

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

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра Конструювання машин

«На правах рукопису»
УДК 621.923

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інструментальні системи інженерного
дизайну»**

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

**на тему: «Дослідження триботехнічних властивостей магнітно-абразивного
інструменту в умовах кільцевого розташування робочих зазорів»**

Виконав:

студент 6 курсу,

групи МІ-91мп

Жук Роман Борисович

Науковий керівник:

Професор кафедри КМ, д. т. н., професор

Майборода Віктор Станіславович

Рецензент:

Доцент кафедри ТМ, к.т.н., доцент

Кореньков Володимир Миколайович

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра Конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 131 – прикладна механіка

Освітньо-професійна програма Інструментальні системи інженерного дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО**
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Жуку Роману Борисовичу

1. Тема дисертації «Дослідження триботехнічних властивостей магнітно-абразивного інструменту в умовах кільцевого розташування робочих зазорів»
науковий керівник дисертації Майборода Віктор Станіславович д.т.н., професор затверджені наказом по університету від «03» листопада 2020 р. №3205-с

2. Термін подання студентом дисертації 07 грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження Трибологічні властивості магнітно-абразивного інструменту (МАІ) при контакті з оброблюваною поверхнею деталі під час магнітно-абразивного оброблення (МАО).

4. Предмет дослідження Процес МАО

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Проаналізувати існуючі дослідження реологічних та трибологічних властивостей магнітно-абразивного інструменту при МАО;

2. Розробити методики для дослідження трибологічних властивостей МАІ;

3. Виконати дослідження особливостей умов взаємодії МАІ з оброблюваними деталями в умовах кільцевого розташування робочих зазорів в залежності від технологічних параметрів процесу.

4. Знайти раціональні режими для МАО деталей з різних матеріалів у кільцевій ванні.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій: публікація наведена в додатку В

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз досліджень властивостей МАІ	01.09.20 – 20.09.20	
2	Методика досліджень трибологічних властивостей МАІ в умовах кільцевого розташування робочих зазорів	21.09.20 – 11.10.20	
3	Експериментальні дослідження умов ударно-фрикційної взаємодії МАІ з поверхнею деталі	12.10.20 – 15.11.20	
4	Розробка Start-Up проекту	16.11.20 - 04.12.20	

Студент

(підпис)

Роман ЖУК

Науковий керівник

(підпис)

Віктор МАЙБОРОДА

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Жук Р.Б. Дослідження триботехнічних властивостей магнітно – абразивного інструменту в умовах кільцевого розташування робочих зазорів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – прикладна механіка – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2020.

Виконано аналіз існуючих літературних джерел в області досліджень реологічних та трибологічних властивостей МАІ. Розглянуто геометричні і мікрогеометричні характеристики деяких магнітно – абразивних порошків. Проаналізовано їх магнітні властивості МАІ, структурні закономірності і особливості формування МАІ та його взаємодії з оброблюваною поверхнею.

Розроблена методика, за якою було проведено визначення зусиль в МАІ та характер їх змін в залежності від певних технологічних факторів при МАО в умовах кільцевого розташування робочих магнітних зазорів.

Проаналізовано тенденції зміни величини крутного ефективного моменту в залежності від технологічних параметрів процесу: типу магнітно-абразивного порошку, його розміру і форми частинок, швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни та власної осі, величини магнітної індукції.

Досліджено вплив ударно-фрикційної взаємодії МАІ на оброблювану поверхню зразків з парамагнітних та феромагнітних матеріалів, на основі графіків та топограм різниць ефективного моменту між залежностями ефективного моменту при різних технологічних умовах.

Знайдені раціональні режими процесу МАО для парамагнітних та феромагнітних матеріалів.

Ключові слова: магнітно-абразивний інструмент, магнітно-абразивне оброблення, ударно – фрикційна взаємодія МАІ, ефективний момент, трибологічні та реологічні властивості МАІ, кільцеве розташування робочих щілин, магнітне поле.

SUMMARY

Zhuk R.B. Study of tribotechnical properties of a magnetic - abrasive tool in the conditions of annular arrangement of working gaps.

Dissertation for obtaining a Master's degree in specialty 131 – applied mechanical engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – Kyiv, 2020.

The analysis of existing literature sources in the field of research of rheological and tribological properties of MAT is performed. Geometrical and microgeometric characteristics of some magnetic abrasive powders are considered. Analyzed magnetic properties of MAT, structural regularities of MAT formation and its interaction with the treated surface.

A method has been developed for determining the forces of the MAT and the nature of their changes depending on changes in certain technological factors under the MAO in the conditions of the annular arrangement of the working magnetic gaps.

The analyzed trend of changes in the development of the effective moment value depending on the type of powder, its size, the speed of rotation of the sample around the axis of the ring bath and its own axis, and the value of magnetic induction.

The influence of the impact-friction interaction of the MAT on the treated surface of samples of paramagnetic and ferromagnetic materials is studied on the basis of graphs and topograms of differences in the effective moment between the dependences of the effective moment under various technological conditions.

Rational modes of the MAP process for paramagnetic and ferromagnetic materials are found.

Keywords: magnetic-abrasive tool, magnetic-abrasive processing, impact-friction interaction of MAT, effective moment, tribological and rheological properties of MAI, annular arrangement of working slots, magnetic field.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1_АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО – АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ	10
1.1 Дослідження в області тангенціальних напружень МАІ	11
1.2 Огляд деяких магнітно-абразивних порошків, які використовуються для формування МАІ	16
1.3 Магнітні властивості МАІ	19
1.4 Структурні закономірності формування порошкового МАІ і його взаємодії з оброблюваною поверхнею	24
1.5 Дійсні значення коефіцієнтів тертя у загально прийнятному вигляді ..	26
РОЗДІЛ 2_МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО – АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ РОБОЧИХ ЗАЗОРІВ	29
2.1 Установка для МАО з кільцевим розташуванням робочих зазорів.....	29
2.2 Методика вимірювання зусиль при МАО у кільцевій ванні.....	31
2.3 Зразки, матеріали і умови дослідження трибологічних властивостей МАІ	37
РОЗДІЛ 3_ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ УДАРНО – ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МАІ З ПОВЕРХНЕЮ ДЕТАЛЕЙ	40
3.1.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Полімам-М (400/315 мкм).....	40
3.1.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Полімам-М (200/100 мкм).....	43
3.1.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Ферромап (400/315 мкм).....	46
3.1.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Ферромап (200/100 мкм).....	47
3.2.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Полімам-М (400/315 мкм)	50
3.2.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Полімам-М (200/100 мкм)	51
3.2.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Ферромап (400/315 мкм)	54

3.2.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Ферромап (200/100 мкм)	55
3.3.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Полімам-М (400/315 мкм)	57
3.3.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Полімам-М (200/100 мкм)	60
3.3.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Ферромап (400/315 мкм).....	61
3.3.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Ферромап (200/100 мкм).....	63
3.4.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40Х13 порошком Полімам-М (400/315 мкм)	66
3.4.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40Х13 порошком Полімам-М (200/100 мкм)	67
3.4.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40Х13 порошком Ферромап (400/315 мкм).....	68
3.4.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40Х13 порошком Ферромап (200/100 мкм).....	70
3.5 Аналіз отриманих результатів після проведення експериментів	72
3.5.1 МАО парамагнетиків осколковим порошком Ферромап 200/100 мкм	72
3.5.2 МАО парамагнетиків осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм	74
3.5.3 МАО парамагнетиків округлим порошком Полімам-М	76
3.5.4 МАО феромагнітної сталі 40Х13	78
РОЗДІЛ 4.....	82
РОЗРОБКА START-UP ПРОЕКТУ	82
4.1 Опис ідеї проекту	82
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	83
4.3 Аналіз ринкових можливостей Start-Up проекту	83
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	86
ВИСНОВКИ	89
Список використаної літератури:	91
Додатки.....	94

ВСТУП

Актуальність теми. Існує велика кількість схем, при яких можливо здійснювати процес МАО, але найбільш поширеною є схема з кільцевим розташуванням робочих зон, так як вона має ряд переваг, а саме можливість регулювання технологічних параметрів процесу в широких межах, регулювання величини магнітної індукції, швидкості обертання деталі навколо осі кільцевої ванни і власної, базування деталі в кільцевій ванні та регулювання траєкторії руху в процесі оброблення.

Станом на сьогоднішній день досить широко досліджене питання, щодо умов формування МАІ з магнітно – абразивного порошку (МАП) в магнітному полі в цілому, а також були виконані дослідження реологічних властивостей порошкового МАІ, в умовах великих робочих щілин.

Але залишилось невирішеними питання пов'язані з визначенням трибологічних властивостей МАІ при його контакті з оброблюваною поверхнею деталі в умовах кільцевого розташування робочих зазорів, що потребує детального дослідження.

Метою роботи є дослідження трибологічних властивостей магнітно – абразивного інструменту в умовах кільцевого розташування великих магнітних робочих зазорів при обробленні пара- та феромагнітних матеріалів в умовах змінних технічних параметрів МАО.

Для досягнення мети потрібно виконати наступні дії:

1. Зробити аналіз існуючих досліджень по реологічним та трибологічним властивостям магнітно-абразивного інструменту при МАО;
2. Розробити методики для дослідження трибологічних властивостей МАІ;
3. Виконати дослідження особливостей умов взаємодії МАІ з оброблюваними деталями в умовах кільцевого розташування робочих зазорів в залежності від технологічних параметрів процесу.
4. Знаходження раціональних режимів для МАО деталей з різних матеріалів у кільцевій ванні.

Об’єкт дослідження. Магнітно – абразивне оброблення.

Предмет дослідження. Трибологічні властивості магнітно – абразивного інструменту при контакті з оброблюваною поверхнею деталі під час МАО.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на теорії магнітного поля, трибології, реології, матеріалознавства та теорії контактної взаємодії.

Наукова новизна. Визначено особливості поведінки МАІ при його ударно-фрикційній взаємодії з оброблюваною поверхнею матеріалу зразка при різних умовах МАО, завдяки чому стало можливим проведення аналізу впливу сил тертя МАІ та його тиску на деталь, що дозволило розробити рекомендації стосовно оброблення феро -, та парамагнітних матеріалів та, як наслідок, підвищити продуктивність процесу МАО конкретних матеріалів.

Практичне значення. Визначено раціональні режими для магнітно – абразивної обробки феромагнітних та парамагнітних деталей, що дозволило оптимізувати процес МАО для різних технологічних умов і поставлених у автоматизованому виробництві задач в установці з магнітною системою кільцевого розташування робочих зазорів.

Особистий внесок здобувача. Автором досліджено особливості впливу сил тиску та тертя МАІ на оброблювану деталь з різних матеріалів та при різних технологічних умовах МАО. Отримано залежності поведінки МАІ за різними умовами МАО та розроблено рекомендації оброблення деяких феромагнітних та парамагнітних матеріалів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел з 20 найменувань та додатків. Основний текст дисертації викладено на 80 сторінках, що містять 45 рисунків, 21 таблицю. Повний обсяг дисертації становить 100 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО – АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

У сучасному машинобудуванні існує велика кількість методів фінішного оброблення виробів простої і складної геометричної форми, лопаток ГТД, різального інструменту, для забезпечення його відповідної якості, шляхом досягнення необхідної шорсткості, зміцнення поверхневого шару та підвищення фізико-механічних властивостей [1,3,5,20]. Одним з найперспективніших серед таких є застосування магнітно – абразивного оброблення (МАО).

Метод магнітно-абразивного оброблення є методом, що здійснюється при переміщенні деталі в середовищі фєроабразивного порошку, який утримується силами магнітного поля в робочому стані.

При розробці вискоєфективного процесу МАО особливу увагу необхідно приділяти процесам, пов'язаних з умовами формування магнітно-абразивного інструменту протягом всього технологічного циклу обробки, особливостями його структуроутворення і руху окремих груп частинок [2]. Раніше було показано [1], що при МАО в умовах великих робочих зазорів взаємодія окремих елементів оброблюваної поверхні з магнітно-абразивним порошком, сформованим в магнітно – абразивний інструмент (МАІ) доцільно розглядати не як одиничні акти контактування окремих частинок порошку з оброблюваними поверхнями деталей, а як процес взаємодії окремих квазістабільних утворень з частинок порошку - представницьких обсягів - з деталлю. При цьому необхідно враховувати градієнт магнітного поля, яке забезпечує певне, досить стабільне формування стійких структурних утворень в МАІ.

Показано, що процес МАО відбувається в умовах ударно-фрикційної взаємодії МАІ з оброблюваною поверхнею [13,14,15,16]. Інтерференція даної взаємодії дає можливість досягати потрібних фізико-механічних

властивостей оброблюваної деталі. Отже, необхідним є проведення аналізу сил тертя, що виникають в МАІ та визначення його тиску на оброблювану деталь.

1.1 Дослідження в області тангенціальних напружень МАІ

Раніше проведені дослідження трибологічних та реологічних властивостей порошкового МАІ, та розроблені методики та установки, що дозволяло визначити вплив різних технологічних факторів на особливості формування і переформування МАІ і динамічні процеси, які відбуваються в порошковому інструменті під час МАО реальних поверхонь деталей [1,8].

Зовнішній вигляд установки для дослідження зсувних напружень в МАІ та для дослідження впливу параметрів обробки на реологічні властивості МАІ представлені на рисунках 1.1 та 1.2 відповідно.

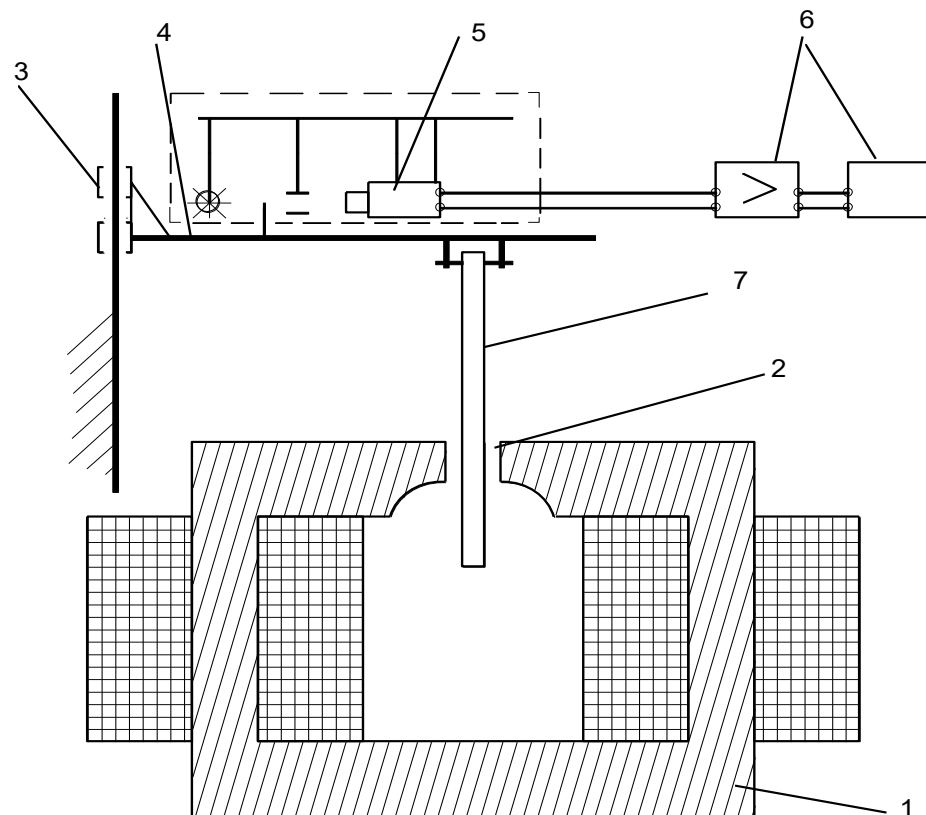


Рис 1.1. – Схема установки для визначення трибологічних властивостей МАІ

Визначено, що величина зсувних напружень τ в МАІ під час МАО, як в парі МАІ – поверхня деталі, так і між шарами МАІ – внутрішнє тертя, є лінійною функцією від магнітної індукції B у робочих щілинах в діапазоні зміни величини індукції $0 \div 0,6$ Тл, а величина коефіцієнту пропорційності між B і τ визначає коефіцієнт тертя у магнітному полі;

Визначена лінійна залежність має наступний вид (1.1):

$$\tau = \tau_0 + f \cdot B \quad (1.1)$$

де τ - зсувні напруження в МАІ, кПа;

τ_0 - незмінна складова зсувних напружень; кПа

B - величина магнітної індукції Тл;

f - коефіцієнт пропорційності, кПа/Тл, який є коефіцієнтом тертя у магнітному полі (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Значення τ_0 і f для різних типів порошків для умов МАІ – поверхня оброблюваної деталі

Тип порошку	Розмір частинок порошку, мкм	Матеріал зразка	τ_0 , кПа	f , кПа/Тл
1	2	3	4	5
ПОЛІМАМ-Т	630/400	ВТЗ-1	3,05	33,70
	400/315		1,58	36,28
	315/200		1,63	38,08
	200/100		2,34	36,26
ПОЛІМАМ-Т	630/400	Д16Т	4,07	45,62
	400/315		2,72	38,86
	315/200		2,61	37,08
	200/100		4,41	36,01
ФЕРРОМАП	630/400	ВТЗ-1	4,19	30,59
	400/315		2,81	35,72
	315/200		4,00	32,72
	200/100		2,28	39,73

ПОЛІМАМ-М	630/400	ВТЗ-1	0,86	40,77
	400/315		1,76	37,20
	315/200		0,50	38,20
	200/100		1,15	45,80
ПОЛІМАМ-М	630/400	Д16Т	0,36	99,79
	400/315		1,17	100,7
	315/200		0,27	90,76
	200/100		0,93	95,44

Дослідження в області трибологічних властивостей на установці за рисунком 1.1 були квазістатичними, тобто дослідження відбувалися без наявності обертів при малих швидкостях оброблення. Тому, додатково було здійснено дослідження впливу параметрів обробки на реологічні властивості МАІ на установці з диском, що обертається з регульованою швидкістю [8,9,15] (рис.1.2).

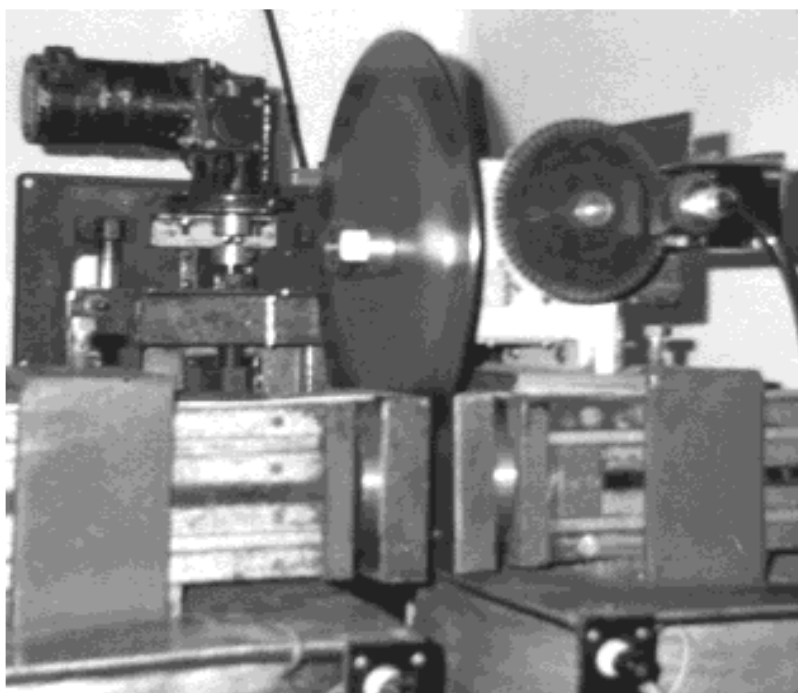


Рис 1.2 – Зовнішній вигляд установки для дослідження впливу параметрів обробки на реологічні властивості МАІ

Контроль сил, що діяли на поверхню диску, в процесі МАО, здійснювались шляхом визначення корисного моменту на валу редуктора 5.

Для цього було визначено залежність загального електричного опору двигуна від величини струму. Для двигуна, який використовується в складі установки при загальмованому якорі виконували виміри споживаного двигуном струму I при різних значеннях величини напруги U , що задаються від джерела постійного струму. Виміри величини струму I виконували не менше 5 разів при різних положеннях якоря. У результаті обробки отриманих результатів одержано залежність зміни електричного опору двигуна $r_{\text{дв.}}$ від величини струму.

При відсутності навантаження на обертовому диску на валі редуктора, було визначено значення моменту холостого ходу приводу. У зв'язку з тим, що редуктор із двигуном знаходиться поблизу магнітної системи, визначення моменту холостого ходу було виконане при різних значеннях напруженості магнітного поля в магнітній системі. Величина моменту холостого ходу M_{xx} визначалась як:

$$M_{xx} = \frac{U \cdot I - I^2 \cdot r_{\text{дв.}}}{\omega}, \quad (1.2)$$

де U і I - відповідно, напруга і струм на двигуні при заданій частоті обертання ω диска, які вимірюються за допомогою приладів;

$r_{\text{дв.}}$ - опір двигуна, визначений за допомогою залежності

Надалі отримана функція використовується при визначенні корисного моменту на оброблюваному диску.

Величина корисного моменту двигуна при навантаженому в процесі МАО диску визначається за значеннями споживаного струму I_n , напруги U_n і частоти обертання диска ω_n , з врахуванням теплових та механічних втрат у редукторі при вимірюваному значенні струму I_n .

Тоді :

$$M_{\text{кор.}} = M_{\text{ем.}} - M_{xx} \quad (1.3)$$

Встановлено, що швидкість обробки являється найважливішим фактором, що впливає на механізм поведінки частинок МАІ при МАО у великих робочих щілинах. В залежності від ступеня нерівновісності частинок МАІ і їх форми зміна механізму взаємодії частинок МАІ з оброблюваними поверхнями відбувається при швидкостях МАО, які змінюються від 0,7 до 2 м/с для рівновісних порошків і від 2,2 до 3,3 м/с для нерівновісних.

Встановлено, що відбуваються процеси, пов'язані з особливостями руху частинок в МАІ, а саме при певних умовах відбувається обертання частинок МАІ. Значення швидкостей МАО, при яких виявляється активне обертання частинок МАІ, що сформовано з різноманітних порошків подано в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Значення швидкостей МАО, при яких виявляється активне обертання частинок МАІ

Тип порошку	Розмір частинок, мкм	Швидкість, м/с
ПОЛІМАМ-Т	630/400	1,65
	200/100	1,84
ПОЛІМАМ-М	630/400	2,66
	200/100	2,1
ЦРАМАМ	630/400	2,69
	200/100	3,3
СП-17	630/400	2,2
ПР Р6М5	200/100	0,66

Недолік вище описаних методів полягає в тому, що дані методи не враховують реальної сили тертя МАІ, а отримані результати являються лише деяким показником, так як відсутня сила тиску N порошку на деталь.

Тому, дослідження динамічних явищ, які виникають у МАІ під час МАО та їх вплив на конкретні типи матеріалів при обробленні, характеризується рядом динамічних чинників, таких як наприклад швидкість руху деталі

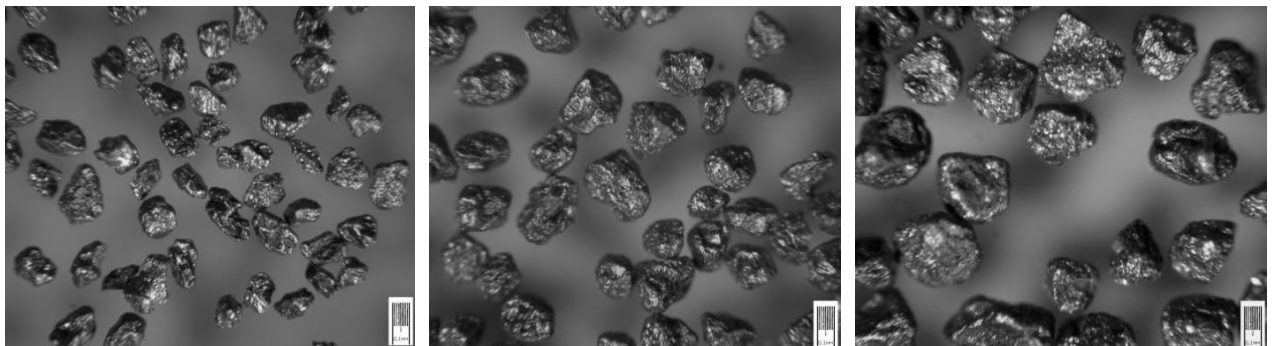
навколо осі кільцевої ванни, власної осі та величина магнітної індукції, що потребує більш сучасного обладнання та створення нової методики по дослідженню трибологічних властивостей МАІ з урахуванням сил тиску N порошку на деталь.

1.2 Огляд деяких магнітно-абразивних порошків, які використовуються для формування МАІ

Магнітно – абразивні порошки та їх геометричні і мікрогеометричні характеристики досить поглиблено досліджено на сьогоднішній час. Орієнтація у вище названих характеристиках МАП є дуже важливою, так як вони є головним визначником у виборі ефективності і області використання їх для MAO та при визначенні особливостей їх контактної взаємодії з оброблюваними поверхнями і характеру їх впливу на оброблювану деталь та МАІ [6,7].

Магнітно – абразивні порошки умовно можна поділити на два типи за формою частинок та способів їх отримання:

- осколкові, що отримуються шляхом розмелу попередньо гранульованих матеріалів з розплавів систем Fe-Si-C та Fe-Si-Ti-C, які мають практично безпоруовату структуру. Такими магнітно-абразивними порошками (МАП) є: Полімам Т, Ферромап, ДЧК (рис. 1.3).



Полімам-Т 200/100 мкм

Полімам-Т 315/200 мкм

Полімам-Т 400/315 мкм

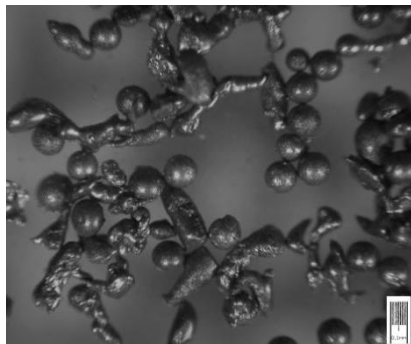
Рис. 1.3. Зовнішній вигляд осколкових частинок МАП на прикладі порошку

Полімам-Т

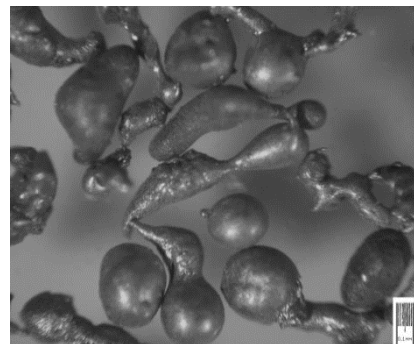
Порошок Ферромап практично ідентичний за складом і властивостями порошку Полімам-Т але відрізняється лише виробником. Магнітно-абразивний порошок Ферромап застосовували у подальших дослідженнях в цій дипломній роботі в якості осколкового і нерівновісного МАП при дослідженні трибологічних властивостей МАІ.

- округлі, отримані в результаті розпилення розплавів системи Fe-Si-C, Fe-C-Si-Al без наступного розмелу, до яких відносяться Царамам, Полімам-М_{сф}, частинки якого мають сферичну форму та ПР Р6М5 (рис. 1.4). Полімам-М_{сф} за своїми властивостями практично ідентичний за складом і властивостями порошку ДЧК, який відноситься до осколкових.

В подальшому магнітно-абразивний порошок Полімам-М використовували при використанні дипломній роботі в якості округлого і нерівновісного МАП.



Полімам-М 200/100 мкм



Полімам-М 400/315 мкм

Рис. 1.4. Зовнішній вигляд округлих частинок МАП на прикладі порошку Полімам-М

Як осколочні, так і округлі МАП мають неправильну геометричну форму. Різниця у походженні та формі частинок порошоків одного складу характеризується способом отримання, додатковим обробленням, методом сепарації та іншими факторами. Кожне окремо взяте зерно, незалежно від методу отримання, має різальні кромки на своїй поверхні, які в свою чергу мають конкретні мікрогеометричні характеристики. Під час МАО використовують МАП з достатньо широким фракційним складом від 100/63

до 1000/630 мкм, які використовують для отримання різних параметрів оброблюваних поверхонь.

Дослідження геометричних та мікрогеометричних характеристик МАП, а саме коефіцієнтів нерівності – k_f , а також радіусів округлення різальної кромки – $r_{кз}$ виконували за допомогою мікроскопічного аналізу моношару частинок різних МАП на інструментальному мікроскопі УІМ – 2М з наступним статистичним обробленням отриманих результатів [7].

Результати вимірювання наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Геометричні характеристики окремих МАП

Тип порошку	Фракції, мкм	k_f	Стандартне відхилення
Полімам - Т	200/100	1,52	0,36
	315/200	1,41	0,37
	400/315	1,29	0,2
Полімам - М	200/100	1,79	1,22
	400/315	2,07	1,01

Отримані результати по визначенню ступеню нерівності частинок МАП дозволяють поділити їх на:

- рівновісні, з коефіцієнтом нерівності $k_f < 1,6$ – порошки типу Полімам Т, ДЧК_{6/y} та ПР Р6М5;
- нерівновісні, з коефіцієнтом нерівності $k_f > 1,6$ – порошки типу ДЧК_н, Царамам, Полімам-М.

При формуванні МАІ важливою характеристикою є щільність порошкового середовища. Значення щільностей деяких існуючих магнітно-абразивних порошків, які рекомендовано використовувати для розробки технологічних процесів при МАО наведено в табл. 1.4. Вимірювання щільності МАП виконувалось за стандартними методиками, прийнятими в

порошковій металургії [1,8]. Після проведення вимірювань було встановлено, що МАП з округлими частинками мають найкращу схильність до ущільнення. З отриманих результатів зміни величини щільності видно, що найкраща спроможність до ущільнення притаманна порошкам з округлими частинками, наприклад Полімам-М. Розмір частинок мав несуттєвий вплив на значення щільності порошків для досліджуваного діапазону.

Таблиця 1.4

Щільність деяких магнітно-абразивних порошків

Назва порошку	Розмір частинок, мкм	Щільність, $\times 10^{-3}$ г/мм ³	
		пікнометрична	насипна
ПОЛІМАМ-Т	630/400	6,75	3,40
	400/315		3,32
	315/200		3,32
	200/100		3,24
ПОЛІМАМ-М	630/400	7,18	3,62
	400/315		3,63
	315/200		3,65
	200/100		3,67
ФЕРРОМАП	630/400	6,47	3,08
	400/315		2,99
	315/200		2,82
	200/100		2,78

1.3 Магнітні властивості МАІ

Величина і характер зміни магнітних властивостей МАП є визначними показниками ефективності процесу полірування деталі при МАО, так як вони описують зміну сил магнітного походження у робочих зонах магнітних

щілин [3,5]. Існує два важливих фактори, які впливають на деталь під час МАО, а саме:

- величина відносної магнітної проникності (μ) МАП, сформованого в інструмент силами магнітного поля.
- величина намагніченості порошкового МАІ (М).

Були проведені дослідження на характер їх залежності від напруженості магнітного поля в установках з магнітною системою.

Величина магнітної індукції в робочій зоні магнітних щілин верстата, заповненої магнітно-абразивним порошком визначається за формулою (1.4):

$$\mathbf{B} = (\chi' + \mu_0) \cdot \mathbf{H}, \quad (1.4)$$

де χ' - абсолютна магнітна сприйнятливість речовини, що заповнює зазор, Гн/м.

Причому

$$\mu = \chi + 1 = \chi' / \mu_0 + 1,$$

де χ - відносна магнітна сприйнятливість.

Тоді з огляду на аналіз експериментальних і теоретичних досліджень, виконаний у [4], можна провести оцінку намагніченості МАІ, використовуючи залежність:

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}_e}{\mu_0} - \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}_e - \mathbf{B}_0}{\mu_0} \quad (1.5)$$

де \mathbf{B}_e - магнітна індукція в магнітній щілині, яку заповнено магнітно-абразивним порошком;

\mathbf{B}_0 - магнітна індукція в порожній робочій щілині.

Величину відносної магнітної проникливості для МАІ можна визначити, як відношення магнітної індукції в заповненій робочій щілині B_e до величини магнітної індукції в порожній щілині B_0 при сталому рівні напруженості магнітного поля.

При дослідженні магнітних характеристик МАІ використовували мілітесламетр Ф-4355. Фіксування датчика Холла в наперед заданому місці робочої щілини виконували за допомогою спеціального пристрою, який жорстко встановлювався на полюсні наконечники, і мав вигляд гребінки з відомим кроком зубців (3 мм) і величиною пазів, які відповідали товщині датчика Холла.

При вимірюванні величини магнітної індукції в робочих зонах магнітних щілин встановлено характер зміни величини μ залежно від напруженості магнітного поля.

Вимірювання виконувалися в магнітних щілинах шириною 20 мм за умови, що коефіцієнт ущільнення (відношення величини щільності МАІ в щілині до насипної щільності магнітно-абразивного порошку) дорівнював 1.

Аналіз отриманих результатів показує, що з зростанням розміру частинок магнітно-абразивних порошоків у діапазоні від 63 мкм до 630 мкм величина μ зменшується. Для магнітно-абразивних порошоків, отриманих розпиленням із розплавів, величина відносної магнітної проникливості вище, ніж у спечених і псевдоплавлених порошоків з аналогічним складом, що пов'язано з більш низькою пористістю частинок і кращою спроможністю ущільнюватися під впливом сил магнітного поля. Здатність порошку до формування більш щільного інструменту в магнітному полі підтверджує, наприклад, той факт, що μ МАІ з ПОЛІМАМ-М на 10-12 % вище, ніж у МАІ з ПОЛІМАМ-Т, незважаючи на те, що як показано в [4,6], магнітні властивості композиції Fe-Ti-Si-C вище, ніж у Fe-Si-C, але порошки останнього мають округлу форму - кращу для формування МАІ з підвищеною щільністю.

Отримані залежності показують, що зі збільшенням магнітної індукції **B** в робочих щілинах величина μ виходить на деяку постійну величину, яку можна вважати індукцією насичення для МАІ, сформованого з певного порошку. Значення магнітної індукції насичення і відносної магнітної проникливості насичення наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Значення величин магнітного насичення МАІ з різноманітних порошків

Тип порошку	Магнітна індукція насичення, $B_{\text{нас}}$, Тл	Відносна магнітна проникливість насичення, $\mu_{\text{нас}}$
ПОЛІМАМ-Т	0,6	1,49
ПОЛІМАМ-М	0,70	1,63
ЦРАМАМ	0,58	1,34
Ж15КТ	0,5	1,36
ПФО Р6М5	0,5	1,28

$$\mu_c = \mu + k \cdot V, \quad (1.6)$$

де μ - відносна магнітна проникність МАІ без наповнювача;

V - відносна об'ємна частка порошку наповнювача,

k - коефіцієнт пропорційності.

Для визначення впливу заповнення робочих щілин магнітно-абразивним порошком на величину μ МАІ було підготовлено спеціальні суміші, які складаються з магнітно-абразивних порошків Поліам-М або Поліам-Т і порошку наповнювача, в якості якого використовувався сферичний порошок бронзи з розміром частинок і насипною щільністю близькою до відповідних

параметрів магнітно-абразивних порошків ($\gamma_{\text{нас.}} = 3,23 \text{ г/см}^3$) і відносною магнітною проникливістю достатньо близькою до μ повітря ($\chi \approx - 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$).

Дослідження показали, що відносна магнітна проникність МАІ з виготовлених сумішей практично лінійно залежить від ступеню заповнення робочої щілини, тобто від його відносної щільності й описується залежністю (рис. 1.5):

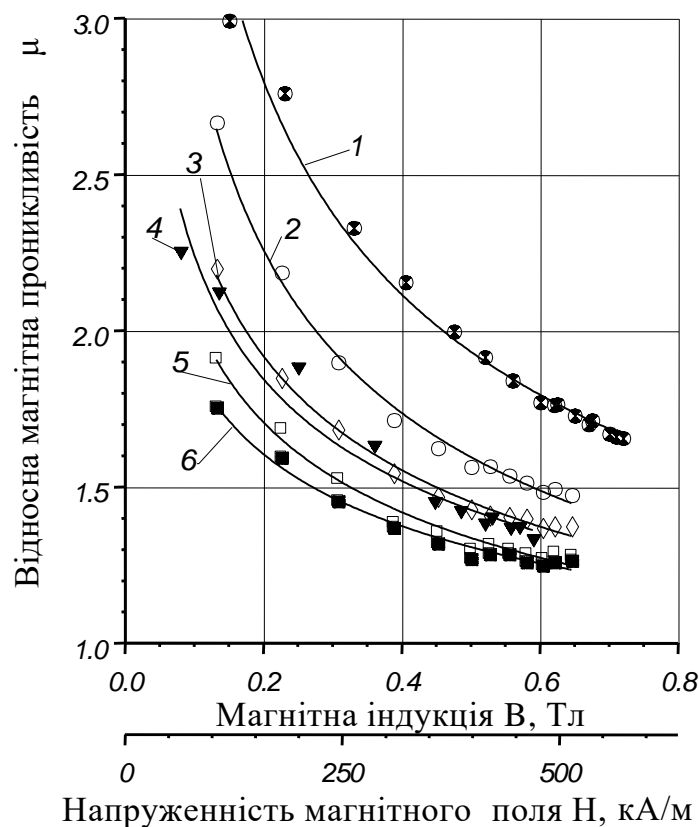


Рис.1.5 Залежність зміни відносної магнітної проникливості МАІ від напруженості магнітного поля для порошків ПОЛІМАМ-М - крива 1, ПОЛІМАМ-Т - 2, ЦАРАМАМ - 3, Ж15КТ - 4, ПФО Р6М5 - 5, ПФО Р6М5 (фракція 200/100 мкм) – 6.

Було досліджено, що при зростанні напруженості зовнішнього магнітного поля від 0 до $(2,0 - 2,5) \cdot 10^5 \text{ А/м}$ величина M зростає певної величини, яка залежить від геометричних характеристик та матеріалу

порошку. Також виявлено, що збільшення намагніченості не відбувається при збільшенні магнітного поля.

Це можливо пояснити тим, що на етапі намагнічування сили відбувається ущільнення порцій порошку в робочих щілинах і збільшуються до досягнення зовнішнім полем значень, що викликають індукцію насичення в представницьких об'ємах МАІ. Подальше збільшення зовнішнього поля не призводить до підвищення сил магнітного походження, що діють з боку МАІ на поверхню деталі, тому що результуюча магнітна сила змінює напрямок. В результаті чого, порції порошку починають притискуватися до поверхні полюсних наконечників.

1.4 Структурні закономірності формування порошкового МАІ і його взаємодії з оброблюваною поверхнею

Розроблено методику фіксації окремих об'ємів МАІ і дослідження ділянок безпосереднього, локального контакту частинок з поверхнею, що оброблюється. Показано, що для порошоків з нерозгалуженою зовнішньою поверхнею в залежності від розміру частинок відносна величина площі фактичного контакту МАІ з оброблюваною поверхнею $-S_f$, змінюється слабо і для ПОЛІМАМ-Т становить 0,06, ПОЛІМАМ-М – 0,5. Для МАІ, що сформовано з порошоків керметного типу величина S_f , в залежності від розмірів частинок змінюється від 0,13 до 0,6;

Для отримання елементів МАІ, які безпосередньо взаємодіють з оброблюваною поверхнею в процесі МАО фіксацію частинок порошку виконували самотвердіючою пластмасою або піцеїновим лаком в присутності оброблюваної поверхні по закінченню циклу обробки. Отримані разом з деталлю зліпки інструменту в магнітному полі вилучалися з робочих зон магнітних щілин, після чого виконувалось виділення частини зліпку, яка безпосередньо контактує з поверхнею. Виділений елемент піддавався незначному поліруванню, з метою більш чіткого виявлення місць контакту.

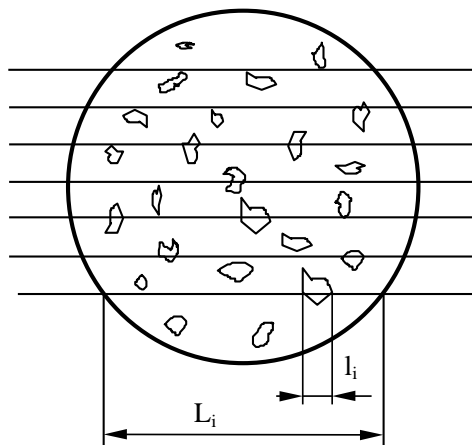


Рис. 1.6 Схема шліфа при вимірюванні фактичної площі контакту МАІ з поверхнею деталі.

Було визначено: середню величину поперечного розміру одиначної плями фактичного контакту зерна МАІ з оброблюваною поверхнею - l_i , варіацію величини l_i , відносну площу фактичного контакту частинок інструменту з деталлю - S_f і частоту актів контакту частинок МАІ в зоні обробки з поверхнею - f_k .

Встановлено, що для вибраних порошкових матеріалів має місце збільшення величини одиначної плями контакту частинки з поверхнею деталі при збільшенні розмірів частинок МАІ від 200/100 мкм до 630/400 мкм. При чому не встановлено адекватного зв'язку між вказаними параметрами. Аналіз значень відносної площі фактичного контакту МАІ з оброблюваною поверхнею деталі - S_f не дозволяє встановити однозначних функціональних зв'язків між S_f , типом і розміром частинок порошкових матеріалів без конкретних даних про форму частинок.

В результаті аналізу зліпків МАІ встановлено, що в процесі МАО інструмент взаємодіє з поверхнею деталей окремими формуваннями у вигляді груп частинок, які знаходяться у квазістабільному стані і об'єднуються між собою силами магнітного поля. Такі формування мають вигляд тетраедрів, у яких одна з граней практично перпендикулярна вектору

магнітного поля. При цьому подібні тетраедри розташовуються один відносно іншого вздовж ліній магнітного поля один над другим, утворюючи ланцюжки зерен, які аналогічні “струнам”.

Таблиця 1.6

Статистичні характеристики зон фактичного контакту зерен МАІ з оброблюваною поверхнею в реальних умовах.

Тип порошку	Розмір частинок, мкм	Поперечний розмір плями контакту l_i , мм	Коефіцієнт варіації величини l_i	Відносна площа фактичного контакту S_f	Частота контактів МАІ з поверхнею f_k
ПОЛІМАМ-Т	200/100	0,025	0,80	0,0527	2,06
	630/400	0,057	0,82	0,0570	0,99
ПОЛІМАМ-М	200/100	0,041	0,58	0,0409	0,99
	630/400	0,081	0,63	0,0582	0,72

1.5 Дійсні значення коефіцієнтів тертя у загально прийнятному вигляді

З фізичної точки зору нормальні напруження МАІ в зоні тертя, накладеними коефіцієнтами магнітного поля, аналогічні коефіцієнтам пропорційності зміни тангенціальних напружень від магнітної індукції. Але необхідним було знаходження дійсних значень коефіцієнтів тертя у загально прийнятному вигляді, для розрахунків сил різання при розробці і прогнозуванні процесів обробки різних деталей (табл.1.8).

Для цього за виведеними формулами питомого електроопору (1.7), тиску, прикладеному до порошку (1.8), і даних, наведених в таблицях 1.7, отримали значення коефіцієнтів тертя визначені в загальноприйнятному - в таблиці 1.8.

$$\rho = k \cdot B^{-m} \quad (1.7)$$

де ρ - питомий електроопір МАІ,

k - коефіцієнт пропорційності,

m - емпіричний показник ступеня, що залежить від розміру частинок;

$$P = f(\rho) = k_1 \cdot \rho^{m_1} \quad (1.8)$$

де P - тиск, прикладений до порошку, кПа;

ρ - питомий електроопір, Ом·мм;

k_1, m_1 - деякі коефіцієнти, що залежать від властивостей порошку.

Таблиця 1.7

Значення коефіцієнтів k, m рівняння (1.7), дисперсій адекватності і середньої дисперсії D_A, D_{CP} , а також експериментального критерію Фішера k_{FE} .

Тип порошку	Розмір частинок, мкм	k	m	D_A	D_{CP}	k_{FE}
ПОЛІМАМ-Т	200/100	8.79	0.59	1.14	1.15	0.99
	315/200	5.19	0.71	2.52	1.41	1.77
	400/315	2.62	0.43	1.04	0.83	1.25
	630/400	2.02	0.42	1.01	0.95	1.06
ПОЛІМАМ-М	400/ 315	7616	1.16	35830	21981	1.63
	630/ 400	17568	1.22	128530	88641	1.45

Приведені коефіцієнти тертя магнітно-абразивного порошкового інструменту

Тип порошку	Розмір частинок, мкм	Коефіцієнт тертя	
		в парі МАІ-ВТЗ-1	в парі МАІ-МАІ
Полімам-Т	630/400	0.14	0.34
	400/315	0.15	0.35
	315/200	0.24	0.49
	200/100	0.31	0.62
Полімам-М	630/400	0.46	1.29
	400/315	0.45	1.39

Наведені результати являються похідними від залежностей питомого електроопору МАІ від магнітної індукції і силу тиску, та отримані для припущення, що МАІ розглядається як тверде безперервне тіло. Але виконані експериментальні і теоретичні дослідження показали, що МАІ має властивості в'язко-пластичного середовища, тобто таке середовище не рухається доки в ньому напруження не перевищать деякого критичного значення, яке визначається напруженнями зсуву [8] – бінгамовське середовище.

Саме тому, доцільним є використання методики для дослідження впливу параметрів обробки на властивості МАІ на установці з диском (рис.1.2), що обертається з регульованою швидкістю.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО – АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ РОБОЧИХ ЗАЗОРІВ

2.1 Установка для МАО з кільцевим розташуванням робочих зазорів

Експериментальні дослідження були проведені на установці типу кільцевої ванни яка реалізована на вертикально-фрезерному станку типу ОЦ – Іжевськ (рис. 2.1), та призначена для магнітно – абразивної обробки для деталей складної форми [2,10].

Установка складається з магнітної системи (1), яка має симетричний магнітопровід з коаксіально розташованими полюсними наконечниками (9), які утворюють між полюсами кільцеву робочу зону (2) для заповнення її магнітно – абразивним порошком. Діаметр кільцевої робочої зони - 200 мм, ширина – 35 мм, а її висота – 30 мм. До головного шпинделя верстата кріпиться універсальна головка (4), та її вертикальна вісь коаксіально розташована до магнітної системи, і утворює плиту (5) для з'єднання з мінішпинделем (6). В мінішпиндель встановлюється оправка (8) для закріплення оброблювальної деталі. Оправка може обертатися навколо осі мінішпинделя, який з'єднаний з двигуном постійного струму (7) через редуктор, які забезпечують можливість обертання деталі з реверсом навколо власної осі з регульованою швидкістю обертання в діапазоні 0 - 1000 об/хв.

Крім того, на плиті розташовується другий мінішпиндель (3) для базування в ньому додаткового формоутворюючого елемента МАІ [11,12]. Обидва мінішпинделя можливо повертати під різними кутами відносно до дотичної середньої лінії кільцевої ванни.

Магнітна індукція регулюється в діапазоні 0,02 – 0,5 Тл, завдяки чому у робочих щілинах при їх кільцевому розташуванні утворюється в процесі МАО магнітно – абразивний інструмент (10).

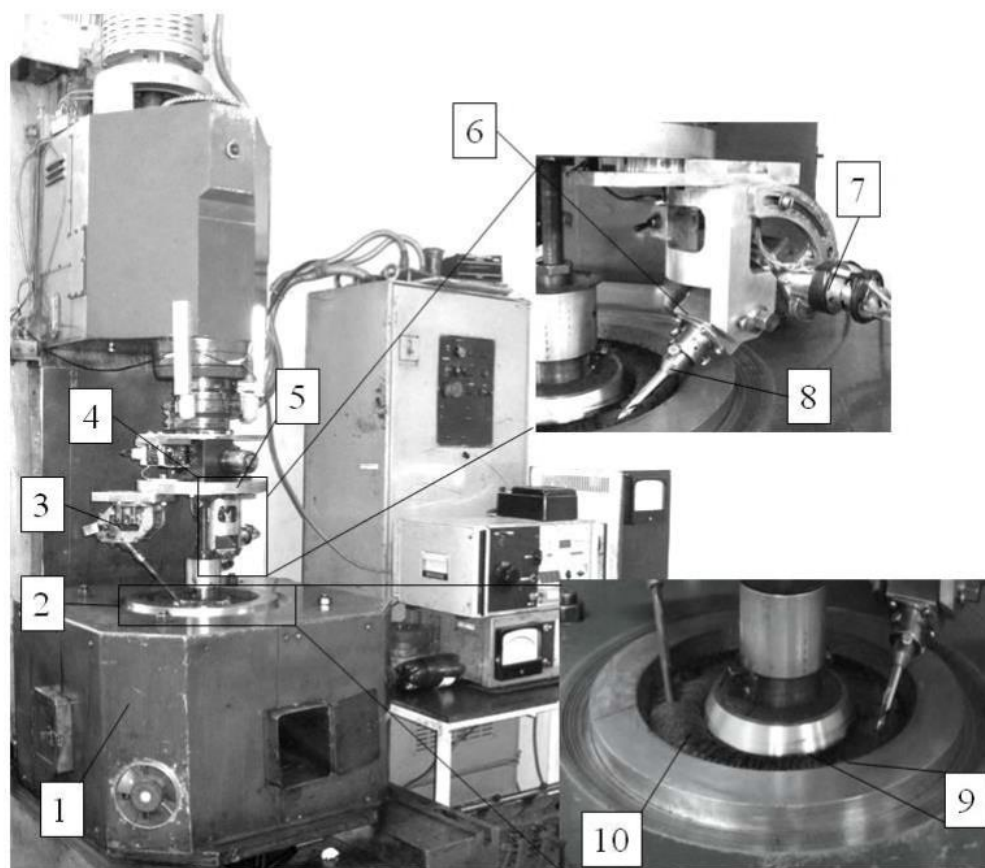


Рисунок 2.1 – Експериментальна установка

Основною задачею дослідження було визначення особливостей ударно-фрикційної взаємодії МАІ на оброблювану поверхню, яка має вплив на величину крутного моменту двигуна мінішпинделя, до якого закріплена деталь. Тому для дослідження використовувалось робоче обладнання (рис.2.2), для вимірювання швидкості обертання головного шпинделя та закріпленої до мінішпинделя деталі. Вимірювання швидкості обертів шпинделя здійснюється за допомогою датчика Хола та диску з магнітами на головному шпинделі. А для визначення швидкості обертання деталі використовується спеціальний блок на базі Arduino з безпроводним передавачем Bluetooth, що передається на приймач, який відображує швидкість обертання на дисплей (1).

Для вимірювання навантажень на двигун мінішпинделя використовується джерело постійного струму, амперметр (2) та вольтметр (3).

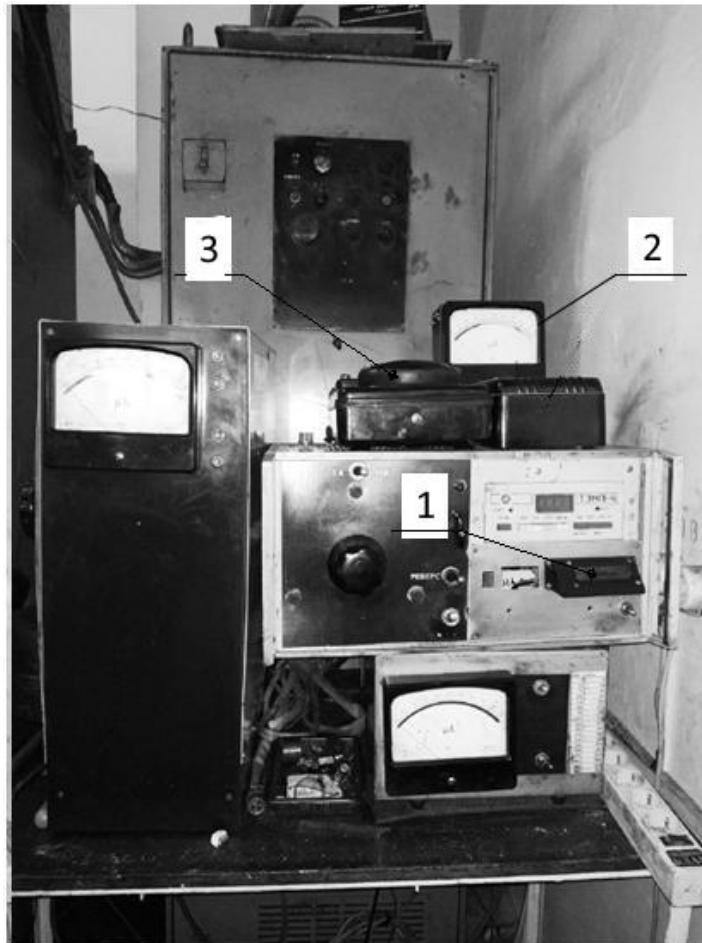


Рисунок 2.2 – Обладнання для вимірювання зусиль при МАО

2.2 Методика вимірювання зусиль при МАО у кільцевій ванні

Основною метою даного дослідження було виявлення особливостей поведінки МАІ при його ударно-фрикційній взаємодії з оброблюваною поверхнею матеріалу зразка при різних умовах МАО, для подальшого аналізу сил тертя МАІ та його тиску на деталь. Для досягнення цієї мети необхідним є знаходження крутного ефективного моменту $M_{\text{еф}}$ зразка при МАО в умовах кільцевого розташування робочих зазорів [17].

Для цього на першому етапі було проведено тарування двигуна для визначення моменту холостого ходу $M_{\text{х.х}}$ при обертанні зразка навколо власної осі та осі кільцевої ванни, за відсутності наповнення робочої зони МАП [2, 10, 18]. Тарування виконувалось як для парамагнітних, так і для феромагнітних матеріалів при швидкості обертання головного шпинделя

$V=200$ об/хв та магнітної індукції $B=0,18$ Тл. Було визначено, що величини магнітної індукції та швидкості обертання мають несуттєвий вплив на справжність тарування. Дослідження проводилось для кожного значення напруги (U) при її зростанні від 3 до 15 В, та спаданні. Вимірювались сила струму (I) та швидкість обертання (ω) зразка навколо своєї осі. Отримувались середні показники сили струму та швидкості обертання для кожного значення напруги, після чого отримані дані були задані у попередньо розроблену програму в системі “Excel” (рис. 2.3), для отримання залежності моменту холостого ходу (рис. 2.4) від значення напруги за формулою (2.1).

$$M_{x.x} = \frac{U_{xx} \cdot I_{xx} - I_{xx}^2 \cdot r_{дв.}}{\omega} \quad (2.1)$$

де $M_{x.x}$ – момент холостого ходу, $U_{x.x}$ – напруга холостого ходу (В), $I_{x.x}$ – сила струму холостого ходу (А), $r_{дв.}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв).

Напруження, В	Струм, А	Струм перерахований, А	$V_{шп}$, об/хв	ω , рад/с	$M_{x.x}$
3	38	1,98914	115	12,03667	0,39058
4	42	2,203124	162,5	17,00833	0,426808
5	47	2,470604	217,5	22,765	0,456832
6	50,5	2,65784	272,5	28,52167	0,479864
7	54,5	2,871824	329,5	34,48767	0,506373
8	58	3,05906	390	40,82	0,526163
9	60	3,166051	446	46,68133	0,54169
10	63	3,326539	501,5	52,49033	0,566282
11	65,5	3,460279	557,5	58,35167	0,586642
12	68	3,594019	612,5	64,10833	0,608264
13	68,5	3,620767	655	68,55667	0,625392
14	69,5	3,674263	717,5	75,09833	0,627439
15	72	3,808003	775	81,11667	0,646966

Рис. 2.3 – Приклад розрахункової таблиці при таруванні зразка зі сталі 40Х13

Експериментально визначена залежність зміни величини моменту холостого ходу від швидкості обертання зразків навколо власної осі була апроксимована лінійною функцією виду: $M_{x,x} = K \cdot \omega + M_0$.

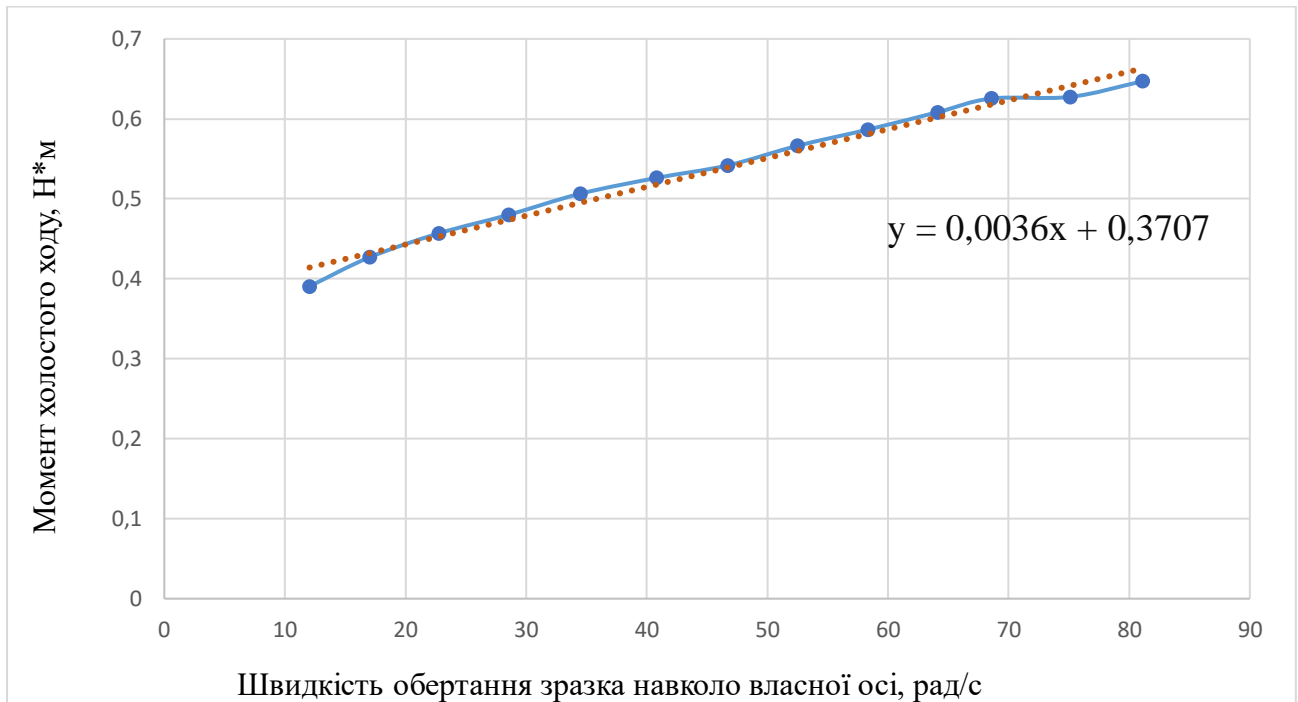


Рис. 2.4 – Залежність моменту холостого ходу від швидкості обертання зразку на прикладі зразку зі сталі 40X13

Наступним кроком визначався опір двигуна ($r_{дв}$) при загальмованому якорі. Визначення опору двигуна полягало у знаходженні величини струму, спожитого двигуном, при різних значеннях напруги, від 1 до 6 В. Виміри виконувались 3 рази, після чого підраховувалися середні значення спожитого струму ($I_{дв}$) при різних величинах напруги ($U_{дв}$).

За формулою (2.2) було знайдено залежність величини опору двигуна від напруги, що подавалась на двигун [2, 10].

$$r_{дв} = \frac{U_{дв}}{I_{дв}} \quad (2.2)$$

Результати вимірювання величини опору двигуна зображені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Значення електричного опору двигуна при різних наругах постійного струму

Напр, В	Сила струму, А	R _{дв} , Ом
1	2,631092	0,378449
2	6,086931	0,332417
3	9,585567	0,313399
4	12,79532	0,308373
5	16,00508	0,308859
6	19,7498	0,310049

За наведеними в табл.2.1 значеннями у програмі “Grapher” була знайдена поліноміальна функція, що приймала участь у визначенні моменту двигуна M_{дв}, та була побудована її графічна функція, що представлена на рисунку 2.5.

Приклад знайденої поліноміальної функції має вигляд (2.3):

$$R_{дв} = 0,4699 - 0,12189 * U_{дв} + 3,4791 * 10^{-2} * U_{дв}^2 - 0,6811 * 10^{-3} * U_{дв}^3 + 2,982605072 * 10^{-4} * U_{дв}^4 - 7,2621 * 10^{-6} * U_{дв}^5 \quad (2.3)$$

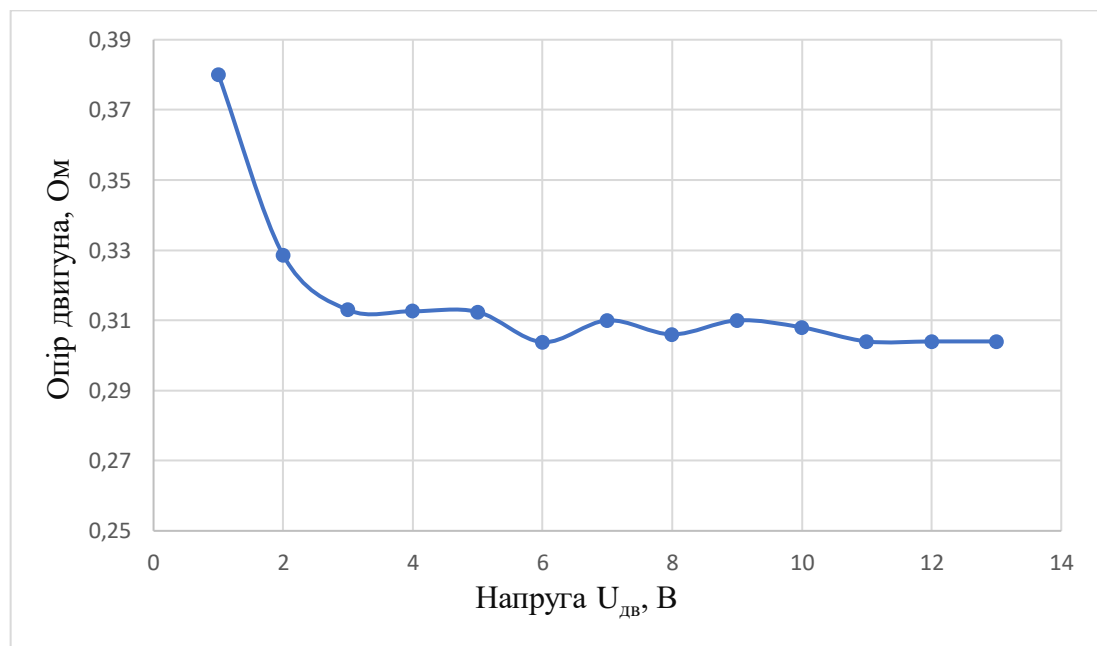


Рис. 2.5 – Залежність опору двигуна від величини напруги

Наступним етапом визначався робочий момент двигуна $M_{\text{дв}}$ в заповненій магнітно-абразивним порошком кільцевій ванні. Ключовими параметрами для знаходження робочого моменту двигуна є його сила опору $r_{\text{дв}}$, спожитий ним струм I , величина напруги $U_{\text{дв}}$ та швидкість обертання зразка ω навколо власної осі.

Для знаходження $M_{\text{дв}}$ на двигун мінішпинделя подавали напругу в діапазоні 3 – 15 В з кроком 1 В, після чого були зняті виміри вживаної двигуном сили струму та швидкості обертання зразка навколо власної осі за магнітними індукціями 0,18 та 0,25 Тл. Дослідження проводилось в умовах задавання певної швидкості обертання двигуна (V) навколо осі кільцевої ванни для двох вище зазначених величин магнітних індукцій від 100 до 300 об/хв з кроком 50 об/хв.

Результати знайдених показників сили струму I та швидкості обертання зразка ω навколо власної осі були отримані як при зростанні та і при спаданні напруги, після чого вираховувалось середнє значення. При обробленні використовували відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) для сприяння відновлення МАІ на протязі усього циклу вимірювань.

Величину робочого моменту двигуна розраховували за формулою 2.4.

$$M_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{роб}} \cdot I_{\text{роб}} - I_{\text{роб}}^2 \cdot r_{\text{дв.}}}{\omega} \quad (2.4)$$

де $M_{\text{дв}}$ – робочий момент, $U_{\text{роб}}$ – робоча напруга, $I_{\text{роб}}$ – робоча сила струму.

Як і у випадку з дослідженням моменту холостого ходу, отримані значення сили струму I та швидкості обертання зразка ω були задані для наперед створеної програми (рис. 2.6) в системі “Excel”, для знаходження величин $M_{\text{дв}}$ в залежності від напруги.

Напруга, В	Струм, А	Струм перерахований, А	Vшп, об/хв	ω , рад/с	M _{дв}	M _{еф}
0	0	0	0	0	0	0
3	51	2,684588	100	10,46667	0,531901	0,125708
4	63	3,326539	147,5	15,43833	0,625827	0,203724
5	73	3,861499	192,5	20,14833	0,719885	0,28271
6	82	4,342963	245	25,64333	0,781091	0,326332
7	91	4,824426	295	30,87667	0,853054	0,381549
8	97,5	5,17215	350	36,63333	0,896061	0,406135
9	107,5	5,70711	400	41,86667	0,977918	0,471244
10	113	6,001337	450	47,1	1,029484	0,506064
11	117	6,215321	502,5	52,595	1,065002	0,523998
12	120	6,375809	549	57,462	1,105334	0,548756
13	123	6,536297	610	63,84667	1,117	0,539991
14	127,5	6,777029	655	68,55667	1,169978	0,577896
15	131	6,964265	705	73,79	1,206601	0,597773

Рис. 2.6 - Приклад розрахунку робочого моменту двигуна M_{дв} при оброблюванні зразка з алюмінію Д16Т при V=250 об/хв та В=0,25 Тл

Маючи значення M_{дв} є можливим знаходження дійсного ефективного моменту M_{еф}, який є результатом виведення зусилля холостого ходу M_{х.х}, який відбувається внаслідок сил тертя в редукторі мінішпинделя, або опору двигуна.

Отже, M_{еф} розраховувалось за формулою (2.5).

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} \quad (2.5)$$

Характерний вигляд отриманих результатів у вигляді залежності зміни ефективного моменту від швидкості обертання зразка своєї власної осі при різних швидкостях обертання навколо осі установки представлено на рис. 2.7.

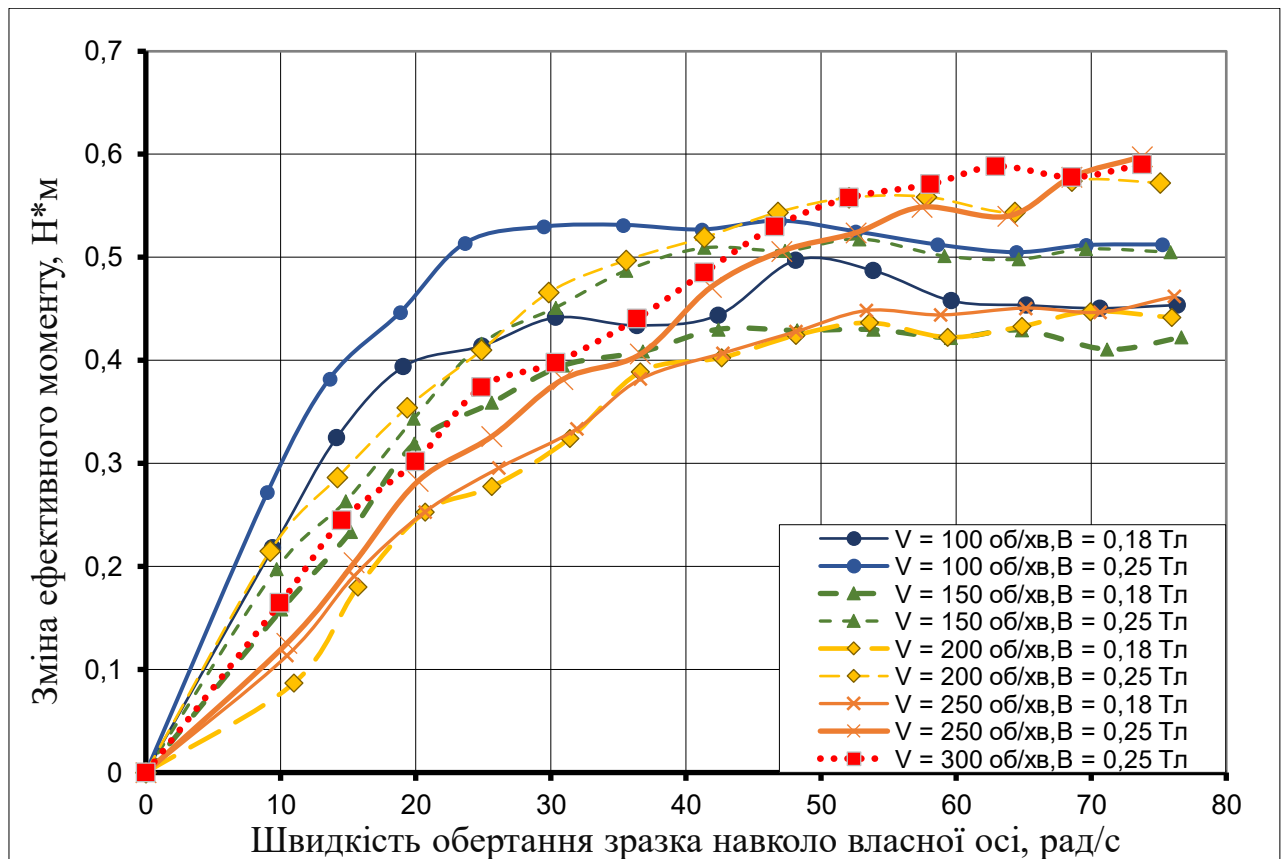


Рис. 2.7 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразка навколо власної осі та осі кільцевої щілини при магнітній індукції 0,25 Тл, порошком Полімам-М (400/315 мкм)

2.3 Зразки, матеріали і умови дослідження трибологічних властивостей МАІ

Для дослідження використовувались циліндричні зразки довжиною 30 мм та діаметром 16 мм (рис 2.8) з феромагнітних та парамагнітних матеріалів, а саме: сталь 40Х13, алюміній Д16Т, титан ВТ 3-1 та бронза БрАЖ. Висота зразків дорівнює висоті робочої зони магнітної системи установки.

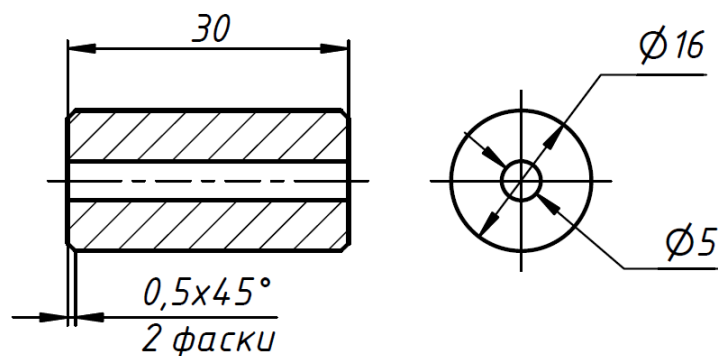


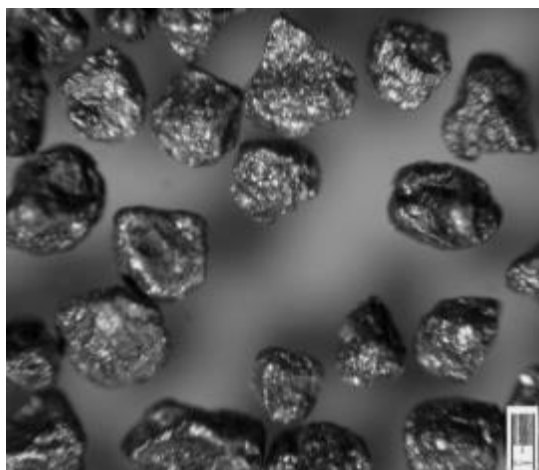
Рисунок 2.8 – Ескіз оброблюваних зразків

Зразки встановлювалися в оправці закріпленій на осі мінішпинделя універсальної головки 2 (рис.2.1) паралельно до осі кільцевої ванни.

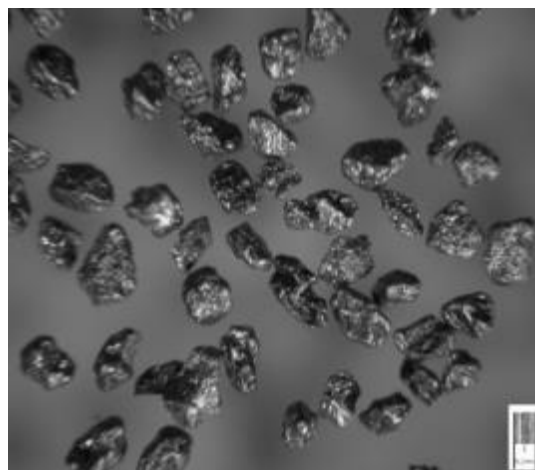
Для дослідження було обрано два типи порошків за своїми властивостями та структурами.

В якості осколкового та рівновісного використовувався порошок Ферромап з різними фракціями 400/315 та 200/100 мкм (рис. 2.9), а округлого та нерівновісного – Полімам-М також з фракціями 400/315 та 200/100 мкм (рис. 2.10).

Більш детальний опис даних порошків наведено в розділі 1 даної дипломної роботи.

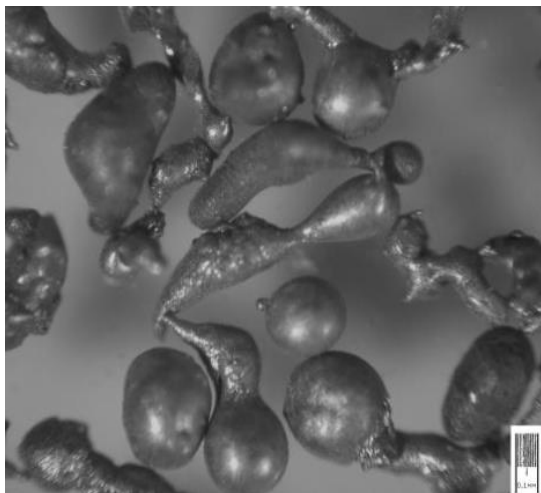


Ферромап 400/315 мкм

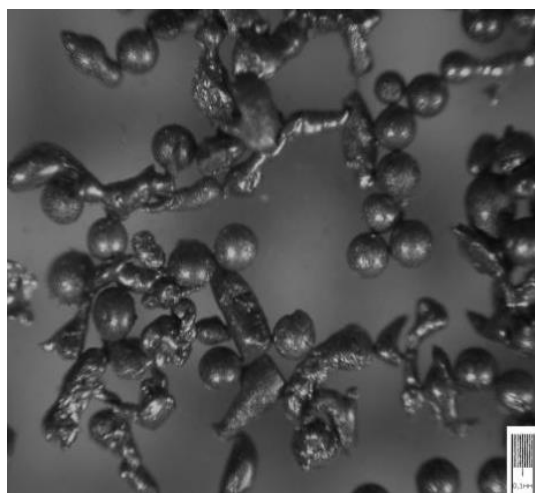


Ферромап 200/100 мкм

Рисунок 2.9 – Вигляд осколкового порошку Ферромап з фракціями 400/315 та 200/100 мкм



Полімам-М 400/315 мкм



Полімам-М 200/100 мкм

Рисунок 2.10 – Вигляд округлого порошку Полімам-М з фракціями
400/315 та 200/100 мкм

Магнітно-абразивне оброблення виконували в кільцевій ванні діаметром 200 мм. Частота обертання зразків з оправкою навколо осі кільцевої ванни змінювалась в діапазоні 100 ... 300 об/хв з дискретністю 50 об/хв. Частота обертання зразків навколо власної осі варіювалась від 50 до 800 об/хв.

Коефіцієнт заповнення робочого зазору складав 0,8.

Величина магнітної індукції в зоні оброблення вільної від магнітного-абразивного порошку складала 0,18 и 0,25 Тл. Вимірювання магнітної індукції виконували мілітесламетром Щ-4300 за допомогою датчика Холла, який розташовували в середній частині зазору.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ УДАРНО – ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МАІ З ПОВЕРХНЕЮ ДЕТАЛЕЙ

Величина M_{ef} є своєрідним показником сил тертя в парі МАІ – поверхня деталі і певною мірою дозволяє оптимізувати умови поведінки МАІ при MAO. Досліджувану гаму матеріалів умовно можна розділити на дві групи: і парамагнітні – титан ВТЗ-1, алюміній Д16Т, бронза БрАЖ та феромагнітні – Сталь 40Х13. У зв'язку з цим аналіз отриманих результатів доцільно виконувати за вказаними групами окремо.

3.1.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Полімам-М (400/315 мкм)

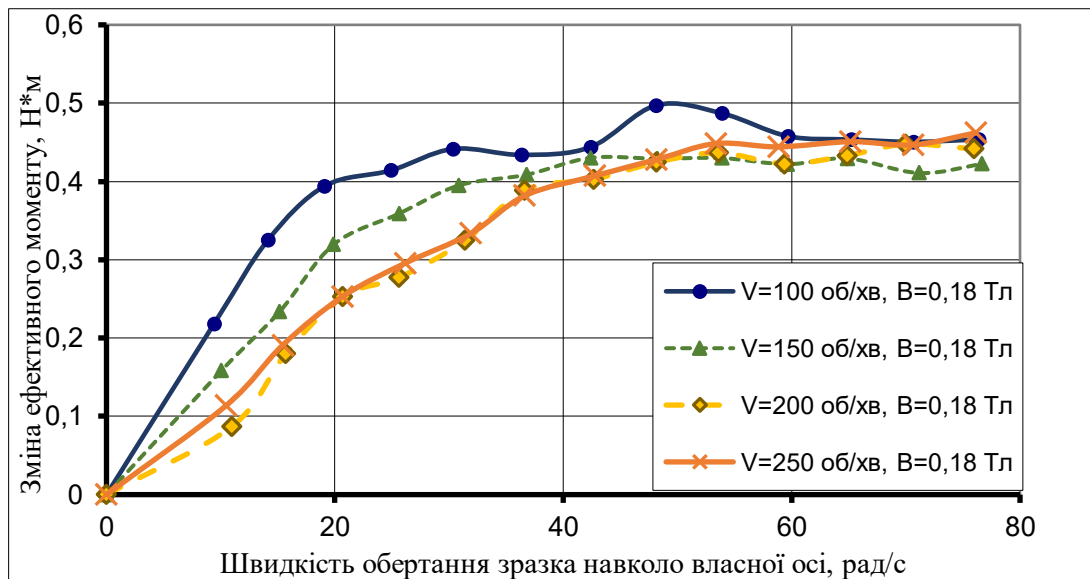
При обробленні парамагнітного алюмінію порошком Полімам-М з фракцією 400/315 мкм з величиною магнітної індукції в $B = 0.18$ Тл, наявне спадання ефективного моменту при збільшенні швидкості обертання головного шпинделя (рис 3.1.1а). Це може бути пов'язано зі зменшенням площі фактичного контакту МАІ з оброблюваною поверхнею [1].

Величина ефективного моменту при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 200 та 250 об/хв практично однакова. При $B=0,18$ Тл величина ефективного моменту при швидкості обертання зразка навколо своєї осі $\omega=78$ рад/с дорівнює близько $0,45 \text{ Н*м}$ у всіх випадках.

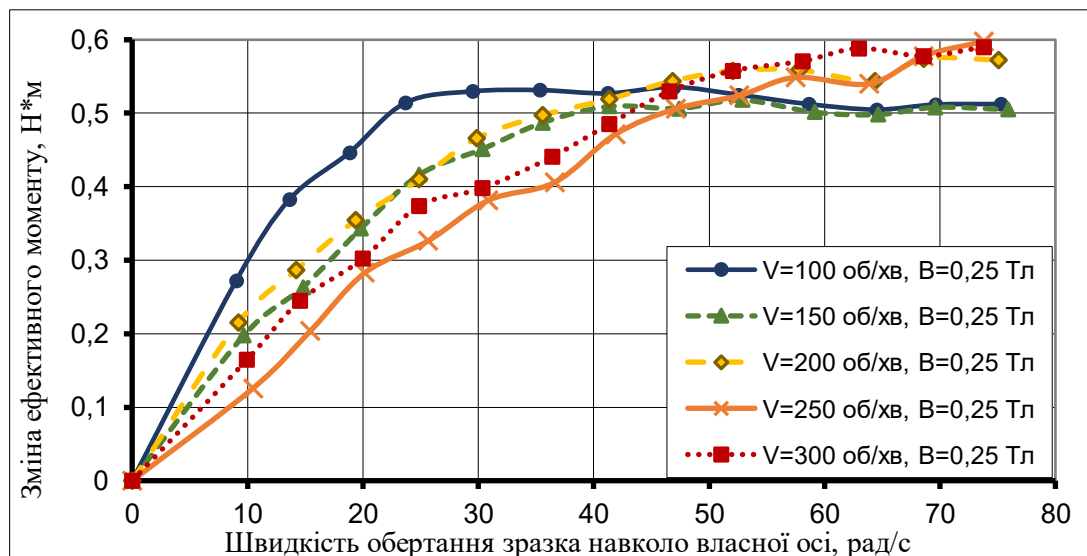
Найбільший ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,5 \text{ Н*м}$ досягається при найменшій швидкості обертання головного шпинделя $V=100$ об/хв та швидкості обертання навколо своєї осі $\omega=48$ рад/с.

Встановлено, що при $B=0,18$ Тл найбільш стабільним процес оброблення спостерігається при швидкостях обертання шпинделя 200 та 250 об/хв у діапазоні швидкості обертання зразка $\omega=40-80$ рад/с. Згідно графіку можна вважати, що при таких умовах процес оброблення є більш ефективним, так як на відміну від зміни величини ефективного моменту при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=100$ об/хв

спостерігається менше коливань величини $M_{\text{еф}}$. Нестабільність зміни величини ефективного моменту може негативно виявлятися на якості оброблюваної поверхні деталі.



(а)



(б)

Рис 3.1.1 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні алюмінію Д16Т в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (400/315 мкм)

При збільшенні магнітної індукції (рис 3.1.1б) зростає величина ефективного моменту. Це можливо пояснити початком переформування

МАП під дією динамічних чинників у квазістабільний магнітно-абразивний інструмент. Наявне спадання ефективного моменту при збільшенні швидкості обертання головного шпинделя, але ефективний момент при $V=300$ об/хв є більшим за ефективний момент при $V=250$ об/хв. Також слід звернути увагу на стрімке зростання величини ефективного моменту після набуття обертання зразка понад $\omega=45$ рад/с при швидкості обертання головного шпинделя $V \geq 200$ об/хв. У порівнянні з $V=100$ та $V=150$ об/хв величина ефективного моменту досягає $0,6 \text{ Н*м}$ замість $0,5 \text{ Н*м}$.

Отже, можна зробити висновок, що збільшення магнітної індукції та швидкості обертання головного шпинделя позитивно впливає на ефективність оброблення алюмінію округлим та рівновісним порошком, особливо при набутті швидкості зразка навколо власної осі $\omega > 45$ рад/с, що показано на топограмах (рис. 3.1.1 (в)).

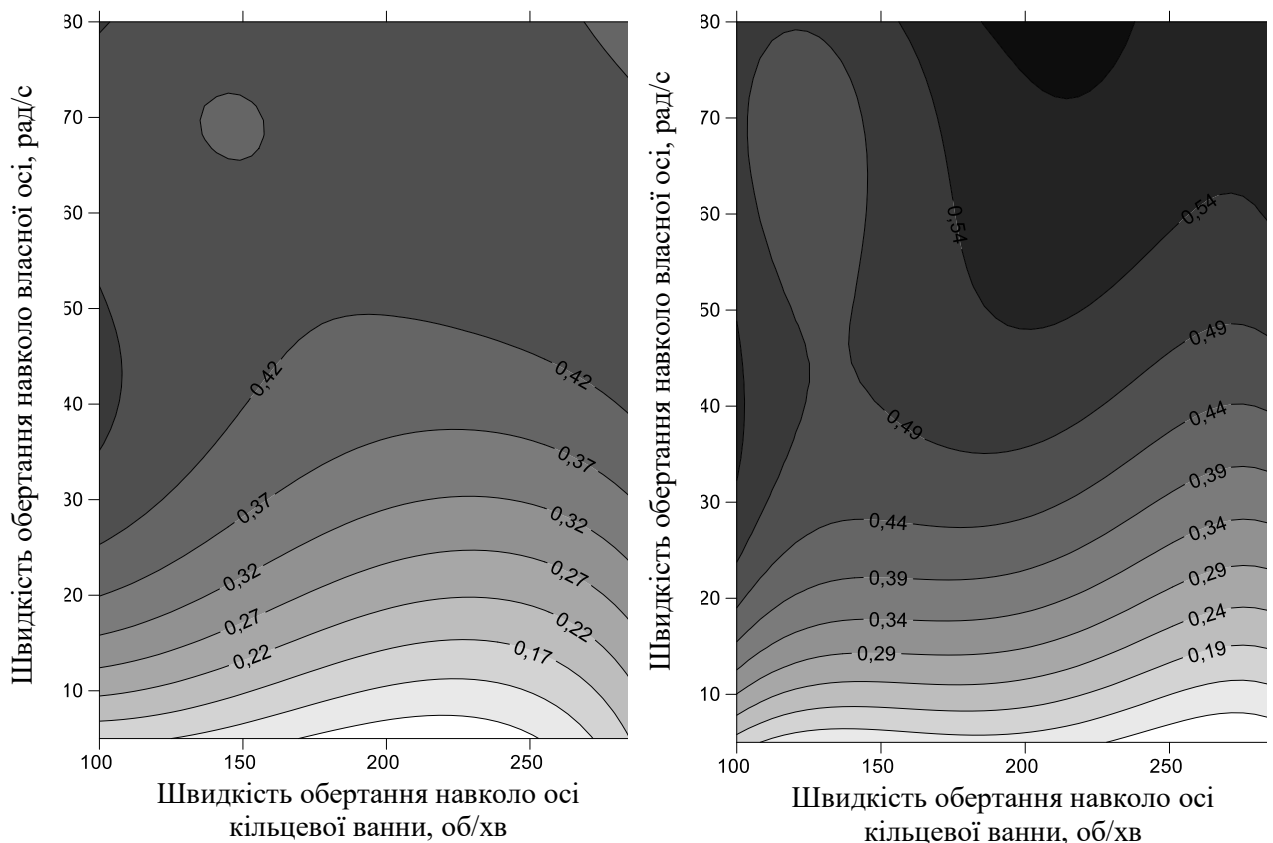
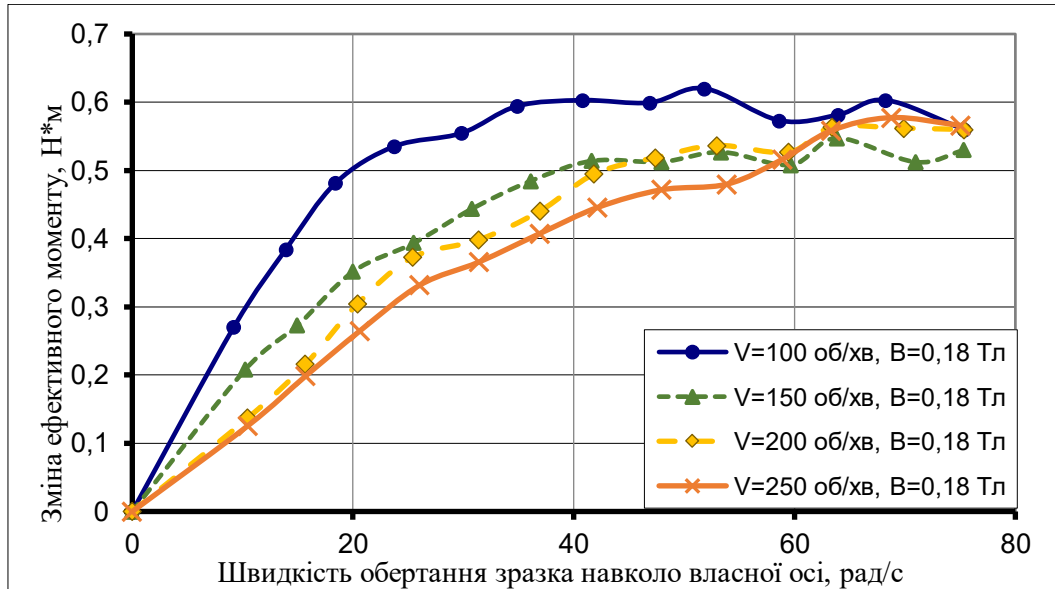


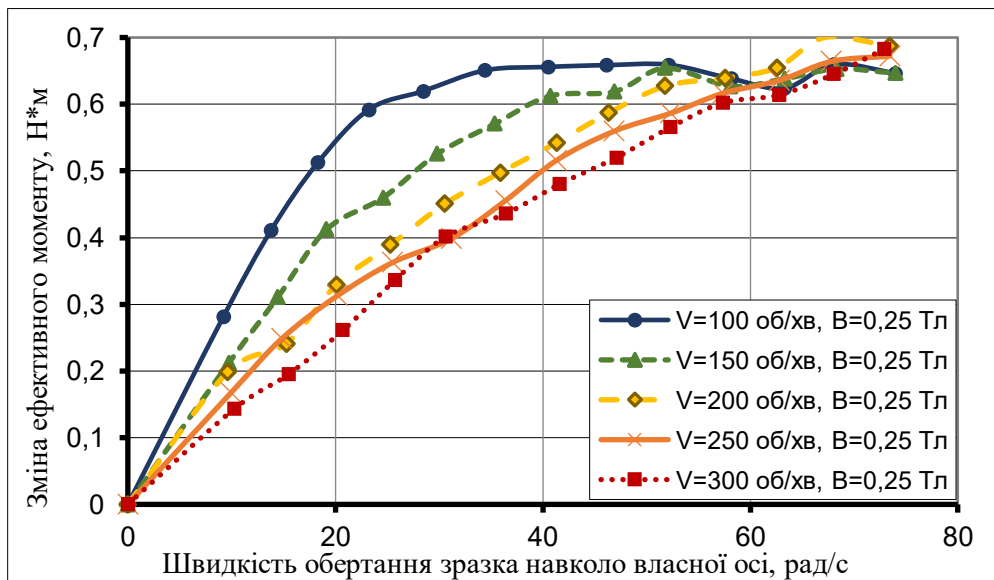
Рис. 3.1.1 (в) – Топограми зміни ефективного моменту при обробленні сплаву з алюмінію Д-16Т при магнітній індукції $B = 0,18$ та $0,25 \text{ Тл}$ відповідно, порошком Полімам-М (400/315 мкм)

3.1.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Полімам-М (200/100 мкм)

На графіку видно (рис 3.1.2а), що при обробленні алюмінію порошком Полімам-М з фракцією 200/100 мкм ефективний момент при $V=100$ об/хв є набагато більшим.



(а)



(б)

Рис 3.1.2 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні алюмінію Д16Т в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0,18 Тл –(а), 0,25 Тл – (б), порошком Полімам-М (200/100 мкм)

Майже при всіх швидкостях ефективний момент досягає 0,52-0,56 Н*м при максимальній швидкості зразка навколо своєї осі $\omega=77$ рад/с.

Найбільший ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,6$ Н*м досягається при найменшій швидкості обертання головного шпинделя $V=100$ об/хв.

Зростання швидкості обертання шпинделя понад $V=100$ об/хв не сильно впливає на величину ефективного моменту, але згідно графіку збільшення швидкості виявляється на стабільності зміни величини ефективного моменту.

Як і у випадку з Полімам-М 400/315, при збільшенні магнітної індукції (рис 3.1.2б) підвищується значення ефективного моменту, а також графіки залежності є більш стабільними та мають менше коливань на відміну від $B=0,18$ Тл. Це пояснюється збільшенням жорсткості та щільності МАІ. До $\omega=58$ рад/с спостерігається лінійна залежність, після чого ефективний момент набуває найбільшого значення при $V=200$ об/хв. Найбільше значення ефективного моменту коливається від 0,65 до 0,7 Н*м.

Виявлено, що округлий порошок з більш мілкими частинками суттєво впливає на тангенціальну складову при взаємодії МАІ з поверхнею зразка, так як ефективний момент у порівнянні з фракцією 400/315 є більшим. На рисунку 3.1.2 (в) представлено топограму різниці між залежностями $M_{\text{еф}}$ при обробленні алюмінію Д16Т порошком Полімам-М за $B = 0,25$ Тл отриманими при фракціях 400/315 та 200/100 мкм.

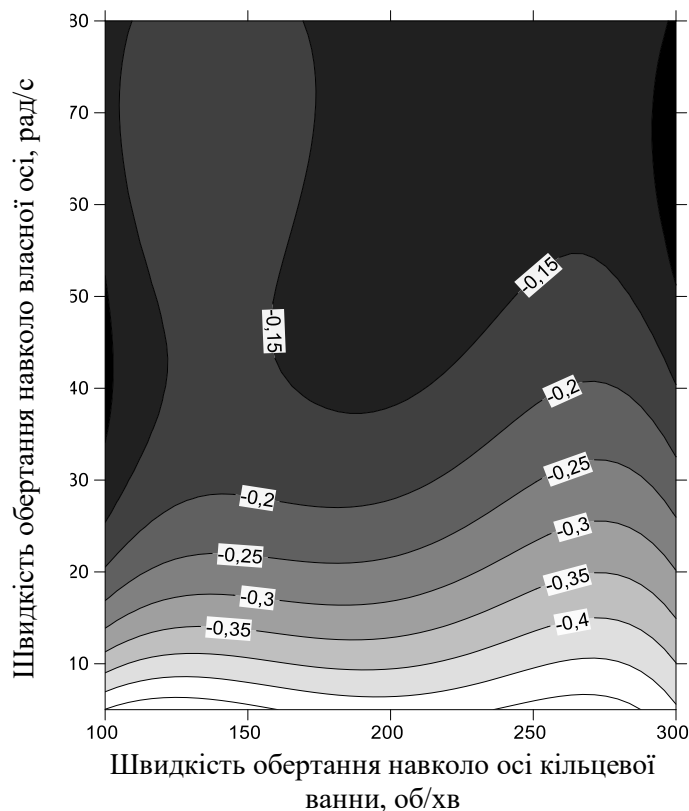


Рис. 3.1.1 (в) – Топограма різниць величини ефективного моменту при обробленні сплаву з алюмінію Д-16Т при магнітній індукції $B = 0,25$ Тл, між розмірами частинок порошку Полімам-М 400/315 та 200/100 мкм .

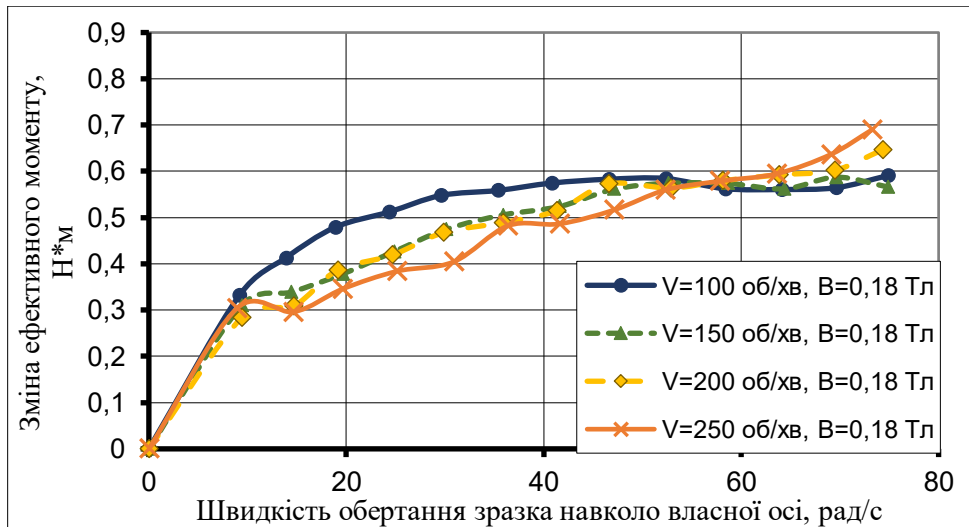
Крім того слід зазначити, що зі збільшенням величини магнітної індукції та швидкості переміщення в робочому зазорі, найбільший ефективний момент зміщується в зону більш високих частот обертання навколо власної осі, що пов'язано зі зменшенням рухливості зерен в квазістабільних формуваннях МАІ.

Після аналізу зміни величини ефективного моменту при обробленні сплаву з алюмінію Д-16Т в залежності від динамічних чинників можна стверджувати, що зі збільшенням магнітної індукції зростає тиск МАІ на поверхню оброблюваної деталі.

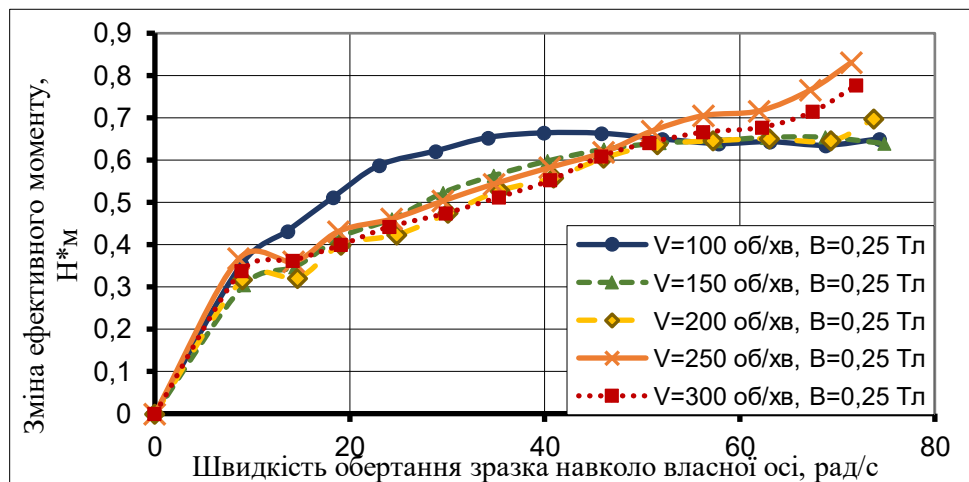
А отже, оптимальне сполучення тангенціальних та нормальних складових має суттєвий вплив на ефективність та стабільність оброблення.

3.1.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Ферромап (400/315 мкм)

При обробленні алюмінію оскольчатим порошком Ферромап з фракцією 400/315 мкм можна побачити (рис 3.1.3а), що не дивлячись на перевагу ефективного моменту при $V=100$ об/хв, графіки залежності є приблизно однаковими, але ефективний момент зростає при більших швидкостях головного шпинделя ($V=200$ та $V=250$ об/хв) при $\omega=55$ рад/с.



(а)



(б)

Рис 3.1.3 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні алюмінію Д16Т в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (400/315 мкм)

Найбільша величина моменту - $M_{\text{макс}} = 0,65 - 0,7 \text{ Н*м}$ є більшою на $0,20 \text{ Н*м}$ чим при обробленні алюмінію округлим порошком Полімам-М (400/315 мкм) при $B=0,18 \text{ Тл}$.

На даному графіку (рис 3.1.3б) слід виділити незначну перевагу при $V=100 \text{ об/хв}$ у діапазоні $\omega = 10-50 \text{ рад/с}$.

Крім цього слід звернути увагу, що при обробленні порошком Ферромап на відміну від Полімам-М при набуванні швидкості зразка навколо своєї осі до 12 рад/с ефективний момент є однаковим при всіх значеннях швидкості шпинделя.

При збільшенні магнітної індукції до $0,25 \text{ Тл}$ ефективний момент значно підвищується. Найбільше значення досягається при $V=250 \text{ об/хв}$, а саме $M_{\text{макс}} = 0,82 \text{ Н*м}$.

До 50 рад/с ефективний момент можна вважати однаковим, але після наглядне стрімке його зростання при $V=250$ та $V=300 \text{ об/хв}$.

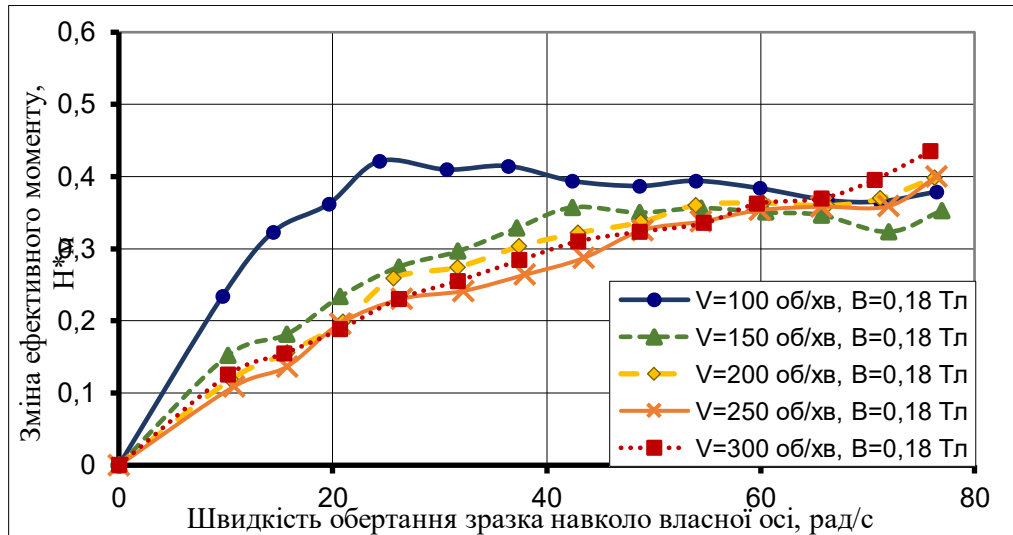
Щодо порівняння з показниками при Полімам-М 400/315 та $B=0,25 \text{ Тл}$, максимальний ефективний момент є більшим на приблизно $0,12 \text{ Н*м}$.

Але для більш глибокого порівняння впливу різних за формою порошоків на ефективний момент, необхідно дослідити вплив порошку Ферромап з меншою фракцією частинок 200/100 мкм.

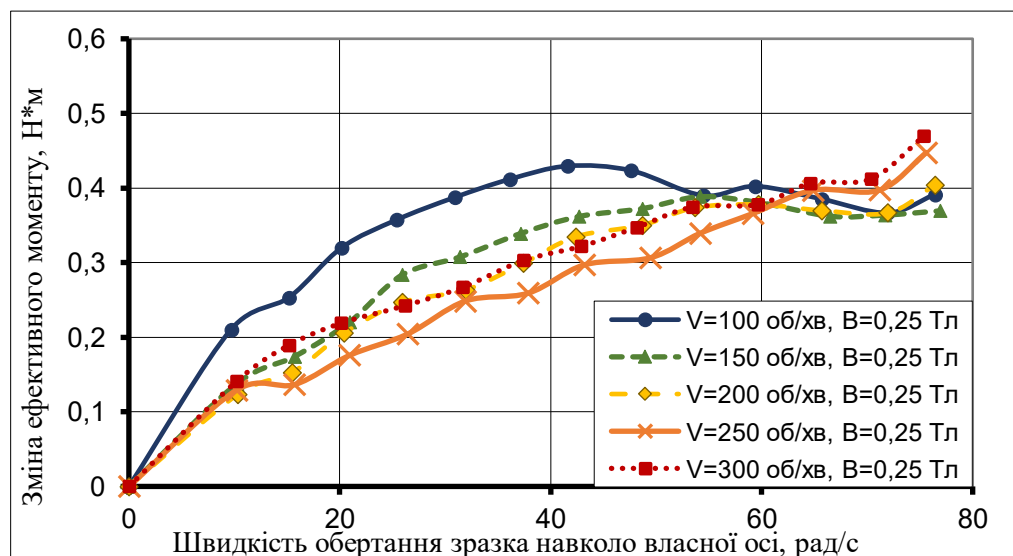
3.1.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву алюмінію Д16Т порошком Ферромап (200/100 мкм)

При зміні фракції на 200/100 мкм (рис 3.1.4а) неможливо не помітити стрімке спадання $M_{\text{еф}}$ при зростанні швидкості шпинделя понад 100 об/хв , а максимальний ефективний момент ($0,42 \text{ Н*м}$) можливо досягти як при $V=100 \text{ об/хв}$ та $\omega = 23 \text{ рад/с}$, так і при $V=300 \text{ об/хв}$, але з більш високим показником швидкості зразка навколо своєї осі $\omega = 77 \text{ рад/с}$.

До $\omega = 65$ рад/с помітний не значний вплив зростання швидкості навколо осі кільцевої ванни на $M_{\text{еф}}$ та залежність можна вважати лінійною крім $V=100$ об/хв, але після показники ефективного моменту ведуть себе дуже хаотично та вибиваються з лінійної залежності



(а)



(б)

Рис 3.1.4 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні алюмінію Д16Т в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (200/100 мкм)

Даний графік (рис 3.1.4б) є дуже схожим на попередній та має мінімальні відмінності, тобто збільшення магнітного поля при обробленні

алюмінію порошком Ферромап 200/100 мкм майже не впливає на величину $M_{\text{еф}}$. Єдина відмінність – відсутнє занадто стрімке зростання $M_{\text{еф}}$ при $V=100$ об/хв у порівнянні з іншими значеннями швидкостей навколо осі кільцевої ванни. Також показано, що $M_{\text{еф}}$ при використанні МАП фракції 200/100 мкм є набагато меншим ніж за 400/315 мкм ($\approx 0,46 \text{ Н*м}$ проти $\approx 0,82 \text{ Н*м}$).

Встановлено, що при обробленні алюмінію Д-16 порошком Полімам-М ефективний момент є більшим за фракцією 200/100 мкм, але при обробленні порошком Ферромап результати є зовсім протилежними – за фракцією 400/315 мкм ефективний момент набуває набагато більшого значення, що показано на топограмі різниць (рис. 3.1.4 (в)).

При обробленні обома типами порошоків збільшення магнітної індукції позитивно впливає на зміну величини ефективного моменту.

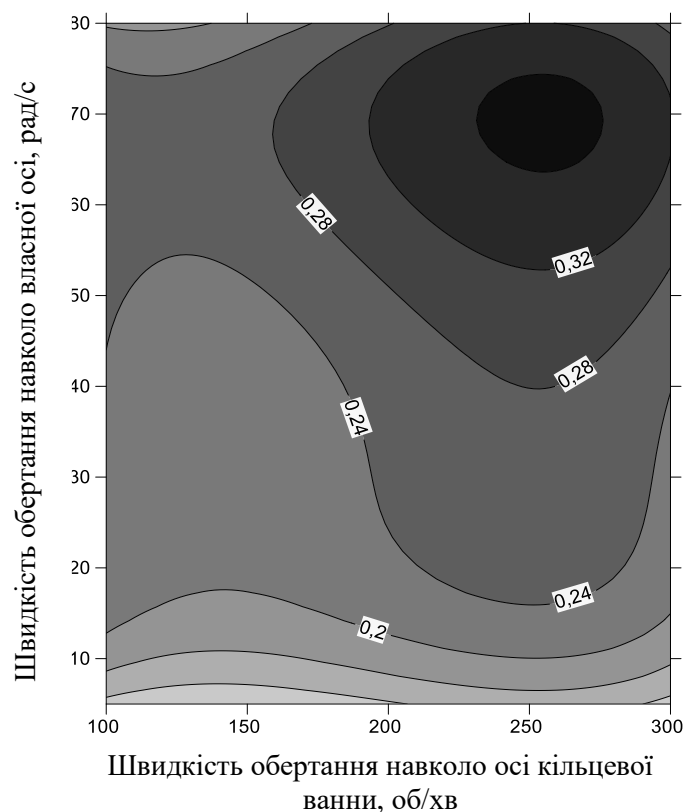
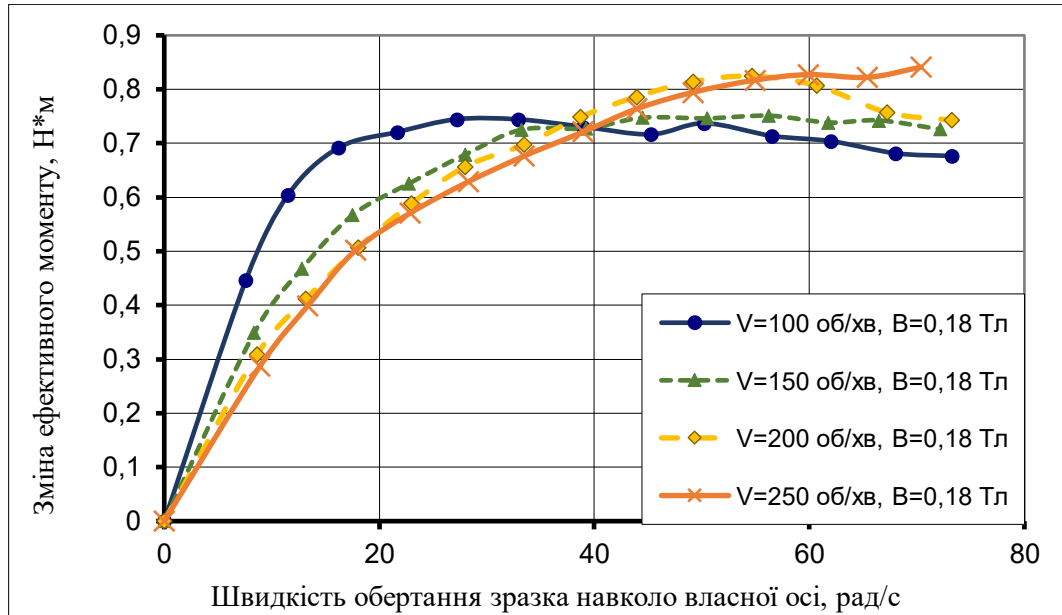


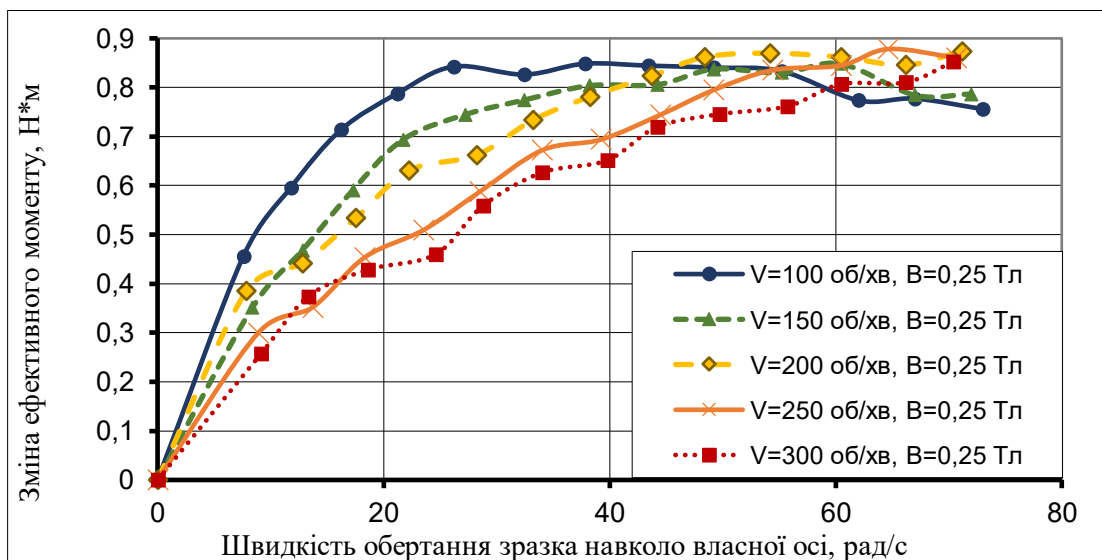
Рис. 3.1.4 (в) – Топограма різниць величини ефективного моменту при обробленні сплаву з алюмінію Д-16Т при магнітній індукції $B = 0,25 \text{ Тл}$, між розмірами частинок порошку Ферромап 400/315 та 200/100 мкм .

3.2.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Полімам-М (400/315 мкм)

При обробленні бронзи порошком Полімам-М з фракцією 400/315 мкм (рис 3.2.1а) наявне лінійне спадання ефективного моменту до $\omega = 38$ рад/с,



(а)



(б)

Рис 3.2.1 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи-БрАЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (400/315 мкм)

після чого $M_{\text{еф}}$ набуває більших величин при більших швидкостях шпинделя, але при $V=250$ об/хв величина $M_{\text{еф}}$ стабільно зростає, коли при інших швидкостях навколо осі кільцевої ванни після $\omega = 60$ рад/с – спадає. Максимальний ефективний момент досягає $0,84 \text{ Н*м}$.

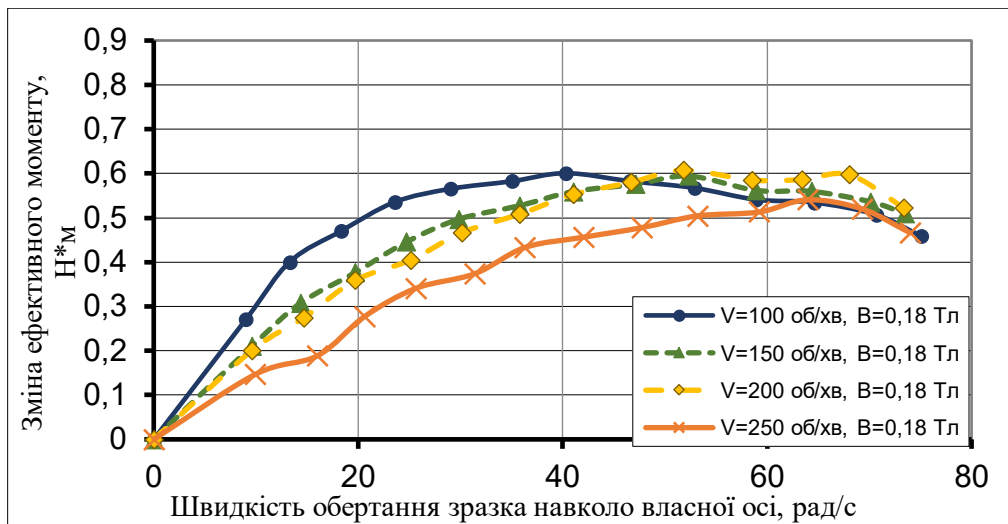
При обробленні бронзи округлим порошком за магнітної індукції $B=0,18$ Тл на відміну від оброблення алюмінію не спостерігається значного переважання ефективного моменту при $V=100$ об/хв. Збільшення величини магнітної індукції (рис 3.2.1б) має незначний вплив на $M_{\text{еф}}$, але тенденція зростання до максимального $M_{\text{еф}}$ можлива тільки при швидкостях понад $V=200$ об/хв, так як при менших показниках швидкості шпинделя ефективний момент спадає після $\omega = 55$ рад/с.

При $B=0,25$ Тл максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,88 \text{ Н*м}$.

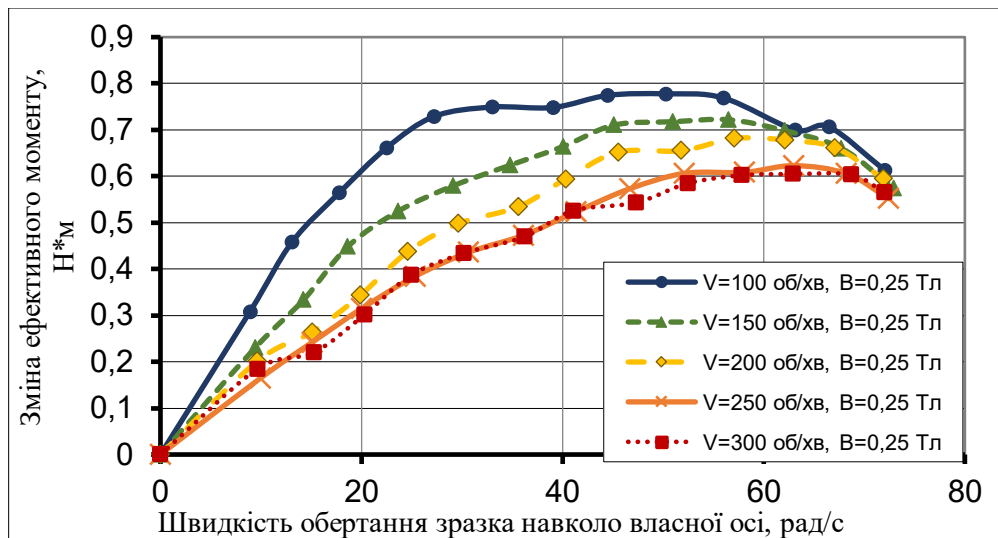
3.2.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БРАЖ порошком Поліам-М (200/100 мкм)

На даному графіку (рис 3.2.2а) видно, що при зміні фракції порошку на 200/100 мкм величина ефективного моменту на відміну від Поліам-М 400/315 мкм має тенденцію до зниження при зростанні швидкості обертання зразка навколо своєї осі. При різних показниках V спадання відбувається по-різному, але $M_{\text{макс}} = 0,6 \text{ Н*м}$ досягається тільки при $V=100$ об/хв та $V=200$ об/хв, при $\omega = 40$ рад/с та $\omega = 52$ рад/с відповідно.

При найбільшій швидкості шпинделя $V=250$ об/хв значення ефективного моменту є найменшими.



(а)



(б)

Рис 3.2.2 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи-БрАЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (200/100 мкм)

Збільшення величини магнітної індукції (рис 3.2.2б) суттєво впливає на зміну $M_{\text{макс}}$.

Можна стверджувати, що зі зміною магнітного поля результати набувають лінійної залежності спадання при збільшенні швидкості шпинделя навколо осі кільцевої ванни.

Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,79 \text{ Н*м}$ при $V=100 \text{ об/хв}$.

При обробленні бронзи ще меншою фракцією зерен зменшення величини ефективного моменту відбувається ще раніше при досягненні швидкості зразка навколо своєї осі $\omega = 60 \text{ рад/с}$.

На топограмі (рис. 3.2.2 (в)) відображено вплив збільшення магнітної індукції на зміну ефективного моменту для зразка зі сплаву Бронзи-БрАЖ.

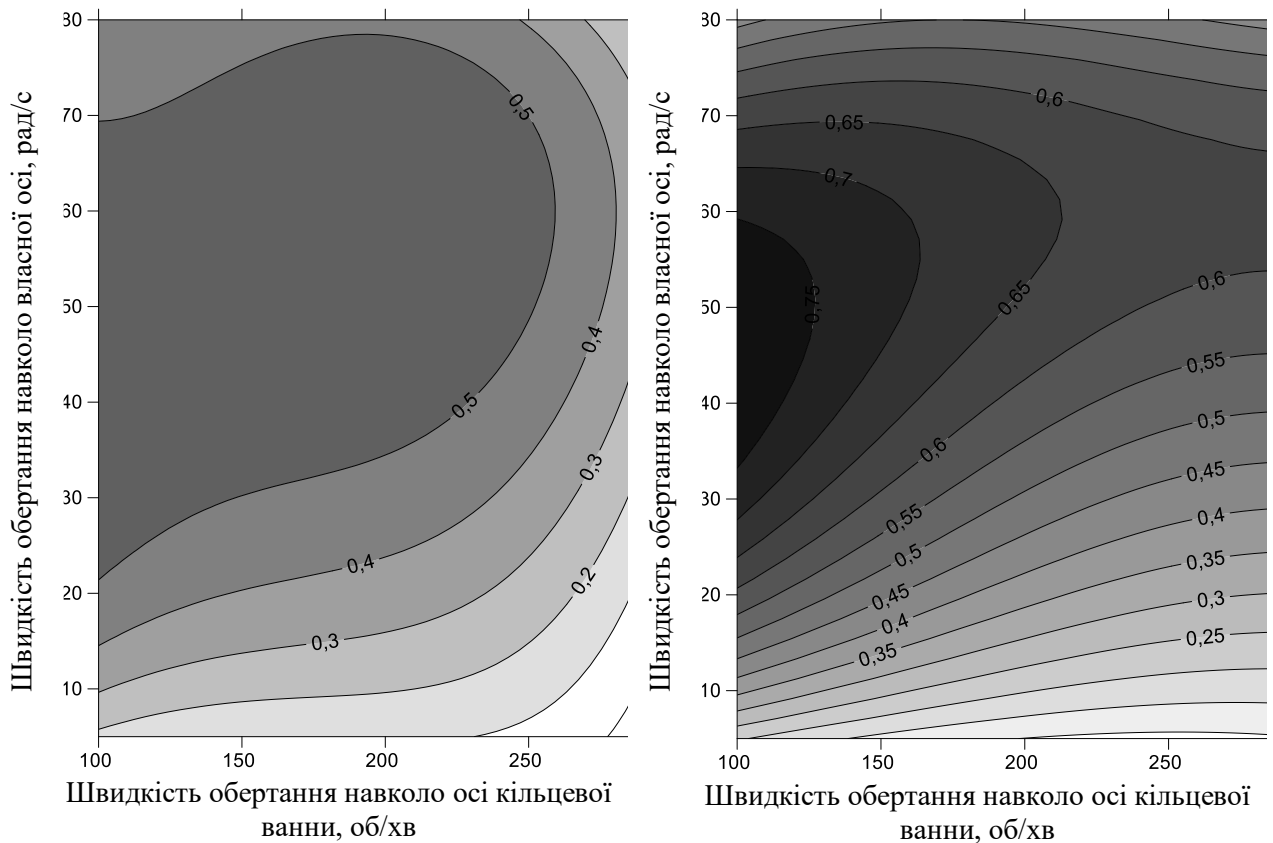
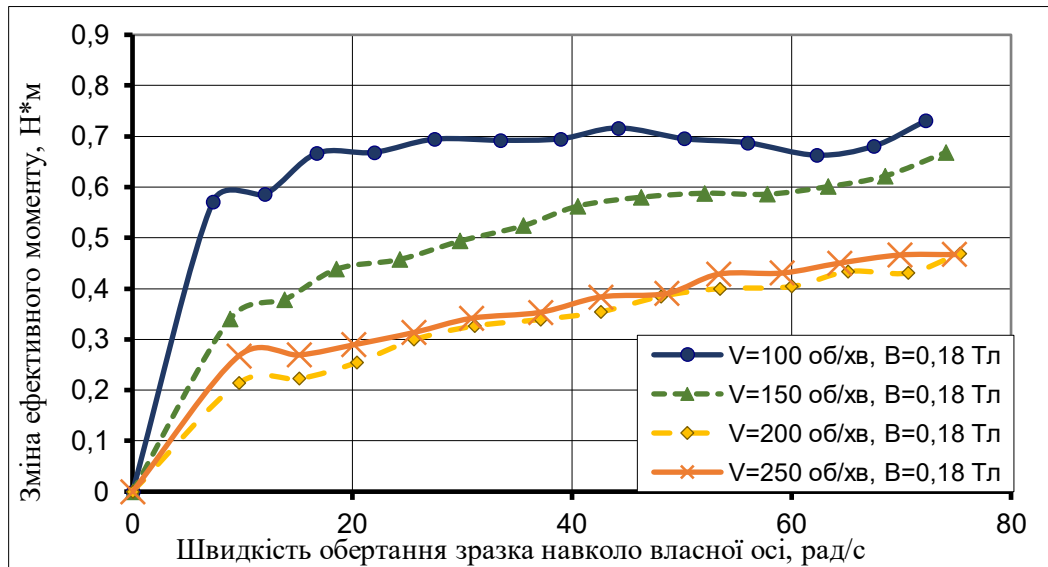


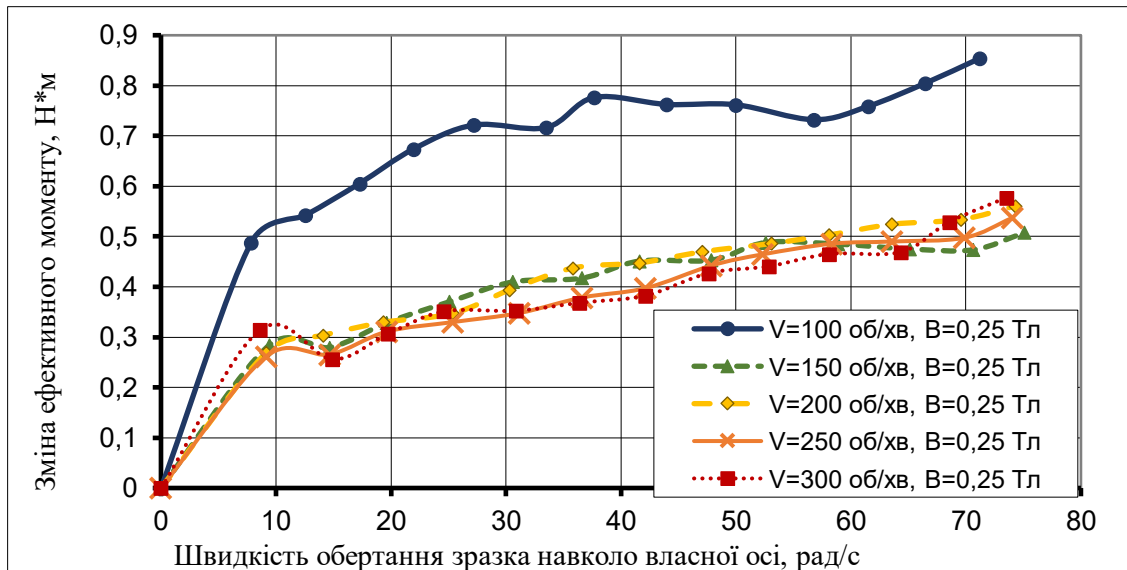
Рис. 3.2.2 (в) – Топограми зміни ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи-БрАЖ при магнітній індукції $B = 0,18$ та $0,25 \text{ Тл}$ відповідно, порошком Полімам-М (200/100 мкм)

3.2.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Ферромап (400/315 мкм)

По-перше можна стверджувати, що при обробленні бронзи оскольчатим порошком (рис 3.2.3а) на початку зростання швидкості зразка навколо власної осі наявне стрімке зростання $M_{\text{еф}}$ при $V=100$ об/хв, після



(а)



(б)

Рис 3.2.3 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи-БрАЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (400/315 мкм)

чого відбувається нестабільна зміна величини $M_{\text{еф}}$, але при збільшенні ω при $V=100$ об/хв $M_{\text{еф}}$ досягає максимального значення $0,72 \text{ Н*м}$. Тенденція зростання величини ефективного моменту при $B = 0,18 \text{ Тл}$ та $V = 200$ об/хв та $V = 250$ об/хв є майже однакова, та має найменше значення.

Присутнє лінійне спадання ефективного моменту, але з очевидним великим кроком при збільшенні швидкості зразка навколо осі кільцевої ванни.

Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,72 \text{ Н*м}$ при $V=100$ об/хв.

При зміні магнітного поля (рис 3.2.3б) набагато зменшується крок різниці значень $M_{\text{еф}}$ при збільшенні швидкості обертання шпинделя понад $V = 100$ об/хв.

Збільшується значення ефективного моменту $M_{\text{еф}}$ при усіх V .

Але $M_{\text{еф}}$ при $V = 150$ об/хв та $B = 0,18 \text{ Тл}$ є набагато більшим за усі інші показники на цьому графіку, крім $V = 100$ об/хв.

Видно, що збільшення швидкості шпинделя несе за собою незначний вплив.

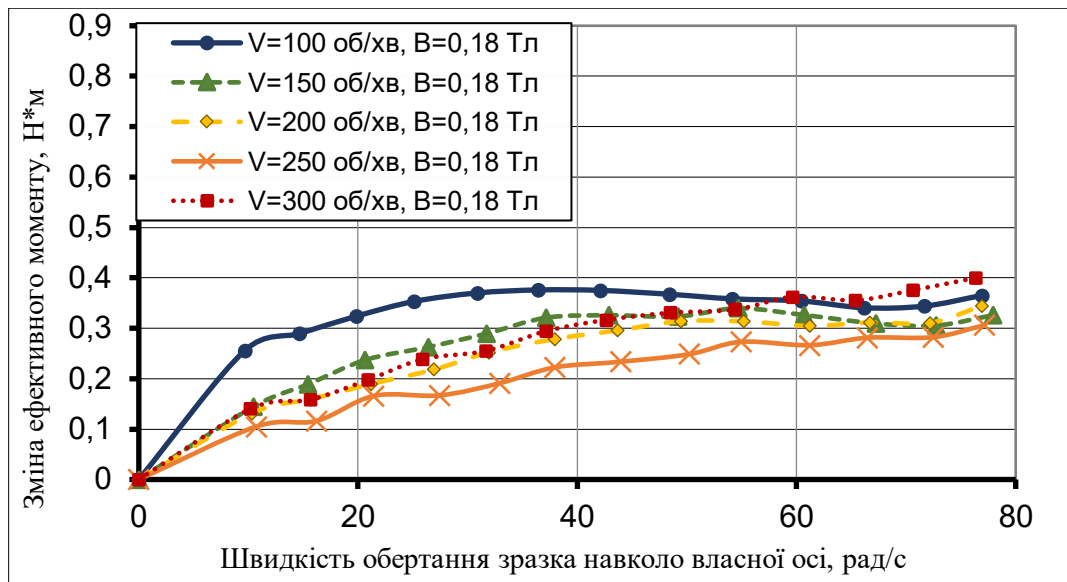
Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 0,85 \text{ Н*м}$ при $V=100$ об/хв.

Зміну ефективного моменту при досягненні швидкості переміщення зразком понад $V = 100$ об/хв можна вважати однаковою для усіх швидкостей.

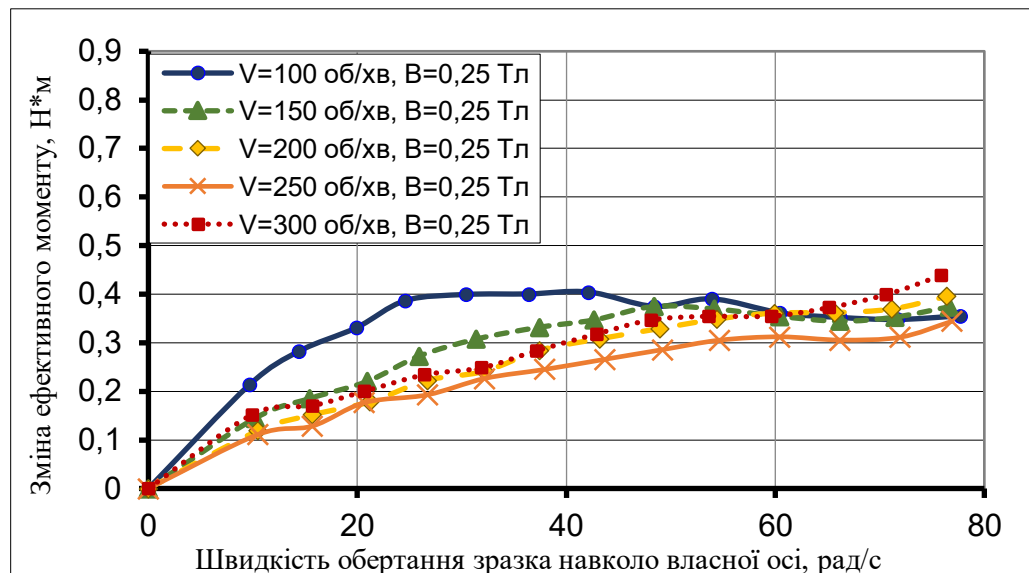
Наявне домінування величини $M_{\text{еф}}$ для $V=100$ об/хв над іншими показниками швидкостей обертання навколо осі робочої зони.

3.2.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Бронза - БрАЖ порошком Ферромап (200/100 мкм)

Не дивлячись на лінійну залежність (рис 3.2.4а) спадання при збільшенні швидкості, розвиток зміни $M_{\text{еф}}$ при найбільшій швидкості $V=300$ об/хв є виключенням у даному випадку, так як має більші значення за $V=200$ об/хв та $V=250$ об/хв, а також при $\omega = 60 \text{ рад/с}$ переважає усі залежності за показником $M_{\text{еф}}$. Досягає $0,4 \text{ Н*м}$.



(а)



(б)

Рис 3.2.4 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи-БрАЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (200/100 мкм)

Даний графік (рис 3.2.4б) не суттєво відрізняється від попереднього, а збільшення магнітного поля впливає тільки на $M_{\text{макс}}$, що дорівнює 0,44 Н*м також при $V=300$ об/хв.

Встановлено, що при обробленні бронзи – Браж найбільшу величину ефективного моменту можна досягти порошками Полімам-М та Ферромап з фракціями 400/315 мкм. Велике значення в різниці величин ефективного моменту між розмірами частинок порошку Ферромап 400/315 та 200/100 мкм представлено на топограмі (рис. 3.2.4 (в)).

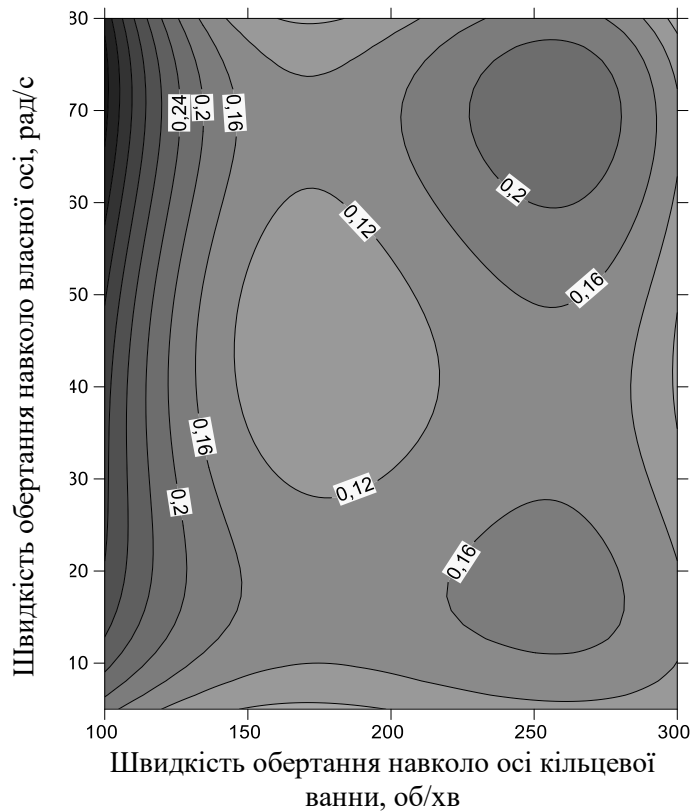
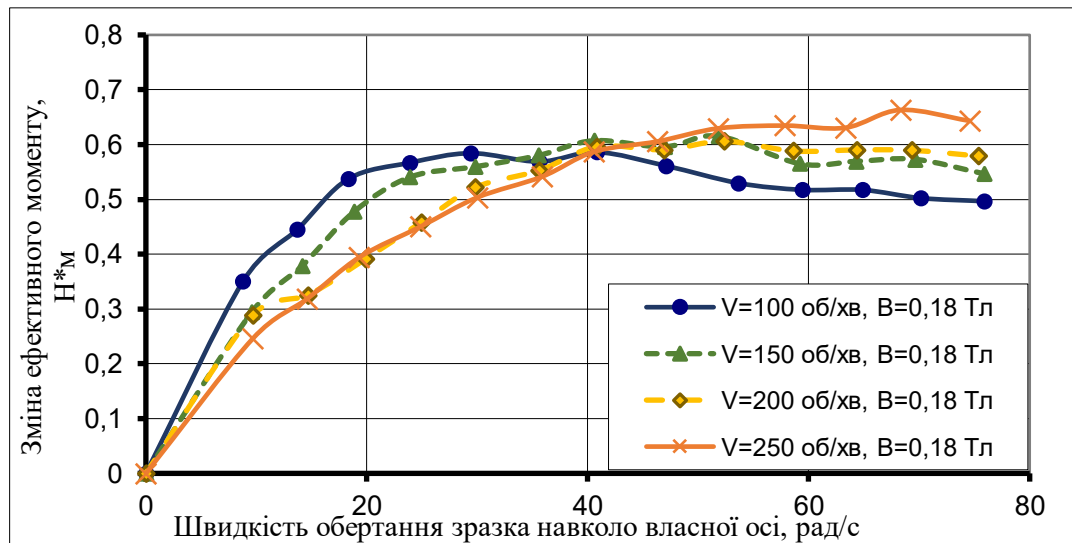


Рис. 3.2.4 (в) – Топограма різниць величини ефективного моменту при обробленні сплаву з бронзи - БраЖ при магнітній індукції $B = 0,25$ Тл, між розмірами частинок порошку Ферромап 400/315 та 200/100 мкм .

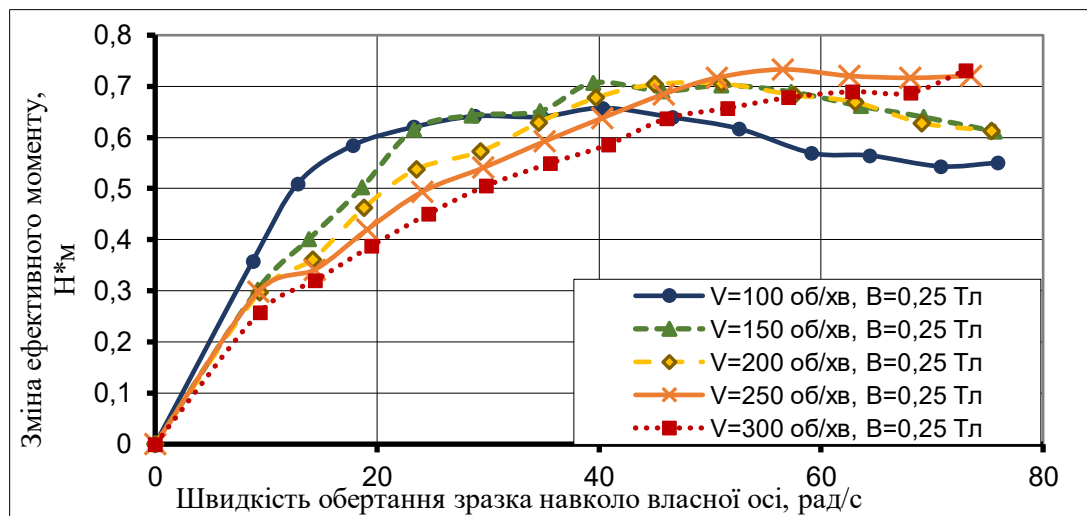
3.3.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Полімам-М (400/315 мкм)

При обробленні титану порошком Полімам-М з фракцією 400/315 мкм (рис 3.3.1а) помітно, що до швидкості обертання мінішпинделя $\omega = 40$ рад/с, графік має лінійну залежність зниження ефективного моменту за збільшенням швидкості обертання головного шпинделя.

Але після чого ця залежність стає діаметрально протилежною до вище названої, та найбільший ефективний момент досягається при $V=250$ об/хв до $0,67 \text{ Н*м}$.



(а)



(б)

Рис 3.3.1 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з титану ВТЗ-1 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (400/315 мкм)

Збільшення магнітного поля (рис 3.3.1б) має незначний вплив на $M_{\text{еф}}$. Ефективний момент при швидкостях навколо осі кільцевої зони від 100 до 200 об/хв має здатність до зниження, при чому найкраще це помітно за $V=100$ об/хв, який прямує до $0,55 \text{ Н*м}$, а при $V=150$ об/хв та $V=200$ об/хв – до $0,61 \text{ Н*м}$.

Але при більших обертах головного шпинделя спостерігається навпаки стабільне зростання $M_{\text{еф}}$ до $0,72 \text{ Н*м}$.

На топограмі (рис. 3.3.1 (в)) більш детально показано мінімальний вплив зміни величини магнітної індукції на ефективний моменту для зразка зі сплаву титан ВТЗ-1.

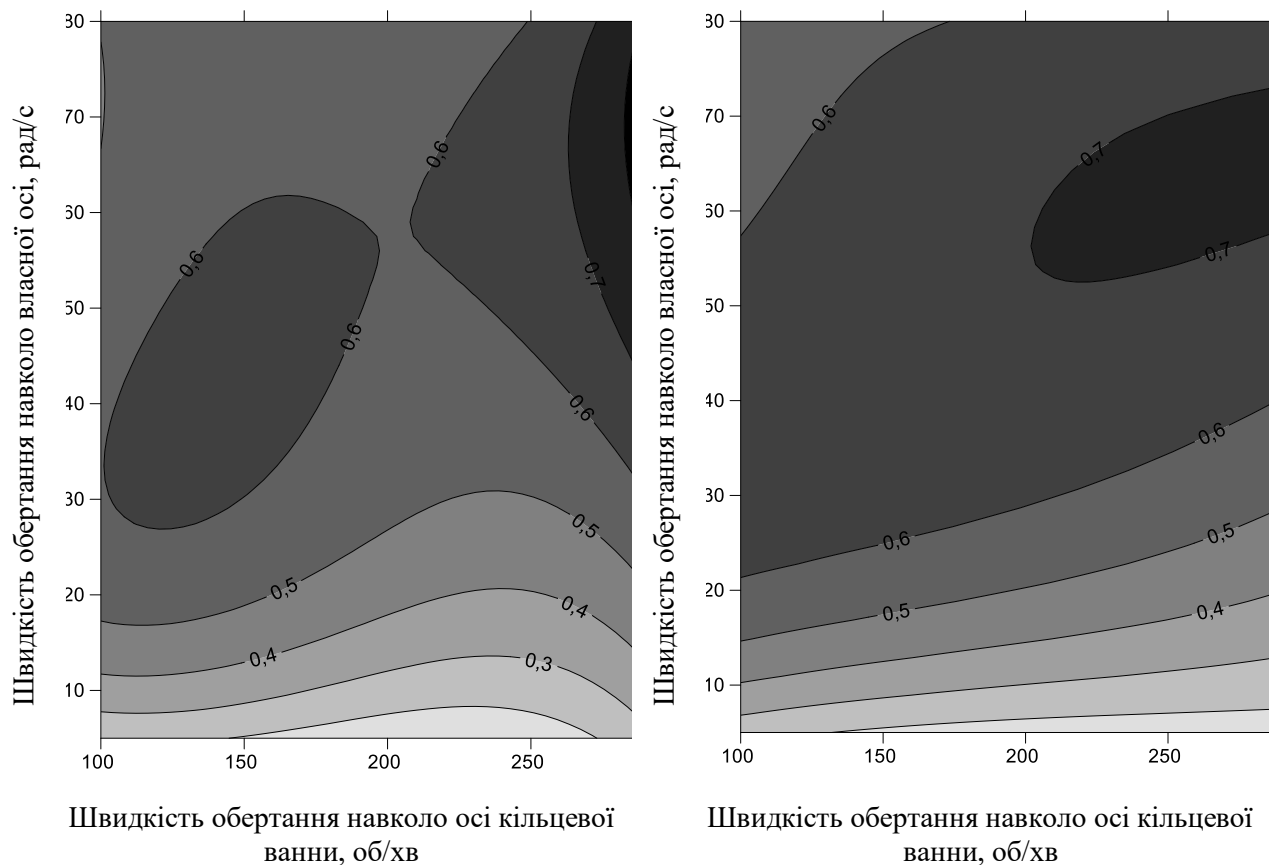
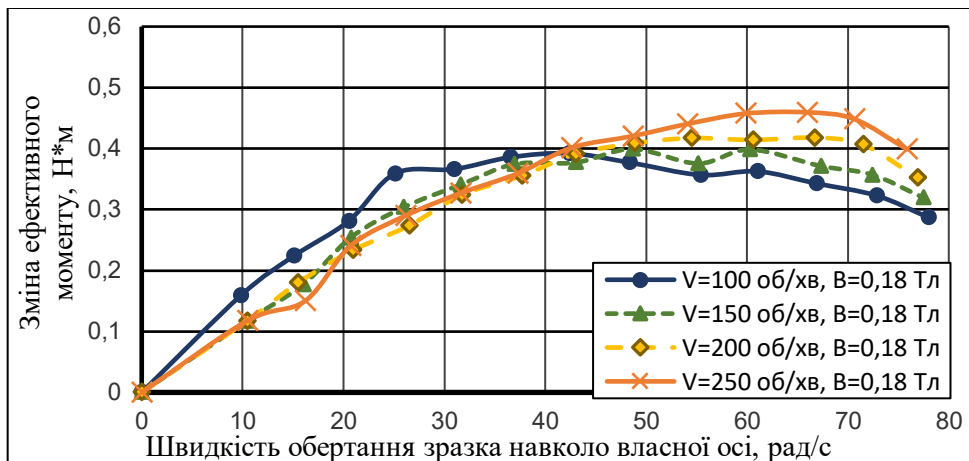


Рис. 3.2.2 (в) – Топограми зміни ефективного моменту при обробленні сплаву зі сплаву титан ВТЗ-1 при магнітній індукції $B = 0,18$ та $0,25 \text{ Тл}$ відповідно, порошком Полімам-М (400/315 мкм)

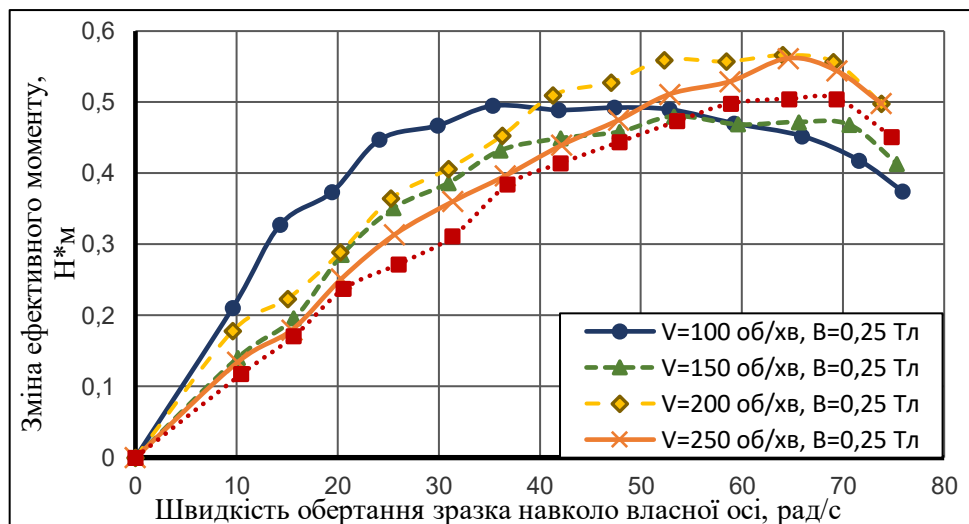
3.3.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Поліам-М (200/100 мкм)

Помітний аналогічний розвиток ефективного моменту (рис 3.3.2а), як і при обробленні порошком Поліам-М 400/315 мкм при $B=0,18$ Тл, але $M_{\text{макс}}$ є набагато меншим, а саме $0,46 \text{ Н*м}$ замість $0,67 \text{ Н*м}$.

Крім того підвищення обертів мінішпинделя понад $\omega = 66 \text{ рад/с}$ сприяє до зменшення $M_{\text{еф}}$.



(а)



(б)

Рис 3.3.2 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з титану ВТЗ-1 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції $0,18 \text{ Тл}$ –(а), $0,25 \text{ Тл}$ – (б), порошком Поліам-М (200/100 мкм)

Аналогічно попередньому графіку існує схильність до зменшення $M_{\text{еф}}$ при більших швидкостях зразка навколо власної осі (рис 3.3.2б). До певної кількості обертів мінішпинделя (приблизно $\omega = 42$ рад/с) спостерігається лінійна залежність до зменшення $M_{\text{еф}}$ при більших обертах головного шпинделя. Але після чого результати є досить неоднозначними, так як показники $M_{\text{еф}}$ при $V=300$ об/хв є меншими за $V=200$ та $V=250$ об/хв, при чому $M_{\text{еф}}$ при $V=200$ об/хв є більшим на протязі усього зростання швидкості обертання зразка навколо власної осі.

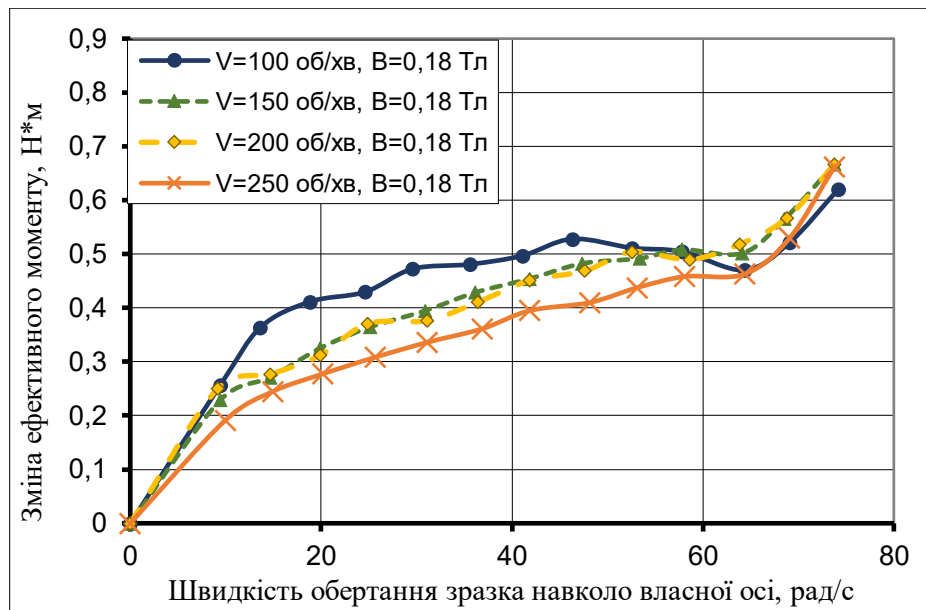
$M_{\text{макс}} = 0,56 \text{ Н*м}$ при $V=200$ та $V=250$ об/хв, після $\omega = 64$ рад/с ефективний момент спадає, як і у випадку з обробленням бронзи округлим порошком при різних фракціях.

3.3.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТ3-1 порошком Ферромап (400/315 мкм)

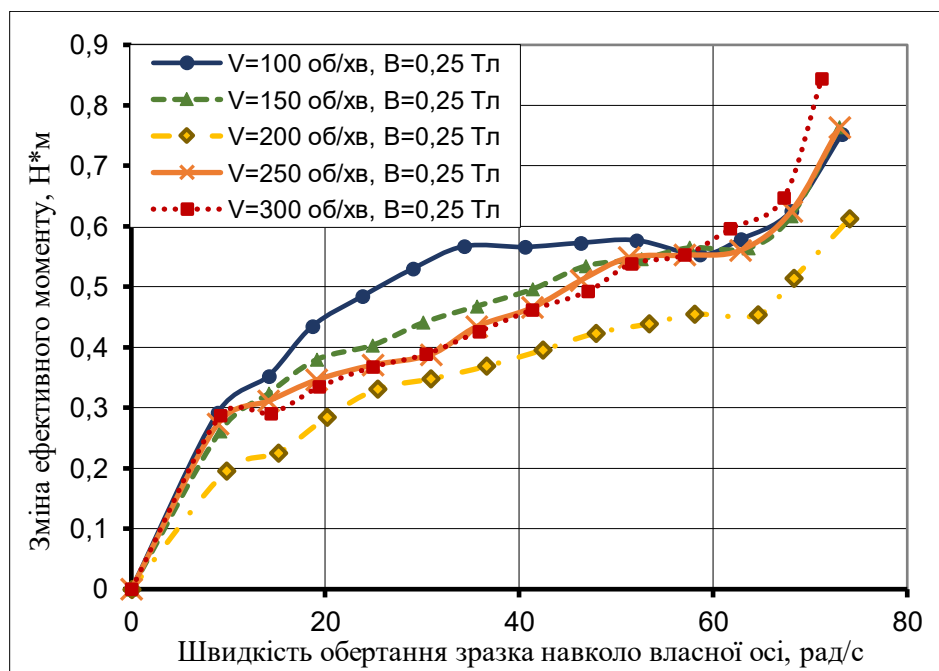
При обробленні титану порошком Ферромап (рис 3.3.3а) до швидкості обертання зразка навколо своєї осі приблизно $\omega = 52$ рад/с існує лінійна залежність, після чого при усіх значеннях V помітне стрімке підвищення ефективного моменту при досягненні швидкості мінішпинделя понад $\omega = 65$ об/хв.

Різке підвищення значення ефективного моменту відбувається в наслідок переуцільнення контактної зони фераобразивним порошком.

Можна вважати, що при усіх значеннях V понад $\omega = 65$ об/хв, ефективний момент $M_{\text{еф}}$ є однаковим, так як прагне до однієї величини $0,7 \text{ Н*м}$.



(а)



(б)

Рис 3.3.3 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з титану ВТЗ-1 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (400/315 мкм)

На даному графіку (рис 3.3.3б), перш за все, можна побачити аномально низькі показники $M_{\text{еф}}$ при швидкості обертання навколо осі

кільцевої ванни $V=200$ об/хв протягом усього діапазону зростання швидкості обертів мінішпинделя. Збільшення величини магнітного поля суттєво впливає на величину $M_{\text{еф}}$. До $\omega = 57$ об/хв спостерігається лінійна залежність до зниження $M_{\text{еф}}$ при зростанні швидкості головного шпинделя V , але після чого $M_{\text{еф}}$ має схильність до різкого підвищення, що особливо помітно при $V=300$ об/хв.

При $V=300$ об/хв $M_{\text{еф}}$ має найбільшу величину на протязі усього періоду зростання понад $\omega = 60$ об/хв, а $M_{\text{макс}} = 0,85 \text{ Н*м}$.

Слід звернути увагу, що найбільше значення $M_{\text{еф}}$ при $V=100, 150, 250$ об/хв є однаковим.

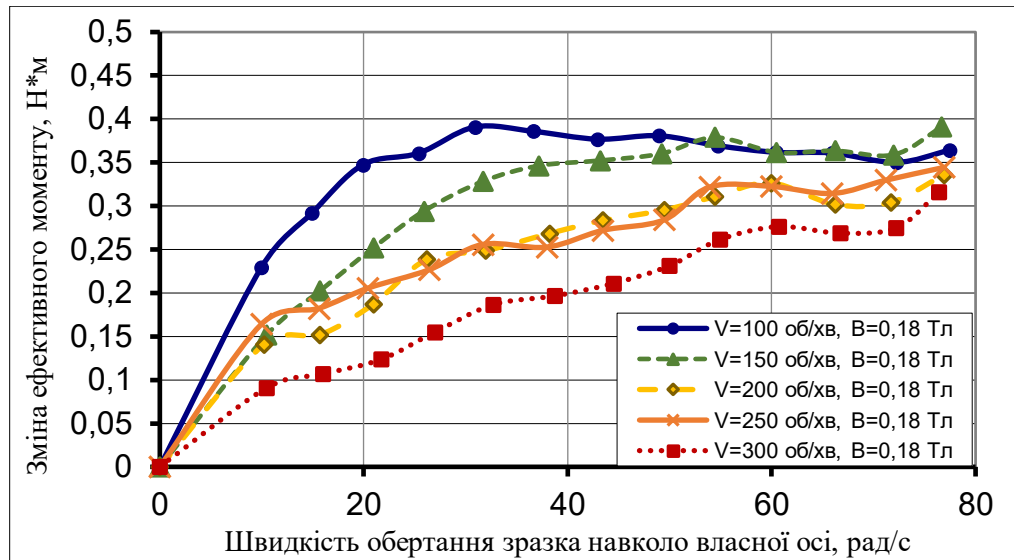
3.3.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку зі сплаву Титан ВТЗ-1 порошком Ферромап (200/100 мкм)

При зміні фракції порошку Ферромап на 200/100 мкм графік (рис 3.3.4а) має явну лінійну залежність до зниження $M_{\text{еф}}$ при збільшенні швидкості навколо осі кільцевої ванни, та крок показників $M_{\text{еф}}$ при різних значеннях V є досить великим; крім $V=200$ та 250 об/хв, значення яких можна вважати рівними.

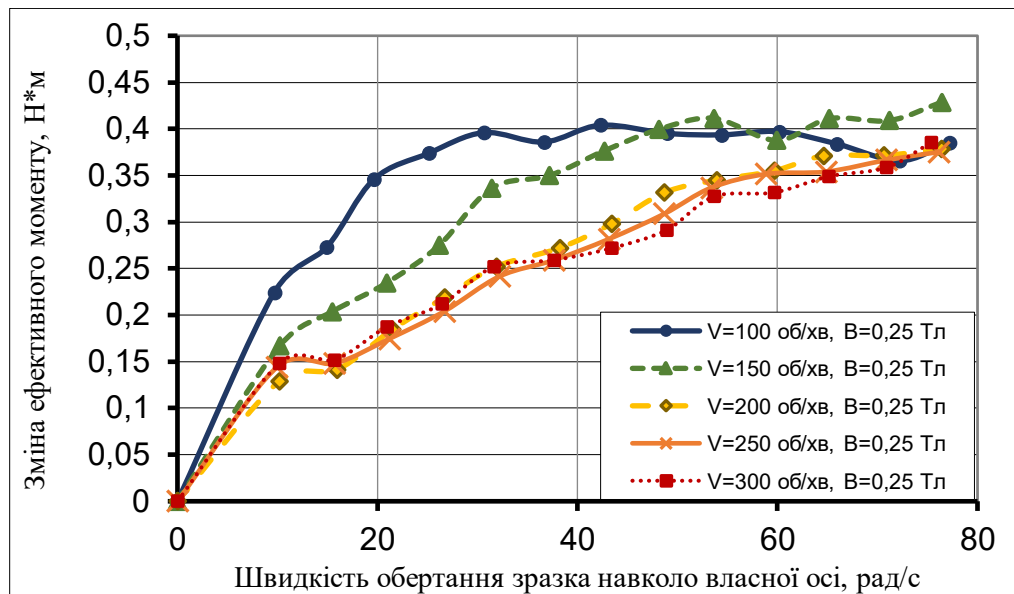
Спостерігається схильність до зменшення $M_{\text{еф}}$ при $\omega = 60$ об/хв і його різке зростання понад $\omega = 68$ об/хв.. $M_{\text{макс}} = 0,39 \text{ Н*м}$ при ($V=150$ об/хв $\omega = 78$ об/хв) та ($V=100$ об/хв $\omega = 30$ об/хв).

На залежностях, наведених на рис 3.3.4б показано, що значення $M_{\text{еф}}$ при $V=200, 250$ та 300 об/хв на протязі усього діапазону обертів мінішпинделя є майже однаковими. При зазначених швидкостях головного шпинделя зростання $M_{\text{еф}}$ є більш стабільним за за зміну $M_{\text{еф}}$ при швидкостях шпинделя нижче. Крім того, усі значення $M_{\text{еф}}$ при збільшенні обертів зразка навколо власної осі ω прагнуть до $0,38 \text{ Н*м}$, крім $V=150$ об/хв. При $V=150$

об/хв величина ефективного моменту $M_{\text{еф}}$ є найбільшим після набуття обертів зразка понад $\omega = 50$ об/хв.



(а)



(б)

Рис 3.3.4 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву з титану ВТЗ-1 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (200/100 мкм)

Збільшення магнітної індукції не несе за собою значного впливу на зміну ефективного моменту, як і збільшення швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни.

Встановлено, що при обробленні титану ВТЗ-1 найбільшу величину ефективного моменту можна досягти порошками Поліам-М та Ферромап з фракціями 400/315 мкм, топограми яких наведено на (рис 3.3.4 (в)) .

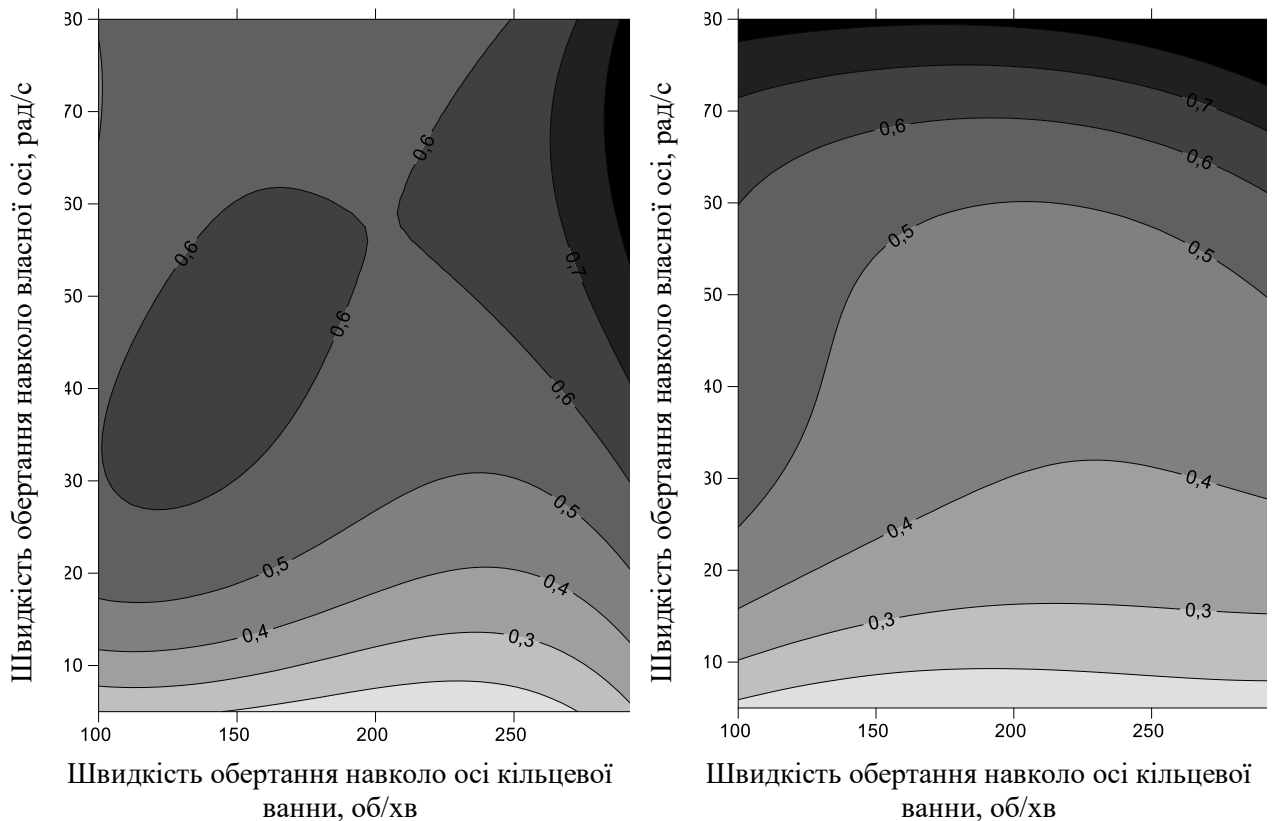
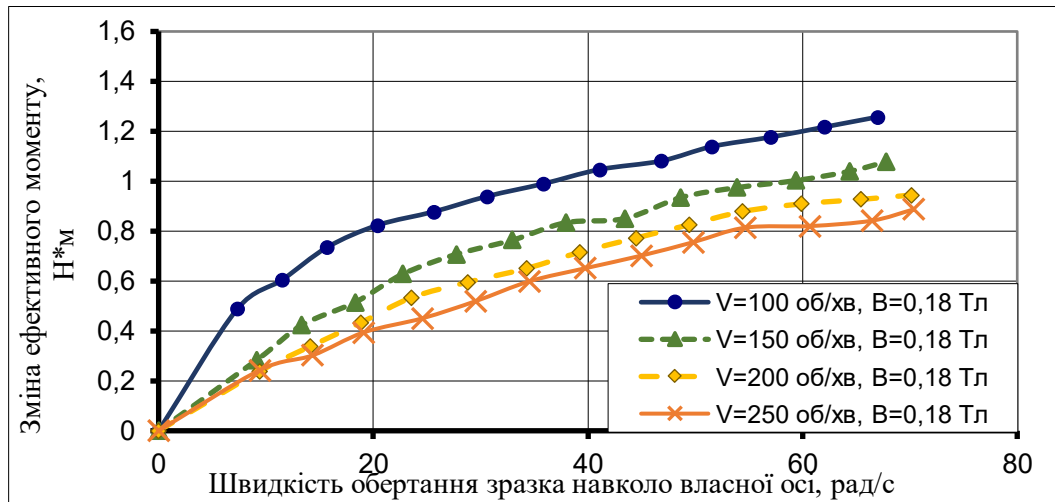


Рис. 3.3.4 (в) – Топограми зміни ефективного моменту при обробленні титану ВТЗ-1 порошком Поліам-М (400/315 мкм) та Ферромап (400/315 мкм)

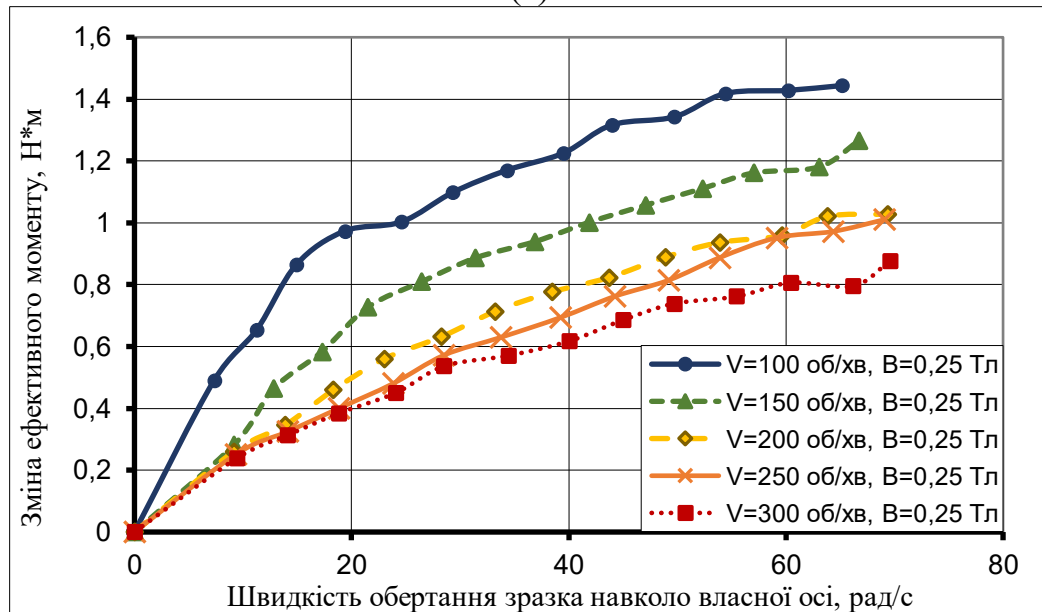
Після аналізу впливу динамічних чинників на ефективний момент при обробленні сплавів з бронзи та титану слід зробити висновок, що наявне підвищення ефективного моменту при значному зростанні швидкості навколо власної осі зразка ω пов'язано з великим показником тертя обертання частинок МАІ, за рахунок чого між МАІ та оброблюваною поверхнею відбувається зона заклинювання, тобто така зона схильна до переущільнення. В той час як різке падіння ефективного моменту при певному зростанні швидкості навколо власної осі зразка ω - з тертям кочення, при якому відбувається не зріз поверхні частинками МАІ, а їх заминанням, за рахунок чого відбувається пластично-деформуюча зона на зразках з титану та бронзи.

3.4.1 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40X13 порошком Полімам-М (400/315 мкм)

При обробленні феромагнітної сталі округлим порошком (рис 3.4.1)



(а)



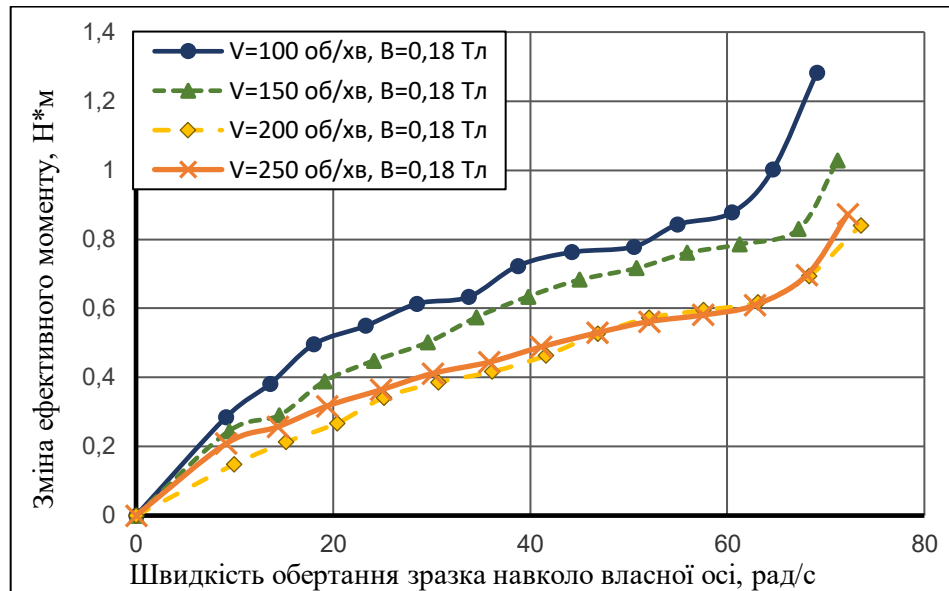
(б)

Рис 3.4.1 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (400/315 мкм)

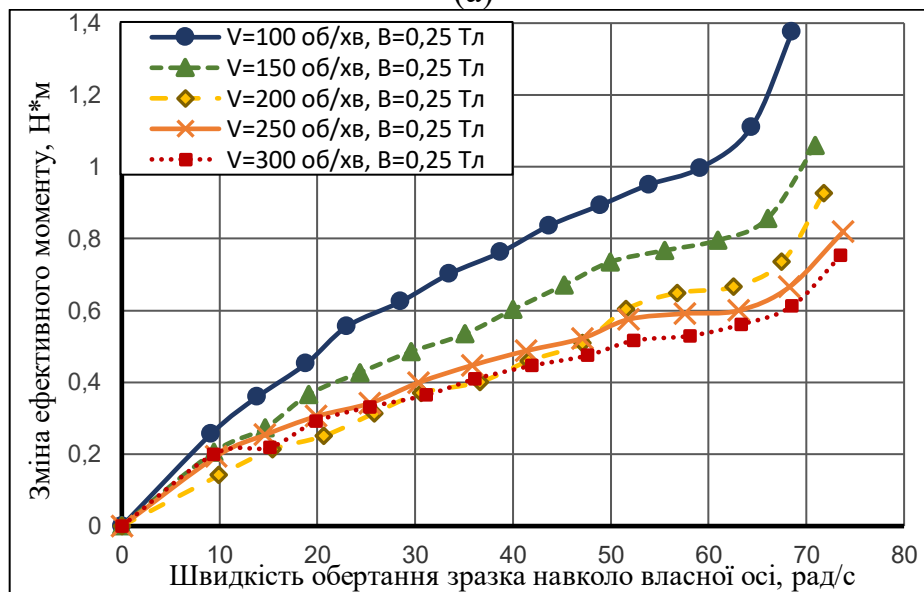
присутнє несуттєве збільшення ефективного моменту при збільшенні магнітної індукції. Збільшення швидкості переміщення у робочому зазорі призводить до зменшення ефективного моменту. Залежності є абсолютно лінійними. Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 1,42 \text{ Н*м}$ при $V=100$ об/хв та $B=0,25 \text{ Тл}$.

3.4.2 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40X13 порошком Полімам-М (200/100 мкм)

В умовах оброблення порошком Полімам-М з фракцією 200/100 мкм також можна стверджувати, що збільшення магнітної індукції має мінімальний вплив на ефективний момент $M_{\text{еф}}$ (рис 3.4.2).



(а)



(б)

Рис 3.4.2 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Полімам-М (200/100 мкм)

На відміну від обробки порошком Полімам-М з фракцією 400/315, наявне стрімке зростання $M_{\text{еф}}$ після набуття швидкості зразка навколо

власної осі понад $\omega = 65$ об/хв. При $B=0,18$ Тл збільшення швидкості має несуттєвий вплив на $M_{\text{еф}}$, а при $B=0,25$ Тл залежність стає лінійною тільки при зростанні швидкості обертів мінішпинделя понад $\omega = 49$ об/хв. Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 1,4$ Н*м при $V=100$ об/хв та $B=0,25$ Тл. Зміна величини ефективного моменту при $V= 200$ та 250 об/хв за збільшенням швидкості обертання зразка навколо власної осі однакова.

На топограмі (рис. 3.4.2 (в)) більш детально показано зміну ефективного моменту при різних значеннях магнітної індукції для зразка зі сталі 40X13.

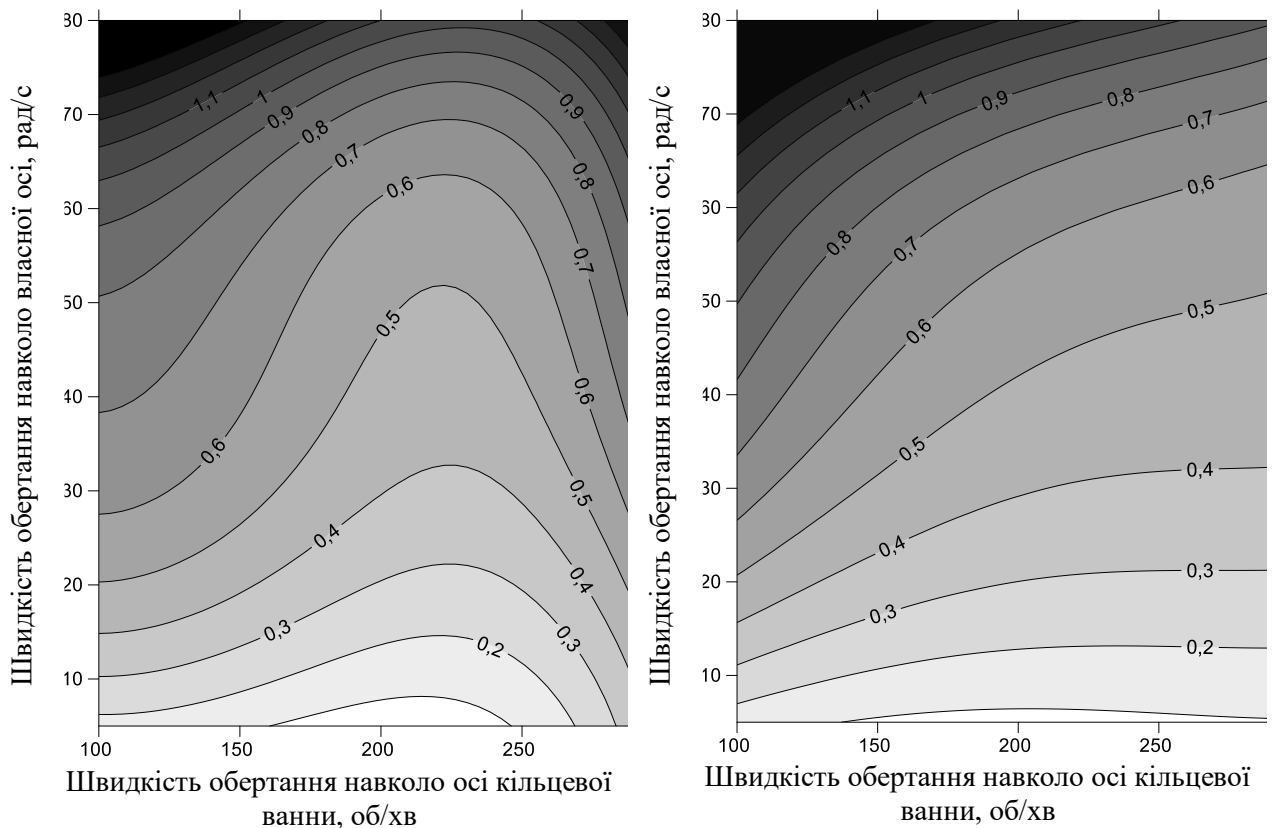
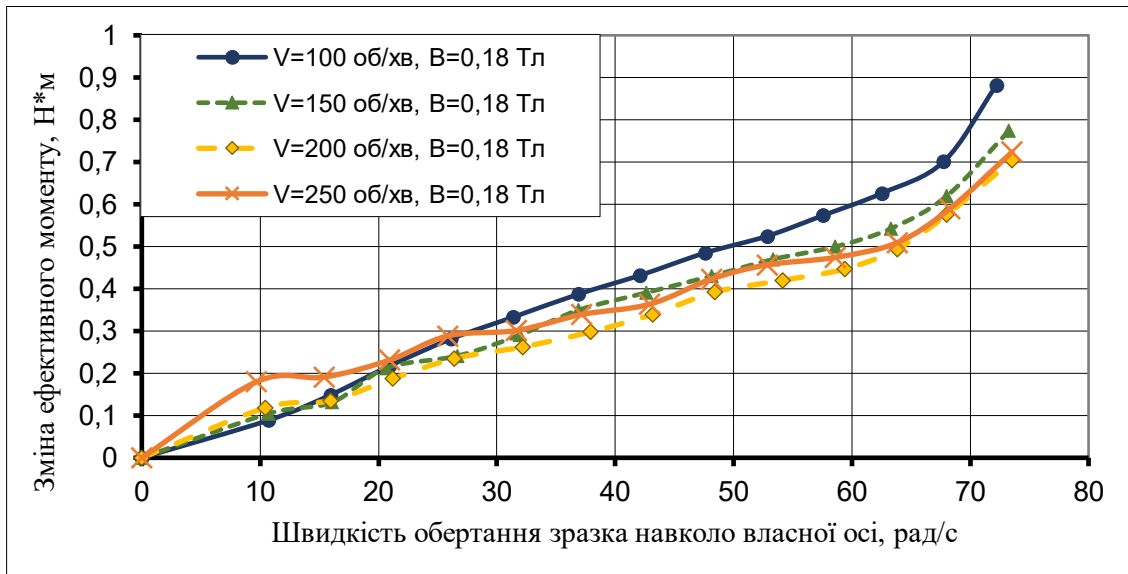


Рис. 3.4.2 (в) – Топограми зміни ефективного моменту при обробленні сплаву зі сталі 40X13 при магнітній індукції $B = 0,18$ та $0,25$ Тл відповідно, порошком Полімам-М (200/100 мкм)

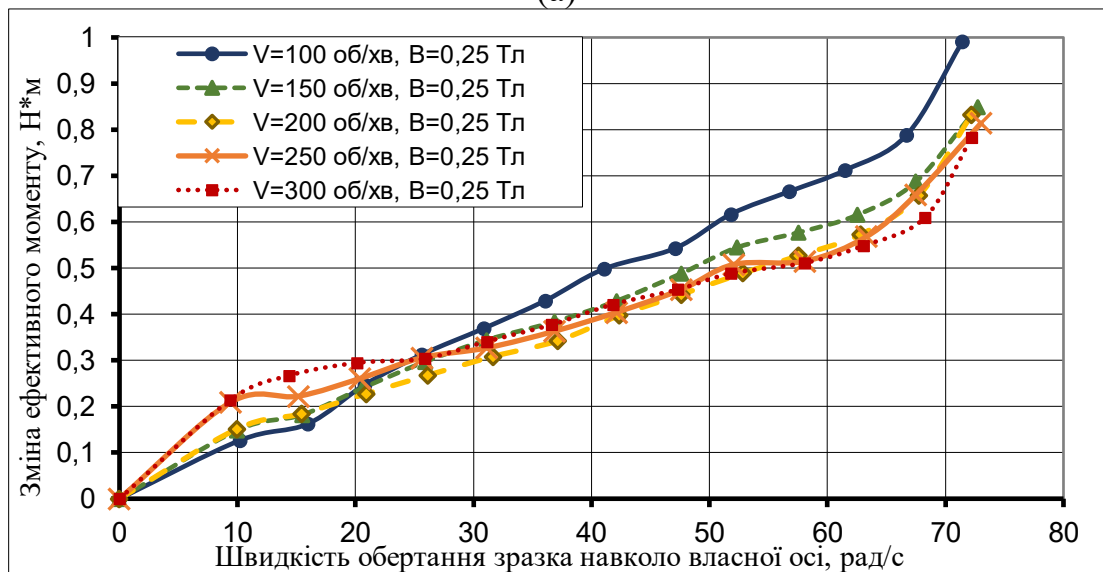
3.4.3 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40X13 порошком Ферромап (400/315 мкм)

При обробленні зразку зі сталі 40X13 та порошку Ферромап з фракцією 400/315 мкм (рис 3.4.3) при всіх значеннях магнітної індукції та швидкостей переміщення в кільцевій ванні, спостерігається лінійне зростання

ефективного моменту при зростанні швидкості обертання навколо власної осі в діапазоні 0–68 рад/с. При швидкості більше 68 рад/с починається різке зростання ефективного моменту.



(а)



(б)

Рис 3.4.3 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (400/315 мкм)

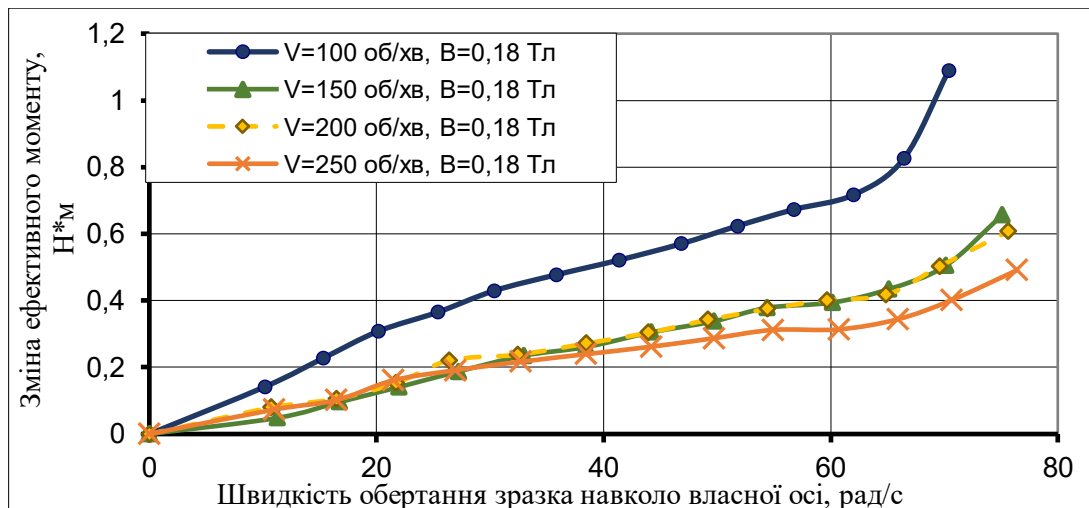
Значення $M_{\text{еф}}$ при усіх швидкостях головного шпинделя навколо осі кільцевої ванни крім $V=100$ об/хв є майже однаковими.

В результаті аналізу отриманих поверхонь, показано, що при різних значеннях магнітної індукції, ефективний момент у рівній мірі залежить від зміни швидкості переміщення у робочому зазорі та швидкості обертання

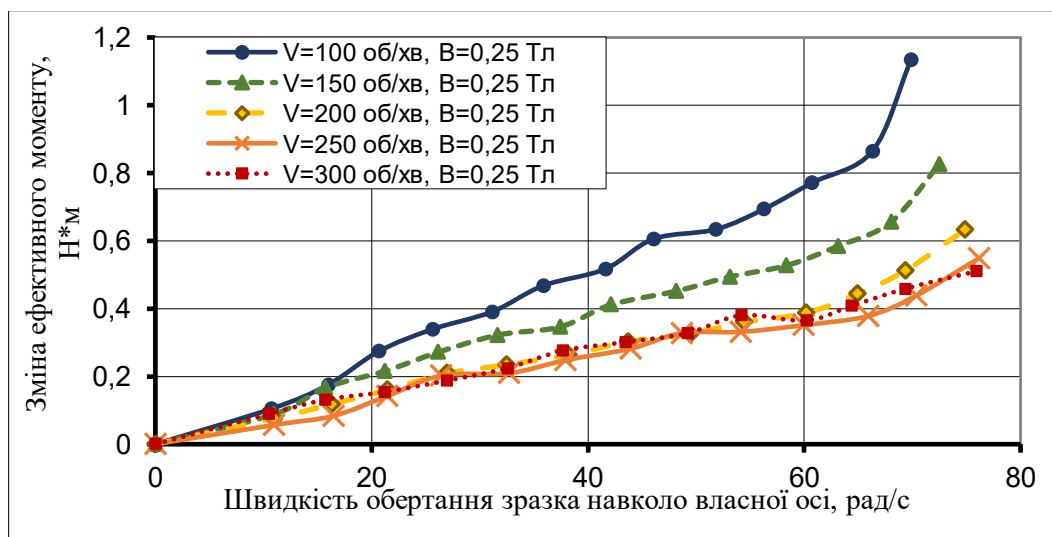
навколо власної осі. Встановлено, що максимальні значення ефективного моменту виникають при високих швидкостях обертання навколо власної осі та низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни.

3.4.4 Зміна ефективного моменту при обробленні зразку з Сталі 40X13 порошком Ферромап (200/100 мкм)

При обробленні зразку зі сталі 40X13 порошком Ферромап з фракцією 200/100 мкм (рис 3.4.4) наявне різке зменшення ефективного моменту при



(а)



(б)

Рис 3.4.4 - Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції 0.18 Тл –(а), 0.25 Тл – (б), порошком Ферромап (200/100 мкм)

збільшенні швидкості обертання шпинделя навколо осі кільцевої ванни понад $V = 100$ об/хв. Збільшення величини магнітної індукції не несе за собою значного впливу на ефективний момент, крім значень при $V = 150$ об/хв, що помітно за магнітною індукцією $B = 0,25$ Тл.

Максимальний ефективний момент $M_{\text{макс}} = 1,1 \text{ Н*м}$ при $V=100$ об/хв та $B = 0,18$ та $0,25$ Тл.

Встановлено, що при обробленні ферромагнітної сталі величини ефективного моменту $M_{\text{еф}}$ не критично залежить від фракцій (400/315 та 200/100) порошоків Полімам-М та Ферромап відповідно, що показано на прикладі топограми (рис. 3.4.4 (в)) різниці величин зміни ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 між порошками Ферромап 400/315 та 200/100 мкм за магнітною індукцією $B = 0,25$ Тл.

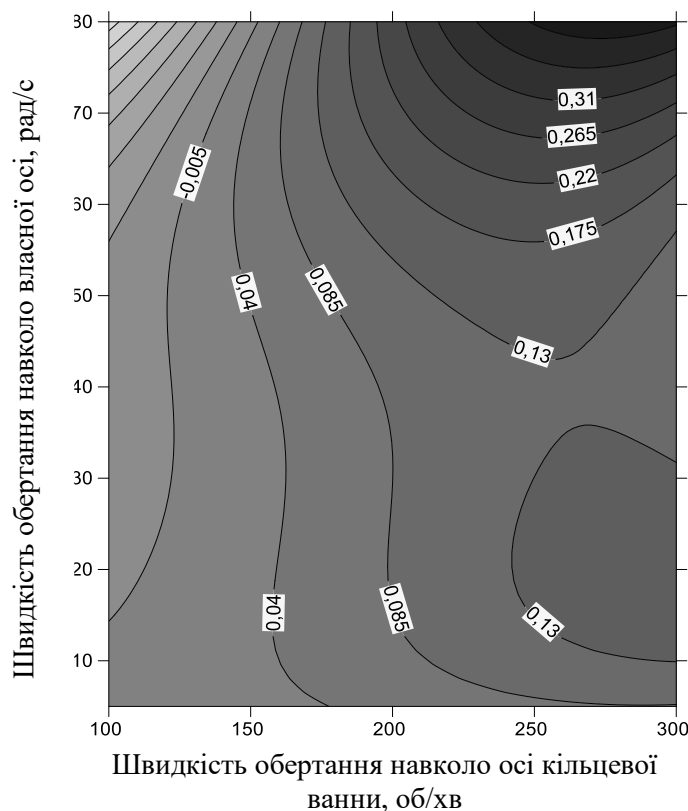


Рис. 3.4.4 (в) – Топограма різниць величини ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 при магнітній індукції $B = 0,25$ Тл, між розмірами частинок порошку Ферромап 400/315 та 200/100 мкм .

3.5 Аналіз отриманих результатів після проведення експериментів

3.5.1 МАО парамагнетиків осколковим порошком Ферромап 200/100 мкм

Практично на всіх залежностях $M_{ef} = f(\omega_0)$ характерні типові криві, які можна умовно розділити на дві області в залежності від частоти обертання деталей навколо власної осі ω_0 :

Початкова (перша) область - область низьких частот обертання $\omega_0 = (0-20 \text{ рад/с})$. У вказаній області має місце досить активне зростання величини M_{ef} від 0 до 0,2 Н*м. Слід зазначити, що така зміна має місце при $V_0 = 150-300 \text{ об/хв}$. При швидкості $V_0 = 100 \text{ об/хв}$ зростання M_{ef} в зазначеному діапазоні ω_0 більш активне. Величина M_{ef} збільшується до 0,3 Н * м-0,35 Н * м для всіх парамагнітних зразків. Друга область - область частот обертання зразків $\omega_0 = 20-70 \text{ рад/с}$. У цій області при швидкості $V_0 = 150 - 300 \text{ об/хв}$ величина M_{ef} зростає монотонно і повільно асимптотично наближується до деяких значень $M_{ef}^{ст}$, наведених в таблиці 3.1 для різних матеріалів та умов обробки.

Таблиця 3.1

Значення $M_{ef}^{ст}$ для різних МАП і матеріалів деталей, що оброблюються

Матеріал зразка	Порошок МАІ	Магнітна індукція, ТЛ	$M_{ef}^{ст}$, Н*м
Титан ВТЗ-1	Ферромап 200/100	250	0,25 – 0,35
		400	0,35 – 0,4
	Ферромап 400/315	250	0,45 – 0,5
		400	0,45 – 0,55
Бронза - БрАЖ	Ферромап 200/100	250	0,27 – 0,37
		400	0,3 – 0,37
	Ферромап 400/315	250	0,4 – 0,45
		400	0,5 – 0,55
Алюміній Д16Т	Ферромап 200/100	250	0,35
		400	0,4
	Ферромап 400/315	250	0,55
		400	0,65

Важливо відзначити, що зміна величини магнітної індукції в робочих зазорах несуттєво впливає на величину M_{ef} , що підтверджується топографіями поверхонь, що представляють різницю між залежностями $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ отриманими при $B = 0,25$ і $0,18$ Тл (рис. 3.5.1(а), 3.5.1(б) та 3.5.1(в)).

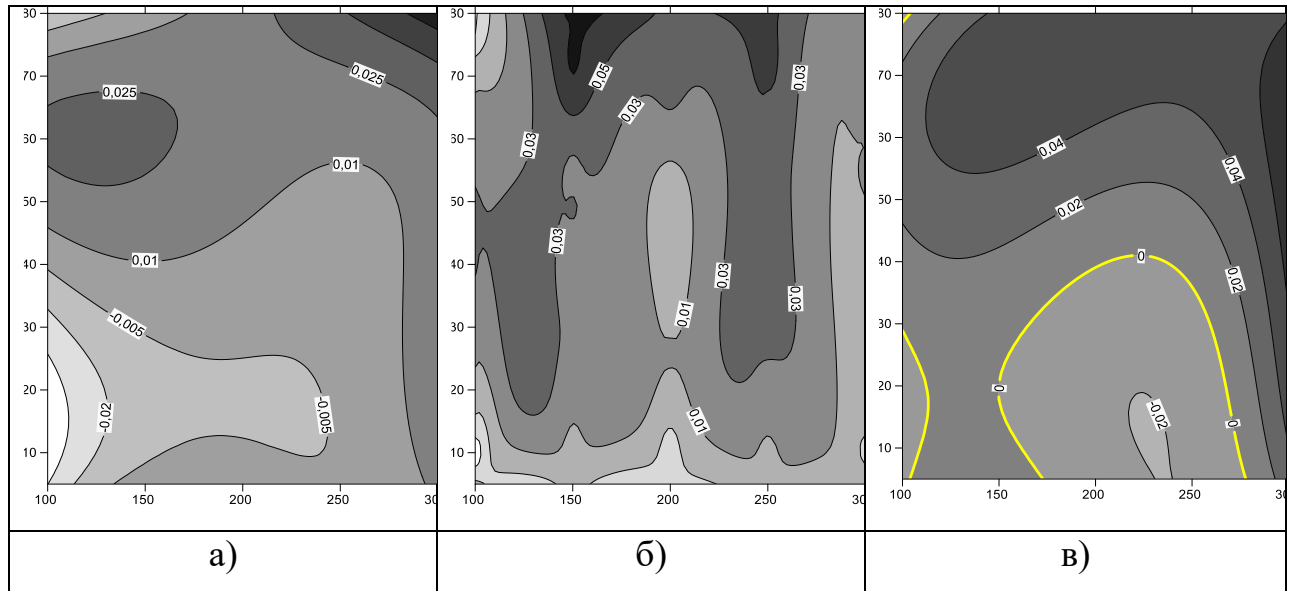


Рис.3.5.1 - Різниця між залежностями M_{ef} при МАО порошком Ферромап 200/100 мкм отриманими при $B = 0,25$ та $0,18$ Тл зразків з (а)-Д16Т, (б) – БрАЖ і (в) - ВТЗ-1 в залежності від частоти обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни.

На рисунках показано, що різниця у величині M_{ef} для алюмінію Д16Т складає $-0,025$ Н*м, для бронзи БрАЖ $-0,05$ Н*м та для титану ВТЗ-1 $-0,04$ Н*м. Слід зазначити, що швидкість обертання зразків навколо осі кільцевої ванни V_0 в діапазоні 150-300 об/хв слабо впливає на величину M_{ef} . Встановлено, що зі зростанням величини V_0 , як правило, спостерігається незначне зниження величини M_{ef} незважаючи на те, що величина динамічного притиску елементів МАІ до поверхні зразків з ростом V_0 буде збільшуватися. Необхідно відзначити і деякі аномальні зміни M_{ef} , які мають місце при МАО особливо бронзових і алюмінієвих зразків, коли при швидкостях $V_0 = 250$ об/хв ефективний момент буде менше, ніж при

швидкості $V_0 = 300$ об/хв. Така відмінність може бути пов'язана з особливостями формування і переформування структури МАІ і вимагає додаткового дослідження, пов'язаного з аналізом умов "обтікання" МАІ поверхонь циліндричної форми, умов адгезійної взаємодії матеріалу порошку з матеріалом зразків. Підтвердженням активної адгезійної взаємодії бронзових і алюмінієвих зразків при МАО порошком Ферромап 200/100 мкм послужило наявність шаржування поверхні, яке проявилось у вигляді формування сіро-чорного нальоту на поверхні зразків після МАО, в той час як на титані подібний наліт був відсутній.

3.5.2 МАО парамагнетиків осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм

При аналізі процесу МАО парамагнітних зразків більшим осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм встановлено, що порівняно з порошком 200/100 мкм на залежностях $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ з'являється третя область в діапазонах частот $\omega_0 > 60-65$ рад/с. Найбільш явно проявляється ця третя область на зразках із сплавів титану і алюмінію. У цій області має місце зростання величини M_{ef} . Для зразків виготовлених з бронзи активне зростання M_{ef} проявляється при $V_0 = 100$ і 150 об/хв. Подібне збільшення ефективного моменту можна пояснити особливостями в поведінці окремих груп, сформованих з частинок порошку в квазістабільних об'ємах. Для цього зручно скористатися структурною моделлю МАІ, описаної в [7]. При підвищених частотах обертання зразків утворюються віялоподібні ущільнення, на їх будь-якій поверхні і під дією сил тертя зміщуються в область між бічною поверхнею зразків і поверхневого полюсного наконечника. У зазначеній області зміщується порошок, взаємодіючи з порошком, який розташовується на поверхні полюсів в мертвій зоні [2] і основами конусоподібних формувань МАІ утворює зону з підвищеною щільністю – більше $2-2,5$ г/мм³ [19] – зону заклинювання. У порівнянні з щільністю МАІ на лобовій поверхні зразків $1,3-1,4$ г/мм³ [2] саме наявність

цієї зони в МАІ і буде збільшувати значення M_{ef} . Дане твердження вимагає ретельного експериментального підтвердження.

У порівнянні з результатами отриманих на порошку з розміром частинок 200/100 мкм всі встановлені закономірності зберігаються і мають більш яскраво виражений характер. Значення M_{ef} при МАО більшим порошком як правило вище, що підтверджується топографіями поверхонь, що представляють різницю в значеннях $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$, отриманих для порошків 400/315 і 200/100 мкм (рис. 3.5.2).

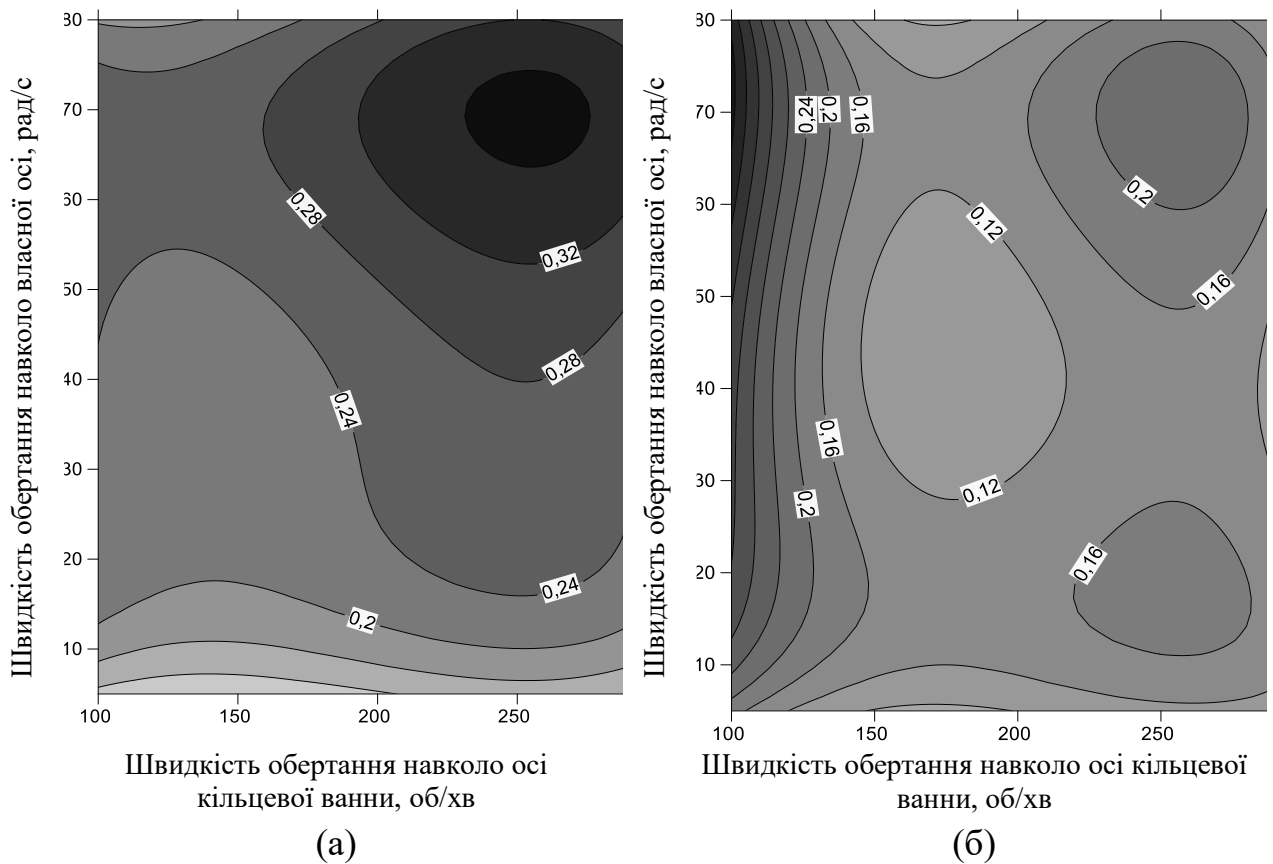


Рис.3.5.2 - Різниця між залежностями M_{ef} при обробленні Д16Т - (а), БрАЖ - (б), ВТЗ-1– (в) порошком Ферромап при $B = 0,18$ Тл отриманими при фракціях 400/315 та 200/100 мкм

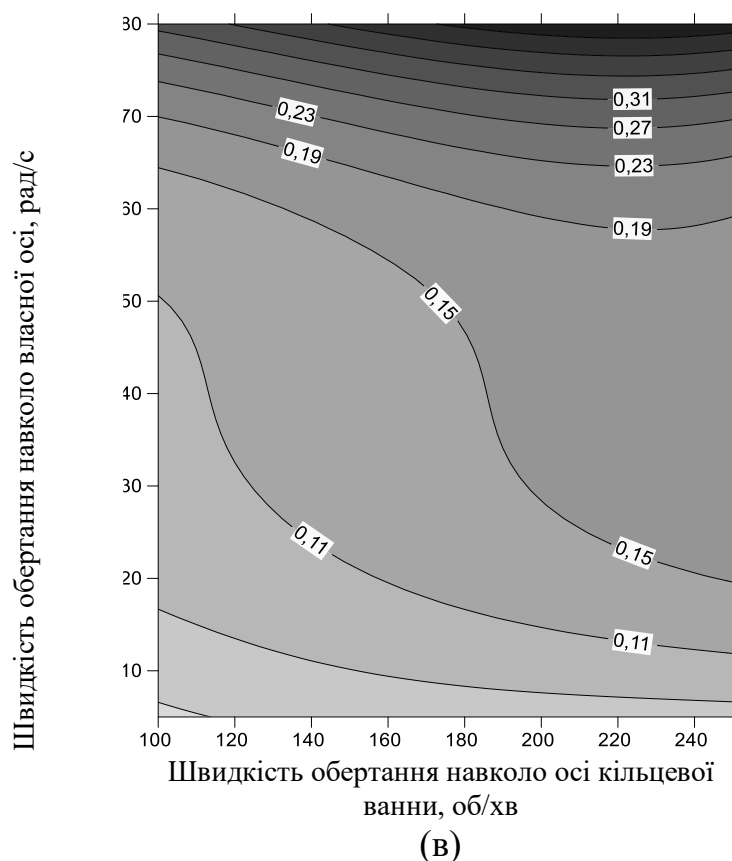


Рис.3.5.2 (продовження)- Різниця між залежностями M_{ef} при обробленні Д16Т - (а), БрАЖ - (б), ВТЗ-1– (в) порошком Ферромап при $B = 0,18$ Тл отриманими при фракціях 400/315 та 200/100 мкм

3.5.3 МАО парамагнетиків округлим порошком Полімам-М

Аналіз процесу МАО порошком Полімам-М з округлими частинками показав, що особливості взаємодії МАІ з поверхнею зразка мають суттєві відмінності від оброблення осколковим порошком Ферромап. Отримані залежності $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ або асимптотично наближаються до деякої постійної величини, яка або залежить від швидкості обертання V_0 або мають екстремальний характер. Причому область, де M_{ef} починає слабо змінюватися або має місце екстремум, залежить від розміру частинок МАІ, величини магнітної індукції і починається при частотах обертання $\omega_0 = 30-40$ рад/с, причому чим більше V_0 , тим при більших значеннях ω_0 починається третя область. Значення M_{ef} при яких має місце екстремум або величини моменту, що змінюються несуттєво наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

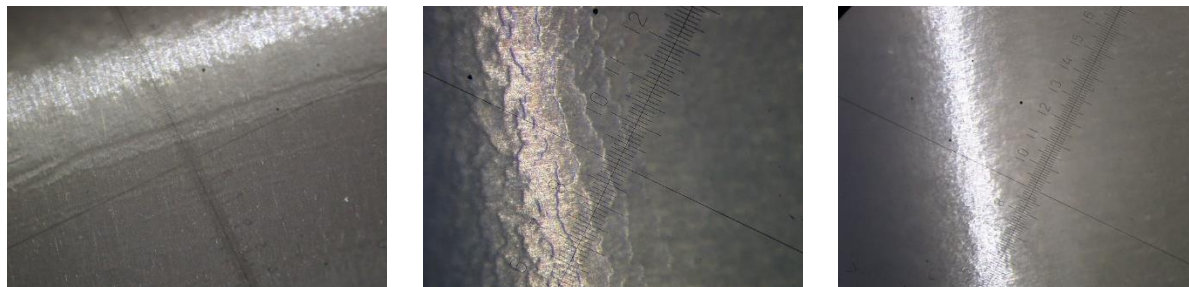
Значення $M_{ef}^{ст}$ для різних МАП і матеріалів деталей, що оброблюються

Матеріал зразка	Порошок МАІ	Магнітна індукція, ТЛ	$M_{ef}^{ст}$, Н*м
Титан ВТЗ-1	Поліам - М 200/100	250	0,37 – 0,45
		400	0,5 – 0,58
	Поліам - М 400/315	250	0,55 – 0,65
		400	0,6 – 0,75
Бронза - БрАЖ	Поліам - М 200/100	250	0,5 – 0,6
		400	0,6 – 0,78
	Поліам - М 400/315	250	0,7 – 0,8
		400	0,75 – 0,88
Алюміній Д16Т	Поліам - М 200/100	250	0,5
		400	0,6
	Поліам - М 400/315	250	0,45
		400	0,5

Різниця в поведінці частинок порошку в третій області при МАО округлим порошком Поліам-М можна пояснити особливостями руху частинок в представницьких обсягах в МАО. При МАО округлим порошком частинки починають активно провертатися, здійснюючи переважно скобління і пластичне деформування поверхні шару зразків проти мікрорізання і скобління гострими виступами частинок Ферромап з осколковою формою. Підтвердженням цього є зовнішній вигляд поверхонь зразків після МАО (рис.3.5.3).

Слід зазначити, що чим активніше реалізується процес пластичного деформування поверхні шару, тим більше значення величини M_{ef} . Необхідно відзначити, що якщо технологічний параметр V_0 при МАО осколковим порошком має слабкий вплив на значення M_{ef} і їх зміну, то при обробці

округлим порошком встановлено, що чим вище швидкість обертання зразків навколо осі кільцевої ванни, тим нижче величина M_{ef} . Це пов'язано з тим, що зі зростанням швидкості переміщення зразків час реального контакту кожної окремої частинки з поверхневим шаром деталі зменшується.



(а) Титан ВТЗ-1

(б) Бронза БрАЖ

(в) Алюміній Д16Т

Рис 3.5.3 Зовнішній вигляд поверхонь парамагнітних зразків після проведення МАО

В результаті цього ймовірність їх впровадження необхідна для здійснення процесу мікрорізання нижча, ніж для здійснення скобління і пластичного деформування, тобто чим твердіше матеріал зразків, тим менше енергії витрачається на пластичну деформацію і тим менше буде величина M_{ef} , що виникає при контактуванні частинок МАІ з поверхнею деталей.

3.5.4 МАО феромагнітної сталі 40Х13

При МАО феромагнітної сталі практично на всіх залежностях $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ спостерігається чітка тенденція зміни величини ефективного моменту, за якою є характерним зменшення цього моменту при збільшенні технологічного параметру V_0 . Причому в деяких випадках зменшення є дуже різким, особливо це помітно при обробленні осколковим порошком Ферромап 200/100 мкм.

Найбільш ефективний момент при обробленні будь-яким типом порошку досягається при $V_0 = 100$ об/хв. Це насамперед пов'язано з магнітними властивостями оброблюваного матеріалу. Тобто, при найменшій швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни, сила динамічного притиску порошкового МАІ на деталь не є найбільшою, а переважають сили магнітного походження, які призводять до активного притягування частинок

МАІ до всієї поверхні, а не тільки до тієї частини, що обумовлена дією динамічного притискання при обертанні зразків навколо кільцевої ванни.

Слід зазначити, що максимальний момент не залежить від розміру фракції окремо взятого порошку.

Зміна величини магнітної індукції в загальному має вплив лише тільки на показники ефективного моменту, отримані при обробленні зі швидкістю головного шпинделя $V_0 = 100$ об/хв. Крім того, при обробленні сталі 40Х13 осколковим порошком Ферромап спостерігається майже однакові значення M_{ef} при швидкості переміщення зразка $V_0 \geq 150$ об/хв. Підтверджується це топографією поверхонь, що представляє різницю між залежностями $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ отриманими при $B = 0,25$ і $0,18$ Тл (рис. 3.5.4).

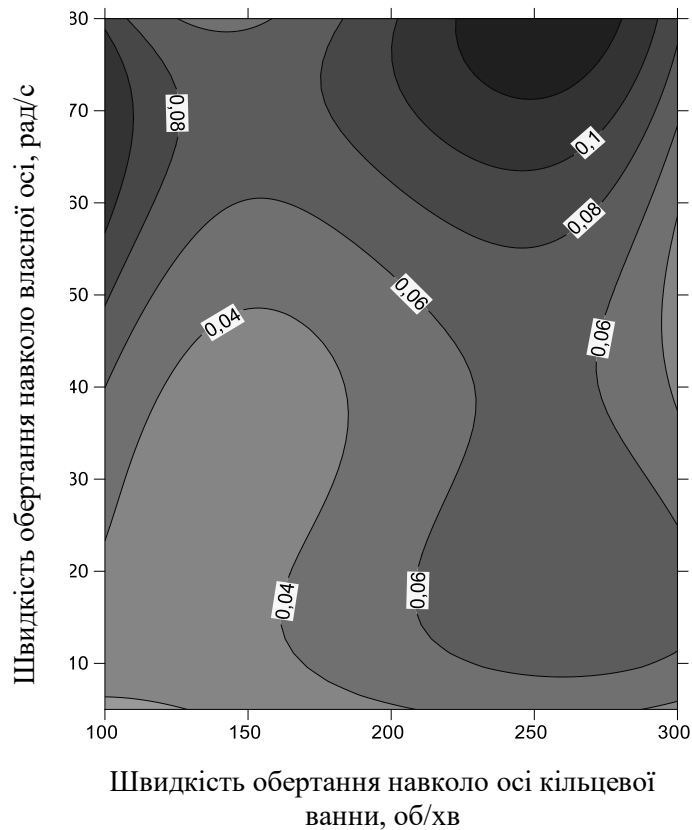


Рис. 3.5.4 - Різниця між залежностями M_{ef} при обробленні 40Х13 порошком Ферромап 400/315 отриманими при $B = 0,25$ та $0,18$ Тл.

Макс. значення різниці складає $M_{ef} = 0,1 \text{ Н*м}$

При аналізі процесу МАО ферромагнітної сталі округлим порошком Полімам-М (200/100 мкм) та осколковим Ферромап встановлено, що порівняно з порошком Полімам-М (400/315 мкм) на залежностях $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ виникає третя область в діапазонах частот $\omega_0 = 65-70$ рад/с. У цій зоні відбувається різке зростання величини M_{ef} внаслідок переуцільнення МАІ між поверхнею зразка і полюсними наконечниками, які формують зону оброблення. У таблиці 3.3 приведені значення лінійних функцій відносно швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни та магнітної індукції, за якими відбуваються зміни в умовах формування МАІ, що призводять до зміни ефективного моменту M_{ef} в діапазоні $\omega_0 = 5 - (60...65)$ рад/с, при МАО округлим порошком Полімам-М 200/100 мкм та осколковим Ферромап обох фракцій.

Таблиця 3.3

Значення лінійних функцій відносно швидкості обертання зразків

Умови обробки	Полімам-М 200/100 мкм	Ферромап 200/100 мкм	Ферромап 400/315 мкм
$V = 100$ об/хв, $B = 0,18$ Тл	$y = 0,0128x + 0,178$	$y = 0,0112x + 0,0503$	$y = 0,0101x + 0,0005$
$V = 100$ об/хв, $B = 0,25$ Тл	$y = 0,0161x + 0,1188$	$y = 0,0128x - 0,0069$	$y = 0,0117x + 0,001$
$V = 150$ об/хв, $B = 0,18$ Тл	$y = 0,0121x + 0,1146$	$y = 0,0069x - 0,0094$	$y = 0,0086x + 0,0134$
$V = 150$ об/хв, $B = 0,25$ Тл	$y = 0,0127x + 0,0825$	$y = 0,0091x + 0,0135$	$y = 0,0095x + 0,0347$
$V = 200$ об/хв, $B = 0,18$ Тл	$y = 0,0096x + 0,0588$	$y = 0,0066x + 0,0129$	$y = 0,0074x + 0,0238$
$V = 200$ об/хв, $B = 0,25$ Тл	$y = 0,0106x + 0,0293$	$y = 0,0065x + 0,0131$	$y = 0,0085x + 0,0384$
$V = 250$ об/хв, $B = 0,18$ Тл	$y = 0,0087x + 0,1115$	$y = 0,0051x + 0,0295$	$y = 0,0072x + 0,07$
$V = 250$ об/хв, $B = 0,25$ Тл	$y = 0,009x + 0,0967$	$y = 0,006x + 0,0083$	$y = 0,0078x + 0,0821$
$V = 300$ об/хв, $B = 0,25$ Тл	$y = 0,008x + 0,0961$	$y = 0,0062x + 0,0227$	$y = 0,0073x + 0,1079$

За аналізом процесу МАО феромагнітної сталі не спостерігається чіткої наявності першої зони зміни ефективного моменту. Але виключенням є МАО більшим осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм, при якому є характерним аномальне підвищення ефективного моменту за $V_0 > 250$ об/хв не досягаючи зразком швидкості навколо власної осі приблизно $\omega_0 = 20$ рад/с.

Зовнішній вигляд поверхонь зразка після МАО (рис. 3.5.5). У порівнянні з зовнішнім виглядом поверхонь парамагнітних, більш пластичних матеріалів (рис. 3.5.3) відсутні сліди пластичної деформації мікронерівностей, а наявним є типові сліди від мікрорізання і скобління.

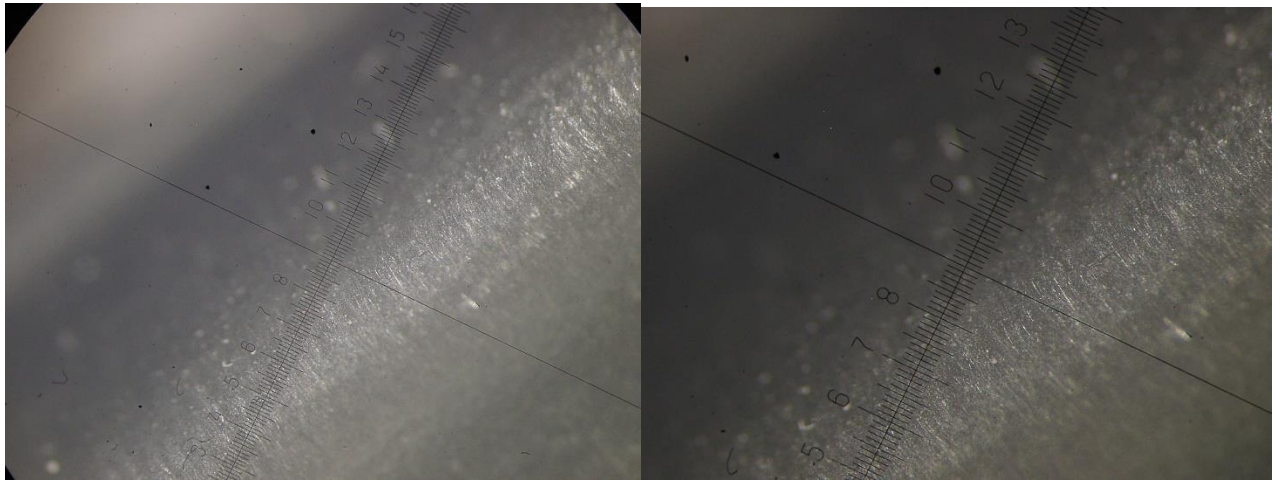


Рис. 3.5.5 - Зовнішній вигляд поверхні феромагнітного зразка зі сталі 40Х13

Таким чином за результатами отриманими під час проведення досліджень ударно – фрикційної взаємодії МАІ на оброблювану поверхню зразків, було отримано раціональні режими, які рекомендовано для МАО матеріалів з: алюмінію Д16Т, бронзи – БрАЖ, титану ВТЗ-1 та сталі 40Х13.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА START-UP ПРОЕКТУ

На сьогоднішній день метод МАО є одним з найперспективніших видів обробки різанням у сучасному автоматизованому виробництві. Найбільш поширеною є схема МАО з кільцевим розташуванням робочих зазорів, так як вона має можливість керування технологічних чинників процесу, потрібного базування деталі у шпинделі установки та регулювання її траєкторії руху під час процесу МАО.

Тому, актуальним є впровадження Start-Up проекту, щодо дослідження трибологічних властивостей МАІ по відношенню до оброблюваної поверхні. Це пояснюється тим, що процес МАО в умовах кільцевої ванни супроводжується ударно-фрикційною взаємодією МАІ на деталь, дослідження якої може слугувати для визначення раціональних режимів МАО для поверхонь з парамагнітних і феромагнітних матеріалів.

Для початку створимо стислий опис ідеї проекту, що подано у таблиці 4.1.

4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї start-up проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Основна ідея дослідження трибологічних властивостей МАІ полягає в тому, що інтерференція ударно-фрикційної взаємодії дозволяє досягати потрібних фізико-механічних властивостей деталі при МАО	У автоматизованому виробництві машинобудування	Забезпечення менших витрат на виробництво
	У інструментальній галузі машинобудування	Забезпечення кращої зносостійкості інструмента
	У сфері медичного обладнання	Забезпечення необхідної форми різальної кромки

Технології для реалізації ідеї проекту відображені у таблиці 4.2.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.2 – Технологічний аудит ідеї проекту

№	Технологічна вимога	Технологія реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Наявність установки	Закупівля установки для МАО	+	+
2	Наявність феро, - та парамагнітних зразків	Замовлення або виготовлення зразків	+	+
3	Використання МАП	Замовлення МАП у постачальника	+	+
4	Визначення ударно-фрикційної взаємодії МАІ	Проведення експериментальних досліджень	+	+

Представлені вимоги та їх технологічні рішення є в наявності та доступними на ринку інструментального виробництва.

4.3 Аналіз ринкових можливостей Start-Up проекту

Завдяки аналізу ринкових можливостей проекту є можливим планування його подальшого розвитку, враховуючи потреби потенційних замовників. Необхідно порівняти недоліки та переваги проекту, визначити потенціальні можливості, деякі фактори загроз до його реалізації, визначитися з цільовою аудиторією.

У таблиці 4.3 визначаємо головні потреби у ринку по відношенню до проекту, цільові галузі машинобудування, вимоги клієнтів до виробу та відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів.

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів Start-Up проекту

	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Висока якість обробки та забезпечення потрібних властивостей	Загальне машинобудування, інструментальне виробництво, медична галузь	Технічні та геометричні характеристики виробів	Технічна підтримка та наявність гарантії на товар
2.	Зменшення кількості виробів, що вийшли з ладу	Загальне машинобудування, медична галузь	Надійність та довговічність виробів	Забезпечення надійності оброблення та зниження вірогідності браку
3.	Продуктивність виробництва	Загальне машинобудування, інструментальне виробництво, медична галузь	Вартість, експлуатаційна завантаженість.	Забезпечення продуктивності оброблення та зменшення собівартості

Після характеристики потенційних клієнтів Start-Up проекту виконуємо аналіз можливих загроз та потенційних можливостей проекту, що подано у таблицях 4.4 та 4.5.

Таблиця 4.4 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція організації
1	Процес МАО	Організація використовує старі методи оброблення	Пояснення переваг методу
2	Не оптимально підібрані режими	Організація не враховує інтерференцію ударно-фрикційної взаємодії МАІ на оброблювану деталь	Демонстрація переваг використання рекомендованих технологічних режимів

Продовження таблиці 4.4

3	Схеми та установки для МАО	Організація використовує старі схеми або установки для МАО	Пояснення переваг схеми за наявності кільцевого розташування зазорів
---	----------------------------	--	--

Таблиця 4.5 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
1	Поширення МАО у автоматизованому виробництві	Поширення МАО може вплинути на збільшення попиту інформації про метод	Забезпечити подальші дослідження в цьому напрямку
2	Відкриття нових явищ при МАО	Знаходження явищ або недоліків методу, що потребує більшого дослідження	Забезпечити подальші дослідження в цьому напрямку

Останній пункт для завершення аналізу ринкових можливостей Start-Up проекту – створення порівняльної таблиці переваг і недоліків проекту, наявності можливих загроз та можливостей.

Таблиця 4.6 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - Якість - Варіативність - Універсальність - Гнучкість 	<ul style="list-style-type: none"> - Залежність від використання МАО на ринку - Затрати часу
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - Поширене використання у автоматизованому виробництві - Відкриття нових явищ 	<ul style="list-style-type: none"> - Знайдення недоліків - Зниження вірогідності використання МАО

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Проводимо вибір цільових груп потенційних споживачів для розробки ринкової стратегії проекту.

Таблиця 4.7 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Автоматизоване виробництво машинобудування	90%	Споживачі можуть мати потребу	60%	75%
2	Інструментальне виробництво	85%	Споживачі мають потребу	85%	60%
3	Виробництво медичного обладнання	80%	Інформація необхідна споживачам	75%	70%

Далі, після аналізу цільових груп потенційних споживачів, визначаємось з базовою стратегією розвитку, що відображена у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто-спроможні пропозиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Подальші дослідження впливу МАІ на деталь за рахунок нових технологій	Якомога швидке досягнення керуючої позиції	Орієнтованість на потреби замовника	Стратегія фокусу

Оскільки проект орієнтований на специфічну нішу, де потреби клієнтів можуть сильно відрізнятися від іншого ринку, вибираємо стратегію фокусу.

Для стратегії фокусу є характерним:

- вузька ринкова ніша
- нижчі витрати на технічне обслуговування вибраної ніші або здатність надавати клієнтам ніші те, що відповідає їхнім потребам
- специфічні потреби обраного сегменту ринку
- підкреслення унікальної можливості виробника задовольнити специфічні потреби покупців
- суворе дотримання принципу більш повного по порівнянню з конкурентами задоволення потреб клієнтів обраної ніші
- не втрачати імідж компанії і не витрачати сили на перемикання на інші сегменти і розширення асортименту з метою збільшення ринку

Таблиця 4.9 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Унікальність проекту	Пошук нових споживачів або залучення споживачів конкурентів	Копіювання характеристик компанії конкурента	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Так	Ні	Пристосовницька

Тепер останнім кроком, визначившись з потребами обраного сегменту ринку та його потенціальними клієнтами, а також з базовою стратегією розвитку, створюємо стратегію позиціонування (табл. 4.10). За рахунок позиціонування компанія створює імідж і ключові конкуренто-спроможні позиції, за якими їх асоціюють клієнти.

Таблиця 4.10 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто-спроможні позиції власного стартапу	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію проекту
1	Якість, продуктивність, надійність	Стратегія фокусу	Орієнтованість на потреби замовника, розвиток технологій	Універсальність, продуктивність,

Start-Up проект являється доцільним, оскільки:

1. Метод МАО є перспективним і потребує подальшого розвитку
2. Користується попитом серед багатьох галузей машинобудування
3. Займає специфічну нішу, отже є конкурентноздатним
4. Має суворе ставлення до задоволення потреб замовника, щодо якості кінцевого продукту.

ВИСНОВКИ

В результаті проведення експериментальних досліджень було встановлено, що:

1. При МАО в умовах великих магнітних зазорів ключову роль відіграє сила тиску та тертя МАІ на деталь. На ударно - фрикційну взаємодію МАІ на оброблювану поверхню у процесі МАО впливає ряд технологічних чинників, а саме: величина магнітної індукції, швидкість обертання зразка навколо осі кільцевого розташування робочих зазорів та власної осі, матеріал оброблюваною деталі та напруження, що подається на шпиндель установки.

2. При обробленні парамагнітних матеріалів осколковим порошком Ферромап 200/100 мкм встановлено, що зі зростанням величини V_0 , як правило, спостерігається незначне зниження величини M_{ef} незважаючи на те, що величина динамічного притиску елементів МАІ до поверхні зразків з ростом V_0 буде збільшуватися. Існує вірогідність виникнення активної адгезійної взаємодії бронзових і алюмінієвих зразків при МАО порошком Ферромап 200/100 мкм, що виникає не при максимальних значеннях швидкості переміщення зразка.

3. При обробленні парамагнітних матеріалів більшим осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм на підвищених частотах обертання зразків утворюються віялоподібні ущільнення, і під дією сил тертя зміщуються в область між бічною поверхнею зразків і поверхневого полюсного наконечника. У зазначеній області МАІ утворює зону з підвищеною щільністю – зону заклинювання.

4. При МАО округлим порошком Полімам-М при підвищених частотах обертання зразка навколо власної осі частинки МАП починають активно провертатися, здійснюючи переважно скобління і пластичне деформування поверхні шару зразків проти мікрорізання і скобління гострими виступами частинок Ферромап з осколковою формою. Чим активніше реалізується процес пластичного деформування поверхні шару, тим більше значення величини M_{ef} . При обробці округлим порошком встановлено, що чим вище

швидкість обертання зразків навколо осі кільцевої ванни, тим нижче величина $M_{\text{еф}}$. Це пов'язано з тим, що зі зростанням швидкості переміщення зразків час реального контакту кожної окремої частинки з поверхневим шаром деталі зменшується.

5. На оброблення феромагнітної сталі розмір частинок порошку має мінімальний вплив. При МАО в діапазонах частот обертання зразка $\omega_0 = 65-70$ рад/с сталь 40Х13 має схильність до різкого підвищення величини ефективного моменту. Збільшення величини магнітної індукції в загалом має вплив лише тільки на показники ефективного моменту, отримані при обробленні зі швидкістю головного шпинделя $V_0 = 100$ об/хв.

6. За результатами виконаних досліджень реологічних властивостей МАІ визначено раціональні режими, які рекомендовано для МАО матеріалів з: алюмінію Д16Т, бронзи – БрАЖ, титану ВТЗ-1 та сталі 40Х13 (Додаток Б).

Список використаної літератури:

1. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.
2. Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий. – Житомир: ПП «Рута», 2017. – 272 с.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента. – Л.:Машиностроение. – 1986. – 176 с.
4. Оликер В.Е. Разработка и свойства литых магнитно-абразивных порошков. Препринт. – Киев:ИПМ АН УССР, 1984. – 58 с.
5. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Мн.:Наука и техника, 1981. – 328 с.
6. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Оликер. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
7. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. канд. техн. н аук: 05.03.01 /Ткачук І.В. – Київ, 2015. – 163 с.
8. Степанов О.В. Дослідження процесу формування магнітно-абразивного порошкового інструменту для обробки деталей складної форми. Автореф.дис. ... канд.техн.наук. – Київ, 1997. – 16 с.
9. Майборода В.С. Дослідження триботехнічних особливостей формування порошкового ферабразивного інструменту при магнітно-абразивній обробці // Металознавство та обробка металів. - 1998. - №1-2. - С.59-63.
10. Давидюк А. І. Силові характеристики в магнітно-абразивному інструменті в робочій зоні кільцевого типу: магістерська дис. :133 Галузеве машинобудування / Давидюк А. І. – Київ, 2018. – 104 с.
11. Майборода В.С. Эффективность применения при магнитно-абразивной обработке восстанавливающих стержневых элементов /В.С.Майборода,

Д.Ю.Джулий, И.В.Ткачук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2012. - №30 – С. 171-177.

12. Майборода В.С. Формирование магнитно-абразивного инструмента в рабочих зонах установок типа «кольцевая ванна» /В.С.Майборода, Д.Ю.Джулий, И.В.Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. - Вип.9(205) – С.127-133.

13. Майборода В.С. Дослідження характеристик внутрішнього тертя сумішей магнітно-абразивних порошків у магнітному полі // Порошкова металургія.- 2000. -№3-С.62-67.

14. Майборода В.С. Внутрішнє тертя у магнітно-абразивному інструменті // Наукові вісті НТУУ «КПІ» - №3-2000.-С.62-67.

15. Майборода В.С. Реологические характеристики магнитно-абразивных порошков в магнитном поле. /В.С.Майборода, О.В.Степанов, Н.Л.Тараненко, В.Я.Верменко // Порошковая металлургия - 1994. - №12 - С.62-66.

16. Майборода В.С. Дослідження особливостей тертя порошкового магнітно-абразивного інструменту об поверхню деталей при магнітноабразивній обробці/В.С.Майборода, О.А.Хоменко, В.М.Гейчук, Д.В.Белановський, Н.В.Ульяненко //Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – 2001. – Вып. 41. – С. 113-119.

17. Гейчук В.М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні Автореф дисс.докт.техн.наук. 05.03.01/В.М.Гейчук – К, - 2012. – 40 с.

18. Смолинець О.Р. Дослідження впливу швидкостей магнітно-абразивного оброблення на корисний момент на шпинделі при обробленні зразків з різного матеріалу/ О.Р. Смолинець, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» 2017.

19. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей : дис.канд.техн.наук. : 05.02.08 /.Майборода Виктор Станиславович – К., - 1988. – 170 с.
20. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 376 с.

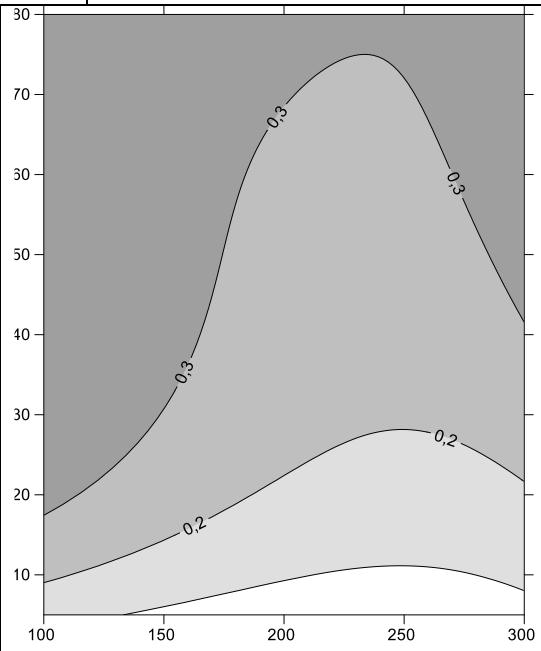
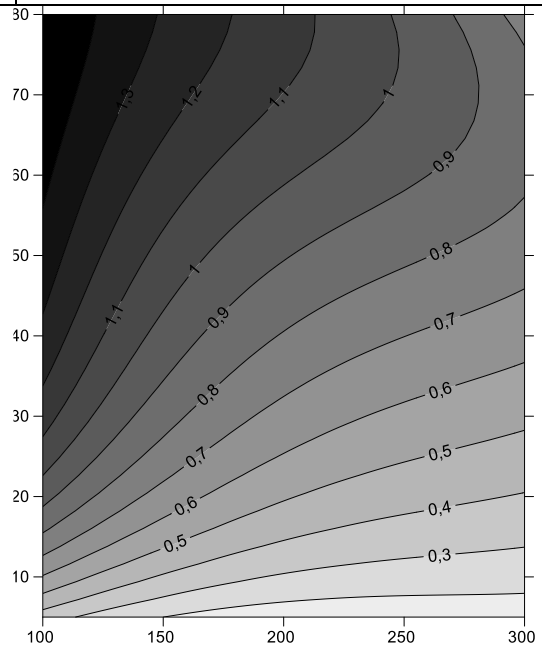
Додаток А

Функції та коефіцієнти отримані для створення топограм змін величини
ефективного моменту, на прикладі деяких топограм

Вигляд загальної функції залежності зміни ефективного моменту $M_{ef} = f(V_0, \omega_0)$ від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни та власної осі:

$$Z(X,Y) = A_{00} + A_{01} Y + A_{02} Y^2 + A_{03} Y^3 + A_{04} Y^4 + A_{10} X + A_{11} XY + A_{12} XY^2 + A_{13} XY^3 + A_{20} X^2 + A_{21} X^2Y + A_{22} X^2Y^2 + A_{30} X^3 + A_{31} X^3Y$$

№	Значення коефіцієнтів для топограми бронзи БрАЖ	Значення коефіцієнтів для топограми сталі 40Х13
A ₀₀	0.11283257456219	0.61993236557606
A ₀₁	0.028563579571796	0.10536654174824
A ₀₂	-0.00073813280684252	-0.00207726039765
A ₀₃	4.997344701276E-006	1.7945995612988E-005
A ₀₄	-7.5064999948775E-009	-6.1827409670687E-008
A ₁₀	-0.00083874052082367	-0.0090239053474439
A ₁₁	-2.4766249681397E-005	-0.00046386805711044
A ₁₂	2.6664083053431E-006	7.5862748751861E-006
A ₁₃	-1.1973887068434E-008	-3.1043815199301E-008
A ₂₀	-6.7403540163432E-007	3.8639486690749E-005
A ₂₁	-4.1040941237401E-007	8.0778274934187E-007
A ₂₂	-2.2585491350482E-009	-7.7472722972795E-009
A ₃₀	8.2375352077224E-009	-5.0534746018022E-008
A ₃₁	9.8011525599661E-010	-5.0108372966307E-010

Швидкість обертання навколо власної осі, рад/с		Швидкість обертання навколо власної осі, рад/с	
	Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни, об/хв		Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни, об/хв
	(а)		(б)

Топограми зміни ефективного моменту при обробленні Бронзи - БрАЖ порошком Ферромап (200/100 мкм) при $V=0,18$ Тл (а), та Сталі 40Х13 порошком Поліам-М (400/315 мкм) при $V=0,25$ Тл (б)

Додаток Б

Раціональні режими для МАО парамагнітних та феромагнітних матеріалів

Матеріал	Марка та зернистість порошку	Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни, об/хв	Швидкість обертання деталі навколо власної осі, рад/с	Магнітна індукція, Тл
Алюміній Д16Т	Полімам-М 400/315	100 – 150	40 – 80	0,25
	Полімам-М 200/100	100 – 150	50 – 80	0,25
	Ферромап 400/315	100 - 150	40 – 80	0,18 – 0,25
	Ферромап 200/100	100 - 150	45 – 80	0,18 – 0,25
Бронза БрАЖ	Полімам-М 400/315	100 – 150	35 – 70	0,18
	Полімам-М 200/100	200	50 – 70	0,18
	Ферромап 400/315	200 – 250	45 – 70	0,18 – 0,25
	Ферромап 200/100	100 - 250	50 – 80	0,18 – 0,25
Титан ВТЗ-1	Полімам-М 400/315	150 – 250	50 – 80	0,18
	Полімам-М 200/100	200 – 250	55 – 70	0,18
	Ферромап 400/315	100 – 250	50 – 65	0,18 – 0,25
	Ферромап 200/100	100 - 250	50 – 75	0,18
Сталь 40Х13	Полімам-М 400/315	100 – 250	40 – 70	0,18
	Полімам-М 200/100	100 – 250	40 – 65	0,18
	Ферромап 400/315	100 – 300	40 – 65	0,18 – 0,25
	Ферромап 200/100	200 – 250	40 – 65	0,18 – 0,25

Додаток В
Матеріали доповідей

ВПЛИВ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕФЕКТИВНИЙ МОМЕНТ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ В КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ В УМОВАХ ВЕЛИКИХ МАГНІТНИХ ЗАЗОРІВ

Майборода В.С., докт. техн. наук, професор, Заставський К. О., аспірант,

Жук Р.Б., студент

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Магнітно-абразивне оброблення – перспективний метод фінішного оброблення деталей простої та складної форми, що має ряд як переваг, так і недоліків. Одним з недоліків є відсутність достатньої кількості інформації про процес, особливо інформації про силову взаємодію між деталлю та МАІ (магнітно-абразивним інструментом) що формується з магнітно-абразивного порошку (МАП). Це стримує широке впровадження методу МАО в виробництві [1].

Експериментальне дослідження виконували на установці типу кільцева ванна при швидкостях обертання робочої головки V , яка встановлена в шпиндель верстата в діапазоні 100–300 об/хв., швидкість обертання навколо осі деталі становила 100 – 750. За МАП було використано порошок Полімам-М з різною зернистістю 400/315 та 200/100 мкм. Магнітна індукція в робочих зонах коаксіальної магнітної системи складала $B=0,18$ Тл та $B=0,25$ Тл. Процес МАО виконували в умовах формування стабільного МАІ. Зміна швидкості обертання мінішпинделя забезпечувалась за рахунок зміни напруги U на двигуні постійного струму, який є індивідуальним приводом мінішпинделя в діапазоні від 3 до 15 В з кроком 1 В. Для дослідження використовувались циліндричні зразки діаметром 16 мм та довжиною 30 мм встановлені паралельно осі головки і магнітної кільцевої ванни, виготовлені з алюмінію, бронзи, титанового сплаву (парамагнітні матеріали) та сталі 40Х13 (феромагнітна) [1-2].

Отримані результати представлено у вигляді поверхонь – залежностей зміни ефективного моменту від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни і власної осі деталі при різних значеннях магнітної індукції в робочому зазорі [2]. В подальшому було побудовано залежності, які представляють різницю між вище зазначеними поверхнями. Кінцевий результат наведено на рис. 1 – 4.

На рис. 1 показано, що для порошоків з зернистістю 200/100 мкм підвищення магнітної індукції в робочих зазорах від 0,18 до 0,25 Тл має відчутний вплив при зростанні швидкості обертання навколо власної осі, а для більшої зернистості (400/315 мкм) – при збільшенні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Це може бути зумовлено процесом, зв'язаним з заклинюванням часток порошку більшого розміру та більшим впливом на оброблення саме фактору розміру порошку, який ущільнюється перед деталлю, що оброблюється, а утворене ущільнення з зростанням швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни до 200 – 220 об/хв зміщується в зону між поверхнею полюсного наконечника і деталлю, утворюючи зону заклинювання.

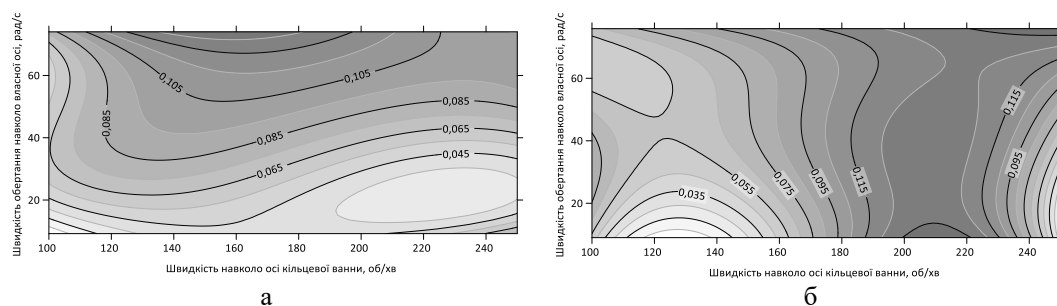


Рис. 1 Різниця в залежностях зміни значень ефективного моменту, отриманих при $B=0,25$ і $B=0,18$ Тл при обробленні алюмінію порошком Полімам-М з фракцією а – 200/100 мкм, б – 400/315 мкм

Оброблення бронзи (рис.2) порошком дрібної фракції супроводжується збільшенням впливу магнітної індукції при зростанні швидкості обертання навколо власної осі та незначних швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни – до 160 об/хв.

При обробленні титану (рис.3) характер зміни ефективного моменту аналогічний результатам отриманим при обробленні алюмінію порошком Полімам-М з тією різницею, що найбільший вплив виявляється при швидкостях обертання зразків навколо власної осі 40-60 рад/с. При чому для дрібного порошку зміщення ущільненої зони відбувається при більших швидкостях обертання деталі навколо власної осі і пояснюється меншою інерційністю (масою) представницьких ущільнень з яких формується МАІ. Це пов'язано з характером адгезійної взаємодії матеріалу порошку з матеріалом деталі, що оброблюється.

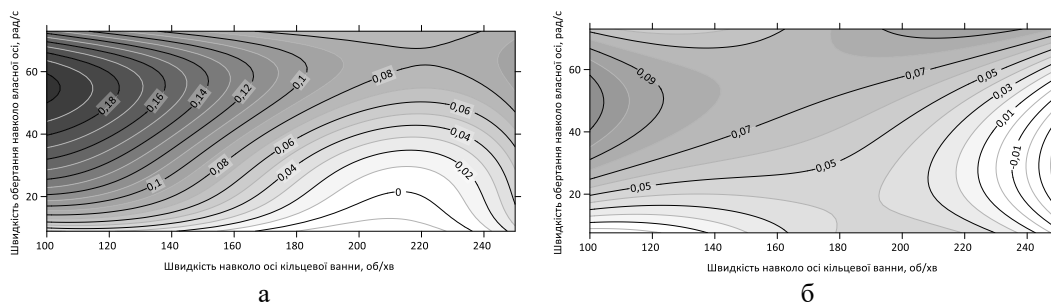


Рис. 2 Різниця в залежностях зміни значень ефективного моменту, отриманих при $V=0,25$ і $V=0,18$ Тл при обробленні бронзи порошком Полімам-М з фракцією а – 200/100 мкм, б – 400/315 мкм

Для оброблення феромагнітної сталі (рис.4) характерне збільшення впливу магнітної індукції при низьких значеннях швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни та високих значеннях швидкості обертання навколо власної осі. У порівнянні з немагнітними металами, сталь має більший вплив магнітного поля на ефективний момент, це зумовлено магнітними властивостями сталі.

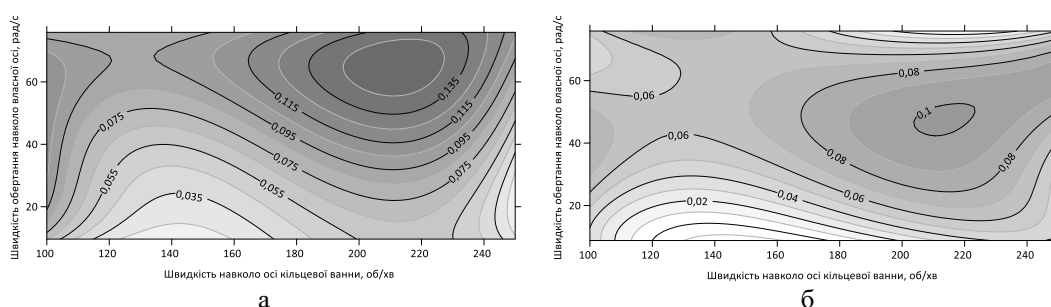


Рис. 3 Різниця в залежностях зміни значень ефективного моменту, отриманих при $V=0,25$ і $V=0,18$ Тл при обробленні титану порошком Полімам-М з фракцією а – 200/100 мкм, б – 400/315 мкм

Встановлено, що збільшення розміру зерен порошку при обробленні сталі сприяє зростанню впливу магнітної індукції на ефективний момент, а при обробленні немагнітних матеріалів – зменшенню. Таке явище можна пояснити магнітними властивостями порошку - більшою силою, з якою відбувається притягнення груп більш крупних зерен до поверхні феромагнітної деталі.

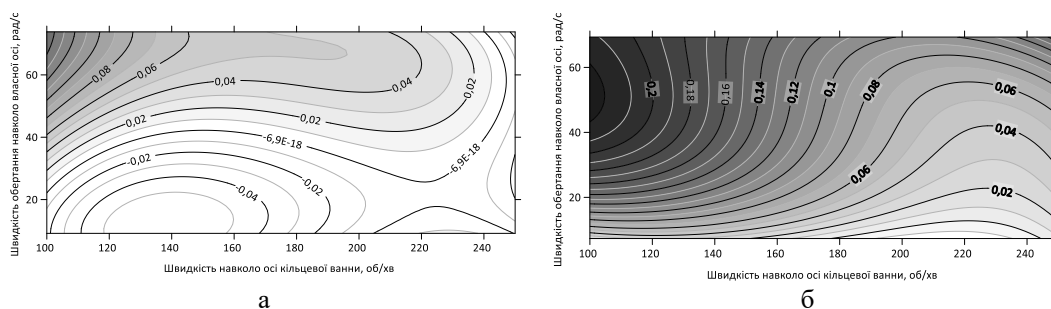


Рис. 4 Різниця в залежностях зміни значень ефективного моменту, отриманих при $V=0,25$ і $V=0,18$ Тл при обробленні сталі порошком Полімам-М з фракцією а – 200/100 мкм, б – 400/315 мкм

Список посилань

1. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы [Электронный ресурс]: монография / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий ; М-во образования и науки Украины, Нац. техн. ун-т Украины “Киев. политехн. ин-т им. И. Сикорского”. – Электронные текстовые данные (1 файл: 10,75 Мбайт). – Житомир : Рута, 2017. – 272 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>
2. Заставський К.О. Дослідження силових характеристик взаємодії інструменту з деталлю при магнітно-абразивному обробленні у кільцевій ванні: магістерська дис. :131 Прикладна механіка / Заставський К.О. – Київ, 2019. - 111с.



*Національний технічний університет України
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського*

МЕХАНІКО – МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра конструювання машин

***“ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНО – АБРАЗИВНОГО
ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ РОБОЧИХ ЗАЗОРІВ ”***

Виконав: студент 6 курсу, групи МІ -91мп, Жук Р.Б.

Науковий керівник: д. т. н. Майборода В.С.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

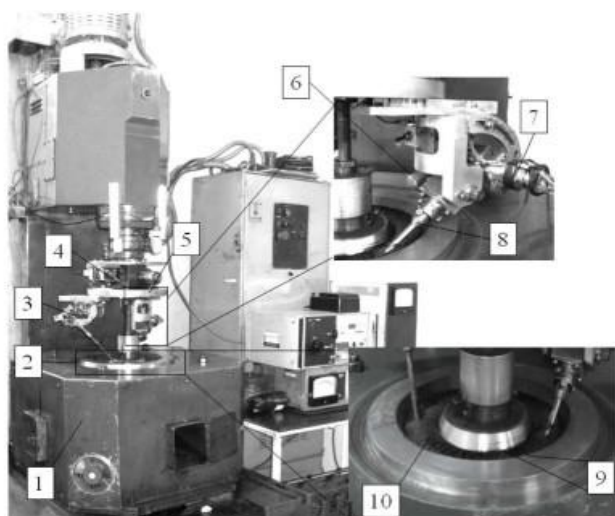
Мета дипломного проекту:

Дослідження ударно-фрикційної взаємодії магнітно – абразивного інструменту (МАІ) на оброблювану поверхню в умовах кільцевого розташування великих магнітних робочих зазорів парамагнітних та феромагнітних матеріалів при зміні технічних параметрів МАО

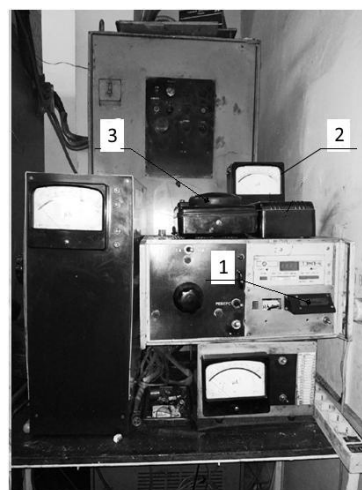
Задачі дипломного проекту:

- Зробити аналіз існуючих досліджень по реологічним та трибологічним властивостям МАІ при МАО
- Створення методики для дослідження трибологічних властивостей МАІ у процесі МАО
- Виконати дослідження характеру трибологічної взаємодії МАІ на зразки з різних матеріалів в умовах кільцевого розташування робочих зазорів в залежності від технологічних параметрів процесу МАО
- Знайти раціональні режими МАО для парамагнетиків та феромагнетиків у кільцевій ванні

УСТАНОВКА ДЛЯ МАО З РОБОЧОЮ ЗОНОЮ ТИПУ «КІЛЬЦЕВА ВАННА»



Експериментальна установка типу Кільцева ванна”



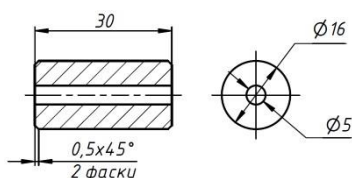
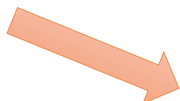
Обладнання для вимірювання зусиль при МАС

ЗРАЗКИ ТА ТИПИ ПОРОШКІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУВАЛИСЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

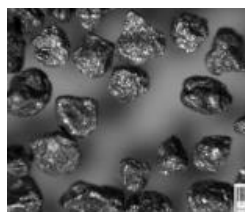
Вигляд осколкових та
нерівновісних порошків



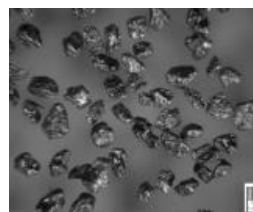
Вигляд округлих та
рівновісних порошків



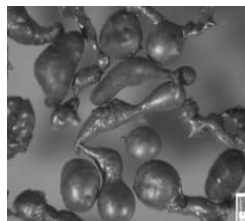
*Ескіз оброблюваних зразків з матеріалів:
сталь 40Х13, алюміній Д16Т, титан ВТЗ-1 та
бронза БрАЖ*



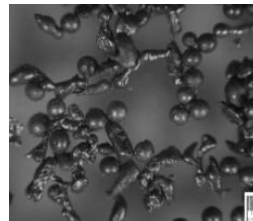
Ферромап 400/315 мкм



Ферромап 200/100 мкм



Полімам-М 400/315 мкм



Полімам-М 200/100 мкм

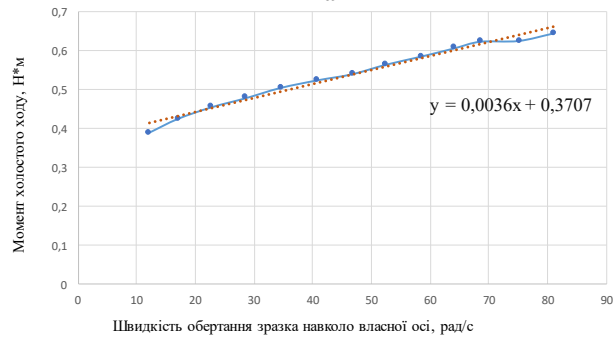
ОПИС МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ ЗУСИЛЬ ПРИ МАО У КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ

Головні етапи для знаходження $M_{\text{еф}}$:

1. тарування двигуна для визначення моменту холостого ходу $M_{\text{хх}}$
2. визначення опору двигуна $r_{\text{дв}}$ при загальмованому якорі
3. визначення робочого моменту двигуна $M_{\text{дв}}$
4. знаходження $M_{\text{еф}}$

Визначення моменту холостого ходу:

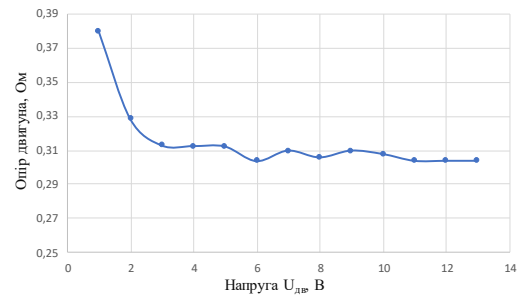
$$M_{\text{хх}} = \frac{U_{\text{хх}} \cdot I_{\text{хх}} - I_{\text{хх}}^2 \cdot r_{\text{дв}}}{\omega}$$



Залежність моменту холостого ходу від швидкості обертання зразку на прикладі зразку зі сталі 40Х13

$$r_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}}}{I_{\text{дв}}}$$

$$R_{\text{дв}} = 0,4699 - 0,12189 \cdot U_{\text{дв}} + 3,4791 \cdot 10^{-2} \cdot U_{\text{дв}}^2 - 0,6811 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{дв}}^3 + 2,982605072 \cdot 10^{-4} \cdot U_{\text{дв}}^4 - 7,2621 \cdot 10^{-6} \cdot U_{\text{дв}}^5$$



Функція залежності опору двигуна від напруги

ОПИС МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ ЗУСИЛЬ ПРИ МАО У КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ

Визначення моменту холостого ходу:

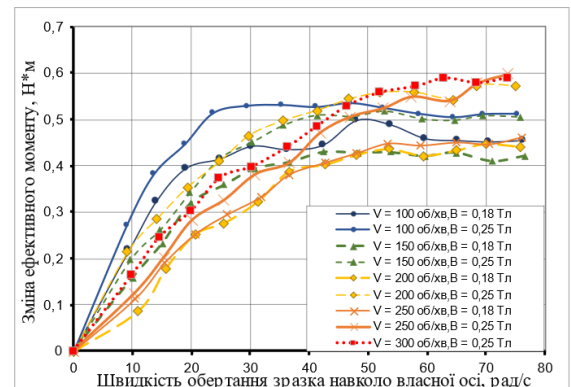
$$M_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{роб}} \cdot I_{\text{роб}} - I_{\text{роб}}^2 \cdot r_{\text{дв}}}{\omega}$$

Напруга, В	Струм, А	Струм, перерахований, А	Вшп, об/хв	ω, рад/с	M _{дв}	M _{еф}
0	0	0	0	0	0	0
3	51	2,684588	100	10,46667	0,531901	0,125708
4	63	3,326539	147,5	15,43833	0,625827	0,203724
5	73	3,861499	192,5	20,14833	0,719885	0,28271
6	82	4,342963	245	25,64333	0,781091	0,326332
7	91	4,824426	295	30,87667	0,853054	0,381549
8	97,5	5,17215	350	36,63333	0,896061	0,406135
9	107,5	5,70711	400	41,86667	0,977918	0,471244
10	113	6,001337	450	47,1	1,029484	0,506064
11	117	6,215321	502,5	52,595	1,065002	0,523998
12	120	6,375809	549	57,462	1,105334	0,548756
13	123	6,536297	610	63,84667	1,117	0,539991
14	127,5	6,777029	655	68,55667	1,169978	0,577896
15	131	6,964265	705	73,79	1,206601	0,597773

Приклад розрахунку робочого моменту двигуна $M_{\text{дв}}$ при оброблюванні зразка з алюмінію Д16Т при $V=250$ об/хв та $B=0,25$ Тл

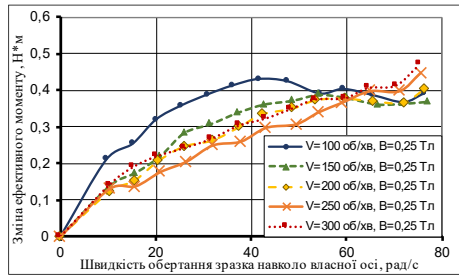
Визначення ефективного моменту:

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}}$$

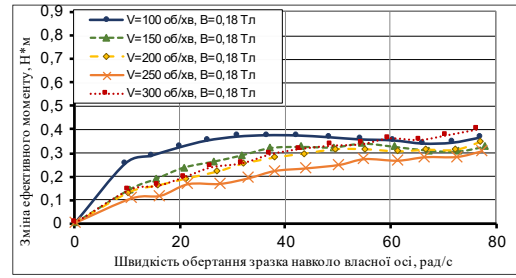


Зміна величини ефективного моменту на прикладі оброблення алюмінію Д16Т при магнітній індукції 0,25 Тл, порошком Полімам-М (400/315 мкм)

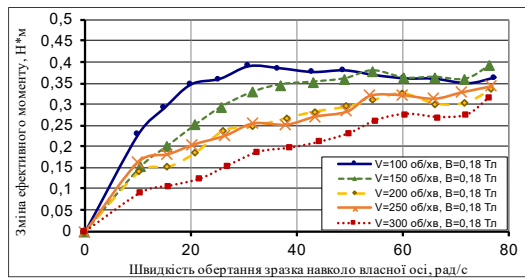
МАО ПАРАМАГНЕТИКІВ ОСКОЛКОВИМ ПОРОШКОМ ФЕРРОМАП 200/100 МКМ



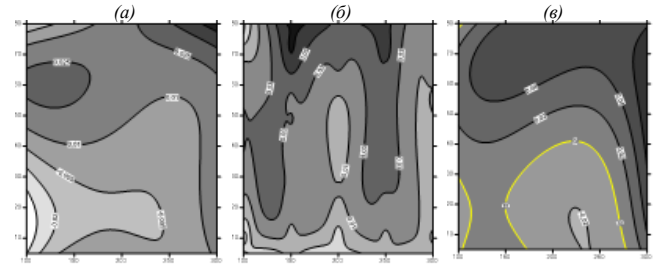
Алюміній Д16Т, $B = 0.25 \text{ Тл}$



Бронза БрАЖ $B = 0.18 \text{ Тл}$

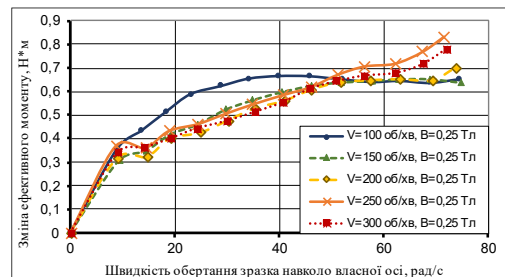


Титан ВТЗ-1, $B = 0.18 \text{ Тл}$

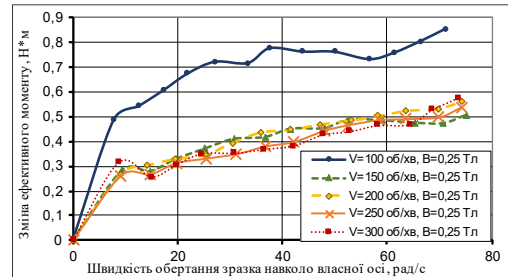


Топографічні карти між залежностями $M_{\text{еф}}$ при $B = 0.25$ та 0.18 Тл зразків з (а) Д16Т, (б) – БрАЖ і (в) – ВТЗ-1

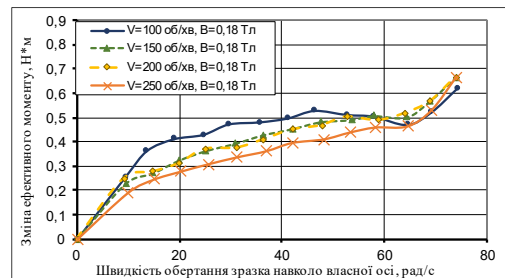
МАО ПАРАМАГНЕТИКІВ ОСКОЛКОВИМ ПОРОШКОМ ФЕРРОМАП 400/315 МКМ



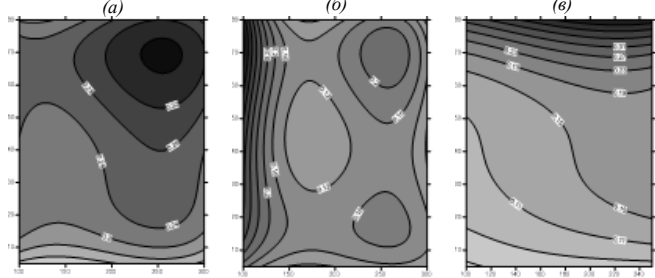
Алюміній Д16Т, $B = 0.25 \text{ Тл}$



Бронза БрАЖ $B = 0.25 \text{ Тл}$

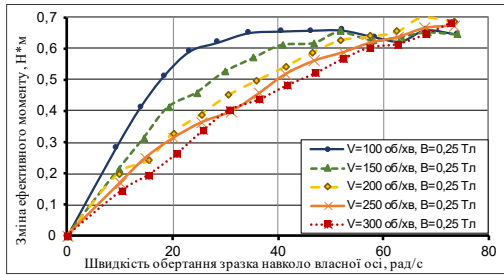


Титан ВТЗ-1, $B = 0.18 \text{ Тл}$

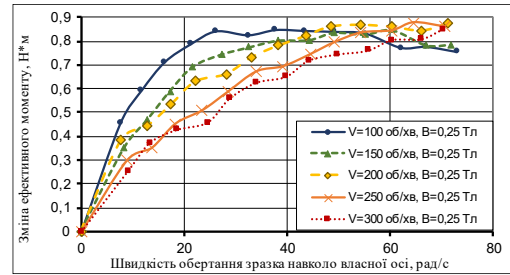


Топографічні карти $M_{\text{еф}}$ отримані при фракціях 400/315 та 200/100 мкм при обробленні зразків з (а) Д16Т, (б) – БрАЖ і (в) – ВТЗ-1

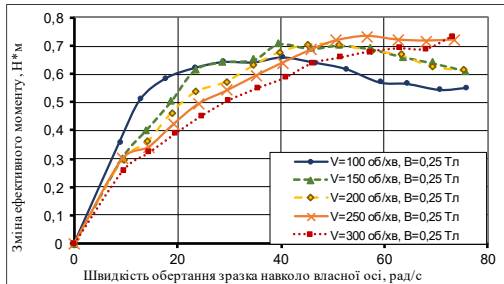
МАО ПАРАМАГНЕТИКІВ ОКРУГЛИМ ПОРОШКОМ ПОЛІМАМ-М



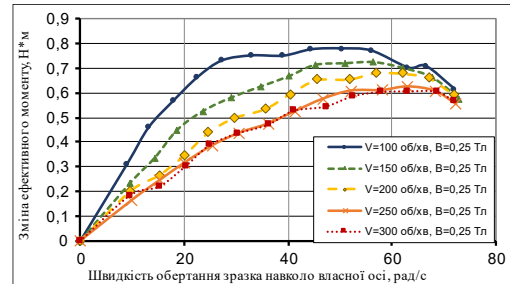
Алюміній Д16Т, Поліам(200/100 мкм), $B = 0.25$ Тл



Бронза БрАЖ, Поліам(400/315 мкм), $B = 0.25$ Тл

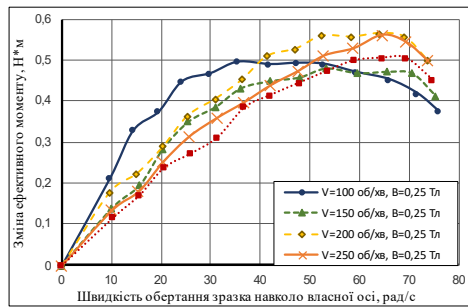


Титан ВТЗ-1, Поліам(400/315 мкм), $B = 0.25$ Тл

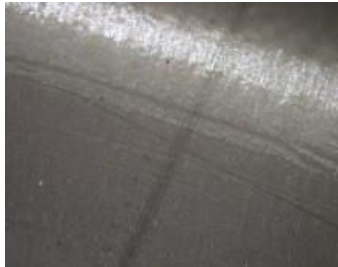


Бронза БрАЖ, Поліам(200/100 мкм), $B = 0.25$ Тл

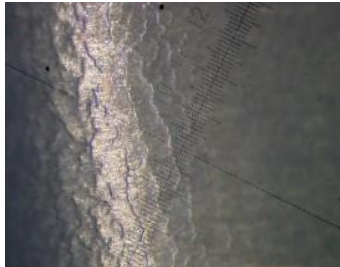
МАО ПАРАМАГНЕТИКІВ ОКРУГЛИМ ПОРОШКОМ ПОЛІМАМ-М



Графік з наявністю третьої зони на прикладі зміни M_{ef} при МАО Титану ВТЗ-1 округлим порошком Поліам-М 200/100 мкм, у якій має місце пластичне деформування поверхні шару зразків



Титан ВТЗ-1

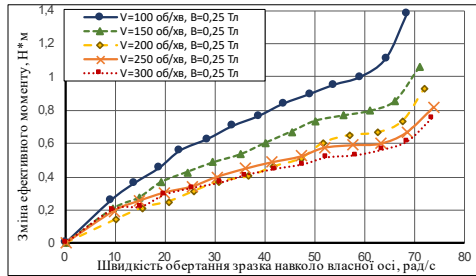


Бронза БрАЖ

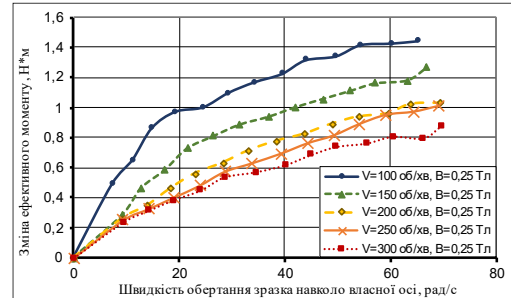


Алюміній Д16Т

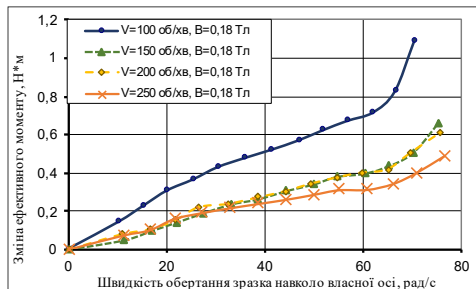
МАО ФЕРОМАГНІТНОЇ СТАЛІ 40Х13



Сталь 40Х13, Полімам (200/100 мкм), $B = 0.25$ Тл



Сталь 40Х13, Полімам (400/315 мкм), $B = 0.25$ Тл



Сталь 40Х13, Ферромап (200/100 мкм), $B = 0.18$ Тл



Вигляд сталі 40Х13, з наявним
слідами мікрорізання і скобління,
у порівнянні з більш
пластичними матеріалами

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На ударно - фрикційну взаємодію МАІ на оброблювану поверхню у процесі МАО впливає ряд технологічних чинників, а саме: величина магнітної індукції, швидкість обертання зразка навколо осі кільцевого розташування робочих зазорів та власної осі, матеріал оброблюваної деталі.
2. Існує вірогідність виникнення активної адгезійної взаємодії бронзових і алюмінієвих зразків при МАО порошком Ферромап 200/100 мкм, що виникає не при максимальних значеннях швидкості переміщення зразка.
3. При обробленні парамагнітних матеріалів більшим осколковим порошком Ферромап 400/315 мкм на підвищених частотах обертання зразків утворюються віялоподібні ущільнення, і під дією сил тертя зміщуються в область між бічною поверхнею зразків і поверхневого полюсного наконечника. У зазначеній області МАІ утворює зону з підвищеною щільністю – зону заклинювання.
4. При МАО округлим порошком Полімам-М при підвищених частотах обертання зразка навколо власної осі частинки МАІ починають активно провертатися, здійснюючи переважно скобління і пластичне деформування поверхні шару зразків проти мікрорізання і скобління гострими виступами частинок Ферромап з осколковою формою. Зі зростанням швидкості переміщення зразків час реального контакту кожної окремої частинки з поверхневим шаром деталі зменшується.
5. На оброблення феромагнітної сталі розмір частинок порошку має мінімальний вплив. При МАО в діапазонах частот обертання зразка $\omega_0 = 65-70$ рад/с сталь 40Х13 має схильність до різкого підвищення величини ефективного моменту. Збільшення величини магнітної індукції в загальному має вплив лише тільки на показники ефективного моменту, отримані при обробленні зі швидкістю головного шпинделя $V_0 = 100$ об/хв.
6. За результатами виконаних досліджень реологічних властивостей МАІ визначено раціональні режими, які рекомендовано для МАО матеріалів з: алюмінію Д16Т, бронзи – БрАЖ, титану ВТЗ-1 та сталі 40Х13