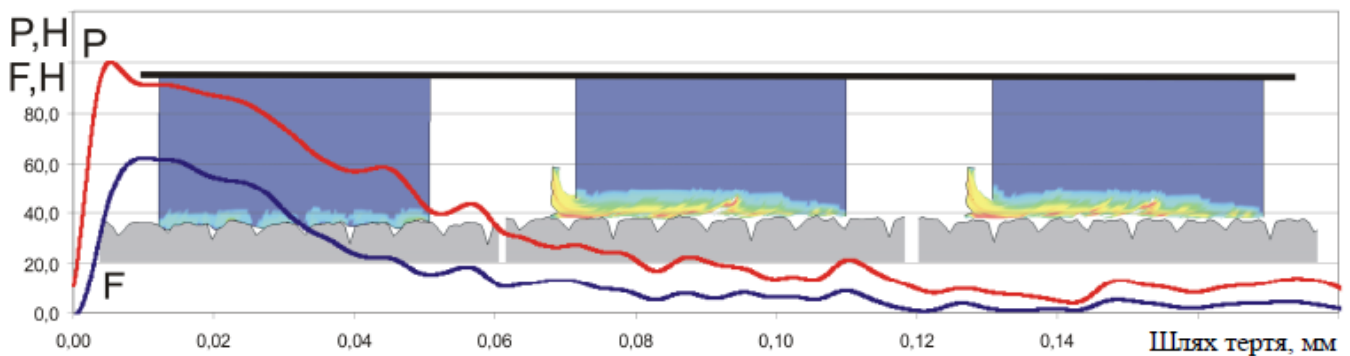


Рисунок 2.2 – Зміна поверхні контакту в процесі відносного ковзання індентора по контртілу при жорсткій схемі навантаження (розподіл пластичних деформацій: синій колір - 0; червоний колір - 2.0)

Спираючись на досвід Л. Ш. Шустера в роботі не виконувалися випробування при підвищених температурах для випадків, коли температура контактної взаємодії очікувалася менше ніж  $700^\circ \text{C}$ . У першому наближенні константи  $k_b$  і  $T_k$  можуть бути визначені за формулою  $T_k \approx 700^\circ \text{C}$ ,  $k_b = \beta_0 / 300$ .

Прототип пристрою, який забезпечує вимірювання моменту тертя методом обертання відносно плоского контртіла, з жорсткою схемою навантаження сферичного індентора, реалізований на базі вертикально-фрезерного верстата 6P12 (рис. 2.3). Вибір базової системи для реалізації пристрою обумовлений необхідністю забезпечення високої жорсткості механізму навантаження в напрямку осі дії нормальної сили з можливістю одночасного додавання обертання навколо цієї ж осі. Жорсткість використаного верстата становить  $j_z = 55 \text{ мкм} / \text{кН}$ .

Пристрій працює наступним чином.

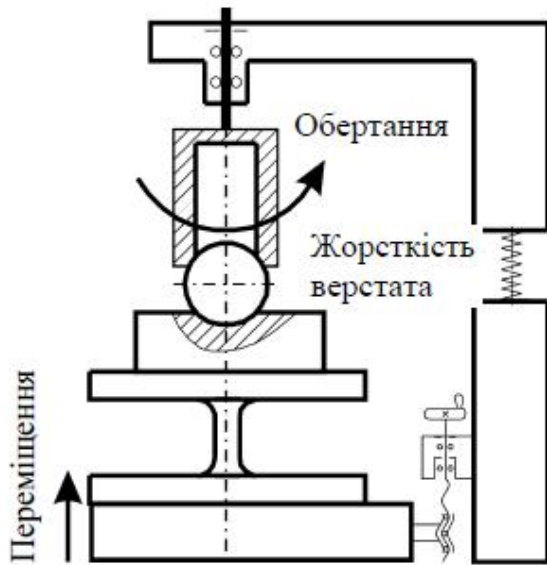


Рисунок 2.3 – Схема навантаження



Рисунок 2.4 – Динамометр

На столі верстата співвісно з віссю шпинделя встановлюється вимірювальний пристрій (динамометр), що дозволяє одночасно вимірювати нормальну до його базової площини силу і крутний момент. На базову поверхню динамометра встановлюють контртіло у вигляді пластини товщиною не менше 5 мм з паралельними бічними поверхнями. У цангові патрони закріплюється оправка з конічним центральним отвором, виконаним з метою мінімізації биття, сумісно з оправкою безпосередньо на фрезерному верстаті. Індентор з відполірованої торцевої сфери діаметром 6-9 мм з відхиленням від округлості не більш 5 мкм, заздалегідь знежиреної спиртом і обробленої активованим вугіллям, розміщується між поверхнею контртіла, обробленого аналогічним способом, і конічною оправкою (рис. 2.3). Базування індентора здійснюється по конічній поверхні центрального отвору. Гільза шпинделя нерухомо встановлюється в бабці шпинделя. Навантаження здійснюють переміщенням консолі верстата вздовж осі z. Сила навантаження контролюється динамометром (рис. 2.4). Вимірювання моменту тертя здійснюється при обертанні з частотою 31,5 об / хв шпинделю. Мала частота обертання виключає розігрівання контактної поверхні. Крутний момент на індентор передається через контактну поверхню сферичної оправки, радіус якої в кілька разів більше радіусу лунки, що утворюється.

У перші моменти часу момент тертя інтенсивно зростає, а нормальна сила дещо зменшується через інтенсивну деформацію контактної поверхні та зміни її мікрорельєфу. Далі інтенсивність цих процесів сповільнюється і, в певний момент часу, настає стабілізація величини фактичної площі контакту – момент тертя і нормальна сила залишаються постійними в межах точності вимірів. У цей момент вимірювання припиняють, швидко розвантажуючи систему. Отриманий відбиток і поверхня індентора без істотних налипань свідчать про те, що при випробуванні між індентором і зміцненою поверхнею контртіла має місце зовнішнє тертя.

Вимірювання параметрів мікрорельєфу індентора  $R_p$ ,  $t_m$ , необхідних для розрахунку деформаційної складової сили опору ковзанню є складним технічним завданням, оскільки індентор являє собою сферу досить малого радіуса. Застосування традиційного профілометра в цьому випадку неможливо у зв'язку з неможливістю створення достатньої бази для вимірювальної голки.

У роботі запропоновано новий метод вимірювання параметрів профілю мікрорельєфу поверхні методом сканування поверхні пучком електронів в растровому електронному мікроскопі з реєстрацією відбитих електронів витягнутими вздовж осі сканування двома сенсорами, розміщеними по різні сторони від оптичної осі електронного мікроскопа. Відомо, що кут відбиття електронів пропорційний куту нахилу поверхні відбиття і атомному номеру хімічного елемента в цій поверхні. Знаходження різниці сигналів зазначених сенсорів дає можливість виключити вплив атомного номера. Вона буде пропорційна тільки куту профілю поверхні (першої похідної профілю поверхні), яка сканується. Орієнтація сенсорів в напрямку осі сканування забезпечує виділення похідної тільки в напрямку сканування.

Це дає можливість відновити профіль мікрорельєфу в кожному рядку зображення зі співвідношення

$$\bar{y}_{i+1} = \left. \frac{d\bar{y}}{dx} \right|_{x_{i+1}} \Delta x + \bar{y}_i, \quad (2.2)$$

де  $\bar{y}_i$  – умовна висота мікровиступів в точці;



$\Delta x$  – розмір точки зображення, що визначається заданим масштабом зображення.

Абсолютна висота мікрорельєфів може бути визначена з виразу

$$y_i = k \cdot \bar{y}, \quad (2.3)$$

де  $k$  – масштабний коефіцієнт, що визначається за даних величинах контрасту, струмів першої, другої і третьої лінз за зразком шорсткості.

Параметри мікрорельєфу визначалися за стандартними формулами, визначеним у ГОСТ 2789. Для розрахунку параметрів мікрорельєфу розроблена програма в середовищі Matlab.

Основними недоліками цього методу визначення адгезійної складової середнього коефіцієнту тертя є важкість виготовлення сферичного індентору (шару) з інструментального матеріалу (твердого сплаву), а також, у зв'язку з тим, що індентор виготовляється з інструментального матеріалу, неможливим є використання методу без руйнування різальної частини інструменту, а також для випадків, коли необхідно визначити фрикційні характеристики взаємодії оброблюваного матеріалу з покупним інструментом, що має покриття.

Тому запропоновано метод визначення адгезійної складової середнього коефіцієнту тертя, де індентор виконується з оброблюваного матеріалу, а контртілом є безпосередньо поверхні непереточуваної твердосплавної пластини.

2.2.2 Математична модель індентора для визначення трибологічних властивостей інструментального та конструкційного матеріалів

Проведений аналіз технологічності конструкції індентора показує, що, для отримання необхідних результатів, найбільш зручним для використання та економічно вигідним для виготовлення є індентор циліндричної форми із оброблюваного матеріалу.

Для визначення геометричних параметрів індентора запропоновано використовувати три параметри – довжина, діаметр та радіус округлення торця (робочої поверхні).

Аналіз схеми навантаження індентора (рис. 2.5) показує, що для визначення зазначених параметрів необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} d \geq d_{кр}, & \text{— допустимі навантаження} \\ l \leq l_{кр} & \text{— формула Ейлера} \\ r \leq r_{кр} & \text{— діаметр відбитку} \end{cases}, \quad (2.4)$$

де  $d$  – діаметр індентора;  $l$  – довжина індентора;  $r$  – радіус округлення торця індентора.

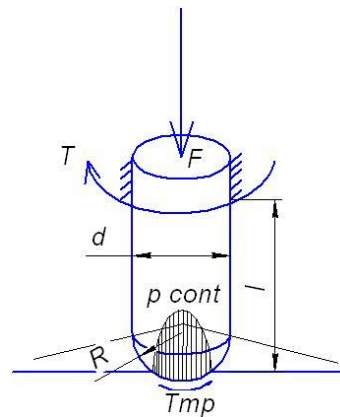


Рисунок 2.5 – Схема навантаження індентору

Головними обмежуючими факторами для визначення геометричних параметрів індентора є: стійкість, яка обмежує довжину індентора; міцність, яка впливає на його діаметр; твердість оброблюваного матеріалу, що зумовлює розміри плями контакту. Важливим є те, що при сталому процесі  $T = T_{тер}$ .

#### *Визначення довжини індентора (стрижня)*

Для вирішення задачі стійкості стрижня необхідно розглянути вплив умов його закріплення його торців на величину критичної сили, що легко зробити шляхом порівняння виду зігнутої осі стрижня при різних випадках закріплення з формою зігнутої осі при шарнірному закріпленні обох кінців стрижня (рис. 2.6).

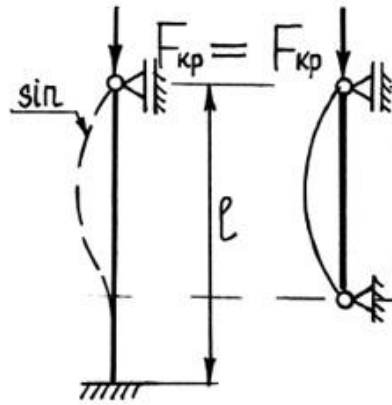


Рисунок 2.6 – Розрахункова модель стійкості індентора: зліва направо реальна та принципова схеми реакцій на навантаження

Стійкість деформованого тіла у вигляді стрижня залежить від величин його діаметру, довжини та прикладеного до нього навантаження [27]. Навантаження, яке викликає втрату стійкості первісної форми тіла (стрижня), називається критичним навантаженням та позначається через  $F_{кр}$ .

В нашому випадку при  $F > F_{кр}$  стрижень втрачає стійкість, тобто прямолінійна форма рівноваги перестає бути стійкою (рис. 2.10).

Довжина стрижня визначається за формулою

$$\frac{\pi d}{2,8} \sqrt{\frac{E}{[\sigma]}} \leq l \leq \sqrt{0,03189 \frac{\pi^3 E d^4}{F n_{уст}}}, \quad (2.5)$$

де  $E$  – модуль Юнга першого роду (поздовжній модуль пружності), МПа;  $F$  – стискаюча сила, Н;  $d$  – діаметр круглого прямого циліндричного стрижня, мм;  $[\sigma]$  – допустимі напруження, МПа;  $n_{уст}$  – коефіцієнт запасу стійкості.

*Визначення діаметру стрижня.*

Для визначення діаметру індентора необхідно враховувати міцність матеріалу.

Стрижень перебуває під дією складного напруженого стану стиснення з крутінням. Напружений стан нескінченно малого елемента в небезпечній точці на бічній циліндричній поверхні стрижня.

Діаметр стрижня визначається за формулою:

$$\sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d^2}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \leq [\sigma], \quad (2.6)$$

де  $F$  – стискаюча сила, Н;  $T$  – крутний момент Нм;

$d$  – діаметр круглого прямого циліндричного стрижня, мм;

$[\sigma]$  – допустимі напруження, МПа;

$R_m^T$  – мінімальне значення тимчасового опору при розрахунковій температурі, МПа;

$R_{p0,2}^T$  – мінімальне значення межі текучості при розрахунковій температурі, МПа;

$R_m^T$  – мінімальна межа тривалої міцності за час  $t$  при розрахунковій температурі, МПа.

Для вирішення поставленого завдання пропонується представити його у вигляді багатокритеріальної задачі з оптимізації, де в якості параметрів оптимізації будуть використовуватися діаметр, довжина і радіус округлення торця.

$$z = \begin{cases} d \rightarrow \min; \\ l \rightarrow \min; \\ r \rightarrow \max \end{cases}, \quad (2.7)$$

Прагнення діаметру та довжини стрижня до мінімального значення обумовлюється розмірами пластини (контртіла) для забезпечення зручності проведення експериментів. Радіус округлення робочого торцю прагне до свого максимально допустимого значення для отримання зони контакту індентору з контртілом достатнього розміру для проведення подальших досліджень.

Для вирішення багатокритеріальної задачі з оптимізації геометричних розмірів індентору розглянемо фактори, що обумовлюють обмеження на ці параметри.

Так для визначення довжини індентора прийняті обмеження пов'язані: 1) зі стійкістю стрижня (див. вираз 2.4); 2) з довжиною приєднувальної частини стрижня, яка обумовлена системою кріплення використовуваного пристрою

верстату. Аналіз виразу 2.4 вказує на те, що довжина індентора знаходиться в функціональній залежності від діаметру.

Визначення радіусу округлення торцю обумовлено 2-ма параметрами: 1) діаметром плями контакту, буде аналізуватися; 2) твердістю індентора та контртіла (леза інструменту). Аналіз цих обмежень показує, що твердістю матеріалів можна знехтувати, а необхідним та достатнім є діаметр плями контакту в межах від 2 до 5 мм для його дослідження за допомогою інструментального мікроскопу. В інших випадках необхідно керуватись інструментальними обмеженнями наявних приладів.

Тому цю задачу можливо представити в наступному вигляді

$$z = d \rightarrow \min; \quad (2.8)$$

#### *Визначення радіусу округлення робочого торця*

Для розрахунку радіусу округлення робочого торця стрижня використовується модель двох дотичних сферичних тіл з радіусами  $R_1$  та  $R_2$ , де  $R_1 = r$ , так як перша поверхня є сферичним торцем індентору, а  $R_2 \rightarrow \infty$ , так як друга поверхня контакту (поверхня контртіла) є площиною.

Для цього випадку радіус площини контакту визначається за формулою:

$$\begin{aligned} r_{cont} &= 0,9086 \sqrt[3]{\eta F \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}; \\ r_{cont} &= 0,9086 \sqrt[3]{\eta F \frac{1}{\lim_{R_1 \rightarrow R} \frac{1}{R_1} + \lim_{R_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{R_2}}}}; \\ 3\text{мм} &\leq 0,9086 \sqrt[3]{\eta F R} \leq 5\text{мм}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $F$  – сила, що стискає поверхні;

$\eta = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_1^2) / E_2$  – пружна постійна дотичних тіл,

де  $\nu_1, \nu_2, E_1$  та  $E_2$  відповідно коефіцієнти Пуассона і поздовжні модулі пружності (модуль Юнга першого роду) першого та другого тіл.

У зв'язку із необхідністю закріплення індентора у цанговому патроні, розташованому на шпинделі верстату, рекомендовано виготовляти індентор довжиною  $2L$  та з робочими радіусами на обох торцях, що забезпечити можливість проведення двох дослідів при умові використання лише одного індентору.

## 2.2 Дослідження деформаційної складової тертя, методика моделювання

У роботі використана скінчено-елементна модель процесу різання, реалізована на основі вирішувача LS-DYNA з імплементацією додаткових процедур у вигляді модуля OCFEM, які адаптують універсальний вирішувач високонелінійних динамічних задач для вирішення задачі моделювання прямокутного вільного різання. Основні теоретичні положення по математичному апарату використаному в моделі викладені в роботах [28; 29; 30; 31].

Скінчено-елементна дискретизація заготовки та інструменту виконувалася чотирикутними чотирьохвузловими SE. Генерація (перестроювання) SE сітки здійснювалася алгоритмом Q-morph (advanced front) [21] за заданим розміром SE на зовнішньому контурі тіла. При генерації нової сітки контур задавався набором геометричних примітивів. При перестроюванні SE сітки – ребрами SE базової SE сітки.

В основу SE моделі процесу різання покладена математична теорія пластичності. Одним з важливих припущень є припущення про ізотропне нестисливе середовище [32]. При цьому поведінка матеріалу при деформації описується поведінкою поверхні плинності, що є границею між пружною і пластичною областями в дев'ятивимірному просторі напруг даної точки тіла. Ця поверхня характеризується рівнянням

$$f_s = (\sigma^{ij}) = 0, \quad (2.10)$$

яке не залежить від напружено-деформованого стану (НДС) і є властивістю даного матеріалу. Отже, її можна визначити експериментально з дослідів по деформуванню зразків в умовах однорідного НДС. Отриману таким чином криву

називають кривою течії (flow stress curve) або рівнянням стану (constitutive equation) і описують з урахуванням умови пластичності фон Мізеса наступним співвідношенням [32]

$$\bar{\sigma} = \sigma_s = \sigma_s(q, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T), \quad (2.11)$$

де  $\bar{\sigma}$  – інтенсивність напружень;  
 $\sigma_s$  – поточна межа текучості;  
 $\sigma^{ij}$  – компоненти тензора напружень;  
 $q$  – параметр зміцнення;  
 $\dot{\bar{\varepsilon}}^p$  – інтенсивність швидкостей пластичних деформацій;  
 $T$  – температура.

В цій роботі модель оброблюваного матеріалу задається у вигляді емпіричного рівняння в формі Джонсона-Кука, що враховує зміну величини межі текучості в залежності від температури, швидкості і величини пластичної деформації. Це найбільш широко використовувана внаслідок своєї універсальності і простоти модель матеріалу:

$$\sigma_s = \left[ A + B \cdot \left( \bar{\varepsilon}^p \right)^n \right] \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot [1 - T^m], \quad (2.12)$$

де  $\bar{\varepsilon}^p$  – інтенсивність пластичної деформації;  
 $\dot{\bar{\varepsilon}}^p$  – інтенсивність швидкості пластичної деформації;  
 $T$  – температура;  
 $A, B, C$  – коефіцієнти;  
 $n, m$  – показники ступеню.

Обчислення дотичних напружень  $\tau$  на поверхні контакту, що визначають опір ковзанню, в даній роботі реалізовано за законом Shaw MC, що формалізує схему, представлену на рисунку 2.7.

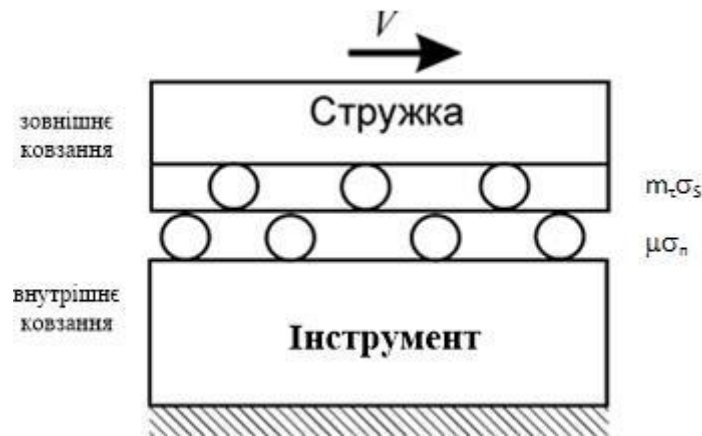


Рисунок 2.7 – Модель контактної границі

Ковзання має місце там, де  $\tau_{max}$  менше

$$\tau_{max} = \min(\tau_s, \mu\sigma_n), \tau_s = m\tau\sigma_s, \quad (2.13)$$

причому схоплювання ( $v=0$ ) має місце коли  $|\tau| < \tau_{max}$ , та ковзання ( $|v| > 0$ ) має місце коли  $|\tau| = \tau_{max}$ . З умови рівноваги нерівність  $|\tau| > \tau_{max}$  недопустима. Варто відзначити, що ковзання бути мати місце в тому шарі, в якому  $\tau_{max}$  менше.

У цьому випадку  $\tau_s$  і  $\mu$  є параметрами моделі тертя, вплив яких на процес різання і досліджено в даній роботі.

Слід зазначити, що дотичні напруження  $\tau$  і  $\tau_{max}$  є умовними, оскільки припускають, що фактична площа контакту дорівнює дійсній. Ця невідповідність враховується корекцією значень  $\tau_s$  і  $\mu$ .

У цій роботі використовувалися спільно геометричний і фізичний критерії руйнування зрізувального шару. В якості геометричного критерію, що розділяє матеріал перед різальною кромкою, використовувалося перестроювання SE сітки інструменту після проходження лезом заданого шляху. Застосування цього критерію дозволило запобігти спотворення SE в області великих пластичних деформацій і збільшити тим самим швидкість і стійкість розрахунку. Як фізичний критерій руйнування пластичного матеріалу був прийнятий критерій накопичених пластичних деформацій у формі Джонсона-Кука



$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \geq 1, \quad (2.14)$$

де  $\bar{\varepsilon}_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*)$  – гранична величина накопичених пластичних деформацій;

$\sigma^* = \sigma / \sigma_{екв}$ ;  $\sigma$  – гідростатичний тиск (стискання при  $\sigma < 0$ );

$\sigma_{екв}$  – еквівалентні напруження за фон Мізесом.

Параметри вирішувача (мінімальний розмір СЕ інструменту, мінімальний розмір СЕ заготовки, коефіцієнт прискорення інтегрування і коефіцієнт контактної жорсткості) задаються відповідно до рекомендацій роботи [21].

Розрахункова схема являє собою твердосплавне лезо с переднім кутом  $\gamma$  і заднім кутом  $\alpha$ , яке, переміщаючись з постійною швидкістю різання  $V$ , зрізає з плоскої заготовки шар постійної товщини  $a$ .

### **2.3 Методика дослідження радіусу округлення лез різальних інструментів з використанням інтерферометра**

Дослідженнями багатьох авторів [33, 34, 35, 36 та ін.] доведено, що по-перше, радіус округлення різальної кромки (РК) має виключно важливий вплив на параметри процесу стружко утворення; по-друге, величини цього параметра можуть змінюватись у відносно великих межах. Наприклад, М. І. Резніков [33] показав, що радіус округлення РК твердосплавного інструмента  $\rho$  в залежності від методу заточки може змінюватись від 36 до 10 мкм і ця різниця помітно впливає на силу різання. Тому визначення величини  $\rho$  необхідне при вивченні процесу стружко утворення в умовах процесів з малими товщинами зрізу, в тому числі й чистового (напівчистового) точіння.

Аналіз показав, що більшість існуючих методів вимірювання з використанням, як правило, оптичних та електронно-механічних вимірювальних приладів не дозволяють з достатньо високою точністю виміряти величину  $\rho$  внаслідок його відносної малості. Крім того, досвід експлуатації твердосплавних непереточуваних пластин показав, що величина радіуса округлення РК є змінною як у часі, так і по її

довжині, що майже не може бути визначено застосовуваними сьогодні методами вимірювань. Одним із ефективних методів дослідження зміни форми і радіусу округлення різальної кромки у теперішній час є спосіб оптичного вимірювання радіусів з використанням інтерферометра. Даний прилад дає можливість створювати як двовимірне (рис. 2.8), так і тривимірне зображення (рис. 2.9) різальної кромки використовуваної пластини, за допомогою якого можна вимірювати в заданих (прийнятих) перетинах леза головною січною площиною  $P_t$  як радіус округлення різальної кромки, так і величини площадки зношування (рис. 2.10).

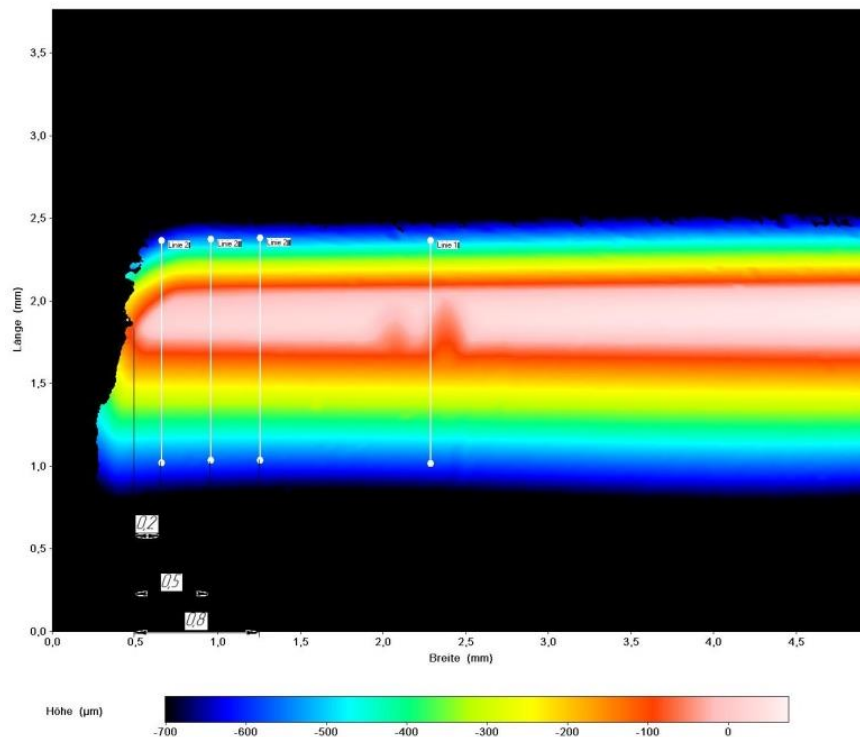
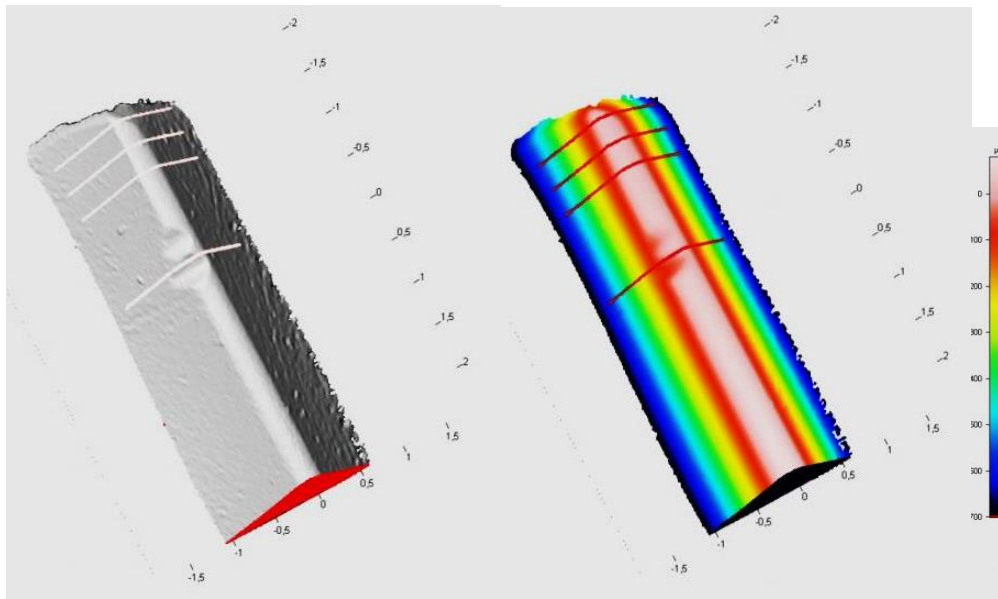


Рисунок 2.8 – Двовимірне зображення різальної кромки пластини з відміченими необхідними перетинами



а)

б)

Рисунок 2.9 – Тривимірне зображення різальної кромки пластини:

а) – реалістичне, б) – виділене кольором за висотою

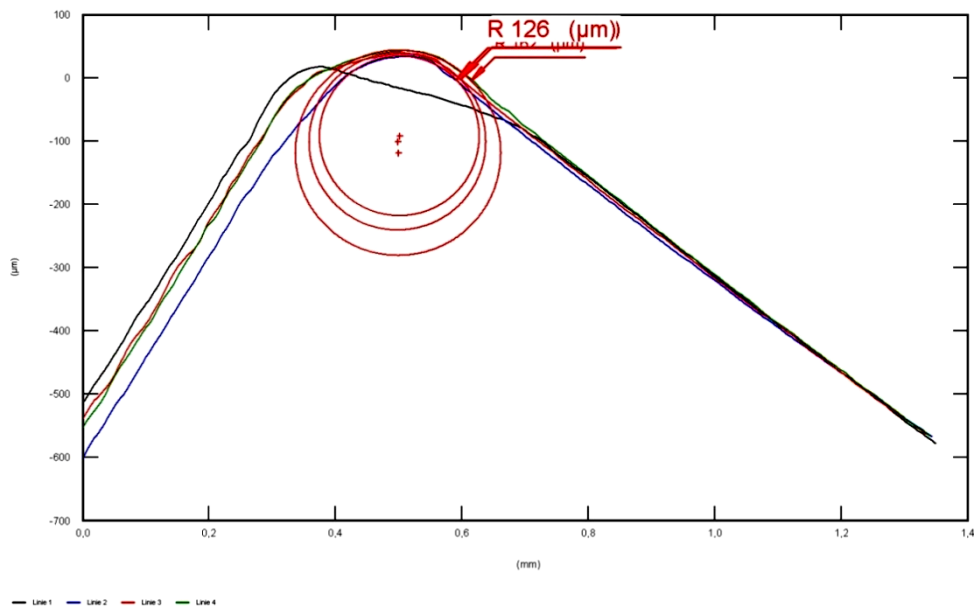


Рисунок 2.10 – Графічне зображення форми різальної кромки в різних перетинах з можливістю вимірювання радіусу округлення  $\rho$

Широко відомий той факт, що класична крива зношування (рис. 2.11) має: ділянки: 1 – припрацювання, яке характеризується різким збільшенням величини площадки зношування ( $a$ , відповідно, і радіусу  $\rho$ ) інструменту протягом відносно

короткого часу його роботи; 2 – стале зношування леза, яке характеризується повільним збільшенням величини площадки зношування інструменту та  $\rho$  протягом відносно тривалого часу його роботи; 3 – критичне зношування інструменту, яке також характеризується різким збільшенням величини площадки зношування, що призводить зрештою до руйнування різальної кромки (вистришування та відколи) і, досить часто, різким збільшенням  $\rho$  або, навіть, механічному руйнуванню інструменту (пластини).

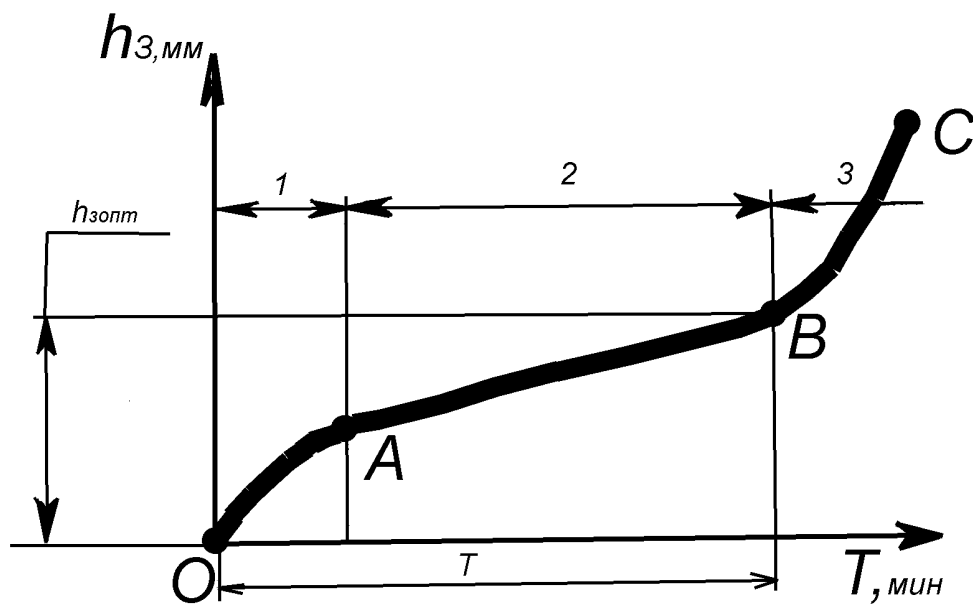


Рисунок 2.11 – Класична крива зношування різального інструмента

У зв'язку з цим, в початковий момент роботи інструменту (в період припрацювання) при використанні цього методу експеримент необхідно зупинити і проводити контроль різальної кромки кожні 3 с, для того, щоб не пропустити точку закінчення ділянки припрацювання і початок ділянки сталого зношування. Потім (на ділянці сталого зношування леза) даний період можна збільшити до 8–10 с. Разом з тим, треба мати на увазі, що немаловажним є момент визначення точки початку ділянки критичного зношування. Відповідно до запропонованої методики в момент зупинки процесу різання проводиться реєстрація величин наступних параметрів зношування інструменту: вимірювання радіуса округлення  $\rho$  і форми

різальної кромки вздовж довжини її робочої ділянки, а також лінійне вимірювання площадки зношування інструменту по задній поверхні  $h_3$ .

Таким чином, увесь представлений набір показаних рисунків і фотографій виконується для різальної пластини після кожного прийнятого періоду її роботи, наприклад, на першій ділянці – 3 с, на другій – 8–10 с.

Отримувані при використанні запропонованої методики результати дозволяють побудувати залежності радіуса округлення різальної кромки від часу роботи інструменту.

## **2.4 Методика дослідження радіуса округлення лез різальних інструментів з використанням растрового електронного мікроскопа**

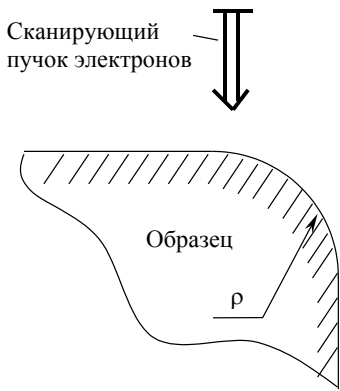
Ця методика запропонована професорами В.О. Залогою та Д.В. Криворучко [37]. Ця методика заснована на застосуванні растрового електронного мікроскопа, наприклад типу РЕМ-100УМ, для якого характерною є велика глибина фокуса, яка при збільшенні  $\times 1000$  становить 20 мкм, що дозволяє бачити (а, відповідно, і вимірювати радіус округлення РК) добре сфокусованою всю робочу ділянку РК.

Вимірювання радіуса округлення РК цим методом засноване на ефекті формування топографічного контрасту, який обумовлений впливом топографії об'єкта як на відбиті, так і на вторинні електрони. Коли плоский зразок відхиляється в сторону від нормального стану до падаючого пучку на кут  $\theta$ , коефіцієнт відбиття електронів поступово зростає, досягаючи одиниці при ковзному падінні. При цьому домінують траекторні ефекти.

З іншого боку відомо, що при формуванні зображення у вторинних електронах сигнал вторинних електронів  $S$  від нахилених поверхонь пропорційний  $\sec \theta$  ( $\theta$  - кут нахилу площадки). Тоді контраст зображення  $dS/S$  для даного кута  $\theta$  дорівнює

$$\frac{dS}{S} = \operatorname{tg} \theta d\theta \quad (2.15)$$

Відповідно до цієї формули, зміни в контрасті, які виникають через невелику зміну кута  $d\theta$  при порівнянні контрасту між двома поверхнями, нахиленими під незначно відрізняючимися кутами, залежать від цього кута, внаслідок чого топографічний контраст в режимі вторинної електронної емісії є вельми чутливим до геометричної конфігурації поверхні зразка і дозволяє виявити малі зміни кутів нахилу поверхні.



Припустимо, що мікрорельєф поверхні РК однаковий в будь-якій її точці. Тоді, при скануванні ділянки РК променем, перпендикулярним до передньої поверхні леза (рис. 2.12), наявність кривизни поверхні буде проявлятися у вигляді зміни яскравості зображення мікрорельєфу цієї поверхні. Таким чином, вимір радіуса округлення РК ґрунтується на вимірюванні ширини зображення на екрані

Рисунок 2.12 - дисплея мікроскопа або фотографії, де змінюється яскравість зображення мікрорельєфу. Такий підхід вимірювання радіуса округлення РК виключає вплив похибки установки зразка. У разі, якщо зразок буде встановлено перпендикулярно скануючому пучку, то бічна поверхня буде представляти у вигляді не сфокусованої білої смуги, що обумовлено збільшенням коефіцієнта відбиття електронів і великою глибиною цієї поверхні.

На рисунку 2.13 представлена оброблена (з метою отримання значно чіткішої межі початку кривизни поверхні) за допомогою комп'ютерної графіки із застосуванням графічного редактору Photoshop 3.0 фотографія РК твердосплавної непереточуваної пластини ВК8, яка отримана при наступних умовах: збільшення  $\times 1000$ , тривалість кадру 40 мс при 500 рядках. Відскановане зображення було піддано вирівнюванню тонів в автоматичному режимі, після чого підбиралися яскравість і контрастність зображення до отримання найкращої якості. Більш того, у процесі розроблення даної методики з'ясувалося, що межа початку радіусної ділянки спостерігається краще при інвертуванні зображення.

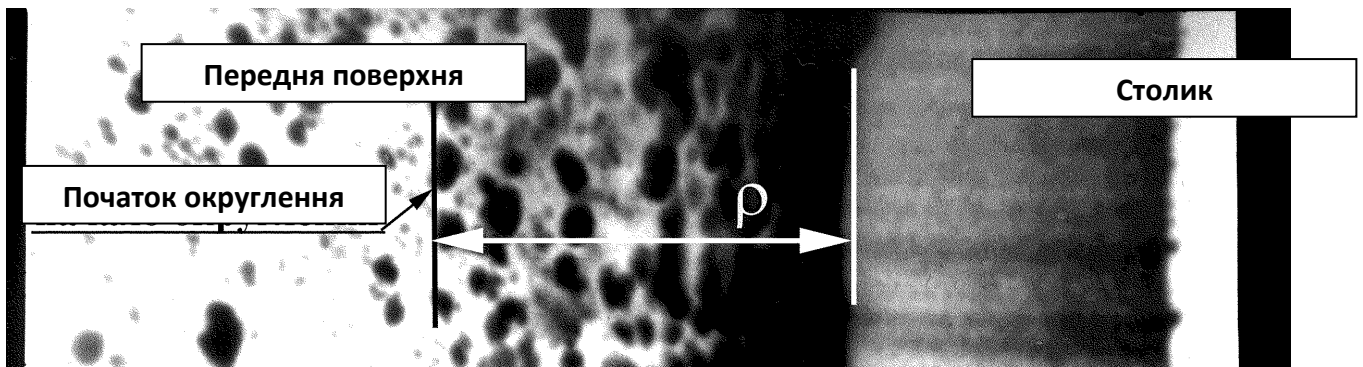


Рисунок 2.13 - Фотографія (негатив) різальної кромки (BK8), яка оброблена за допомогою ЕВМ,  $\times 1000$

Вимірювання виконуються в наступній послідовності. Відповідно до інструкції по експлуатації мікроскопа фокусується зображення на відстані приблизно 100 мкм від РК і встановлюється оптимальна яскравість зображення. Потім зображення зсувається так, щоб РК було: видно на екрані, вертикальна і розгорнута в бік детектора вторинних електронів. Цим досягається мінімальне спотворення зображення. При цьому досліджувана РК являє собою смугу зображення з постійно мінливою яскравістю і має досить чіткі межі. Тоді радіус округлення РК можна розрахувати за формулою:

$$\rho = \frac{L}{Y} \quad (2.16)$$

де  $L$  – ширина світлої полоси на екрані (темної при негативі);

$Y$  – поточне збільшення мікроскопа.

Всі вимірювання і фотографування виконуються при одних і тих же установках параметрів систем мікроскопа. При друку фотографій контролювався масштаб зображення. Збільшення  $Y$  вибиралося таким чином, щоб вимірюваний відрізок займав від  $1/3$  до  $2/3$  ширини екрану, що дозволяє суттєво знизити інструментальну похибку вимірювання.

Співвідношення між вимірним відрізком і його дійсною величиною визначається по тарувальному графіку, побудованому за методикою, наведеною в

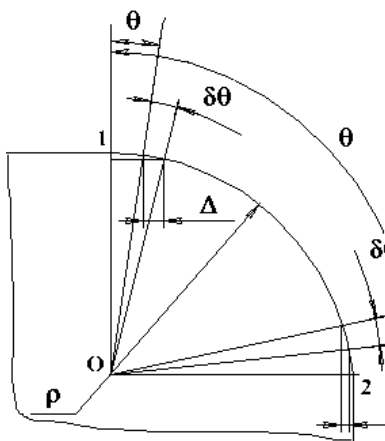
[38], і контролюється вимірюванням тест-об'єкта перед кожною серією вимірювань.

Для підтвердження методики було виконано вимір дроту з відомим діаметром 0.1 мм на електронному та оптичному інструментальному мікроскопах. Похибка становила не більше 5.6%. Відносна похибка запропонованого методу вимірювання може бути оцінена з співвідношення:

$$\min(\varepsilon_{\text{изм}}, \varepsilon_{\text{зр}}, \varepsilon_{\perp}) + \varepsilon_{\gamma} \leq \varepsilon \leq \max(\varepsilon_{\text{изм}}, \varepsilon_{\text{зр}}, \varepsilon_{\perp}) + \varepsilon_{\gamma} \quad (2.17)$$

де  $\varepsilon_{\text{изм}} = \frac{\Delta_L}{L}$  – відносна похибка вимірювання ширини смуги ( $\Delta_L$  - інструментальна абсолютна похибка приладу вимірювання);

$\varepsilon_{\text{зр}}$  – відносна похибка, пов'язана з нечіткістю кордонів. початку і кінця зміни



яскравості;

$\varepsilon_{\perp} = 1 - \cos(\Delta\alpha)$  – відносна похибка, пов'язана з відхиленням від паралельності передньої поверхні скануючого пучку на кут  $\Delta\alpha$ ;  $\varepsilon_{\gamma}$  – відносна інструментальна похибка мікроскопа, що дорівнює 5%.

Відносна похибка, пов'язана з нечіткістю меж

початку і кінця зміни яскравості, може бути визначена, як сума похибки визначення правої і лівої межі, тобто  $\varepsilon_{\text{зр}} = \varepsilon_{\text{зр}}^{\text{np}} + \varepsilon_{\text{зр}}^{\text{лв}}$  (Рис. 2.13). Відомо,

що в залежності від індивідуального сприйняття гранична чутливість ока лежить в інтервалі 3-5% контрасту по яскравості. Тоді початок кордону зміни яскравості може бути визначено з умови (див. 2.15):

$$(\text{tg}(\theta + \delta\theta) - \text{tg}(\theta))d\theta \leq 5\% \quad (2.18)$$

Тому, з огляду на малу величину кутів, похибка  $\varepsilon_{\text{зр}}^{\text{лв}}$  визначається виразом (при  $\theta \rightarrow 0$ ):



$$\varepsilon_{zp}^{лб} = \frac{\Delta}{\rho} = \operatorname{tg}(\delta\theta) \leq \frac{5\%}{\Delta\theta} \quad (2.19)$$

З іншого боку, при  $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$  похибку  $\varepsilon_{zp}^{лб}$  можна визначити з виразу:

$$\varepsilon_{zp}^{np} = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}} \frac{\Delta}{\rho} = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}} (1 - \cos(\delta\theta)) = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}} \left( 1 - \cos\left(\frac{5\%}{\Delta\theta} \cos^2(\theta)\right) \right) = 0 \quad (2.20)$$

Таким чином, похибкою визначення правої межі можна знехтувати.

Оцінимо похибку методу для випадку вимірювання радіуса  $\rho = 20$  мкм при збільшенні  $\times 1000$  лінійкою з ціною поділки 1 мм при допустимому куті  $\Delta\alpha = 1^\circ$  і локальному куті мікрорельєфу  $\Delta\theta > 30^\circ = 0.52$  рад. Тоді ширина смуги на екрані буде дорівнює 20 мм. Інструментальну похибку лінійки приймаємо рівною  $\Delta_L = 0.5$  мм. Тоді складові відносної похибки рівні:

$$\varepsilon_{изм} = \frac{0,5}{20} 100\% = 2,5\% ;$$

$$\varepsilon_{zp} = \frac{0.05}{0.52} 100\% = 9,5\% ;$$

$$\varepsilon_{\perp} = (1 - \cos(1)) \cdot 100 = 0,02\%$$

і сумарна похибка методу вимірювання дорівнює:

$$\min(2,5\%; 9,5\%; 0,02\%) + 5\% \leq \varepsilon \leq \max(2,5\%; 9,5\%; 0,02\%) + 5\%$$

чи

$$5,02\% \leq \varepsilon \leq 14,5\%$$

Таким чином, проведений розрахунок показав, що найбільшу похибку вносять нестабільність параметрів електронного мікроскопа і неточність визначення межі початку радіуса округлення. Необхідно відзначити, що реальна похибка наблизатиметься до 5% оскільки завжди знайдеться нерівність, локальний кут якої значно більше  $30^\circ$ .

Для перевірки повторюваності результатів вимірювань було 10 раз виконано вимір радіуса округлення однієї і тієї ж частини РК. Одна з фотографій представлена на рисунку 2.12. За результатами вимірювань середня величина

радіуса округлення склала  $\rho = 39,8$  мкм, а середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{\bar{x}} = 2,9$  мкм, що відповідає відносної похибки вимірювань близько 7 %.

### **2.3 Висновок**

Таким чином, розроблена методика дозволяє вимірювати радіус округлення РК по всій її довжині, а також проконтролювати якість РК і вибрати її дефектні ділянки, які містять сколи та інші дефекти. Похибка вимірювання цілком прийнятна для оцінки розглянутого параметра з метою вивчення його впливу на механіку процесу чистового точіння.

### 3 ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСТОСУВАННЯ СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ СТОСОВНО ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЛЕЗОВОГО МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КОНКРЕТНОГО ВИРОБНИЧОГО ЗАВДАННЯ

#### 3.1 Планування проведення експерименту

Для планування експерименту було взято три багатогранні непереточувані пластини та проведено 15 випробовувань при однакових режимах для кожної з них. Визначимо кількість факторів, вплив яких буде досліджуватись. Кількість факторів –  $n = 3$  (швидкість різання, подача та глибина різання). Відгук – це зношування пластини по задній поверхні. Вхідні дані для планування експерименту приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для планування експерименту

	Мінімальна	Номінальна	Максимальна
Швидкість різання, V	80	100	120
Подача, S	0,2	0,25	0,3
Глибина різання, t	0,2	0,3	0,4

Для планування експерименту обираємо симетричний ортогональний центральний композиційний план (ОЦКП).

Ядро плану повно факторного експерименту –  $N_0 = 2^n = 2^3 = 8$ . Кількість точок плану = 8.

Центральна точка плану для ОЦКП  $n_0 = 1$ .

Плече «зоряних точок»  $\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{15 \cdot 8} - 8)} = 1,215$ .

«Зоряні точки» ( $x_i = \pm\alpha$ ).

Загальна кількість дослідів в плані  $N = N_0 + 2n + n_0$ ,  $N = 8 + 2 \cdot 3 + 1 = 15$ .

$$\text{Константа перетворення } a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \sqrt{\frac{8}{15}} = 0,73.$$

Для отримання загального вигляду плану, розраховуємо значення  $1 - a$ ,  $-a$ ,  $a^2$   
 $- a$ .

$$1 - a = 0,27$$

$$-a = -0,73$$

$$a^2 - a = 0,75$$

Таким чином, загальний вигляд плану приведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Загальний вигляд плану експерименту

U	x0	x1	x2	x3	x1,2	x1,3	x2,3	x1,2,3	(x1') <sup>2</sup>	(x2') <sup>2</sup>	(x3') <sup>2</sup>	h1	h2	h3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	0,77	0,62	1,1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	0,81	0,58	0,98
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,78	0,63	1,15
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,81	0,58	1,09
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,79	0,54	1,06
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,8	0,62	1,12
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	0,79	0,68	1,11
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	0,82	0,55	1,1
9	1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,81	0,59	1,09
10	1	1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,81	0,61	1,07
11	1	0	-1,215	0	0	0	0	0	0,75	0,75	-0,73	0,74	0,63	1,13
12	1	0	1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	0,85	0,53	0,99
13	1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	0,75	0,75	0,79	0,6	1,16
14	1	0	0	1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	0,82	0,6	1,18
15	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0,79	0,55	1,12
ΣxiU	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ΣxiU	15		10,952			8				4,3727				

Вид загального поліному можна представити як:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot (x_1^2 - a) + b_{22} \cdot (x_2^2 - a) + b_{33} \cdot (x_3^2 - a)$$

Коефіцієнти полінома визначаються за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}, \quad (3.1)$$

де  $x_{iU}$  –  $i$ -й фактор, що впливає на відгук;

$Y_U$  – відгук.

Подальший розрахунок проведемо в програмному продукті Microsoft EXEL.

Розрахування коефіцієнтів полінома.

Результати розрахунку представлено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розраховані значення коефіцієнтів полінома

	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3
1	2	3	4
b <sub>1</sub>	0,010043828	-0,01	0,077
b <sub>2</sub>	0,014942476	-0,004	0,093
b <sub>3</sub>	0,006067385	-0,002	0,1

1	2	3	4
b <sub>12</sub>	0,00125	-0,028	-0,126
b <sub>13</sub>	-0,00375	0,005	-0,096
b <sub>23</sub>	0,00125	0,008	-0,141
b <sub>123</sub>	0,00375	-0,025	0,109
b <sub>11</sub>	0,238891303	0,23	0,298
b <sub>22</sub>	0,262309328	0,206	0,294
b <sub>33</sub>	0,001692318	0,016	-0,024
b <sub>0</sub>	0,798666667	0,594	1,03

Приведемо поліном до спрощеного представлення:

$$Y = b'_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2,$$

де

$$b'_0 = b_0 - b_{11} \cdot a - b_{22} \cdot a - b_{33} \cdot a$$

Таблиця 3.5 – значення коефіцієнта b<sub>0</sub>'

	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3
b <sub>0</sub> '	0,433	0,264	0,615

Перевірка відтворюваності дослідів. При однаковому числі паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів чинників відтворюваність процесу, перевіряється по критерію Кохрена:

$$G = \frac{s_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)}, \quad (3.2)$$

де  $s_u^2$  – дисперсія, що характеризує розсіяння результатів дослідів на  $u$ -м поєднанні рівнів чинників:

$$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (3.3)$$

де  $p=1, 2, \dots, m$  – число паралельних дослідів;

$s_{u \max}^2$  – найбільша з дисперсій в строчках плану;

$G_{(0,05; f_n; f_u)}$  – табличне значення критерію Кохрена при 5%-ном рівні значущості,

$$G_{(0,05; f_n; f_u)} = 0,33;$$

$f_n = n$  – число незалежних оцінок дисперсії,  $f_n = 15$ ;

$f_u = m-1$  – число мір свободи кожної оцінки,  $f_u = 2$ .

Процес вважається відтворним, якщо виконується нерівність (3.2).

$$\sum_{u=1}^n s_{u1}^2 = 0,117; s_{u1 \max}^2 = 0,0257; G_1 = \frac{0,0257}{0,117} = 0,22 < 0,33.$$

$$\sum_{u=1}^n s_{u2}^2 = 0,058; s_{u2 \max}^2 = 0,0057; G_2 = \frac{0,0057}{0,058} = 0,1 < 0,33.$$

$$\sum_{u=1}^n s_{u3}^2 = 0,082; s_{u3 \max}^2 = 0,00996; G_3 = \frac{0,00996}{0,082} = 0,121 < 0,33.$$

Нерівність вірна – процес відтворюваний для трьох пластин.

При цьому дисперсія відтворюваності (помилка досвіду) визначається по формулі

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}. \quad (3.4)$$

Розрахункові значення дисперсії відтворюваності занесено до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахункові значення дисперсії відтворюваності

	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3
$Sy^2$	0,634	0,354	1,126

Перевірка адекватності лінійної моделі виконується за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)} \quad (3.5)$$

де  $y_u$  – розрахункове значення відгуку в  $i$ -му досвіді;

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}, \quad (3.6)$$

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$  – критерій Фішера при 5 % - ному рівні значущості  $F_{(0,05; f_{ad}; f_y)} = 23,69$ ;

$f_{ad} = n - k - 1$  – число мір свободи дисперсії адекватності;

$f_y$  – число мір свободи дисперсії відтворюваності.

$$s_{ad1}^2 = 8,738; F_1 = \frac{8,738}{0,638} = 13,69 < 23,69.$$

$$s_{ad2}^2 = 8,147; F_2 = \frac{8,147}{0,638} = 12,76 < 23,69.$$

$$s_{ad3}^2 = 11,424; F_3 = \frac{11,424}{0,638} = 16,73 < 23,69.$$

Можна зробити висновок, що модель адекватна для трьох пластин.

Оцінка значущості коефіцієнта регресії проводиться за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05; f_y)} \frac{s_y}{\sqrt{n}}, \quad (3.7)$$

де  $t_{(0,05; f_y)}$  – 5 % - на точка розподілу Стьюдента з  $f_y = 14$  мірами свободи.

Для перевірки нерівності розрахуємо значення  $\Delta b_i$ . Результати занесені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Розраховані значення  $\Delta b_i$

	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3
$\Delta b_i$	0,045	0,033	0,148

Таким чином, у відповідності до виконання нерівності, можна скласти таблицю з прийнятими коефіцієнтами полінома.

Таблиця 3.8 – Прийняті коефіцієнти полінома

	Пластина1	Пластина2	Пластина3
1	2	3	4
b <sub>1</sub>	0	0	0
b <sub>2</sub>	0	0	0
b <sub>3</sub>	0	0	0

1	2	3	4
b <sub>12</sub>	0	0	-0,126
b <sub>13</sub>	0	0	0
b <sub>23</sub>	0	0	-0,141
b <sub>123</sub>	0	0	0
b <sub>11</sub>	0,239	0,23	0,298
b <sub>22</sub>	0,262	0,206	0,294
b <sub>33</sub>	0	0	0
b <sub>0</sub>	0,433	0,264	0,615

Запишемо поліном у кодованому вигляді для всіх трьох пластин:

$$Y_1 = 0,433 + 0,239 \cdot x_1^2 + 0,263 \cdot x_2^2$$

$$Y_2 = 0,264 + 0,23 \cdot x_1^2 + 0,206 \cdot x_2^2$$

$$Y_3 = 0,615 - 0,126 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,141 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,298 \cdot x_1^2 + 0,294 \cdot x_2^2$$

Декодування полінома виконується за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - x_{i_0}}{\delta_i}, \quad (3.8)$$

де  $X_i$  – натуральне значення чинника;

$x_{i_0}$  – значення  $i$ -го чинника на нульовому рівні;

$\delta_i$  – інтервал варіювання  $i$ -го чинника.



$$\begin{aligned}
 h_1 &= 0,433 + 0,239 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \right)^2 + 0,262 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right)^2 = 0,433 + \\
 &+ 0,239 \cdot (0,0025 \cdot V^2 - 0,5 \cdot V + 25) + 0,262 \cdot (400 \cdot S^2 - 100 \cdot S + 25) = \\
 &= 0,433 + 0,001 \cdot V^2 - 0,001 \cdot V + 0,063 + 104,92 \cdot S^2 - 26,23 \cdot S + 6,56 = \\
 &= 7,06 + 0,001 \cdot V^2 - 0,001 \cdot V + 104,92 \cdot S^2 - 26,23 \cdot S
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_2 &= 0,264 + 0,23 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \right)^2 + 0,206 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right)^2 = \\
 &= 0,264 + 0,23 \cdot (0,0025 \cdot V^2 - 0,5 \cdot V + 25) + 0,206 \cdot (400 \cdot S^2 - 100 \cdot S + 25) = \\
 &= 0,264 + 0,001 \cdot V^2 - 0,115 \cdot V + 5,75 + 82,4 \cdot S^2 - 20,6 \cdot S + 5,15 = \\
 &= 11,164 + 0,001 \cdot V^2 - 0,001 \cdot V + 104,92 \cdot S^2 - 26,23 \cdot S
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 0,615 - 0,126 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \cdot \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right) - 0,141 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \cdot \frac{t-0,3}{0,3-0,2} \right) + \\
 &+ 0,299 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \right)^2 + 0,294 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right)^2 = 0,615 - 0,126 \cdot (V \cdot S - 0,25 \cdot V - 100 \cdot S + 25) - \\
 &- 0,141 \cdot (200 \cdot S \cdot t - 50 \cdot t - 60 \cdot S + 150) + 0,299 \cdot (0,0025 \cdot V^2 - 0,5 \cdot V + 25) + \\
 &+ 0,294 \cdot (400 \cdot S^2 - 100 \cdot S + 25) = 0,615 - 0,126 \cdot V \cdot t + 0,03 \cdot V + 12,6 \cdot S - 3,15 - 28,2 \cdot S \cdot t + \\
 &+ 7,05 \cdot t + 8,46 \cdot S - 21,15 + 0,001 \cdot V^2 - 0,15 \cdot V + 7,48 + 117,6 \cdot S^2 - 29,4 \cdot S + 7,75 = \\
 &= -8,46 - 0,126 \cdot V \cdot t + 0,03 \cdot V + 12,6 \cdot S - 28,2 \cdot S \cdot t + 7,05 \cdot t + 8,46 \cdot S + 0,001 \cdot V^2 - \\
 &- 0,15 \cdot V + 117,6 \cdot S^2 - 29,4 \cdot S
 \end{aligned}$$

Таблиця 3.9 – Отриманні залежності відгука від факторів, що впливають на досліджуваний процес

Пластина	Поліном
1	$h_1 = 7,06 + 0,0006 \cdot V^2 - 0,0013 \cdot V + 104,92 \cdot S^2 - 26,23 \cdot S$ <p>Критерій Фішера <math>F_1 = 13,69 &lt; 23,69</math> – модель адекватна.</p>
2	$h_2 = 0,264 + 0,23 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \right)^2 + 0,206 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right)^2 =$ $= 11,164 + 0,001 \cdot V^2 - 0,001 \cdot V + 104,92 \cdot S^2 - 26,23 \cdot S$ <p>Критерій Фішера <math>F_2 = 12,76 &lt; 23,69</math> – модель адекватна</p>

Пластина	Поліном
3	$h_3 = 0,615 - 0,126 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \cdot \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right) - 0,141 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \cdot \frac{t-0,3}{0,3-0,2} \right) +$ $+ 0,299 \cdot \left( \frac{V-100}{120-100} \right)^2 + 0,294 \cdot \left( \frac{S-0,25}{0,3-0,25} \right)^2 = -8,46 - 0,126 \cdot V \cdot t + 0,03 \cdot V +$ $+ 12,6 \cdot S - 28,2 \cdot S \cdot t + 7,05 \cdot t + 8,46 \cdot S + 0,001 \cdot V^2 - 0,15 \cdot V + 117,6 \cdot S^2 - 29,4 \cdot S$ <p>Критерій Фішера <math>F_3 = 16,73 &lt; 23,69</math> – модель адекватна</p>

### 3.2 Дослідження сили супротиву ковзанню для різних пластин

Було проведено дослідження з використанням трибометра (рис.2.4). Експерименти проводились для визначення адгезійної складової сил тертя в парі «інструментальний – оброблювальний» матеріал. Всі експерименти проходили для трьох пластин різних виробників, що рекомендовані для чистової обробки сталі 45. Було використано циліндричний індентор виготовлений з оброблюваного матеріалу за розмірами розрахованими згідно математичної моделі в пункті 2.2. Для кожної з пластин було проведено 5 дослідів.

Таблиця 3.10 – Результати проведених дослідів

№ експ.	Дотп, мм	P0, Н	T0, Нмм	Tп, Нмм	радіус відбитку, мм	F0	p, Мпа	tau, Мпа
1.1	1,9	3000	1030	1131,8	0,95	2,83528737	1057,95449	712,832505
1.2	2,1	2629	864,8	953,91	1,05	3,4636059	758,939895	444,973467
1.3	1,8	1766	573	632,83	0,9	2,54469005	694,01969	468,762669
1.4	1,8	1793	592,2	652,99	0,9	2,54469005	704,69879	483,696916
1.5	1,7	988,4	285,8	319,27	0,85	2,26980069	435,465547	280,7318
2.1	1,9	2977	855,4	956,31	0,95	2,83528737	1049,87594	602,312256
2.2	2,1	3214	975,7	1084,7	1,05	3,4636059	927,810522	505,963859
2.3	1,8	1585	447,4	501,16	0,9	2,54469005	622,747749	371,230615
2.4	1,8	1944	524,5	590,43	0,9	2,54469005	764,022322	437,354356
2.5	1,7	1073	265,1	301,47	0,85	2,26980069	472,874118	265,078899
3.1	2,1	2361	686,2	766,23	1,05	3,4636059	681,584472	357,424647
3.2	2	3099	904,3	1009,3	1	3,14159265	986,528281	545,046437
3.3	1,9	2227	550,8	626,33	0,95	2,83528737	785,387761	394,480129
3.4	1,8	1900	468,1	532,53	0,9	2,54469005	746,666574	394,467546
3.5	1,8	1093	259,4	296,49	0,9	2,54469005	429,521859	219,624222

Якщо ковзання на площині контакту відсутнє, то з цього припущення виходить, що площа контакту може повертатися як жорстке ціле щодо віддалених точок обох тіл. Тоді середнє значення дотичного напруження на поверхні відбитка відповідно до даних К. Джонсона може бути задано широко використовуваним виразом:

$$\tau_n = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{M_z}{r_{\text{отп}}^3} = 0,239 \frac{M_z}{r_{\text{отп}}^3} \quad (3.9)$$

де  $M_z$  – момент опору обертанню, вимірюваний динамометром;  $r_{\text{отп}}$  – радіус відбитка. Однак більш точним наближенням є припущення про наявність ковзання на поверхні контакту, як це має місце на практиці в даних випробуваннях. Для цього випадку К. Джонсон дає вираз

$$M_z = \frac{3}{16} \pi \mu N_z r_{\text{отп}} \quad (3.10)$$

де  $\mu$  – середній коефіцієнт тертя на контактній поверхні.

Середні нормальні напруження на поверхні відбитка розраховували за формулою

$$\sigma_n = N_z / \pi r_{\text{отп}}^2 \quad (3.11)$$

де  $N_z$  – осьова сила.

Звідси середнє дотичне напруження на поверхні контакту дорівнює

$$\tau_n = \frac{16}{3\pi^2} \cdot \frac{M_z}{r_{\text{отп}}^3} = 0,540 \frac{M_z}{r_{\text{отп}}^3} \quad (3.12)$$

тобто більше, ніж у два рази в порівнянні зі значеннями, підрахованими за формулою (3.9). Тому в даній роботі для побудови графіка залежності середніх

нормальних напружень від середніх дотичних напружень були використані формули (3.11) і (3.12).

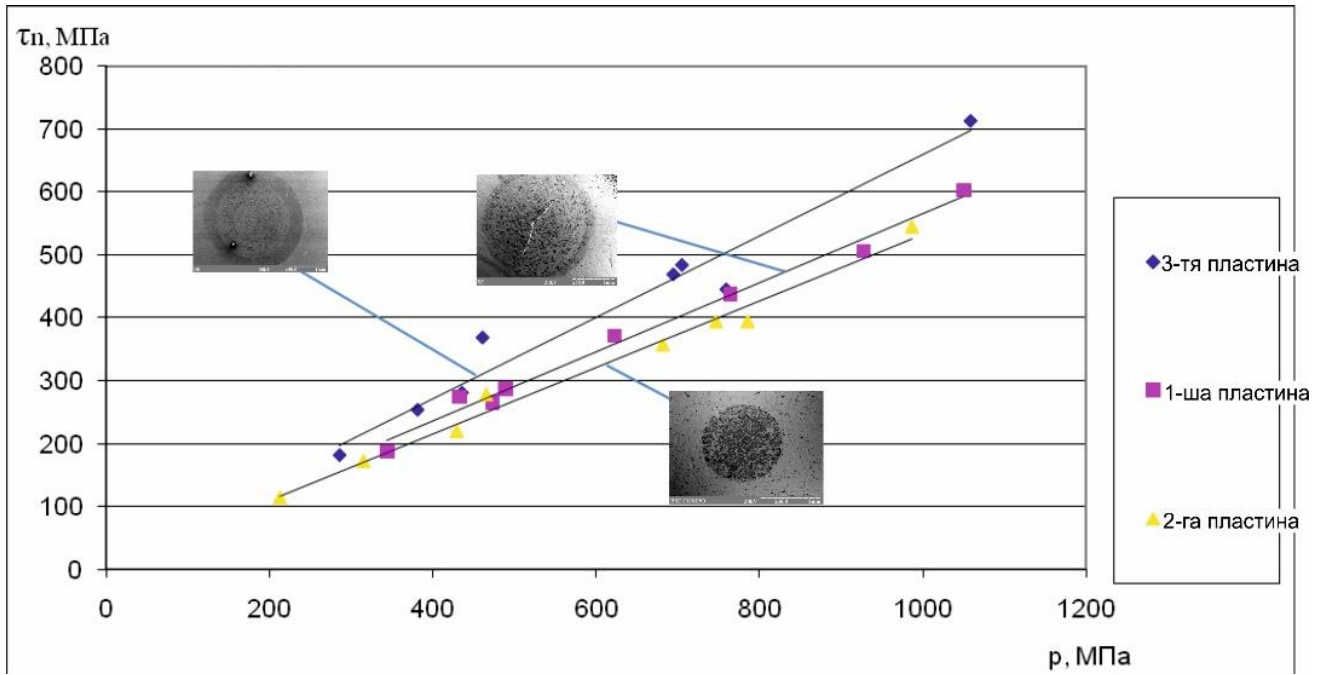


Рисунок 3.1 – Діаграма залежності  $\tau_n$  від  $\sigma_n$  для трьох різних пластин

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ЛЕЗА ПО ЗАДНІЙ ПОВЕРХНІ

Для підтвердження результатів моделювання було проведено натурний експеримент з різання однієї заготовки трьома пластинами різних виробників. Після заданого часу обробки було зроблено контроль величини зношування по задній поверхні кожної з використовуваних. За допомогою знімків майданчика зносу пластини на задній поверхні і масштабної лінійки, отриманих за допомогою мікроскопа (рис.3.2), були проведені вимірювання лінійної величини зношування  $h_3$ . На даних рисунках показано, як вимірюється зношування пластини по задній поверхні. Враховуючи, що фотографії задньої поверхні пластини і масштабної лінійки виконані з використанням однієї і тієї ж лінзи і з однаковим збільшенням, можна за допомогою масштабної лінійки (на рис.3.2 показано розмір 1 мм) визначити отримане при вимірюванні значення величини зношування  $h_3$  на задній поверхні.

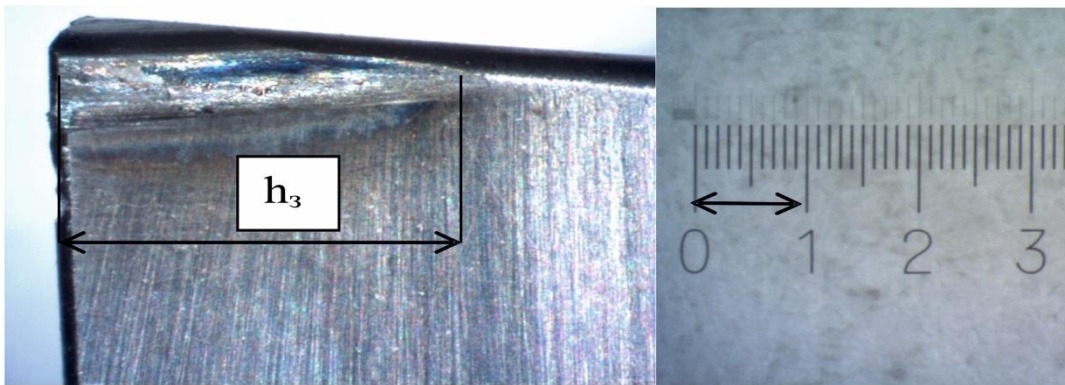


Рисунок 3.2 – фотографія задньої поверхні пластини та масштабної лінійки

Результати, отримані після проведення натурального експерименту показують, що величина зношування по задній поверхні буде у другій пластини (рис. 3.3).

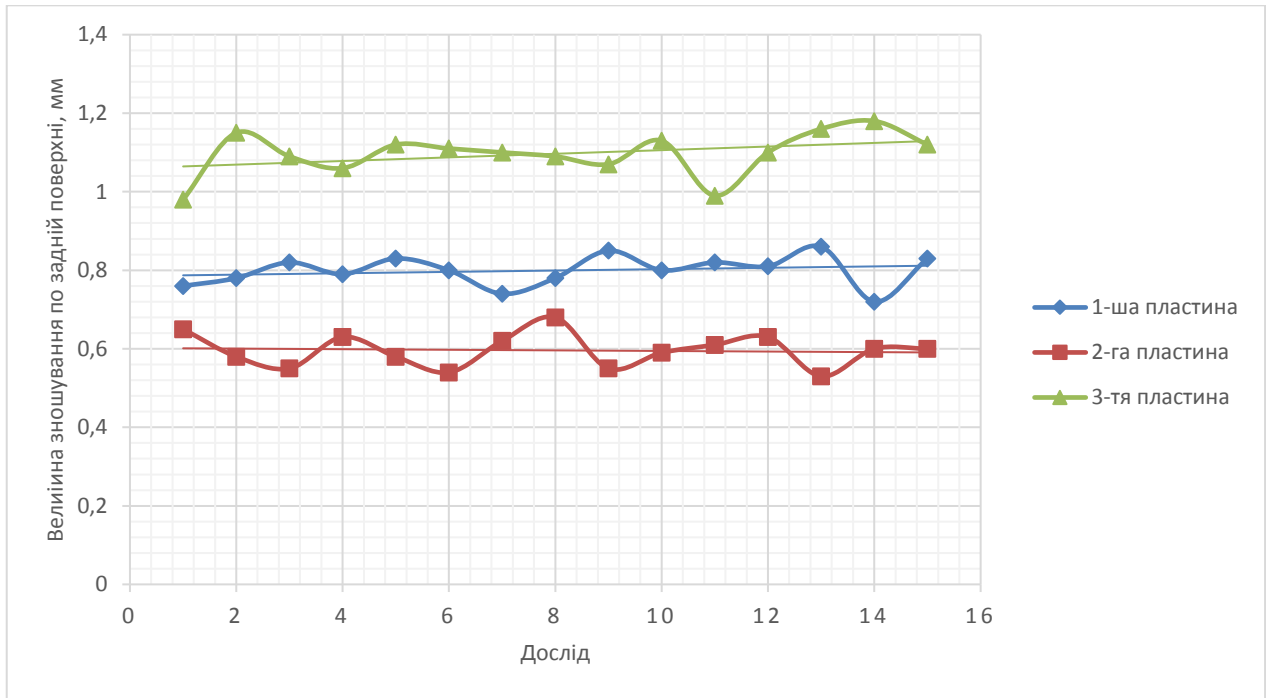


Рисунок 3.3 – Величина зносу по задній поверхні для трьох пластин різних виробників

Вибрані пластини були з радіусом заокруглення різальної кромки 1-шої пластини 30мкм, 2-гої – 20 мкм, 3-тьої – 60 мкм.

#### 4.1 Висновок

Розроблено метод вибору покупних змінних багатогранних пластин для чистової обробки заснований на тому, що треба враховувати трибологічні характеристики (середній коефіцієнт тертя) взаємодії в парі «інструментальний-оброблювальний» матеріали та радіус заокруглення різальної кромки.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, на основі теорії трибології різання металів запропоновано теоретичні основи неруйнівного експрес оцінювання якості леза металорізального інструменту, що купується для вирішення конкретного виробничого завдання, а саме:

1. На основі проведених досліджень процесу формування контактної зони інструмент – оброблювальна поверхня в умовах адгезії встановлено залежності якості лез різального інструменту від адгезійної складової сили тертя. Встановлено, що комплекс трибологічних властивостей матеріалів, які знаходяться в процесі різання в контактній взаємодії, складається з рівнянь, які пов'язують температуру і нормальні напруження на контактній поверхні з дотичними напруженнями. У загальному випадку моделювання процесу різання на рівні деталізації «Лезо» мають бути визначені 5 констант  $\tau_0, \beta_0, k_b, T_k, \mu_d$  які відображають трибологічні властивості контактуючої пари.

2. Для визначення констант  $\tau_0, \beta_0$ , які характеризують адгезійну взаємодію інструментального та оброблюваного матеріалів, в роботі розроблені спеціальні методики і алгоритм експериментальних досліджень ковзання в умовах високих тисків за допомогою адгезіометра оригінальної конструкції, що дозволяє визначити силу опору ковзанню за жорсткою схемою навантаження індентора в півпростір при його безперервному обертанні.

3. В роботі удосконалено форсований метод оцінювання стійкості різального інструменту, що купується на основі запропонованого алгоритму проведення неруйнівного експрес методу оцінювання якості лез різального інструменту, що базується на теорії фрикційної взаємодії поверхонь різального леза з поверхнями на оброблюваній заготовці та стружкою.

4. На основі теоретичних досліджень можливостей використання скінчено-елементного аналізу для прогнозування ресурсу лезового металорізального інструменту запропоновано теоретичні основи вибору лезового металорізального

інструменту що купується з урахуванням техніко-економічних показників виробництв підприємств та виконання вимог конкретного виробничого завдання.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Фундаментальні аспекти прийняття рішень в системі інструментального забезпечення машинобудівних виробництв // [Електронний ресурс]. – URL: [http://sumdu.edu.ua/images/stories/scientific\\_inf/research/report/interim2016-Zaloga\(1\).pdf](http://sumdu.edu.ua/images/stories/scientific_inf/research/report/interim2016-Zaloga(1).pdf)
2. Мазур, М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / [М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов] : під заг. ред.. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. - Львів : Новий Світ – 2000, 2011. – 422 с.
3. Внуков Ю.М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навчальний посібник / Ю.М. Внуков, В.О. Залога. – Суми: Сумський державний університет, 2010 – 243с.
4. Залога В. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні: навчальний посібник / В. О. Залога, В. Д. Гончаров, О. О. Залога; за заг. ред. В. О. Залого. - Суми : Сумський державний університет, 2013. – 371 с.
5. Основи теорії різання матеріалів: підручник / [М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.]; За ред. М.П. Мазура. – Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.
6. Rubenstein C. The influence of strain rate in orthogonal cutting / C. Rubenstein // Int. J. Mach. Tool Des. and Res. – 1972. – Т. 12. – № 2. – С. 105–120.
7. Грановский Г. И. Резание металлов / Грановский Г. И. –М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
8. Abdelmoneim M. E. Tool edge roundness and stable buildup formation in finish machining / M. E. Abdelmoneim, R. F. Scrutton // Trans. ASME. –1976. – № 4. – С. 1258–1267.
9. А.С. 1764833 СССР, G 01 N 3/58. Способ контроля качества режущего инструмента / В. А. Десненко, Л. И. Пупань, А. И. Грабченко, В. И. Кононенко (СССР). – №4746917/08; заявл. 09.10.89; опубл. 30.09.92. Бюл. № 36.

10. Bowden F. P. The Friction and Lubrication of Solids / Bowden F. P., Tabor D. – Oxford: Clarendon Press, 1964
11. Виноградов Д. В. Оценка свойства быстрорежущего инструмента / Д. В. Виноградов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1993. – № 10–12. – С. 121–125.
12. Абрамян Н. С. К вопросу о стабильности твердосплавных многогранных режущих пластинок / Н. С. Абрамян // Современные задачи резания инструментами из жестких материалов: тезисы докладов Всесоюзн. научной конф. – Харьков. –1981. – С. 5 – 6
13. Ивченко Т. Г. Обоснование и обеспечение в эксплуатации оптимального уровня безотказности и долговечности режущего инструмента / Т. Г. Ивченко // Тез. докл.: Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг (24 - 28 сент. 1997 г.). – Харьков. –1997. – С. 103–104.
14. Івченко О. В. Управління якістю інструментальної підготовки виробництва багатонаменклатурного машинобудівного підприємства: дис. ... канд. техн. наук: 05.01.02 / Івченко Олександр Володимирович. – К., 2009. – 278 с.
15. Антипов Д. В. Управление качеством изготовления режущего инструмента на основе интеграции методов менеджмента / Антипов Д. В., Антипова О. И. // Вектор науки ТГУ. – 2009. – №4. – С.15-20
16. А. С. 1682888 СССР, G 01 N 3/58. Способ прогнозирования стойкости режущего инструмента / Н. В. Новиков, Л. Н.Девин, А. К. Пискунов, В. Ф. Дрожин и В. Л. Доброскок (СССР). – №4687407/28; заявл. 03.05.89; опубл. 07.10.91. Бюл. № 37
17. Васілевський О.М. Нормування показників надійності технічних засобів / Васілевський О.М., Поджаренко В.О. – Вінниця: ВНТУ, 2010 – 129 с.
18. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах, т.2. Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1986 – 496 с.
19. Залога В.О. Розрахунок режимів різання при точінні, свердлінні, фрезеруванні. Навчальний посібник – К.: ИСИ, 1994 – 176 с. (українською та російською мовами)

20. Ozel T. , Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting//Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2000. – Т. 40. – С. 133- 152.
21. Ozel T. , Zeren E. Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting test//Journal of Material Processing Technology. – 2004. – Т. 153. – С. 1019 – 025.
22. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.
23. Chandrasekaran H. , Kapoor S. G. Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses//Trans. ASME. -1965. – Т. 87. – С. 78 – 91.
24. Chandrasekaran H. , Kapoor S. G. Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses//Trans. ASME. -1965. -Т. 87. -С. 78- 91.
25. Андреев Г. С. Исследование напряжений в рабочей части резца на порязризационно-оптической установке с применением киносъемок / Андреев Г. С. // Вестник машиностроения. – 1958. – № 5. – С. 34 – 38.
26. Остафьев В. А. Физические основы процессов резания металлов / Остафьев В. А. – К.: Высшая школа, 1976. – 136 с.
27. Сопротивление материалов / [Писаренко Г. С., Агаев В. А., Квитка А. Л., и др.]. – Учебник: [4-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.
28. Heisel U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances / [Heisel U. , Krivoruchko D. V., Zaloha V. A., Storchak M.]//Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – Calabria, 2007. – С. 141–148.
29. Klocke F. 2D-FEM simulation of the orthogonal high speed cutting process / Klocke F. , Raedt H. , Hoppe S. //Machining Science and Technology. – 2001. – № 5. – С. 323–340.
30. Sartkulvanich P. Effects of flow stress and friction models in finite element simulation of orthogonal cutting – A sensitivity analysis / Sartkulvanich P., Altan T. , Göcmen A. // Machining Science and Technology. – 2005. – № 9. – С. 1–26.

31. Sohner J. Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode: Doktors der Ingenieurwissenschaften / Sohner J – Karlsruhe: Universitat Karlsruhe, 2003. – 162 c
32. Habak M. Effect of the Microstructure on the Tool. Chip Tribological Contact in Hard Turning of 100Cr6 Bearing Steel / Habak M. , leburn J. L., Badie-Levet D. // Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. –2007. –С. 365–372.
33. Резников А. Н. Теплофизика резания / Резников А. Н. – М.: Машиностроение, 1969. –288 с.
34. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
35. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
36. Грановский Г.И. Резание металлов / [Грановский Г.И., Грудов П.П., Кривоухов В.А. и др.] : Под ред. В.А. Кривоухова. – М.: Машгиз, 1954. - 472с.
37. Криворучко Д. В. Підвищення ефективності процесів чистової обробки на основі аналітичного моделювання силової взаємодії леза з заготовкою: дис. доктора техн.. наук : 16.01.03 / Криворучко Дмитро Володимирович. – К., - 2003. – 138 с.
38. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента / Девин Л.Н. – К.: Наукова думка, 1992. – 130 с.

## ДОДАТОК А

### ТАБЛИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИБІР ЗМІННИХ БАГАТОГРАНИХ ПЛАСТИН

Таблиця А.1 – Подачі, мм/об при чистовому точінні [18, с268]

Параметр шероховатости поверхности, мкм		Радиус при вершине резца $r$ , мм					
		0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
$Ra$	$Rz$						
0,63	—	0,07	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17
1,25		0,10	0,13	0,165	0,19	0,21	0,23
2,50		0,144	0,20	0,246	0,29	0,32	0,35
—	20	0,25	0,33	0,42	0,49	0,55	0,60
	40	0,35	0,51	0,63	0,72	0,80	0,87
	80	0,47	0,66	0,81	0,94	1,04	1,14

Примечание. Подачи даны для обработки сталей с  $\sigma_B = 700 \div 900$  МПа и чугунов; для сталей с  $\sigma_B = 500 \div 700$  МПа значения подач умножать на коэффициент  $K_s = 0,45$ ; для сталей с  $\sigma_B = 900 \div 1100$  МПа значения подач умножать на коэффициент  $K_s = 1,25$ .

Таблиця А.2 – Поправочний коефіцієнт  $K_{mv}$ , що враховує вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу [18, с 261]

Обрабатываемый материал	Расчетная формула
Сталь	$K_{mv} = K_r \left( \frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}$
Серый чугун	$K_{mv} = \left( \frac{190}{HB} \right)^{n_v}$
Ковкий чугун	$K_{mv} = \left( \frac{150}{HB} \right)^{n_v}$

Таблица А.3 – Значения коэффициента  $K_r$  та ступеня  $n_v$  для розрахунку коефіцієнта оброблюваності  $K_{mv}$  [18, с262]

Обрабатываемый материал	Коэффициент $K_r$ для материала инструмента		Показатели степени $n_v$ , при обработке						
			резцами		сверлами, зенкерами, развертками		фрезами		
	из быстрорежущей стали	из твердого сплава	из быстрорежущей стали	из твердого сплава	из быстрорежущей стали	из твердого сплава	из быстрорежущей стали	из твердого сплава	
Сталь: углеродистая ( $C \leq 0,6\%$ ), $\sigma_b$ , МПа: < 450 450 – 550 > 550 повышенной и высокой обрабатываемости резанием хромистая углеродистая ( $C > 0,6\%$ ), хромоникелевая, хромомолибденованадиевая хромомарганцовистая, хромокремнистая, хромокремнемарганцовистая, хромоникельмолибденовая, хромомолибденоалюминиевая хромованадиевая марганцовистая хромоникельвольфрамовая, хромомолибденовая хромоалюминиевая хромоникельванадиевая быстрорежущие	1,0	1,0	–1,0						
	1,0	1,0	1,75			–0,9		–0,9	
	1,0	1,0	1,75			0,9		0,9	
	1,2	1,1	1,75			1,05		–	
	0,85	0,95	1,75					1,45	
	0,8	0,9	1,5					1,35	
	0,7	0,8	1,25	1,0			1,0		1,0
	0,85	0,8	1,25			0,9			
	0,75	0,9	1,5					1,0	
	0,8	0,85	1,25						
	0,75	0,8	1,25						
	0,75	0,85	1,25						
0,6	0,7	1,25							
Чугун: серый ковкий	–	–	1,7	1,25	1,3	1,3	0,95	1,25	
	–	–	1,7	1,25	1,3	1,3	0,85	1,25	

Таблица А.4 – Значения поправочного коэффициента  $K_{mv}$  враховуючого стан поверхні заготовки на швидкість різання [18, с 263]

Состояние поверхности заготовки					
без корки	с коркой				
	Прокат	Поковка	Стальные и чугунные отливки при корке		Медные и алюминиевые сплавы
			нормальной	сильно загрязненной	
1,0	0,9	0,8	0,8 – 0,85	0,5 – 0,6	0,9

Таблица А.5 – Поправочный коэффициент  $K_{uv}$ , що враховує вплив інструментального матеріалу на швидкість різання [18, с 263]

Обрабатываемый материал	Значения коэффициента $K_{uv}$ в зависимости от марки инструментального материала						
	T5K12B 0,35	T5K10 0,65	T14K8 0,8	T15K6 1,00	T15K6 1,15	T30K4 1,4	BK8 0,4
Сталь конструкционная							
Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали	BK8 1,0	T5K10 1,4	T15K6 1,9	P18 0,3	—		
Сталь закаленная	HRC 35 – 50				HRC 51 – 62		
	T15K6 1,0	T30K4 1,25	BK6 0,85	BK8 0,83	BK4 1,0	BK6 0,92	BK8 0,74
Серый и ковкий чугун	BK8	BK6	BK4	BK3	BK3 1,25	—	
	0,83	1,0	1,1	1,15			
Сталь, чугун, медные и алюминиевые сплавы	P6M5	BK4	BK6	9XC	XBG	Y12A	—
	1,0	2,5	2,7	0,6	0,6	0,5	

Таблица А.6 – Значения коэффициента  $C_v$  та показників ступеню у формулі визначення швидкості різання [18, с 269]

Вид обработки	Материал режущей части резца	Характеристика подачи	Коэффициент и показатели степени					
			$C_v$	$x$	$y$	$m$		
<i>Обработка конструкционной углеродистой стали, <math>\sigma_b = 750</math> МПа</i>								
Наружное продольное точение проходными резцами	T15K6 *	$s$ до 0,3	420	0,15	0,20	0,20		
		$s$ св. 0,3 до 0,7	350		0,35			
		$s > 0,7$	340		0,45			
То же, резцами с дополнительным лезвием	T15K6 *	$s \leq t$ $s > t$	292	0,30 0,15	0,15 0,30	0,18		
Отрезание	T5K10* P18**	—	47	—	0,80	0,20		
			23,7		0,66	0,25		
Фасонное точение	P18**	—	22,7	—	0,50	0,30		
Нарезание крепежной резьбы	T15K6 *	—	244	0,23	0,30	0,20		
			P6M5	Черновые ходы: $P \leq 2$ мм	14,8 30	0,70 0,60	0,30 0,25	0,11 0,08
				Чистовые ходы	41,8	0,45	0,30	0,13
Вихревое нарезание резьбы	T15K6 *	—	2330	0,50	0,50	0,50		