

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин**

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 202__ р.

Магістерська дисертація

**на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Конструювання та дизайн машин»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему Магнітно-абразивне оброблення багатограних непереточуваних
твердосплавних пластин _____

Виконав (ла): студент (ка) _____ ІІ курсу, групи МК – 31мп

_____ Михалєвський Богдан-Станіслав Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____ д.т.н. проф. Майборода В.С

(посада, науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з розділу _____

(посада, науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент:

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ - 2024

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 202_ р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Михалєвському Богдану-Станіславу Вікторовичу

1. Тема дисертації Магнітно-абразивне оброблення багатогранних
непереточуваних твердосплавних пластин, науковий керівник дисертації
Майборода Віктор Станіславович к.т.н. професор, затверджені наказом по
університету від «__» _____ 202__ р. №_____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження Процес магнітно-абразивного оброблення
багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин
4. Предмет дослідження Підвищення якості та працездатності твердосплавних
пластин за рахунок використання магнітно абразивного оброблення

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Аналізувати способи підвищення
експлуатаційних властивостей твердосплавного інструменту. Підготувати
зразки до оброблення. Виконання експериментальних досліджень та їх
опрацювання. Розробка стартап проекту

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання отримав

9. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір і затвердження теми		виконано
2	Підбір та ознайомлення із літературою		виконано
3	Складання плану, розробка індивідуального завдання		виконано
4	Виконання експериментальних досліджень		виконано
5	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини		виконано
6	Збір і аналітична обробка статистичного матеріалу з теми дослідження		виконано
7	Розробка стартап проекту		виконано
8	Написання дисертації та її оформлення		виконано
9	Подання роботи та її захист		виконано

Студент

_____ Богдан-Станіслав
МИХАЛЄВСЬКИЙ

Науковий керівник

_____ Віктор МАЙБОРОДА

АНТОЦІЯ

Михалєвський Б.-С. В. Магнітно-абразивне оброблення багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ, 2024.

Магістерська робота присвячена дослідженню магнітно-абразивного оброблення (МАО) багатогранних твердосплавних пластин, яке є перспективним методом фінішної обробки різального інструменту. Проведено аналіз літературних джерел, описано основні схеми та принципи роботи МАО, досліджено характеристики абразивних порошків та їхній вплив на якість обробки.

Розроблено методику експериментального дослідження, яка дозволила оцінити зміни фізико-механічних властивостей різальної кромки, включаючи шорсткість, радіус заокруглення, сколювання та зносостійкість. Встановлено залежності між технологічними параметрами процесу та якістю оброблених пластин.

Результати роботи демонструють ефективність МАО для покращення експлуатаційних властивостей твердосплавних пластин, зокрема, підвищення їхньої зносостійкості та зменшення дефектів різальної кромки. Отримані висновки мають практичну цінність як для виробництва нових пластин, так і для відновлення відпрацьованих інструментів.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, твердосплавні пластини, різальна кромка, шорсткість поверхні, зносостійкість.

SUMMARY

Mykhalevskyi B.-S. V. Magnetic-Abrasive Machining of Polyhedral Non-Regrindable Cemented Carbide Inserts – Manuscript Form.

Dissertation for the attainment of a Master's degree in the specialty 131 – Applied Mechanics. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – Kyiv, 2024.

The master's thesis is dedicated to the study of magnetic-abrasive machining (MAO) of polyhedral cemented carbide inserts, which is a promising method for the finishing treatment of cutting tools. A literature review was conducted, and the main schemes and principles of MAO were described. The characteristics of abrasive powders and their influence on the machining quality were investigated.

A methodology for experimental research was developed, allowing the evaluation of changes in the physico-mechanical properties of the cutting edge, including surface roughness, radius of rounding, chipping, and wear resistance. The dependencies between technological parameters of the process and the quality of the processed inserts were established.

The results of the work demonstrate the effectiveness of MAO in improving the operational properties of cemented carbide inserts, particularly increasing their wear resistance and reducing cutting edge defects. The conclusions obtained have practical value both for the production of new inserts and for the restoration of used tools.

Keywords: magnetic-abrasive machining, cemented carbide inserts, cutting edge, surface roughness, wear resistance.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ВІДОМОСТЕЙ ПРО МАГНІТНО – АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ТА ТВЕРДОСПЛАВНІ ПЛАСТИНИ	11
1.1 Історія розвитку технології МАО.....	11
1.2 Сутність та особливості методу МАО	12
1.3 Класифікація існуючих схем МАО	14
1.4 Магнітно-абразивні порошки, що використовуються при МАО.....	17
1.5 Застосування мастильно-охолоджуючих технологічних засобів при магнітно-абразивному обробленні	19
1.6 Фізико-хімічні явища при МАО	20
1.7 Твердосплавні пластини.....	23
1.8 Класифікація БНТП та система їх позначень.....	24
1.9 Зв’язувальна фаза у пластинах	30
1.10 Покриття пластин.....	31
1.11 Фінішне оброблення твердосплавних пластин	32
1.12 Вплив кінематики та динаміки процесу МАО на якість БНТП	33
2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	37
2.1 Характеристика геометрії та матеріалу різальних пластин.....	37
2.2 Вимірювання поверхневої твердості на пластинах	38
2.3 Визначення шорсткості поверхні	40
2.4 Технологічні параметри МАО в робочій зоні кільцевого типу	42
2.5 Випробування на стійкість.....	43
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
3.1 Дослідження зміни мікротвердості	44
3.2 Випробування на стійкість.....	45

3.3 Визначення шорсткості поверхні	47
4 СТАРТАП ПРОЄКТ	49
4.1 Формування ідеї та опис стартап проєкту	49
4.2 Пошук назви та створення логотипу.....	49
4.3 Основні переваги стартап проєкту	51
4.4 Технологічний аудит стартап проєкту	54
4.5 Аналіз ринкових можливостей для запуску стартап проєкту	55
4.6 Аналіз ринкового середовища	57
4.7 SWOT-аналіз.....	61
4.8 Розробка ринкової стратегії проєкту.....	63
4.9 Фінансова стратегія.....	66
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

1. Скорочення

БНТП	–	багатогранні непереточувані пластини
МОТС	–	мастильно-оходжуюче технологічне середовище
МАІ	–	магнітно-абразивний інструмент
МАО	–	магнітно-абразивне оброблення
МАП	–	магнітно-абразивний порошок
МС	–	механічна суміш
ПАР	–	поверхнево-активна речовина
РІ	–	різальний інструмент
РК	–	різальна кромка
ТП	–	твердосплавні пластини
ФАП	–	фероабразивний порошок
ЧПК	–	числове програмне керування

2. Умовні позначення

V	–	швидкість головного руху (лінійна швидкість руху оправки вздовж робочої зони), м/хв
R	–	радіус округлення РК різального інструменту, мкм;
B	–	магнітна індукція, Тл;
HV	–	твердість за Віккерсом, ГПа;
h	–	зношення РІ, мм;
l	–	довжина вимірювання РК, мкм;
p	–	кут базування оброблюваної деталі відносно площини робочої зони (відносно вектора головного руху), градуси;
q	–	кут базування оброблюваної деталі відносно дотичної площини до кільцевої ванни, градуси

ВСТУП

Одним із основних етапів виготовлення різних деталей є фінішні операції, що і дозволяють формувати бажані параметри якості оброблюваних поверхонь. Найчастіше для таких полірувально-зміцнювальних операцій використовують теплові, хімічні та фізичні методи впливу.

З розвитком автоматизованих виробничих процесів, для оброблення різних матеріалів, значного поширення набули збірні різальні інструменти з механічним кріпленням твердосплавних пластин.

Проте навіть при спостереженні та аналізі процесів обробки металу, а саме: точіння, свердління та фрезерна обробка із використанням твердосплавних пластин, можна виявити певні недоліки та аспекти, що потребують покращення чи модифікації:

- швидке зношення БНТП;
- недостатня якість обробки поверхні;
- нагрів, через високе тертя;
- нестабільність процесу обробки;
- зниження продуктивності обробки поверхонь.

Одним із перспективних методів, що забезпечує позитивний та керований вплив на мікрогеометрію різальних кромek, є метод магнітно-абразивного оброблення.

На етапі виготовлення інструмента з твердого сплаву ключова увага приділяється формі та розмірам різальних кромek, мікрогеометричним характеристикам, а також фізико-механічним властивостям поверхні та поверхневого шару передньої і задньої поверхонь. Для досягнення необхідних експлуатаційних характеристик різальних елементів застосовують різноманітні методи фінішного оброблення із використанням жорстко зв'язаних або вільних абразивів.

Одним із перспективних методів, що забезпечує позитивний та керований вплив на мікрогеометрію різальних кромek, є метод магнітно-

абразивного оброблення. Цей метод застосовує рухомо-скоординований абразивний інструмент, який характеризується змінними жорсткістю, абразивними та полірувальними властивостями. Особливо актуальним є використання цього методу в умовах великих магнітних робочих зон та слабких магнітних полів, що дозволяє досягти високої якості поверхневого шару і покращити характеристики різальних інструментів.

Таким чином, впровадження методу МАО у виробничі процеси дозволяє оптимізувати використання твердосплавних інструментів, підвищити їх ефективність та довговічність, що робить тему дослідження актуальною та важливою для сучасних виробничих підприємств.

1 АНАЛІЗ ВІДОМОСТЕЙ ПРО МАГНІТНО – АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ТА ТВЕРДОСПЛАВНІ ПЛАСТИНИ

1.1 Історія розвитку технології МАО

Ідея використання енергії магнітного поля для механічної обробки деталей була вперше запропонована Н. І. Каргаловим у 1938 році. Він розробив метод обробки внутрішніх поверхонь труб за допомогою абразивного порошку з ферромагнітними властивостями, отримавши авторське свідоцтво на спосіб полірування деталей машин із використанням магнітного поля.

У період з 1956 по 1959 рр. у США, Франції та інших країнах були зареєстровані численні патенти на методи та пристрої для магнітно-абразивної обробки за допомогою вільного абразивного порошку в змінному або циклічно змінному полярному магнітному полі.

У 1960-1961 роках у СРСР дві наукові групи під керівництвом В. А. Шальнова та В. Н. Везуба розробили методи абразивної обробки плоских поверхонь немагнітних матеріалів за допомогою постійного електромагнітного поля. У 1962 році Р. С. Шулев запропонував використовувати порошки з магнітними та абразивними властивостями для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь тіл обертання в полі постійного електромагніту.

Перші експериментальні дослідження магнітно-абразивної обробки в СРСР були проведені у 1960-1965 роках за участю В. Н. Везуба, В. А. Шальнова та Є. Г. Коновалова.

Саме в роботах Є. Г. Коновалова, Г. С. Шулева, А. М. Штейнберга та Ю. М. Барона, виконаних у 1960-1970 роках, вперше було представлено загальні теоретичні положення, фізичні основи та технологічні особливості технології магнітно-абразивного оброблення (МАО) при обробці деталей різного типу. Ці дослідження заклали основи для подальшого розвитку методів і технологій

магнітно-абразивного оброблення, що дозволило значно вдосконалити процеси обробки різних матеріалів.

З 1980-х років технологія магнітно-абразивного оброблення (МАО) здобуває значну популярність, і дослідження у цій галузі починають активно вести в інших країнах, таких як Японія, Болгарія та інших. У цей період, зокрема в СРСР 1980-х — початку 90-х років, дослідження в області магнітно-абразивної обробки активно проводяться науковими колективами в Мінську.

У 1990-х роках магнітно-абразивною обробкою займаються науково-дослідні підрозділи Фізико-технічного інституту НАН Білорусі, БНТУ та науково-інженерне підприємство "Полімаг" (Білорусь). У цей період було розроблено та реалізовано теоретичні і практичні завдання полірування в магнітному полі циліндричних та сферичних поверхонь виробів, які переважно функціонують у вузлах тертя машин і механізмів. Пошукові дослідження продемонстрували перспективність застосування магнітно-абразивної обробки для підготовки поверхонь виробів перед операціями зварювання та нанесення покриттів.

В останні роки активно проводяться дослідження магнітно-абразивної обробки поверхонь прецизійних деталей у галузях електроніки, оптики та лазерної техніки, зокрема в науково-виробничому підприємстві "Полімаг".

Таким чином, технологія магнітно-абразивного оброблення отримала широке поширення та розвиток у багатьох країнах світу. Наукові колективи різних університетів і компаній займаються дослідженнями в цій галузі, що сприяє подальшому вдосконаленню методів і застосуванню магнітно-абразивної обробки в різних промислових сферах.

1.2 Сутність та особливості методу МАО

Магнітно-абразивна обробка (МАО) — це метод обробки, при якому заготовка та абразивні зерна взаємодіють у магнітному полі, рухаючись відносно один одного.

Суть МАО полягає в тому, що феромагнітна абразивна порошкова маса, ущільнена енергією магнітного поля, здійснює абразивний вплив на поверхню оброблюваної деталі.

Цей метод успішно застосовується для обробки різноманітних типів поверхонь, таких як циліндричні зовнішні та внутрішні, плоскі, поверхні тіл обертання з криволінійною утворюючою, а також гвинтові.

Основною сферою застосування магнітно-абразивної обробки є зниження шорсткості на поверхнях при одночасному підвищенні якості поверхневого шару.

До переваг МАО відносяться:

- Зниження циклічних навантажень на технологічну систему, що сприяє поліпшенню точності геометричних розмірів та форми оброблюваної поверхні завдяки безперервному контакту абразиву з поверхнею.
- Підтримка стабільних фізико-механічних характеристик поверхневого шару деталі через відсутність жорсткого кріплення абразивних зерен у зв'язці.
- Усунення критичних тисків і температур в зоні різання, що збільшує стійкість абразивного інструменту та сприяє автоматичному нівелюванню ріжучого інструменту стосовно топографії оброблюваної поверхні.
- Можливість управління жорсткістю абразивного інструменту в осьовому та поздовжньому напрямках через регулювання величини магнітної індукції, що дозволяє контролювати знімання металу.
- Спільне виконання чорнової, чистової та фінішної обробки без необхідності зміни технологічних баз та позиціонування деталі.
- Можливість здійснення як розмірної, так і безрозмірної обробки, що дозволяє знімати метал в межах від 0,002 до 0,5 мм за 10–120 секунд.

1.3 Класифікація існуючих схем МАО

Схеми магнітно-абразивної обробки (МАО) класифікують за трьома основними ознаками. Однією з основних є функціональне призначення схем, за яким вони поділяються на такі категорії:

- I — магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю і створює сили різання.
- II — магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю, створює сили різання та задає ріжучому інструменту рухи різання.
- III — магнітне поле задає сили та рухи різання несформованій масі феромагнітного абразивного порошку.
- IV — магнітне поле задає необхідні для різання рухи безпосередньо заготовці або абразивному інструменту.
- V — магнітне поле в зоні обробки інтенсифікує чи покращує якісні характеристики існуючих абразивних способів обробки.

2. За формою оброблюваних поверхонь:

- А — схеми обробки зовнішніх поверхонь обертання.
- Б — схеми обробки внутрішніх поверхонь обертання.
- В — схеми обробки площин і лінійних фасонних поверхонь.
- Г — схеми обробки тривимірних фасонних поверхонь.

3. За типом використовуваного магнітного індуктора:

- 1 — схеми з електромагнітними індукторами постійного струму.
- 2 — схеми з електромагнітними індукторами змінного струму.
- 3 — схеми з електромагнітними індукторами трьохфазного струму.
- 4 — схеми з індукторами на постійних магнітах.

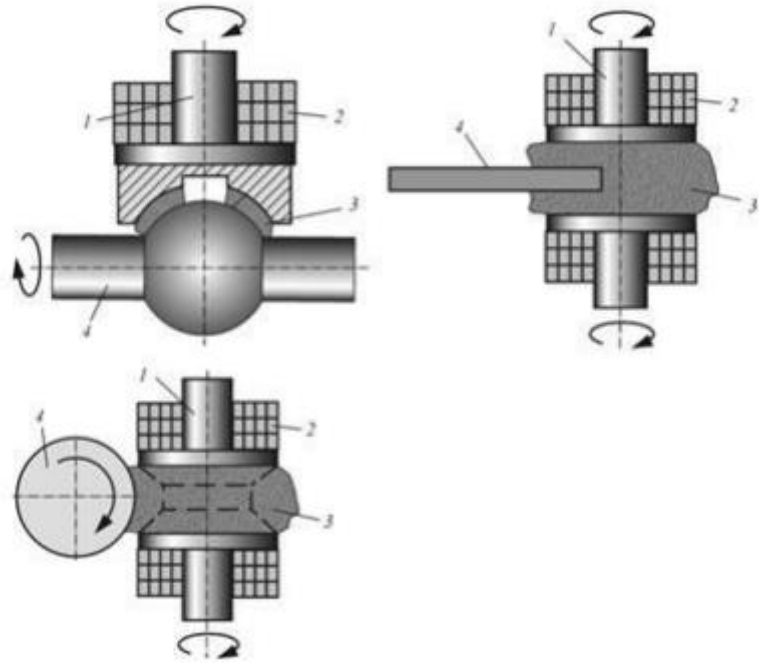


Рис.1.1. Схеми МАО, які застосовують для обробки різноманітних поверхонь: 1 – сердечник електромагніту; 2 – катушка електромагніту; 3 – магнітно-абразивне середовище; 4 – оброблювана заготовка.

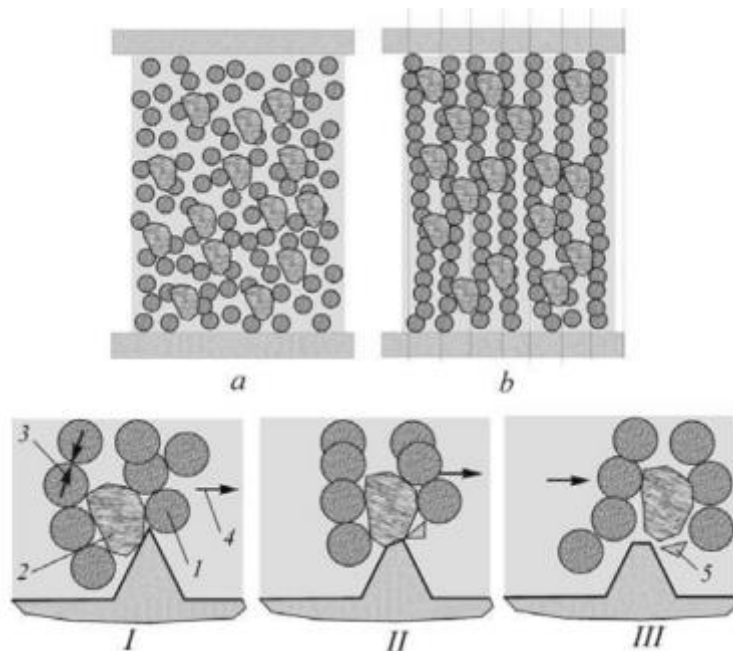


Рис.1.2. «Вистроювання» магнітних часточок при накладанні магнітного поля і стадії видалення нерівності при використанні магнітно-абразивних суспензій: 1 – магнітні часточки; 2 – абразивні часточки; 3 –

взаємодія між частинками; 4 – направлення руху частинок; 5 – видалений матеріал.

Класифікація МАО представлена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Критерій класифікації	Типи схем
1. За функціональним призначенням	I — магнітне поле формує з порошкової абразивної феромагнітної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю.
	II — магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент, створює сили різання та задає рухи різання.
	III — магнітне поле задає сили та рухи різання несформованій масі феромагнітного абразивного порошку.
	IV — магнітне поле задає рухи різання безпосередньо заготовці або абразивному інструменту.
	V — магнітне поле в зоні обробки інтенсифікує чи покращує якісні характеристики існуючих абразивних способів обробки.
2. За формою оброблюваних поверхонь	A — обробка зовнішніх поверхонь обертання.
	Б — обробка внутрішніх поверхонь обертання.
	В — обробка площин та лінійних фасонних поверхонь.
	Г — обробка тривимірних фасонних поверхонь
3. За типом магнітного індуктора	1 — електромагнітні індуктори постійного струму.
	2 — електромагнітні індуктори змінного струму.
	3 — електромагнітні індуктори трьохфазного струму.
	4 — індуктори на постійних магнітах

Вибір типу магнітного індуктора також має значення для ефективності процесу, хоча цей вибір не завжди очевидний, оскільки кожен тип індуктора має свої переваги та недоліки (таблиця 1.2)

Таблиця 1.2

Тип магнітного індуктора	Переваги	Недоліки
1. Електромагніт постійного струму	Стабільність магнітного поля, простота конструкції	Потрібна велика потужність, можливі теплові втрати
2. Електромагніт змінного струму	Можливість контролю інтенсивності поля, ширший діапазон застосування	Складність у підтримці стабільного поля, коливання магнітної індукції
3. Електромагніт трьохфазного струму	Підвищена ефективність для великих обсягів обробки, рівномірний розподіл магнітного поля	Складніша конструкція, вища вартість
4. Індуктори на постійних магнітах	Низьке енергоспоживання, простота конструкції	Обмежені можливості щодо контролю поля, низька потужність

1.4 Магнітно-абразивні порошки, що використовуються при МАО

У процесі магнітно-абразивної обробки застосовуються різноманітні матеріали з різними фізичними та спеціальними властивостями у вигляді ферабразивних порошків (ФАП). Існують різні класифікації ФАП, одна з найпоширеніших — на основі структури частинок порошку та методів їх виробництва. Залежно від обраного методу можна вибрати магнітно-абразивний інструмент, що складається з механічної суміші (МС), яка включає магнітні та абразивні компоненти. Зазвичай для магнітних компонентів використовують порошки заліза або легованого заліза, а також порошки магнітно-твердих сплавів (Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co, ферити), що особливо ефективно працюють у змінних магнітних полях. Абразивний компонент МС може включати будь-які відомі абразивні матеріали, такі як алмаз, ельбор, корунд, карбід кремнію чи карбід інструменту. Це дозволяє створювати ФАП з різною конфігурацією та регулювати їх загальну твердість для конкретних потреб обробки.

Дослідження порошкових матеріалів свідчать, що ефективність обробки значною мірою залежить від форми зерен ферабразивного порошку. При магнітно-абразивному обробленні на результат впливають не лише властивості порошкового матеріалу, а й стан різальної кромки кожного зерна ФАП.

Основними геометричними характеристиками, які визначають здатність зерен до різання, є форма частинок, кількість вершин (різальних кромок), кути при вершинах і радіуси округлення цих вершин. Часто частинки ФАП не мають ідеальної геометричної форми, що може впливати на ефективність процесу обробки та кінцеву якість поверхні.

Зерна фераабразивного порошку мають різноманітні форми, такі як октаедр, трикутна трапеція, ромбічний тетраедр, трикутна призма, сферичний багатогранник тощо. Деякі зерна можуть бути подовженими, мечоподібними, пластинчастими або голкоподібними. Геометрична форма частинок ФАП залежить від матеріалів, з яких складаються магнітні та абразивні компоненти, технології виробництва, зернистості та інших факторів.

Виділяють три основні типи форм зерен в залежності від методу їх виготовлення:

1. Осколкові зерна — утворюються в результаті подрібнення гранульованих розплавлених матеріалів і мають майже непористу структуру. До таких порошків можна віднести ПОЛІМАМ-Т, ФЕРОМАП, порошки на основі аморфного заліза.
2. Округлі зерна — отримуються шляхом плавлення без подальшого подрібнення. Прикладами є порошки на основі Р6М5, ЦАРАМАМ, ПОЛІМАМ-М.
3. Зерна-конгломерати — виготовляються шляхом запікання і подрібнення брикетів. Такі зерна мають високу пористість і низьку механічну силу зчеплення між абразивною і феромагнітною складовими.

Кожен тип зерен має свої властивості, які можуть впливати на ефективність магнітно-абразивної обробки.

ФАП мають різноманітну геометричну форму, і відмінності в її будові навіть у порошків однакового складу можуть бути значними. Ці відмінності залежать від таких факторів, як методи виробництва, додаткова обробка і методи класифікації частинок.

Форма частинок, а також їх розмір є важливими. Частинки порошку, використововуваного в МАО, можуть мати діаметр від 20 до 800 мікрон, що дає широкий діапазон розмірів для оптимізації обробки в залежності від вимог. Більшість фераабразивних зерен мають кілька граней, утворюючи вершини з тупими кутами та певним радіусом скруглення. Кількість цих вершин, а також величина кутів і радіусів округлення визначають ефективність різання та якість обробленої поверхні.

Залежно від марки ФАП і розміру частинок, частинки можуть мати різну кількість вершин, кожна з яких має свій характерний кут і радіус округлення. Часто такі зерна мають не ідеальну геометрію, зберігаючи при цьому ефективні ріжучі характеристики, що позитивно впливають на процес магнітно-абразивної обробки.

Зрозуміти розмір частинок порошку, який використовується при обробці, є важливим етапом у налаштуванні параметрів МАО для досягнення бажаних результатів.

1.5 Застосування мастильно-охолоджуючих технологічних засобів при магнітно-абразивному обробленні

При магнітно-абразивній обробці важливо враховувати три основні температури: локальну, контактну та загальну сталу. Температури в цих зонах значною мірою впливають на ефективність обробки і на якість обробленої поверхні.

Основними факторами, що визначають потужність теплового джерела, є сили різання, які безпосередньо залежать від інтенсивності деформації та тертя при контакті фераабразивної щітки з оброблюваною деталлю. Сили різання в локальній зоні контакту призводять до утворення тепла, яке може спричинити дефекти обробки, такі як перегрів або спотворення матеріалу.

Одним з ефективних способів зниження теплової напруженості є використання мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТС). Їх застосування має кілька важливих напрямків дії:

1. Вплив на сили різання — МОТС можуть зменшити тертя між абразивними зернами та деталлю, що призводить до зниження сили різання.
2. Зміна інтенсивності затуплення зерен — Мастила і охолоджувачі можуть допомогти зменшити швидкість затуплення абразивних зерен, тим самим подовжуючи їхній термін служби.
3. Зменшення інтенсивності теплоутворення — МОТС сприяють розподілу тепла в зоні контакту, що знижує температуру в локальній зоні обробки та запобігає перегріву.

Використання МОТС допомагає знизити ризик виникнення дефектів поверхні, таких як тріщини або зміни в структурі матеріалу, і забезпечує стабільну якість оброблених деталей.

1.6 Фізико-хімічні явища при МАО

При фінішних методах обробки головну роль у досягненні бажаних результатів відіграє обробний матеріал, який безпосередньо контактує з оброблюваною поверхнею і визначає її кінцеві властивості. У випадку магнітно-абразивної обробки ключову роль займає ріжучий інструмент, оскільки саме його феромагнітні характеристики в значній мірі впливають на величину нормальних сил, які діють на оброблювану деталь, що в свою чергу визначає ефективність процесу.

$$\overline{F_H} = \frac{1}{\mu_0} V B \Delta \overline{B}$$

де $\overline{F_H}$ - пондеромоторна сила, з якою абразивне зерно впливає на оброблювану поверхню;

μ_0 – магнітна стала, яка дорівнює 1,256 мкГн/м;

V – об'єм феромагнітної частини;

$\Delta \overline{B}$ – величина магнітної індукції в частинках; ΔB – градієнт (питомий приріст) магнітної індукції.

Величина $\overline{F_H}$ для феромагнітних абразивних гранул знаходиться в межах від 1,0 до $1,2 \times 10^{-3}$ Н. Ця величина залежить від розміру та форми зерен, а також їхнього становища в робочій зоні. Це забезпечує формування рисок на поверхні при магнітно-абразивній обробці з глибиною від 0,18 до 0,5 мкм. Для порівняння: при шліфуванні одиничним зерном електрокорунду класу зернистості 125...80 мкм, що призводить до глибини шліфування від 10 до 40 мкм, нормальні сили становлять 2,75...11,8 Н.

Абразивні частки електрокорунду класу 40...28 мкм, що використовуються в процесі МАО, мають радіус округлення вершин, який не перевищує 6...12 мкм. Дослідження показали, що в умовах магнітно-абразивної обробки макрорізання такими частками неможливе. У цьому випадку процес зняття стружки визначається мікрогеометричними характеристиками абразивних часток, а не їх макрогеометрією.

Диспергування та пластичне деформування поверхневого шару при абразивній обробці значно посилюються через хімічні та адсорбційні процеси, які відбуваються на поверхні деталі в присутності хімічних чи поверхнево-активних речовин. Процес мікрорізання при МАО супроводжується руйнуванням і видаленням хімічних плівок, зокрема оксидних, що утворюються на оброблюваній поверхні, оскільки їх міцність нижча за міцність основного металу. Крім того, у зоні обробки спостерігається явище окрихчування приповерхневого шару, яке виникає через перенаклеп металу під час формування мікроподряпин — слідів мікрорізання.

Під дією сил різання, тертя і адгезії в цих мікрооб'ємах металу виникають розтягувальні напружки, що спричиняють розвиток мікротріщин, що створює умови для міграції активних молекул у них. Ювенільний стан поверхні металу після зрізу та наявність мікротріщин у приповерхневому шарі сприяють адсорбційному ефекту — зниженню міцності металу в присутності поверхнево-активних речовин, що входять до складу МОТС.

Дія адсорбції проявляється в тому, що поверхнево-активні речовини (ПАР) знижують поверхневу енергію металу, сприяючи зародженню

пластичних зрушень і розвитку дефектів структури твердого тіла, які безперервно розвиваються в процесі пружної та пластичної деформації.

Встановлено, що при процесі МАО, коли контактують два матеріали, таких як зерно фераобразивного порошку та деталь, що мають значну різницю в твердості, абсорбційно-пластифікований шар формується в м'якшому матеріалі деталі. Використання мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТС) з активними компонентами дозволяє регулювати граничні умови, зосереджуючи зсувні деформації на тонкому шарі металу, що видаляється, не проникаючи в глибину оброблюваного виробу. Це зменшує витрати енергії на пластичне деформування та диспергування металу в процесі обробки, завдяки крихтуванню тонкого поверхневого шару.

Збільшенню пластичності поверхневого шару та підвищенню інтенсивності знімання металу при МАО сталей також сприяють прояви магнетопластичного та електропластичного ефектів. Під час механічного та магнітного впливу зерен порошку на оброблювану поверхню матеріал деталі зазнає циклічне перемагнічування, що супроводжується рухом доменних стінок, що, в свою чергу, стимулює переміщення дислокацій та сприяє елементарним пластичним зрушенням. Крім того, при переміщенні деталі в магнітному полі індукуються електричні струми, які також ініціюють переміщення дислокацій, що мають власний електричний заряд.

Ці процеси накачування енергії в поверхневий шар, що веде до видалення металу, посилюються циклічними магнітострикційними деформаціями, викликаними змінним магнітним полем. Також процеси електрохімічних явищ, що виникають при взаємодії електричних зарядів на поверхні, сприяють інтенсифікації знімання металу. Усе це разом підсилює ефект диспергування поверхневого шару металу та полірування поверхні деталі в процесі МАО.

1.7 Твердосплавні пластини

Твердосплавні матеріали, різальна кераміка та надтверді інструментальні матеріали є основними для оснащення ріжучих частин інструментів, які використовуються в автоматизованому виробництві, зокрема на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПУ) та гнучких виробничих системах (ГПС). На універсальних верстатах широко застосовуються різці з напаяними робочими частинами або цілком виготовлені з інструментальних матеріалів. Проте на автоматизованому обладнанні використання напайного інструменту вважається неефективним, оскільки потребує значних витрат часу на його заміну.

Сучасний підхід до організації інструментального забезпечення металообробного обладнання полягає у використанні багатогранних непереточуваних пластин які механічно кріпляться до корпусів різальних інструментів. Впровадження БНТП стало значним проривом у розвитку інструментів. По-перше, інструменти з механічним кріпленням БНТП не потребують заточування, оскільки геометрія інструменту визначається формою пластини та її точним положенням у корпусі; після затуплення пластину можна повернути іншою ріжучою кромкою. Відсутність потреби в переточуванні скорочує час на заміну інструменту та підвищує його якість, оскільки зменшується ризик появи тріщин. По-друге, така конструкція дозволяє багаторазово використовувати державки, що сприяє поліпшенню якості та точності їх виготовлення. Це також дає можливість застосовувати термообробку, антикорозійні та декоративні покриття і вдосконалювати конструкцію державок та корпусів. По-третє, відсутність паяння усуває виникнення напруг і мікротріщин, що збільшує довговічність пластин. Додатково, скорочуються втрати вольфраму, танталу, титану та кобальту, оскільки твердосплавні пластини можна вторинно використовувати. З'являється можливість ефективного застосування різальних матеріалів, які складно паяти, таких як безвольфрамові тверді сплави та різальна кераміка.

1.8 Класифікація БНТП та система їх позначень

Багатогранні твердосплавні пластини поділяються на три основні типи: ріжучі, опорні та стружколоми.

Ріжучі пластини безпосередньо беруть участь у процесі різання оброблюваного матеріалу. Опорні пластини слугують для підтримки ріжучих пластин, забезпечуючи їх точне базування та подовжуючи загальний термін служби державки. Стружколоми використовуються для подрібнення стружки у випадках, коли інші методи не забезпечують її належного подрібнення.

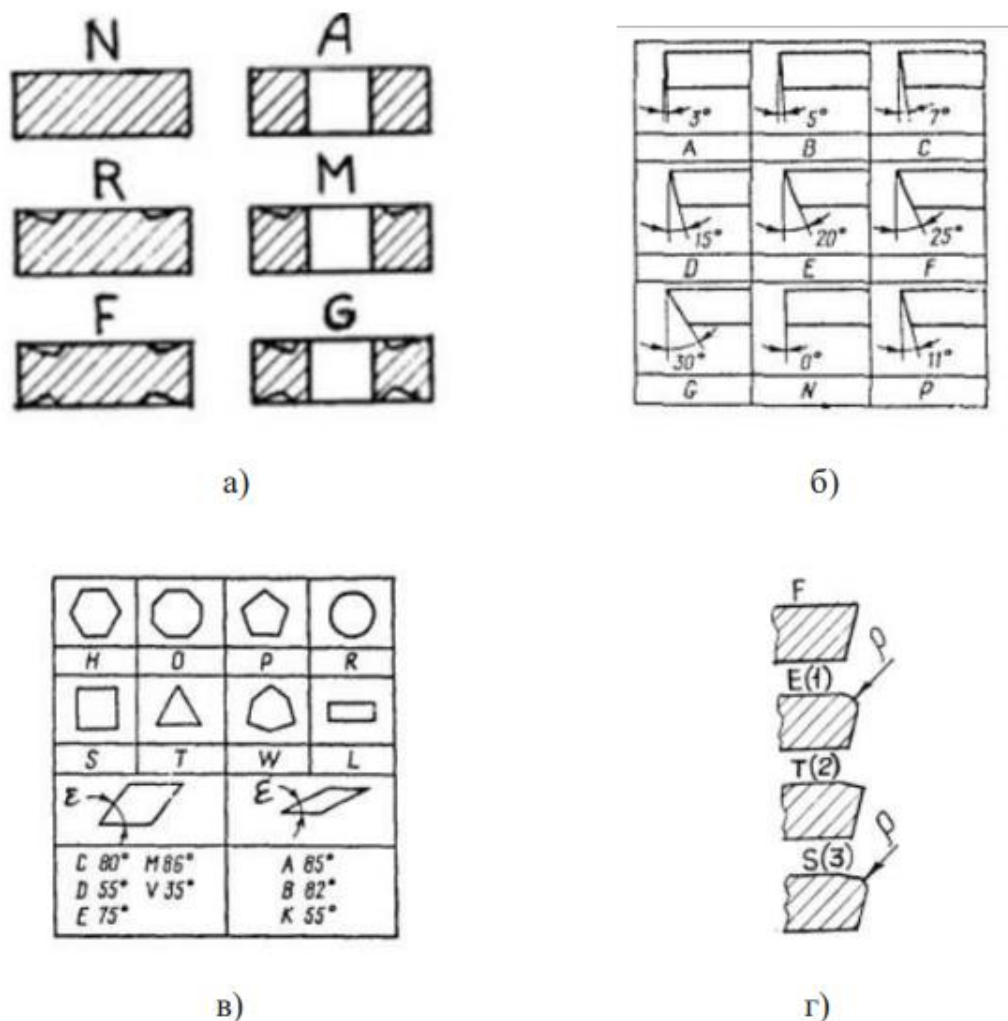


Рис 1.3 Багатогранні непереточувані пластини: а - тип пластин; б - значення заднього кута; в-форма пластин; г - види різальної кромки

Різальні пластини класифікуються за конструкцією, точністю виготовлення та розмірами. З точки зору конструкції, пластини розрізняють за

типом, формою та видом ріжучої кромки. Основні типи пластин наведені на рисунку 2.1а, і вони поділяються за такими конструктивними характеристиками:

- за кількістю робочих граней: односторонні (R, M) та двосторонні (N, A, F, G);
- за формою передньої поверхні: із плоскою гранню (N, A) та з канавками для стружколому (R, M, F, G);
- за наявністю отвору: без отвору (M, R, F) та з отвором (A, M, G);
- за заднім кутом: пластини з нульовим заднім кутом (N) і з кутом, що перевищує нуль (рис. 2.1б).

За формою (рис. 2.1в) пластини поділяються на: нерівносторонні та нерівнокутні (A, B, K, F), рівносторонні та рівнокутні (C, D, E, M, V, W), і рівносторонні та рівнокутні (H, P, O, R, S, T). Кожній літері відповідає певний кут при вершині (див. Табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Позначення пластин	A	B	C	D	E	F	K	M	V	W
Значення кута при вершині, °	85	82	80	55	75	84	55	86	35	80

За типом ріжучої кромки (рис. 1.2.1г) пластини поділяються на такі види: гострі (F), заокруглені (E), з фаскою (T) та з фаскою і заокруглені (S). Після літерного позначення вказується радіус заокруглення в сотих частках міліметра.

Пластини також класифікуються за розмірами: довжиною ріжучої кромки, товщиною пластини та радіусом при вершині. Для кожної форми пластини визначається стандартна довжина ріжучої кромки, яка теоретично розраховується без врахування заокруглення вершини. Наприклад, для

пластин форми Т встановлені такі розміри (мм): 11, 16,5, 22, 27,5, а для пластин форми S — 9,525, 12,7, 15,875 тощо.

Регламентуються також товщина пластин (3,18; 4,76; 6,35; 7,93 мм) і радіус при вершині (0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 мм). Існує п'ять класів точності виготовлення пластин: С, Е, G, М, U (див. Табл. 4).

Класи точності виготовлення твёрдосплавних пластин визначають допустимі відхилення в їх розмірах та якість поверхні. Зазвичай, існує п'ять основних класів точності:

1. С – грубий клас (Coarse), який допускає найбільші відхилення.
Використовується для пластин, де вимоги до точності невисокі.
2. Е – середній клас (Extra), який має вищі вимоги до точності порівняно з класом С, але все ще допускає деякі відхилення.
3. G – покращений клас (General), що забезпечує помірний рівень точності, достатній для більшості стандартних операцій.
4. М – високий клас точності (Medium), який передбачає мінімальні допуски для точніших робіт.
5. U – ультраточний клас (Ultra-precision), де допуски максимально жорсткі. Застосовується для операцій, що вимагають максимальної точності.

Типи пластин за напрямком різання визначаються орієнтацією та застосуванням пластин в залежності від напрямку їхнього руху відносно оброблюваного матеріалу. Виділяють три основні типи:

1. Праворізальні пластини – призначені для правостороннього різання, коли інструмент здійснює різання з правого боку заготовки.
2. Ліворізальні пластини – призначені для лівостороннього різання, коли інструмент ріже з лівого боку заготовки.
3. Нейтральні (або універсальні) пластини – можуть використовуватися як для правостороннього, так і для лівостороннього різання. Вони мають симетричну конструкцію, що дозволяє використовувати їх у будь-якому напрямку.

Позначення багатограних непереточуваних твердосплавних пластин здійснюється за допомогою 13-розрядного індексу, який містить інформацію про основні характеристики пластини. Основні 10 розрядів є обов'язковими і визначають ключові параметри пластини, як описано нижче (див. рис. 2.2):

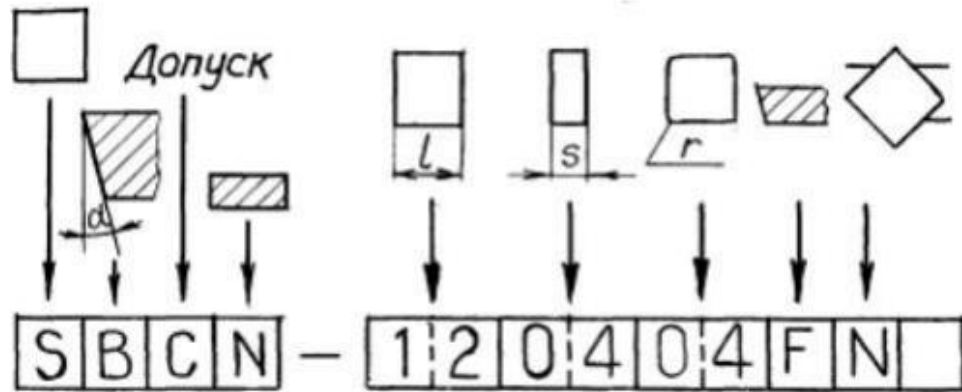


Рис. 1.4 Позначення різальних пластин

1. Перші чотири розряди (буквені):
 - 1-й розряд – форма пластини (наприклад, квадратна, трикутна),
 - 2-й розряд – задній кут (наприклад, нульовий або позитивний),
 - 3-й розряд – клас точності виготовлення (наприклад, С, Е, G, М, U),
 - 4-й розряд – тип пластини (наприклад, наявність отвору або стружколомних канавок).
2. Наступні шість розрядів (цифрові, через дефіс) вказують розміри пластини в міліметрах:
 - 5-й та 6-й розряди – довжина різальної кромки (ціла частина в мм, без дробової),
 - 7-й та 8-й розряди – товщина пластини (також без дробової частини),
 - 9-й та 10-й розряди – радіус при вершині, вказаний у десятих частках міліметра (наприклад, "04" для 0,4 мм).
3. Додаткові розряди:
 - 11-й розряд – вид ріжучої кромки (наприклад, гостра чи з фаскою),
 - 12-й розряд – напрямок різання (наприклад, правий або лівий),
 - 13-й розряд – код заводу-виробника.

4. Приклад позначення

Квадратна пластина із заднім кутом 5° , класу точності G, без отвору та без стружколомних канавок, розмірами: довжина ріжучої кромки $l=12,7$ мм, товщина пластини $S=4,6$ мм, радіус при вершині $r=0,4$ мм, з гострою ріжучою кромкою, придатна для правого і лівого напрямку різання, матиме позначення SBCN - 120404 FN.

Опорні пластини та стружколоми мають спеціальні позначення:

- О – для опорних пластин (наприклад, OSN для чотиригранної опорної пластини без заднього кута),
- С – для стружколомів (наприклад, СТ для трикутного стружколома).

Таке маркування дозволяє зручно ідентифікувати основні характеристики пластини для конкретного застосування.

Конструкції багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин постійно вдосконалюються, і цей процес зосереджується на трьох основних напрямках:

1. Підвищення точності лінійних розмірів пластин, що сприяє забезпеченню високої якості обробки та стабільності роботи інструменту.
2. Покращення характеристик ламання та завивання стружки у широкому діапазоні режимів різання, що дозволяє підвищити продуктивність процесу та зменшити ризик накопичення стружки.
3. Розширення спектру технологічних операцій, які можна виконувати за допомогою БНТП, що робить їх більш універсальними для різних видів обробки.

У таблиці 1.4 представлені позначення пластин, які відображають їхню форму, діаметр, площу, довжину, радіус та кут при вершині. Ці параметри дозволяють швидко ідентифікувати пластини та підібрати їх для конкретних умов обробки.

Таблиця 1.4

Позначення	Форма пластини	D, мм	S, мм, мм	L, мм	R, мм	α , мм
RNMN RBMN RCMN RPMN		4,76 5,56 6,35 7,00 9,52 12,70 15,80 19,05 25,40	2,38 3,18 3,18 3,97; 7,97 4,76 7,97 5,56	-	-	0 5 7 11
SNMN SBMN SCMN SPMN		3,97 4,76 5,56 6,35 7,00 9,52 12, 70 15,80	2,38 3,18 3,18; 3,97 4,76 5,56	L= D	0,4 0,8 1,2 1,6 0,4-3,6	0 5 7 11
TNMN TBMN TCMN TPMN		3,97 4,76 5,56 6,35	2,38 3,18	6,88 8,24 9,23 11,00	0,4 0,8 1,2 1,6	0 5 7 11
CNMN CBMN CCMN CPMN		3,97 4,76 5,56 6,35 7,00	2,38 3,18	4,03 4,83 5,64 6,44 8,13	0,4 0,8 1,2 1,6	0 5 7 11
RBMH RCMH RPMH		4,76 5,56 6,35 7,00 9,52 12, 70	3,18 3,97	-	-	5 7 11

1.9 Зв'язувальна фаза у пластинах

Також цікаво розглянути детальніше зв'язувальну фазу. Тобто це компонент твердосплавного матеріалу, який виконує роль "клею", що утримує разом тверді частинки (основну фазу) у структурі сплаву. Вона забезпечує механічну міцність та покращує в'язкість матеріалу, компенсуючи крихкість твердої фази. Зв'язувальна фаза є важливою складовою у твердих сплавах, таких як карбід вольфраму (WC), які широко застосовуються для виготовлення ріжучих інструментів, зокрема твердосплавних пластин.

Матеріалом є Кобальт (CO), що найчастіше використовується як зв'язувальна фаза в твердих сплавах. Кобальт надає матеріалу пластичність та здатність витримувати механічні та термічні навантаження, або Нікель (Ni) та залізо (Fe), що використовується в спеціальних твердих сплавах, наприклад, для корозійностійких або магнітних властивостей.

До основних функцій можна віднести:

- зв'язок між зернами основної фази: утримує частинки карбиду вольфраму разом, формуючи цільний матеріал;
- покращення в'язкості: зменшує крихкість твердосплавного матеріалу, запобігаючи раптовому руйнуванню під дією ударів чи навантажень;
- розподіл напружень: пом'якшує вплив механічних навантажень на матеріал;
- стійкість до тріщин: перешкоджає їх поширенню в матеріалі.

Найчастіше пропорції зв'язувальної фази становить 6-15% від загального об'єму твердосплавного матеріалу. Вищий рівень кобальту підвищує в'язкість, але зменшує твердість і зносостійкість. А нижчий вміст кобальту збільшує твердість і термостійкість, але може зробити матеріал більш крихким.

1.10 Покриття пластин

Для покриття даних пластин найчастіше використовують PVD або CVD методи.

PVD (Physical Vapor Deposition) — фізичне осадження з парової фази. Метод полягає у нанесенні тонкого шару покриття шляхом фізичного перетворення матеріалу покриття в парову фазу та його конденсації на поверхні деталі. Цей метод відбувається у вакуумній камері за температур 250-500°C.

Основними етапами процесу PVD є:

1. Випаровування матеріалу покриття, тобто джерело матеріалу нагрівається або бомбардується іонами, перетворюючись в пар.
2. Пар рухається у вакуумі та осідає на поверхні деталі.
3. Пар конденсується на поверхні, утворюючи щільний і міцний шар покриття.

До основних переваг PVD відноситься:

- можливість нанесення твердих, зносостійких покриттів із низьким коефіцієнтом тертя;
- мінімальний вплив на основний матеріал завдяки відносно низьким температурам;
- немає шкідливих відходів;
- висока адгезія покриття навіть для складних геометрій.

CVD (Chemical Vapor Deposition) — хімічне осадження з парової фази. Це метод у якому тонкий шар покриття осаджується з хімічних сполук у газовій фазі шляхом хімічної реакції на поверхні деталі. Процес відбувається за температур 800-1000°C у спеціальній реакторній камері.

Основними етапами процесу CVD є:

1. У реактор подаються газові прекурсори, такі як метан або хлориди металів.

2. При високих температурах відбувається розклад газу або реакція між газовими компонентами на поверхні матеріалу.
3. Продукти реакції утворюють міцний шар покриття.

Переваги CVD:

- можливість нанесення товстих покриттів (до 10 мкм) із високою зносостійкістю;
- покриття рівномірно осаджується навіть на складних поверхнях;
- забезпечує високу міцність і адгезію.

Проте в методу CVD є значні недоліки:

- високі температури можуть викликати зміни в структурі основного матеріалу;
- процес тривалий і енерговитратний.

Порівняння PVD та CVD приведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Порівняння

Параметр	PVD	CVD
Температура процесу	250-500°C	800-1000°C
Товщина покриття	2-5 мкм	5-10 мкм
Вплив на базовий матеріал	Мінімальний	Можливі зміни структури
Тип покриття	Тонкі та з низьким тертям	Товсті та надміцні
Застосування	Функціональні	Зносостійкі та термостійкі

Обидва методи активно використовуються в обробці ріжучих інструментів, зокрема твердосплавних пластин, залежно від вимог до покриття й умов експлуатації.

1.11 Фінішне оброблення твердосплавних пластин

Багатогранні пластини, які не підлягають переточуванню, виготовляють у двох варіантах: звичайної точності та прецизійні. Допустиме биття головних різальних кромки у фрезах із шестигранними, п'ятигранними та чотиригранними пластинами на двох суміжних зубцях не повинно

перевищувати 0,12 мм, а для всієї фрези — не більше 0,2 мм. Допустиме торцеве биття також не повинно перевищувати 0,2 мм. Граничне відхилення розташування зачисних фасок відносно бокових поверхонь для пластин підвищеної точності становить $\pm 0,01$ мм, а для прецизійних — $\pm 0,003$ мм. Багатогранні пластини сортують за групами відповідно до биття головних різальних кромок.

Поверхні пластин обробляють методом доведення або шліфування. Доведення виконують на дисковому довідковому напівавтоматі ЗБ816І за допомогою круглих чавунних притирів із використанням абразивної або алмазної суспензії. Однак більш продуктивним є шліфування. Для шліфування твердосплавних пластин широко застосовують верстат 33731 з прямокутним столом і вертикальним шпинделем, що функціонує за принципом електрохімічного шліфування.

Для алмазного шліфування багатогранних твердосплавних пластин, які не переточуються, використовують спеціальні автоматизовані верстати.

1.12 Вплив кінематики та динаміки процесу МАО на якість БНТП

- Були проведені експериментальні дослідження на трьох типах верстатів, які відрізняються кінематикою та динамікою переміщення деталей у робочих зонах під час обробки:
- Магнітно-абразивний роторний верстат МАРС-4 з вертикальним розташуванням шпинделів, на яких на оправках закріплюються багатогранні непереточувані пластини (БНТП) (рис 2.3). Пластини рухаються повільно вздовж робочої зони і обертаються з великою швидкістю навколо своєї осі.
- Установка типу "кільцева ванна" з шестишпиндельним модулем (рис. 2.4), яка дозволяє змінювати співвідношення лінійної швидкості руху деталей вздовж кільцевої ванни до лінійної швидкості руху вздовж осі

деталей у діапазоні від 1:20 до 1:2. Для обробки пластин оптимальним є співвідношення 1:10.

- Експериментальна установка, подібна до кільцевої ванни, зі спеціальною технологічною налагодкою (рис. 2.5), що забезпечує можливість позиціонування та переміщення деталей під різними кутами в робочій зоні кільцевої ванни. Вона також дозволяє обертання деталей навколо осі оправок у різних напрямках із регульованою кутовою швидкістю, а також контрольоване обертання головки верстата навколо осі кільцевої ванни. Ця установка є покращеною версією роторної обробки, що застосовується на перших двох верстатах.



Рис.1.5 Робоча зона станку МАРС

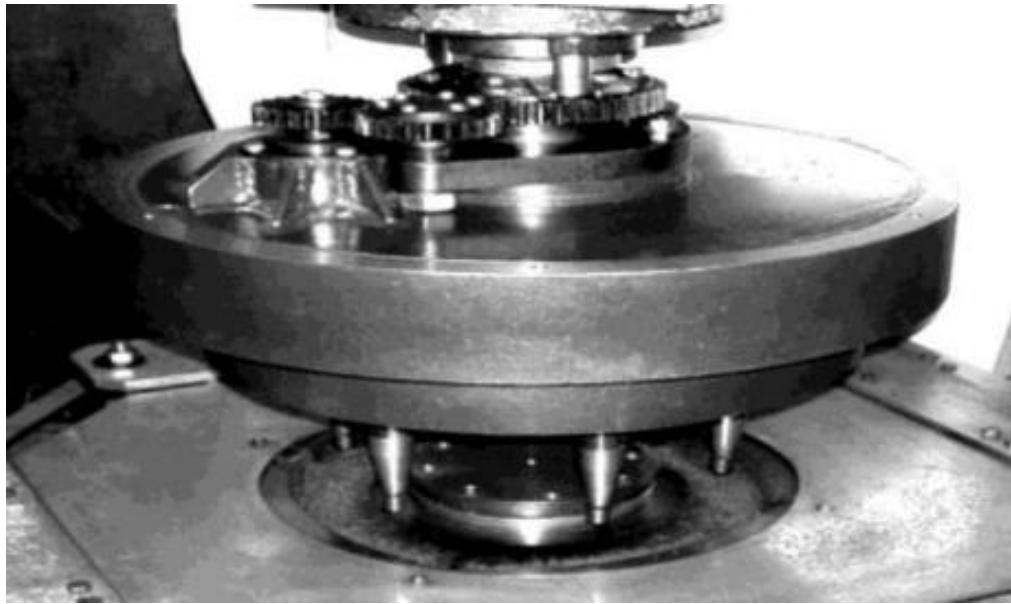


Рис.1.6 Шестишпиндельний робочий модуль установки типу кільцева ванна з вертикальним розташуванням оправок з БНТП

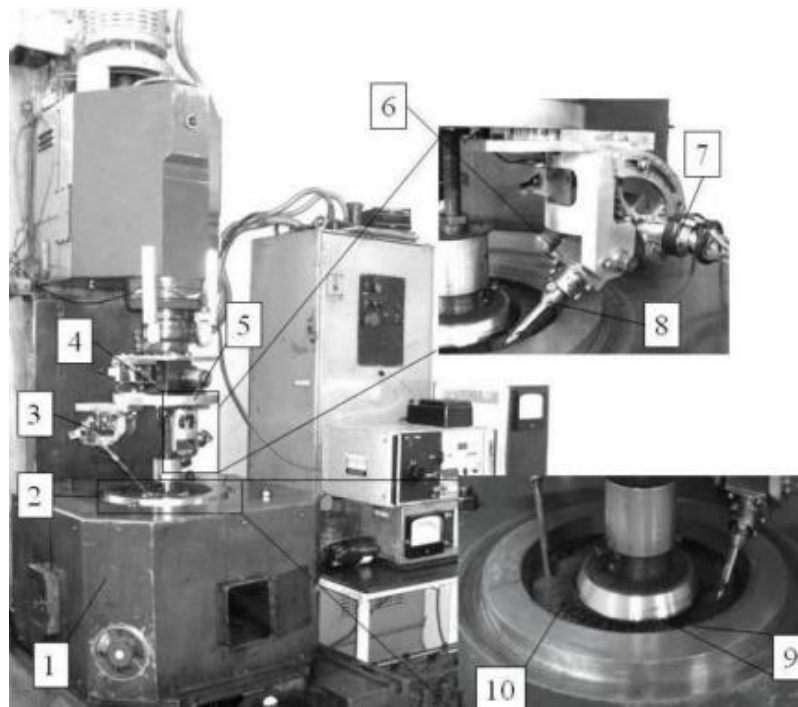


Рис. 2.5 Експериментальний стенд для МАО з кільцевим розташування робочої зони: 1 – магнітна система; 2 – кільцева робоча зона; 3 – другий змінний шпиндель; 4 – універсальна головка; 5 – базова плита; 6 – пристрій з мінішпинделем; 7 – двигун постійного току; 8 – оправка з деталлю; 9 – полюсний наконечник; 10 – магнітно-абразивний інструмент

Низька ефективність магнітно-абразивного оброблення пояснюється початковою якістю оброблюваних пластин. Аналіз змін площі опорної

поверхні мікропрофілю, залежно від рівня мікронерівностей (рис. 2.6), виявив, що при МАО на верстаті МАРС спостерігається незначне зменшення висоти мікровиступів на вершинах передньої поверхні багатограних непереточуваних пластин. Це може бути обумовлено переважанням тангенціальних компонент сил різання під час оброблення і надзвичайно слабкими нормальними силами. На задній поверхні оброблення переважно відбувається у зоні вершин пластин, що пояснюється кінематикою процесу МАО, яка призводить до нерівномірного оброблення деталей.

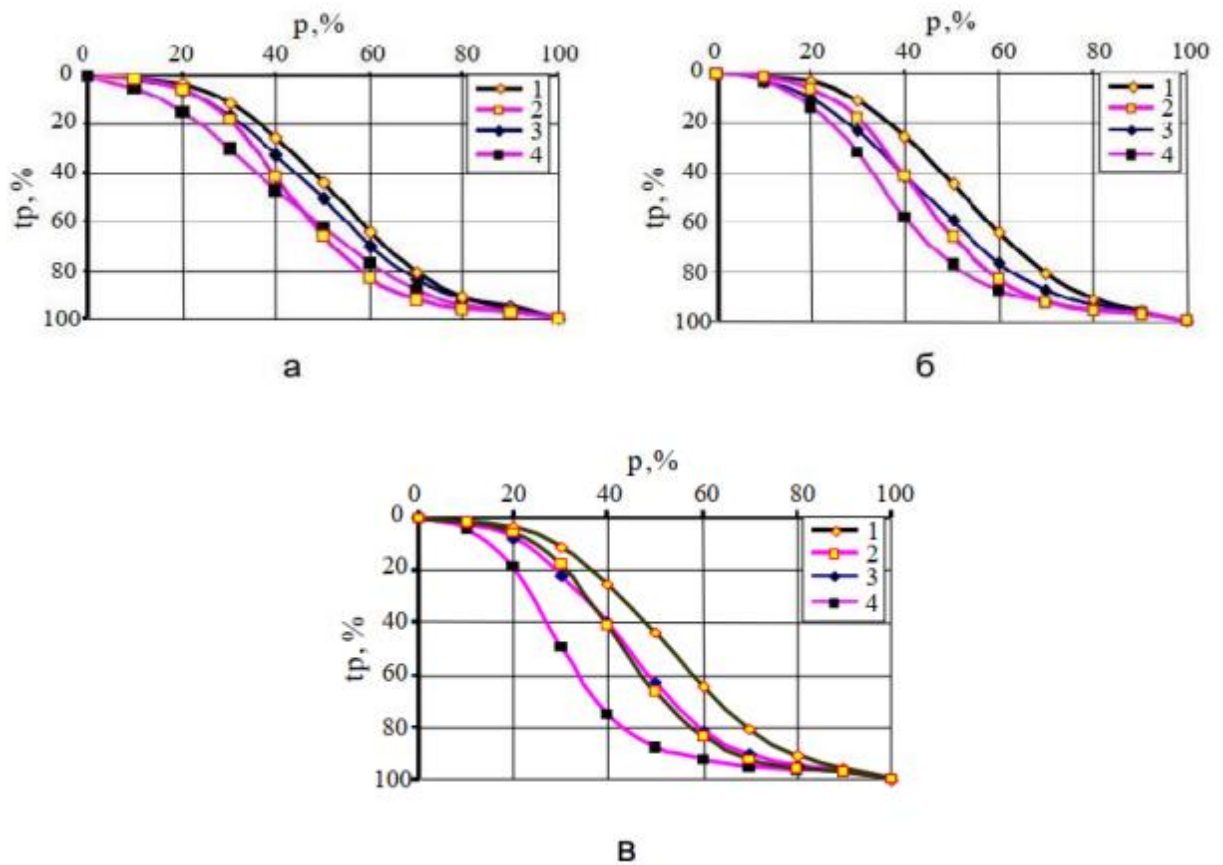


Рис. 1.7. Залежність зміни величини опорної поверхні відносно висоти мікронерівностей для необроблених (1, 2) та оброблених (3, 4) пластин: задня поверхня – 1, 3; передня поверхня – 2, 4.

2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика геометрії та матеріалу різальних пластин

Пластини для проведення досліджень було обрано від компанії DIAEDGE (Mitsubishi Materials U.S.A) (рис 2.1) типу CNMG120408-MS (рис 2.2).



Рис. 2.1 – Логотип компанії

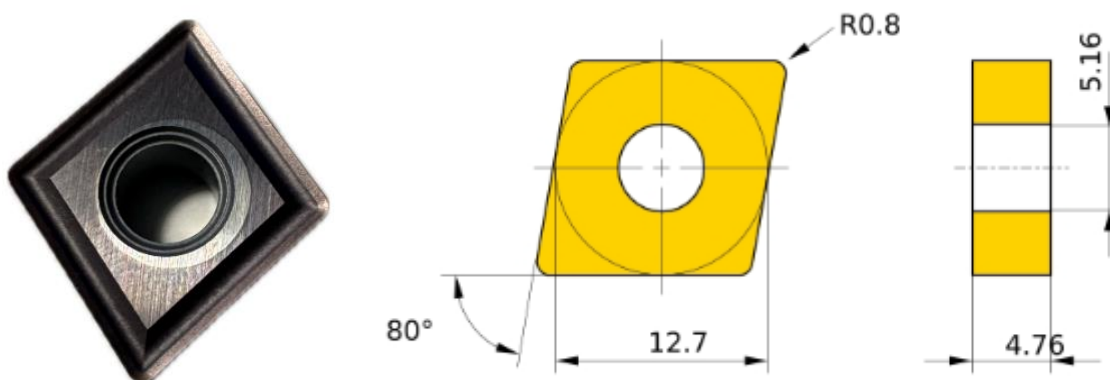


Рис. 2.2 Зовнішній вигляд та розміри пластинки

Характеристики:

1. Матеріал основи: пластина виготовлена з карбіду вольфраму (WC) з кобальтовою зв'язувальною фазою, що забезпечує твердість, зносостійкість та ударну в'язкість.
2. Покриття: CVD або PVD.
3. Стружколом MS: розроблений для універсальних умов обробки. Підходить для середніх глибин різання та швидкостей. Забезпечує якісне утворення стружки та її контроль.

4. Матеріали для обробки:

- вуглецеві сталі;
- леговані сталі;
- нержавіючі сталі;
- можливе використання для чавунів.

5. Тип операцій:

- точіння;
- зовнішня і внутрішня обробка;
- чорнова або напівчистова обробка при середніх режимах різання.

6. Режими різання:

- рекомендовані середні швидкості різання;
- глибина різання: середня (наприклад, 1-3 мм);
- подача: середня (приблизно 0,15-0,35 мм/об).

Основними перевагами цих пластин є:

- надійність у створенні якісної обробленої поверхні;
- стійкість до термічних навантажень;
- ефективне утворення стружки завдяки геометрії стружколому;
- довгий термін служби навіть при складних умовах різання.

Тому, пластини Mitsubishi CNMG120408-MS – універсальний вибір для обробки матеріалів із середньою твердістю, що забезпечує баланс продуктивності, якості та економічності.

2.2 Вимірювання поверхневої твердості на пластинах

Поверхнева твердість твердосплавних пластин була виміряна за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, що наведено на рис. 2.3. Цей метод є стандартним для оцінки стану поверхневих шарів, включаючи визначення їхніх фазових складів та структури. Завдяки високій точності та можливості вимірювань на мікрорівні, він забезпечує надійну оцінку змін механічних властивостей матеріалу, які виникають у результаті обробки, зокрема

магнітно-абразивного. Аналіз результатів до і після МАО дозволяє оцінити ефективність цього методу обробки з точки зору підвищення твердості та однорідності поверхневого шару.



Рис. 2.3. - Мікротвердомір ПМТ-3

Для визначення поверхневої твердості твердосплавних пластин було проведено підготовчий етап, який включав полірування алмазною пастою для отримання якісного шліфа. Під час випробувань використовувалося навантаження на індентор у розмірі 1 Н. Кожну пластину тестували п'ять разів (рис 2.4) уздовж різальної кромки, щоб забезпечити достовірність результатів. Після прикладення навантаження на поверхні шліфа залишався відбиток алмазної пірамідки, довжину діагоналей якого вимірювали для розрахунку значення мікротвердості. Такий підхід забезпечує високу точність та повторюваність результатів при оцінці стану поверхневого шару пластин.

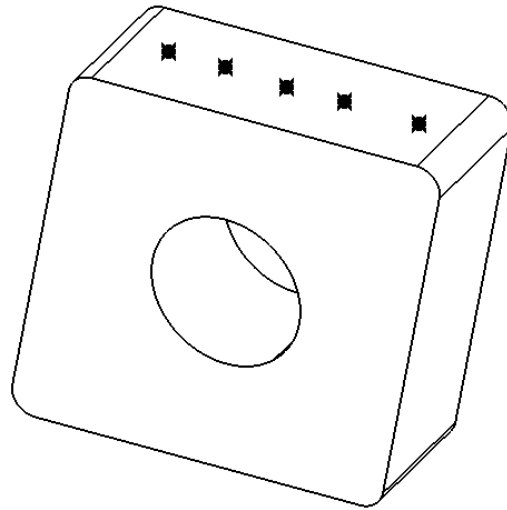


Рис. 2.4. – Схема вимірювання поверхневої твердості

Величина поверхневої твердості визначається по формулі:

$$P = \frac{1,854 \cdot N}{(d \cdot c)^2} \cdot 1000$$

Де P – поверхнева твердість, ГПа;

d – середня довжина діагоналі відбитка, поділки шкал;

c – коефіцієнт тарування;

N – навантаження на індентор, Н.

2.3 Визначення шорсткості поверхні

Вимірювання шорсткості багатогранних твердосплавних пластин є важливим етапом оцінки якості поверхні після фінішної обробки, оскільки цей показник впливає на експлуатаційні характеристики інструменту. Для аналізу шорсткості застосовується комплексна методика, що включає підготовку зразків, використання сучасного обладнання для вимірювань і аналіз отриманих результатів.

На першому етапі проводиться підготовка пластин до вимірювань. Вона включає ретельне очищення поверхні від залишків абразивного матеріалу та інших забруднень, що могли виникнути в процесі обробки. Для цього використовуються ультразвукові ванни або спеціальні очищувальні розчини,

які забезпечують чистоту поверхні без її пошкодження. Окрім того, пластини закріплюються в спеціальних тримачах, що забезпечують стабільність та виключають можливість руху під час вимірювань.

Процес вимірювання шорсткості проводиться за допомогою спеціалізованого обладнання, наприклад, контактного профілометра Mitutoyo SJ-210 або подібних приладів. Контактний датчик приладу переміщується вздовж обраної ділянки поверхні пластини, вимірюючи нерівності та фіксуючи їх цифрові показники. В залежності від досліджуваних зон, вимірювання можуть виконуватися на передній і задній поверхнях пластини, а також безпосередньо на різальній кромці. Остання має особливе значення, оскільки її стан прямо впливає на якість і тривалість роботи інструменту.

Основними параметрами шорсткості, які аналізуються, є:

- R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) — характеризує загальну шорсткість поверхні;
- R_z (максимальна висота нерівностей) — визначає найбільші перепади висоти нерівностей;
- R_q (середнє квадратичне відхилення) — додатково уточнює дані про мікронерівності;
- R_t (повна висота профілю) — використовується для аналізу найглибших і найвищих точок профілю.

У деяких випадках можуть застосовуватись безконтактні методи, такі як лазерна інтерферометрія або оптичні профілометри. Вони дають змогу уникнути впливу датчика на поверхню та зменшити похибки.

Для дослідження різальної кромки шорсткість вимірюється в декількох точках уздовж її довжини. Зазвичай виконується 5–10 вимірювань, результати яких усереднюються для отримання репрезентативного значення. Це дозволяє оцінити однорідність обробки та виявити можливі дефекти, наприклад, мікросколювання або зони надмірного зносу.

Отримані результати вимірювань порівнюються між зразками до та після магнітно-абразивного оброблення. Це дозволяє оцінити ефективність процесу з точки зору зниження шорсткості, покращення мікрогеометрії поверхні та зменшення дефектів. Наприклад, у ході досліджень встановлено, що після МАО значення параметрів R_a та R_z суттєво знижуються, що свідчить про підвищення якості поверхні, а також про покращення експлуатаційних властивостей різального інструменту.

Таким чином, вимірювання шорсткості є невід'ємною частиною оцінки технології фінішної обробки, дозволяючи об'єктивно оцінити її вплив на стан поверхні багатогранних твердосплавних пластин.

2.4 Технологічні параметри МАО в робочій зоні кільцевого типу

Магнітно-абразивне оброблення проводилось на експериментальній установці з кільцевим розташуванням робочої зони, описаному в розділі 1. Конструкція верстата дозволяє забезпечувати високу гнучкість налаштувань завдяки можливості повороту універсальної головки навколо вертикальної осі (q) та повороту оправки відносно головки у вертикальній площині (p). Така конфігурація забезпечувала всі необхідні варіанти базування пластин у робочій зоні.

Під час МАО оброблювана пластина, закріплена на оправці, здійснювала обертання як навколо власної осі, так і навколо осі кільцевої ванни, синхронно з універсальною головкою. Це забезпечувало рівномірний вплив магнітно-абразивного інструмента на всю поверхню пластини, покращуючи якість обробки та сприяючи досягненню заданих параметрів мікрогеометрії різальної кромки.

Режимом оброблення було обрано «натікання з оправки», за допомогою ФАП Ферромат 315/200 із додаванням Асфол із наступними параметрами:

- величина магнітної індукції $B=0,2375$ Тл;
- швидкість обертання деталі навколо своєї осі $\omega=800$ об/хв;

- швидкість обертання деталі навколо осі ванни $V=250$ об/хв;
- кут базування деталі відносно площини робочої зони $p=35^\circ$;
- кут повороту оправки навколо власної осі $q=30^\circ$.
- час оброки становив 240 секунд.

Оброблення відбувалось в двох напрямках обертання навколо власної осі.

2.5 Випробування на стійкість

Випробування на стійкість проводились із використанням токарного верстату з ЧПК HAAS ST-30 (рис. 3.1). У виборі сталі було обрано кругляк У8А із твердістю $HV = 187$ Мпа із діаметром 78 мм та довжиною 460 мм.



Рис. 2.5 – HAAS St-30

Випробування на стійкість виконувались при швидкості різання 70 м/хв, глибини різання 1 мм та подачі 0,2-0,3 мм/об.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати експериментальних досліджень є ключовою частиною наукової роботи, що дозволяє оцінити практичну ефективність запропонованих методів і технологій. У даному розділі представлено аналіз отриманих даних, що були зібрані під час випробувань магнітно-абразивного оброблення багатогранних твердосплавних пластин.

Метою експериментальних досліджень було визначення впливу МАО на фізико-механічні характеристики різальної кромки твердосплавних пластин, включаючи такі показники, як шорсткість поверхні, радіус заокруглення, сколювання та зносостійкість. У ході експериментів також було проаналізовано взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу, такими як магнітна індукція, тривалість оброблення, характеристика абразивного середовища, та якістю отриманих поверхонь.

Результати досліджень дозволяють оцінити ефективність магнітно-абразивного оброблення як методу фінішної обробки, а також розробити рекомендації щодо оптимальних параметрів процесу для досягнення високої якості та продуктивності. Висновки, отримані на основі проведених експериментів, мають як наукову, так і практичну цінність, сприяючи вдосконаленню технології обробки різального інструменту та розширенню її застосування у промисловості.

3.1 Дослідження зміни мікротвердості

Дослідження зміни мікротвердості твердосплавних пластин до і після магнітно-абразивного оброблення дало змогу оцінити вплив цього методу на фізико-механічні властивості поверхні. Для оцінки використовували твердість як ключовий параметр, що визначає експлуатаційні характеристики різального інструменту.

Перед обробкою твердосплавні пластини мали твердість 21,32 ГПа, мікротвердість поверхневого шару (h) становила 1,9 мкм, а параметр шорсткості Ra дорівнював 0,404 мкм. Після проведення МАО із застосуванням абразивного порошку Ферромат 315/200 у комбінації з Асфолом твердість поверхні збільшилася до 23,97 ГПа, товщина поверхневого шару зменшилася до 1,8 мкм, а шорсткість знизилася до $Ra = 0,31$ мкм.

Найбільш суттєві зміни були досягнуті при використанні абразивного порошку Ферромат 630/400 + Асфол. У цьому випадку твердість поверхні зросла до 29,36 ГПа, що свідчить про значне підвищення міцності обробленого матеріалу. Товщина поверхневого шару (h) зменшилася до 1,6 мкм, а шорсткість Ra становила 0,245 мкм, що вказує на суттєве покращення якості поверхні.

Отримані результати демонструють, що МАО забезпечує помітне підвищення мікротвердості поверхні і зниження її шорсткості. Це позитивно впливає на довговічність і зносостійкість твердосплавних пластин, роблячи їх придатними для більш тривалого використання в умовах інтенсивного навантаження.

3.2 Випробування на стійкість

Для оцінки зносостійкості пластин були застосовані три типи матеріалів для обробки: стандартні пластини без МАО, а також пластини, оброблені за допомогою методів магнітно-абразивного оброблення з використанням Ферромат 315/200 + Асфол та Ферромат 630/400 + Асфол. Випробування проводились до досягнення значного зношення пластин, що дозволяло оцінити їх здатність витримувати умови інтенсивної обробки.

В результаті експериментів було виявлено, що пластини, оброблені за допомогою МАО, показали значно більшу стійкість до зносу в порівнянні з необробленими пластинами. За час обробки приблизно 12 хв (рис. 3.1) оброблюваного матеріалу пластини без МАО піддавались значному зносу, що потребувало їх заміни.

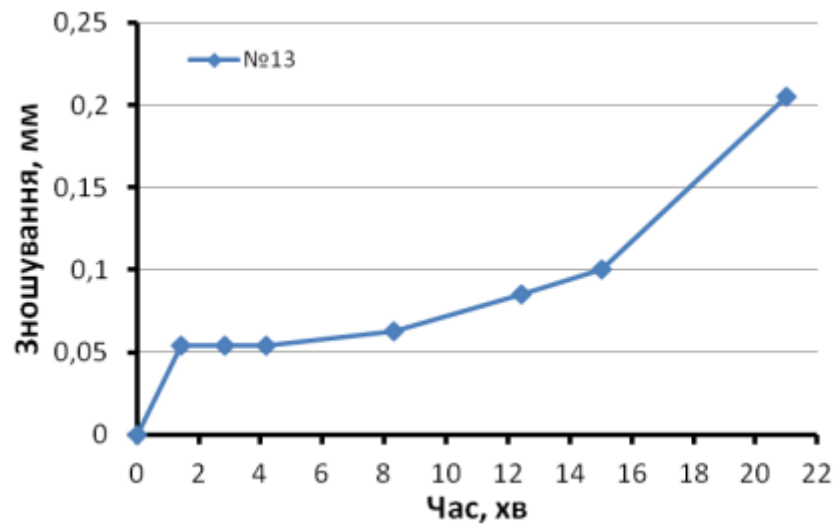


Рис. 3.1

В той же час пластини, оброблені за допомогою МАО (особливо з використанням Ферромат 630/400 + Асфол), демонстрували мінімальні ознаки зношування навіть після обробки 22 хв (рис.3.2) , що свідчить про їх значно більшу стійкість.

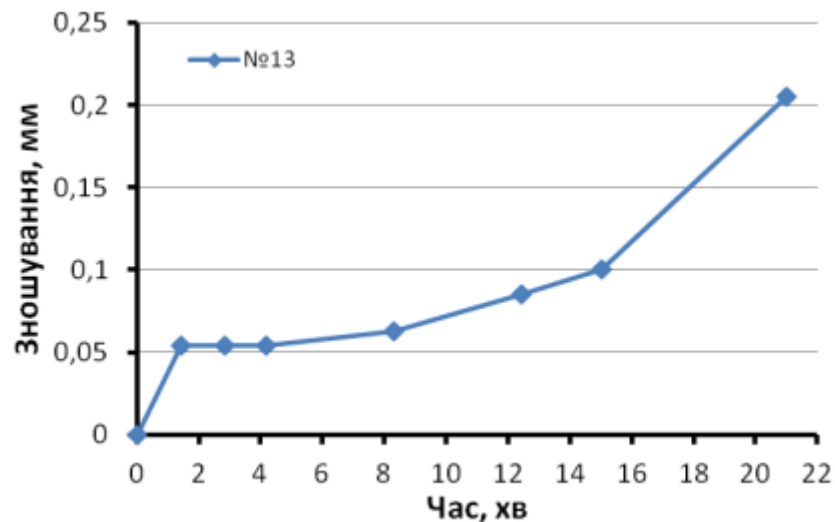


Рис. 3.2

Ці результати вказують на ефективність застосування технології МАО для підвищення зносостійкості твердосплавних пластин, що є важливим аспектом для тривалості роботи інструментів при високих навантаженнях та інтенсивному використанні.

3.3 Визначення шорсткості поверхні

Результати випробувань на шорсткість поверхні показали суттєві зміни після проведення магнітно-абразивного оброблення (МАО) твердосплавних пластин. Початково, до обробки, середня шорсткість поверхні пластин становила $R_a = 0,404$ мкм. Це значення відображає стандартну шорсткість для твердосплавних пластин до їх оброблення, коли поверхня має деякі нерівності, які можуть впливати на точність різання та зносостійкість інструменту.

Після обробки Ферроматом 315/200 + Асфол шорсткість зменшилась до $R_a = 0,31$ мкм, що свідчить про покращення якості обробленої поверхні. Це зменшення на 23% свідчить про ефективність використання цього абразивного інструменту для зниження шорсткості, що забезпечує кращі умови для різання, зменшуючи тертя та підвищуючи зносостійкість пластин.

Подальше застосування Ферромат 630/400 + Асфол призвело до ще більш значного зменшення шорсткості до $R_a = 0,245$ мкм, що є результатом на 39% кращим, ніж початкове значення. Такий рівень шорсткості забезпечує ще більш точну та ефективну обробку матеріалу, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики пластин, підвищуючи їх довговічність і здатність до високопродуктивного різання.

Отже, результати експериментів підтвердили, що МАО є високоефективним методом покращення поверхневих властивостей твердосплавних пластин, зокрема зменшення шорсткості, що безпосередньо впливає на покращення робочих характеристик інструменту та зниження витрат на його обслуговування та заміну.

Графік шорсткості приведено на рисунку 3.3.

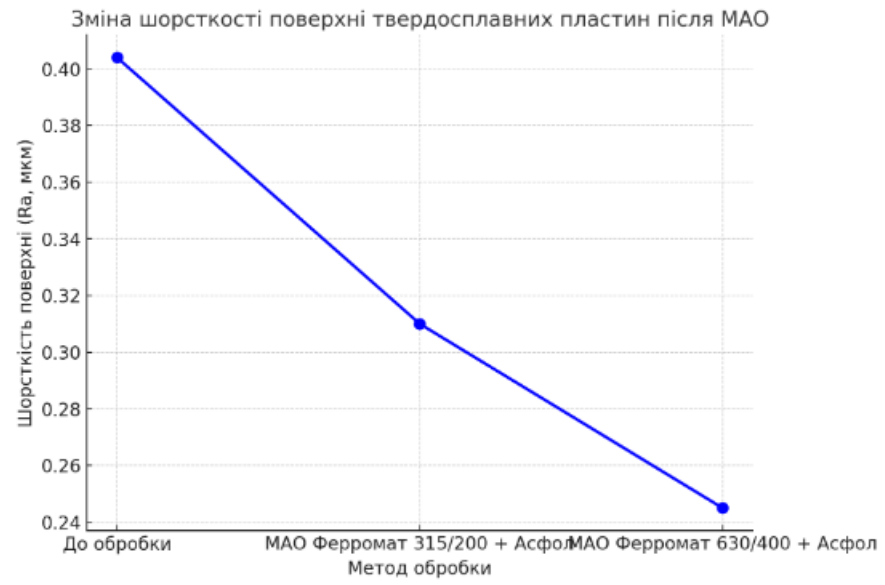


Рис. 3.3

4 СТАРТАП ПРОЄКТ

4.1 Формування ідеї та опис стартап проєкту

Сучасні виклики виробництва вимагають інноваційних рішень, які дозволяють зменшувати витрати та підвищувати ефективність роботи. Однією з актуальних проблем є значні витрати на придбання нового різального інструменту, зокрема багатогранних твердосплавних пластин, що широко використовуються в металообробній промисловості. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні технологій, здатних забезпечити якісне відновлення інструментів та їх повторне використання.

Розробка стартап-проєкту є відповіддю на цю проблему. Основна ідея полягає у створенні мобільної установки для магнітно-абразивного оброблення (МАО), яка дозволить проводити оперативне відновлення відпрацьованих пластин без необхідності витратити значні ресурси на їх заміну. Стартап орієнтований на малий і середній бізнес, забезпечуючи доступність технологій, які раніше були виключно для великих підприємств.

4.2 Пошук назви та створення логотипу

Вибір назви компанії та створення її гасла складний процес, тому було підібрано декілька варіантів:

1. MagneTech Pro – компактне рішення для обробки та відновлення.
2. ReTooler – інноваційна технологія відновлення різального інструменту.
3. EdgeMaster – передова установка для оброблення твердосплавних пластин.
4. ReviveCut – технологія повторного життя для ріжучих інструментів.
5. ToolRestore – мобільна установка для економного відновлення інструментів.
6. SharpPoint – майбутнє магнітно-абразивного оброблення.
7. EdgeCare Mobile – мобільне рішення для відновлення інструментів.

Зупинимось на першому варіанті.

Перейдемо до вибору логотипу компанії:

1. Магніт і абразивний круг

- Стилізований магніт у формі підкови, поруч з яким розташований абразивний круг або шліфувальна пластина.
- Кольори: сталевий сірий, синій, та помаранчевий для акценту (що символізує енергію та інновації).

2. Технологічна хвиля

- Хвилі, що символізують магнітне поле, перетинають стилізовану літеру "М".
- Логотип відображає динаміку і технологічність обробки.
- Кольори: білий фон, сині та зелені лінії для асоціації з точністю та екологічністю.

3. Абстракція пластини

- Силует твердосплавної пластини у вигляді багатогранника з магнітними лініями навколо.
- Такий логотип виглядає лаконічно та підкреслює спеціалізацію компанії.

4. Шестерня і магнітне поле

- Шестерня із хвилями магнітного поля, що утворюють літеру "Р".
- Символізує точність, інженерію та інновації.

5. Мінімалістична емблема

- Лаконічний логотип з великим написом MagneTech Pro, а буква "О" стилізована під магніт або абразивний круг.
- Стиль: строгий і технологічний, кольори — темно-сірий з металевим відтінком.

6. Фокус на інструмент

- Схематичне зображення інструмента (пластини) всередині магнітного поля.

- Мета — чітко показати сферу діяльності компанії.

7. Динамічний дизайн

- Логотип з графічними стрілками, що ілюструють обертання і процес обробки.
- Відчуття руху, технологічності та сучасності.

Виберемо 5 варіант та зробимо його візуалізацію (рис. 4.1):



Рис. 4.1 – логотип компанії

4.3 Основні переваги стартап проєкту

Основні вигоди, які користувач може отримати від використання стартапу MagneTech Pro:

1. Покращена ефективність обробки – швидке та точне відновлення твердосплавних пластин, що значно знижує витрати на нові інструменти.
2. Зниження витрат – економія на нових деталях завдяки ефективному відновленню та подовженню терміну служби інструментів.

3. Зручність у використанні – компактні мобільні установки для обробки та відновлення інструментів, що дозволяють працювати в будь-яких умовах.
4. Покращення якості обробки – завдяки магнітно-абразивній технології досягається висока точність і мінімізація дефектів.
5. Екологічність – використання екологічно безпечних матеріалів і технологій без зайвих відходів, що відповідає сучасним вимогам до сталого виробництва.
6. Технологічна інноваційність – впровадження передових методів обробки, що дозволяє підприємствам залишатися конкурентоспроможними в умовах сучасного ринку.

Ці переваги роблять наш стартап надійним партнером для бізнесів, що прагнуть досягти високої ефективності та економії у виробництві.

Напрямки застосування стартап проєкту:

1. Відновлення різального інструменту – ефективне відновлення твердосплавних пластин для різних видів обробки, таких як точіння, фрезерування, свердління та інші, що дозволяє значно подовжити термін служби інструментів.
2. Металургійна та машинобудівна промисловість – використання технологій для обробки деталей і інструментів, що працюють у складних умовах, підвищуючи їх зносостійкість та точність.
3. Авіаційна та космічна промисловість – обробка інструментів, які використовуються для точних робіт з матеріалами високої міцності, що відповідають суворим вимогам щодо точності та надійності.
4. Інструментальне виробництво – відновлення і покращення інструментів для виробництва високоточних деталей, таких як прес-форм, різці, штампи.
5. Автопромисловість – обробка інструментів для виготовлення компонентів та деталей автомобільної техніки, підвищення їхньої ефективності та тривалості служби.

6. Мікрообробка та високоточне виробництво – використання магнітно-абразивного оброблення для досягнення високої точності при обробці малих або складних деталей.
7. Медичне обладнання – обробка інструментів для виробництва медичних пристроїв, що потребують високої точності і стерильності, таких як хірургічні інструменти.

Технічні переваги:

1. Покращена зносостійкість інструментів: МАО дозволяє значно підвищити зносостійкість твердосплавних пластин завдяки створенню більш якісної та рівномірної поверхні, що забезпечує триваліший термін експлуатації інструментів.
2. Покращення точності обробки: технологія дає змогу досягти високої точності обробки завдяки контролю поверхневої шорсткості та геометрії інструментів, що особливо важливо при роботі з високоточними деталями.
3. Поліпшення механічних властивостей поверхні: підвищення твердості та зносостійкості робочої поверхні інструментів, а також зниження дефектів різальної кромки (поява сколів та тріщин), що дозволяє досягати кращих результатів при роботі з твердими та абразивними матеріалами.
4. Екологічність процесу: МАО не потребує застосування агресивних хімічних речовин, що робить цей процес екологічно чистим у порівнянні з іншими методами обробки, такими як хімічне або електрохімічне знежирення.
5. Покращена поліровка поверхні: МАО також сприяє досягненню високоякісної поліровки та гладкої поверхні інструментів, що знижує тертя і знос, збільшуючи ефективність обробки.

Економічні переваги:

1. Зниження витрат на виготовлення нових інструментів. Завдяки використанню МАО для відновлення твердосплавних пластин

можна зменшити витрати на виготовлення нових інструментів, що економить ресурси і знижує витрати на закупівлю.

2. Подовження терміну служби інструментів. Застосування МАО дозволяє подовжити термін служби інструментів на 20-50%, що знижує витрати на заміну та обслуговування інструментів.
3. Зменшення витрат на енергоспоживання. Оскільки МАО є більш енергоефективним процесом порівняно з традиційними методами обробки, це дозволяє знизити витрати на енергоспоживання.
4. Скорочення часу на обробку та відновлення. Технологія МАО дозволяє значно скоротити час на обробку та відновлення інструментів, оскільки процес є більш швидким і ефективним в порівнянні з іншими методами фінішного оброблення.
5. Зниження витрат на утилізацію відпрацьованих інструментів. МАО дозволяє ефективно відновлювати відпрацьовані інструменти, знижуючи витрати на їх утилізацію та закупівлю нових, що є економічно вигідним для підприємств.

4.4 Технологічний аудит стартап проєкту

Технологічний аудит стартапу MagneTech Pro показав високу ефективність та економічність розробленої технології магнітно-абразивного оброблення, що дозволяє досягти значних покращень у якості обробки, подовженні терміну служби інструментів та зниженні витрат. Ці результати вказують на великий потенціал технології для впровадження в промисловість, зокрема в обробку та відновлення твердосплавних пластин.

Результати аудиту зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 Результати аудиту

Результат	Опис
-----------	------

Покращення ефективності процесу обробки	МАО підвищує ефективність обробки твердосплавних пластин, знижуючи шорсткість та забезпечуючи точну геометрію різальної кромки.
Зниження витрат на інструменти	Технологія дозволяє відновлювати відпрацьовані пластини, знижуючи витрати на нові інструменти та подовжуючи їх термін служби.
Екологічність та безвідходність процесу	МАО є екологічно чистим методом, без використання шкідливих хімічних реагентів, що знижує екологічне навантаження і відходи.
Гнучкість і адаптивність технології	Технологія може бути адаптована для обробки різних видів твердосплавних пластин та інструментів, з можливістю використання мобільних установок.
Висока технологічна зрілість	МАО продемонструвала зрілість і готовність до впровадження в промислове виробництво з високим рівнем контролю та стабільності процесу.
Скорочення часу обробки	МАО дозволяє зменшити час обробки пластин, підвищуючи загальну продуктивність виробництва та знижуючи витрати енергії.

4.5 Аналіз ринкових можливостей для запуску стартап проекту

Аналіз ринкових можливостей для запуску стартапу MagneTech Pro включає в себе оцінку попиту на інноваційну технологію магнітно-абразивного оброблення (МАО), потенційних клієнтів, конкурентне середовище, а також перспективи для масштабування та розвитку в майбутньому. Основні аспекти, що слід врахувати зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3

Ключовий аспект	Опис
Попит на інноваційні технології	- Зростаюча потреба в ефективних і економічних рішеннях для обробки та відновлення інструментів.

	- Високий попит на зносостійкі інструменти для різних галузей: машинобудування, авіація, металургія.
	Технології відновлення інструментів дозволяють знижувати витрати та зберігати ресурси.
Потенційні клієнти	Промислові підприємства (машинобудування, авіація, металообробка).
	Малі та середні підприємства, що займаються ремонтом і виготовленням інструментів.
	Сервісні центри для ремонту та обслуговування інструментів.
Конкурентне середовище	Ринок вже використовує традиційні методи, але МАО забезпечує переваги в екологічності та економії матеріалів.
	МАО забезпечує високу точність, зносостійкість, менше дефектів різальної кромки порівняно з іншими методами.
	Технологія має високу конкуренцію з іншими методами обробки (наприклад, шліфування, PVD/CVD покриття).
Масштабування та розширення	МАО можна адаптувати до різних типів матеріалів і застосувань.
	Потенціал для виходу на нові ринки, такі як 3D-друк, космічна промисловість, автомобільна галузь.
Ризики	Низька обізнаність на ринку та потреба в додаткових інвестиціях у маркетинг і просування технології.
	Технічні ризики щодо адаптації технології до різних інструментів та матеріалів.

	Залежність від постачальників компонентів, таких як абразивні матеріали.
--	--

Таким чином, можна зробити висновок, що на ринку технології фінішного оброблення різального інструменту в Україні існує значний потенціал для розвитку. Хоча на ринку й присутні великі міжнародні компанії, більшість малих і середніх підприємств ще не використовують сучасні методи обробки інструментів. В Україні є недостатня кількість пропозицій у цій галузі, що створює можливість для введення інноваційних рішень, таких як технологія магнітно-абразивного оброблення.

Незважаючи на економічні труднощі та нестабільність ситуації в країні, українські приватні підприємства активно використовують сучасні технології, включаючи верстати з числовим програмним управлінням (ЧПК) та інші передові технології. Це свідчить про наявність інтересу до новітніх методів обробки і відновлення інструментів. Більшість підприємств готові інвестувати у спеціалізоване обладнання для швидкої та якісної обробки інструментів, що є важливим елементом для розвитку ринку.

Попри виклики, внутрішнє виробництво має перевагу перед імпортованими технологіями, а значне зниження вартості української валюти надає додаткові переваги для конкуренції не тільки на внутрішньому ринку, але й за його межами. Тому запуск стартапу в цій галузі має високий потенціал для успіху як в Україні, так і на міжнародних ринках.

4.6 Аналіз ринкового середовища

Загальний аналіз ринкового середовища для стартапу в галузі технології фінішного оброблення різального інструменту, зокрема за допомогою магнітно-абразивного оброблення (МАО), включає в себе кілька ключових аспектів, таких як економічна ситуація, конкуренція, ринковий попит, доступ до технологій та інфраструктури, а також можливості для розвитку та виходу на міжнародні ринки:

1. В умовах нестабільної економічної ситуації, зокрема в Україні, на ринку спостерігається певна динаміка розвитку. Приватні підприємства продовжують інвестувати у модернізацію виробничих потужностей, включаючи обладнання з ЧПК та новітні технології обробки. Це створює попит на інноваційні рішення для обробки та відновлення різального інструменту. Однак, невелика кількість компаній, що пропонують технології фінішного оброблення, дає змогу новим гравцям зайняти нішу на ринку.
2. На ринку фінішного оброблення інструментів присутні великі міжнародні компанії, які пропонують різні методи обробки, але переважно для високоякісних та дорогих інструментів. В Україні конкуренція в даній галузі не є надто великою, оскільки багато малих підприємств не мають доступу до високотехнологічного обладнання або ж не використовують сучасні методи обробки інструментів, що створює можливості для стартапу ввести інноваційні рішення.
3. Попит на технології обробки інструментів зростає, оскільки сучасні виробництва потребують високоякісних і довговічних різальних інструментів. Використання таких технологій, як МАО, може значно покращити зносостійкість інструментів і їх ефективність. Особливо актуальним є відновлення відпрацьованих інструментів, що є важливою частиною потреб ринку, особливо для малих підприємств.
4. Технології фінішного оброблення інструментів постійно вдосконалюються, і нові методи, такі як МАО, здатні значно підвищити ефективність та якість обробки. В Україні є доступ до сучасних виробничих потужностей, таких як верстати з ЧПК, але їх недостатнє використання для фінішного оброблення інструментів створює можливості для нових технологій. Водночас в умовах економічної невизначеності інвестиції в такі технології можуть бути ризикованими для малих та середніх підприємств.

5. Падіння вартості національної валюти та розвиток експорту дозволяють створювати конкурентні переваги для стартапу на міжнародному ринку. Оскільки на ринку відновлення інструментів є низька конкуренція, то вихід на ринки інших країн, особливо в Європі та Азії, може стати важливим кроком у розвитку стартапу.

Загалом, ринкове середовище є перспективним для запуску стартапу. Попри певні економічні труднощі, існують можливості для успішної реалізації інноваційних рішень, таких як МАО, з урахуванням зростаючого попиту на якісне та ефективне оброблення інструментів, а також можливості для виходу на міжнародні ринки.

Фактори конкурентоспроможності для стартапу, що працює у галузі фінішного оброблення інструментів, можуть включати наступні ключові аспекти:

1. Використання новітніх технологій, таких як магнітно-абразивне оброблення, дозволяє значно підвищити ефективність і якість обробки інструментів. Інноваційні методи можуть стати основною конкурентною перевагою, оскільки вони забезпечують покращену зносостійкість, точність і довговічність інструментів, а також знижують витрати на відновлення та обробку.
2. Споживачі завжди шукають оптимальне співвідношення ціни і якості. Стартап може запропонувати конкурентоспроможні ціни за рахунок вдосконаленої технології, зниження витрат на обробку та відновлення інструментів. У порівнянні з імпортними аналогами, пропозиція більш доступної ціни для кінцевого споживача може бути вагомою конкурентною перевагою.
3. Спеціалісти з високою кваліфікацією, здатні працювати з новітніми технологіями, є важливим фактором для досягнення конкурентоспроможності. Стартап, який має команду досвідчених інженерів і техніків, може швидше і точніше реалізувати нові технології обробки.

4. Здатність швидко адаптуватися до змінюваних умов ринку та потреб клієнтів може бути важливим фактором конкурентоспроможності. Стартап може швидко змінювати виробничі потужності, впроваджувати нові технології та коригувати стратегію залежно від вимог клієнтів.
5. Один з головних факторів конкурентоспроможності — це якість кінцевого продукту. Пропозиція продукції з підвищеною зносостійкістю, точністю та довговічністю буде привабливою для клієнтів, оскільки це дозволяє зменшити витрати на обслуговування та заміну інструментів.
6. Важливою перевагою є налагодження партнерських відносин з великими підприємствами, постачальниками та іншими ключовими гравцями в галузі. Створення стабільних каналів збуту та продажу продукції дозволить забезпечити пізнаваність бренду і доступ до нових ринків.
7. Ефективна логістична система і добре розвинена інфраструктура для поставок та обробки замовлень може стати важливою конкурентною перевагою. Це дозволить зменшити час на доставку, що є важливим для клієнтів, які працюють у швидкозмінному середовищі.
8. Важливим фактором конкурентоспроможності є сервісне обслуговування: швидка реакція на запити клієнтів, надання технічної підтримки та індивідуальних рішень для кожного замовника. Високий рівень обслуговування покращує репутацію компанії та підвищує лояльність клієнтів.
9. Постійне вдосконалення технологій через наукові дослідження та інвестиції в R&D дозволяє компанії зберігати конкурентоспроможність на довгостроковій основі, відповідати на нові потреби ринку та покращувати ефективність своїх процесів.

Ці фактори взаємопов'язані й можуть використовуватися для створення сильних конкурентних переваг на ринку. Визначення й оптимізація цих

аспектів дозволяє стартапу зайняти свою нішу на ринку та забезпечити сталий розвиток.

4.7 SWOT-аналіз

SWOT-аналіз — це стратегічний інструмент, що дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони, а також можливості і загрози, які можуть виникнути при реалізації певного проекту чи бізнес-стратегії. Термін SWOT є аббревіатурою, що походить від англійських слів:

- S (Strengths) — Сильні сторони,
- W (Weaknesses) — Слабкі сторони,
- O (Opportunities) — Можливості,
- T (Threats) — Загрози.

Цей аналіз дозволяє підприємствам або стартапам отримати чітке розуміння їхніх конкурентних переваг, слабких місць та зовнішніх факторів, які можуть вплинути на їхній успіх.

Необхідність розгляду SWOT-аналізу:

1. Оцінка внутрішнього середовища: Допомогає зрозуміти, які аспекти бізнесу є сильними та забезпечують конкурентну перевагу (наприклад, інноваційні технології чи висока якість продукції), а також виявити слабкі сторони, які потребують покращення (наприклад, високі витрати або недосконала організація процесів).
2. Аналіз зовнішнього середовища: SWOT дає можливість оцінити зовнішні фактори, які можуть впливати на бізнес, такі як можливості для розширення ринку, співпраця з іншими компаніями, або загрози у вигляді конкуренції чи економічних змін.
3. Планування стратегії розвитку: Розгляд сильних сторін та можливостей допомагає розробити стратегії для розвитку та збільшення конкурентоспроможності, а виявлення слабкостей та загроз — для зниження ризиків та пом'якшення негативних впливів.

4. Зрозумілість і простота: SWOT-аналіз є інструментом, що легко використовувати в будь-якій сфері бізнесу. Це дозволяє навіть на ранніх етапах прийняття рішень оцінити переваги та недоліки і створити план дій.

SWOT-аналіз приведений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Сила (Strengths)	Слабкість (Weaknesses)
1. Інноваційна технологія магнітно-абразивного оброблення	1. Недостатня впізнаваність бренду на ринку
2. Висока ефективність та економія часу при обробці інструментів	2. Відсутність великої кількості постійних клієнтів
3. Зниження витрат на заміну інструментів завдяки відновленню	3. Висока вартість початкових інвестицій в обладнання
4. Підвищена зносостійкість інструментів після обробки	4. Обмежена кількість працівників з висококваліфікованими навичками
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Розвиток ринку відновлення інструментів та фінішного оброблення	1. Сильна конкуренція з боку світових лідерів у галузі
2. Партнерство з великими підприємствами в галузях машинобудування та авіації	2. Коливання економічної ситуації та девальвація національної валюти
3. Розширення на міжнародні ринки через інноваційну технологію	3. Можлива зміна державної політики та нормативно-правової бази
4. Підвищення попиту на високоточні оброблені інструменти	4. Ризик технологічних збоїв або низької ефективності обладнання

Альтернативи оцінюються з урахуванням термінів реалізації та ймовірності забезпечення необхідними ресурсами та описані в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Альтернатива	Опис	Переваги	Недоліки
Партнерство та стратегічні альянси	Спільна діяльність з іншими компаніями для використання їхніх ресурсів та доступу до ринку.	Доступ до клієнтської бази, фінансова підтримка, мінімізація ризиків.	Можлива втрата частини контролю, ризику залежності від партнера.

Альтернатива	Опис	Переваги	Недоліки
Прямий вихід на ринок	Запуск продукту або послуги без посередників. Весь контроль залишається у стартапу.	Повний контроль над бізнесом та прибутками.	Високі витрати на маркетинг і рекламу, ризик невдачі на ринку.
Ліцензування технології	Продаж прав на використання технології іншими компаніями за ліцензію.	Пасивний дохід, мінімальні витрати на маркетинг та продаж.	Зниження прибутків через виплати ліцензійних зборів.
Франчайзинг	Надання можливості іншому підприємству використовувати бренд, бізнес-модель та технології.	Швидке розширення без великих капіталовкладень, контроль якості.	Складність у забезпеченні єдиних стандартів на всіх ланках.
Інтернет-продажі/електронна комерція	Запуск онлайн-магазину або платформи для продажу продуктів/послуг.	Широкий доступ до глобального ринку, зниження витрат на фізичні магазини.	Висока конкуренція в онлайні, потреба в активній цифровій стратегії.
Інвестиційне партнерство	Залучення інвесторів або венчурних фондів для фінансування проекту.	Доступ до капіталу, швидке розширення, підтримка експертів.	Втрата частини контролю, високі вимоги з боку інвесторів.

4.8 Розробка ринкової стратегії проекту

4.5.1 Оцінка ринку та цільова аудиторія

1. Цільова аудиторія:

- Машинобудівні компанії, які займаються виготовленням та обробкою металевих деталей, зокрема твердосплавних пластин.
- Підприємства, що займаються відновленням різального інструменту, такі як спеціалізовані сервісні центри та майстерні.

- Авіаційні та суднобудівні компанії, де висока точність обробки є критично важливою.
- Малі та середні підприємства, які потребують економічно ефективних рішень для відновлення інструментів.

2. Оцінка попиту:

Враховуючи постійну потребу у високоякісному фінішному обробленні та відновленні інструментів, попит на технології, які дозволяють швидко та ефективно відновити робочі характеристики інструментів, залишається стабільно високим.

3. Позиціонування на ринку

- MagneTech Pro буде позиціонуватися як компактне, ефективне та інноваційне рішення для фінішного оброблення і відновлення різального інструменту.
- Основні переваги: зниження витрат на інструменти, покращення якості обробки, підвищення зносостійкості, швидкість та ефективність обробки.

4. Цінова політика:

Стратегія доступної ціни на старті для забезпечення конкурентоспроможності, з поступовим підвищенням вартості при розширенні та вдосконаленні технології.

4.5.2 Маркетингові стратегії

1. Просування через канали дистрибуції:

- Використання прямого продажу через вебсайт і офіційні представництва.
- Розвиток партнерств з виробниками інструментів і компаніями, що займаються відновленням інструментів.

2. Реклама та брендинг:

- Розробка рекламних кампаній з акцентом на вигоди, які надає технологія: зниження витрат, підвищення якості продукції, скорочення часу на обробку.
- Участь у виставках та технічних конференціях для залучення уваги до інноваційної технології.

3. Цільова реклама:

Використання digital-каналів для просування на ринку інтернет-реклами, таргетування на аудиторію за допомогою LinkedIn, Google AdWords та спеціалізованих індустріальних платформ.

4. Вибір каналів продажу:

- Прямий продаж через інтернет-платформи. Розробка та підтримка сучасного вебсайту з можливістю онлайн-консультацій і замовлень.
- Продаж через дистриб'юторів та партнерів. Пошук і встановлення партнерських відносин з постачальниками обладнання, а також сервісними компаніями для забезпечення доступу до кінцевих споживачів.
- Продаж через виставки та індустріальні конференції. Презентація продукту на виставках для підвищення обізнаності та залучення нових клієнтів.

5. План розвитку:

- Запуск мінімальної життєздатної версії (MVP). Почати з обмеженою кількістю пристроїв для тестування на ринку та збирання відгуків користувачів.
- Розширення виробництва. Після досягнення позитивних результатів з MVP та отримання зворотного зв'язку від перших клієнтів, запустити виробництво на більш широкому рівні.
- Міжнародна експансія. Поступово виходити на ринки інших країн, де спостерігається попит на подібні технології, зокрема в країнах Європи та Азії.

Ця ринкова стратегія спрямована на створення стійкої позиції для стартапу MagneTech Pro на ринку технологій фінішного оброблення. Вона охоплює важливі аспекти, такі як розуміння потреб ринку, позиціонування на основі конкурентних переваг, розробку маркетингових заходів і план розвитку з орієнтацією на довгостроковий успіх та сталий ріст.

4.9 Фінансова стратегія

Фінансова стратегія стартапу MagneTech Pro спрямована на забезпечення сталого розвитку та максимізацію прибутковості за рахунок ефективного використання ресурсів та контролю витрат:

1. Початкове фінансування

- Венчурний капітал: Залучення інвестицій на початковому етапі для покриття витрат на розробку та маркетинг.
- Гранти: Можливість отримання державних або міжнародних грантів для підтримки інновацій.

2. Моделі доходів

- Продаж обладнання та послуг з фінішного оброблення інструментів.
- Ліцензування та франчайзинг для розширення на нові ринки.
- Консалтинг та навчання для підприємств, які хочуть впровадити MAO.

3. Прогнозування доходів та витрат

- Перші доходи очікуються від продажу обладнання та послуг, з подальшим збільшенням після розвитку бренду.
- Основні витрати включають закупівлю обладнання, виробництво та маркетинг.

4. Фінансовий контроль та ризики

- Регулярний аналіз фінансових результатів та коригування стратегії.
- Оцінка ризиків, пов'язаних із валютними коливаннями та технологічними змінами.

5. План зростання

- Розширення асортименту та вихід на міжнародні ринки через інвестиції та франчайзинг.

6. Стратегія витрат

- Зниження витрат через автоматизацію процесів та оптимізацію виробництва.

7. Ключові показники ефективності (KPI):

- Зростання доходу на 20-30% у рік протягом перших 5 років.
- Рентабельність 15-20% від доходу.

Тобто, фінансова стратегія стартапу MagneTech Pro орієнтована на зростання доходів через продаж обладнання, ліцензування та консалтинг, з постійним контролем витрат і пошуком нових ринків.

Підсумовуючи все вищесказане, стартап MagneTech Pro має високий потенціал у сфері фінішного оброблення та відновлення різальних інструментів за допомогою технології магнітно-абразивного оброблення. Враховуючи сучасні потреби ринку та обмежену кількість гравців у цій ніші, проект має можливість стати лідером завдяки інноваційному підходу, що поєднує високу ефективність обробки, економію ресурсів та поліпшення якості інструментів.

Стартап спрямований на розвиток ринкових можливостей у різних галузях, таких як машинобудування, авіація, суднобудування та інші, де висока точність та ефективність оброблення інструментів є критичними для забезпечення продуктивності. Вдосконалена фінансова стратегія, з акцентом на інвестування та ліцензування, дозволить забезпечити сталість бізнесу на різних етапах розвитку.

З урахуванням ринкових можливостей та конкурентних переваг, проект MagneTech Pro має великий потенціал для успішної реалізації на українському та міжнародному ринку, що дозволить не тільки покращити якість обробки інструментів, а й сприяти розвитку економіки в цілому.

ВИСНОВКИ

Магнітно-абразивне оброблення є ефективним методом фінішної обробки багатогранних твердосплавних пластин, що дозволяє вирішити низку проблем, пов'язаних із недостатньою якістю поверхонь, зокрема високою шорсткістю, низькою твердістю, наявністю сколів та недостатньою зносостійкістю. Завдяки МАО покращуються експлуатаційні характеристики різальних елементів та якість оброблюваних поверхонь, що підтверджено результатами проведених експериментів.

Дослідження показали, що початкова шорсткість поверхні пластин становила $R_a = 0,404$ мкм, а після обробки ферроматом 630/400 із застосуванням Асфолу вона зменшилася до $R_a = 0,245$ мкм, що свідчить про покращення на 39%. Твердість поверхневого шару пластин зросла з 21,32 ГПа до 29,36 ГПа, тоді як товщина цього шару зменшилася з 1,9 мкм до 1,6 мкм. Важливим результатом стало збільшення зносостійкості: оброблені пластини зберігали працездатність після 22 хвилин інтенсивного використання, тоді як необроблені вимагали заміни вже через 12 хвилин роботи.

На основі результатів роботи було розроблено стартап-проект, спрямований на впровадження мобільної установки для магнітно-абразивного оброблення. Проект орієнтований на малий та середній бізнес і пропонує можливість швидкого відновлення твердосплавних пластин із мінімальними витратами. Ринкові дослідження та аналіз підтвердили економічну ефективність і перспективність цієї технології для широкого промислового застосування.

Отже, магнітно-абразивне оброблення довело свою ефективність як перспективний метод, що дозволяє суттєво покращити якість і працездатність твердосплавних пластин, підвищуючи ефективність сучасних виробничих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Магнітно-абразивне оброблення деталей складної форми / В. С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, 2017.
2. Магнитно-абразивная обработка сложнопровильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев.
3. Багатогранні непереточувані пластини. URL:
https://studbooks.net/1835773/tovarovedenie/mnogogrannye_neperetachivaemye_plastiny.
3. Магнітно-абразивне оброблення деталей / Н. С. Хомич. Мінськ, 2006.
4. Определение рациональной схемы обработки ответственных деталей газотурбинного двигателя в магнитореологических средах методом экспертной оценки / А. Г. Бойцов, С. В. Курилович, В. В. Курицына, М. В. Силуянова. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение Т. 18, № 3, 2019 г.
5. Магнітно-абразивне оброблення інструменту в умовах великих робочих щілин / В.С. Майборода, Б. Карпушевський, О. Климов, 2011.
6. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем / збірник наукових праць. Краматорськ, 2010. URL:
http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/reliability_instrument/archive/%E2%84%9626.pdf.
7. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Минск : Наука и техника, 1981. 327 с 82
8. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград : Машиностроение, 1986. 173 с.
9. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко та ін. Минск : "Беларуская навука", 2017. 377 с.
10. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей/ Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Л.А. Олендер. – Мн.: Высшэйшая школа, 1977. – 288 с.

- 11.Сакулевич Ф.Ю. Сущность и физико-механические особенности магнитно-абразивной обработки
- 12.Ф.Ю. Сакулевич, В.И. Жданович//Новые методы испытания и обработки материалов. Мн., Наука и техника, 1975. С. 135-146.
- 13.Розділ 4. Стартап проект. (с.70). URL:
ela.kpi.ua/bitstream/123456789/49741/1/Dubyskyi_magistr.pdf
- 14.Розділ 5. Розроблення стартап проекту. (с. 81). URL:
ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26581/1/Davydyuk_magistr.pdf