

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

І. М. Пижов, В. О. Федорович, І. В. Волошкіна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ
НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ
КОНТАКТНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Монографія

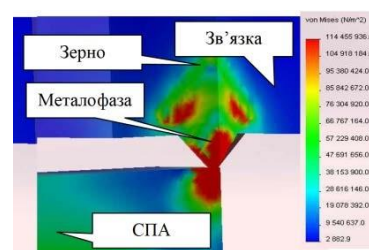
Харків
НТУ «ХПІ»
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

І. М. Пижов, В. О. Федорович, І. В. Волошкіна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ
НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ
КОНТАКТНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Монографія



Харків 2022

УДК 621.923
П 32

Рецензенти:

Ф. В. Новіков, д-р техн. наук, проф. ХНЕУ ім. С. Кузнеця (м. Харків)
О. А. Пермяков, д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Технологія
машинобудування та металорізальні верстати»
НТУ «ХПІ» (М. Харків)

Публікується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ»,
протокол № 2 від 04.02.2022 р.

У монографії викладено сучасні підходи до вдосконалення процесів шліфування надтвердих матеріалів за рахунок управління контактними напруженнями. Використано методологію 3D моделювання НДС системи шліфування, завдяки чому було виконано уточнення механізму самозаточування алмазних кругів. Запропоновано ряд технічних рішень, більшість з яких виконано на рівні винаходів.

Для ІТР промислових підприємств, НДІ, аспірантів та студентів машинобудівних спеціальностей вузів.

Пижов І. М.

П 32 Удосконалення процесу алмазного шліфування надтвердих матеріалів за рахунок управління контактними напруженнями : монографія / І. М. Піжов, В. О. Федорович, І. В. Волошкіна. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2022. – 148 с.

Іл. 50. Табл. 8. Бібліогр.: 181 найм.

УДК 621.923

© І. М. Піжов, В. О. Федорович,
І. В. Волошкіна,
2022

ЗМІСТ.....	3
ВСТУП.....	5
1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ГАЛУЗІ ВИРОБНИЦТВА, ЗАСТОСУВАННЯ СИНТЕТИЧНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ АЛМАЗА І ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ НА ЇХ ОСНОВІ	6
1.1 Сучасні тенденції в області застосування синтетичних алмазів	6
1.2. Сучасні тенденції в галузі використання лезових інструментів та інших виробів на основі синтетичних алмазів.....	11
1.3 Фізичні та технологічні особливості процесів шліфування СПА та можливі шляхи їх удосконалення.....	13
Висновки, постановка завдань та вибір напрямків досліджень	26
2. ЗАГАЛЬНІ УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	32
2.1. Загальна методика досліджень	32
2.2. Методика проведення мікроскопічних досліджень.....	39
2.3. Методики контролю лінійного зносу алмазного круга	41
2.4. Розробка методики непрямого контролю лінійного знімання деталі	49
2.5. Методика визначення продуктивності, питомих витрат алмазів круга та енергоємності процесу шліфування	51
2.6. Методика визначення середніх значень вихідних параметрів в умовах явища періодичності процесів шліфування	52
2.7. Методика математичної обробки експериментальних даних	53
Висновки.....	55
3. УТОЧНЕННЯ МЕХАНІЗМУ САМОЗАТОЧУВАННЯ АЛМАЗНИХ КРУГІВ ШЛЯХОМ 3D МОДЕЛЮВАННЯ НДС СИСТЕМИ «СПА- АЛМАЗНЕ ЗЕРНО-МЕТАЛОФАЗА-ЗВ'ЯЗКА КРУГА».....	56
3.1. Особливості методики 3D моделювання НДС системи «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»... ..	56
3.2. Теоретичне визначення сили взаємодії зерен круга з оброблювальним матеріалом.....	64
3.3. Обґрунтування механізму самозаточування алмазного круга на металевій зв'язці на базі 3D моделювання НДС систем шліфування	66

3.4 Уточнення механізму самозаточування алмазного круга на органічній зв'язці на базі 3D моделювання НДС систем шліфування	73
Висновки	75
4. УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРОВАНОГО ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ СПА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕМІННИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ВІД НИЗЬКОЧАСТОТНИХ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ	77
4.1. Аналіз можливих резервів існуючого процесу шліфування СПА з введенням в зону обробки низькочастотних механічних коливань	77
4.2. Теоретичні дослідження граничних поєднань значень амплітуд і частот механічних коливань	80
4.3. Теоретичні дослідження імпульсу сили як фактора для управління контактними напруженнями	85
4.4. Удосконалення способу електрохімічної правки струмопровідного алмазного круга	90
4.5. Експериментальні дослідження вихідних показників процесу шліфування	93
Висновки	99
5. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ СПА КРУГАМИ НА ОРГАНІЧНИХ ЗВ'ЯЗКАХ В УМОВАХ ВИСОКИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ	103
5.1 Особливості процесу шліфування СПА кругами на органічних зв'язках і перспективи його удосконалення	103
5.2 Особливості визначення і використання деяких фізичних показників для аналізу ефективності і удосконалення процесів шліфування	105
5.3 Удосконалення методу прямого контролю лінійного зносу алмазного круга при шліфуванні СПА на базі явища пристосованості	110
5.4 Розробка і дослідження удосконаленого способу шліфування СПА в умовах високих контактних напружень	115
5.5 Розробка і дослідження удосконаленого способу заточування і доведення лезових інструментів з СПА	121
Висновки	124
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	129

ВСТУП

Досвід розвитку людства останніми роками дозволяє стверджувати, що проблема ресурсозбереження є серйозним фактором, без вирішення якого неможливий перехід до сталого існування суспільства, що є особливо актуальним нині для України. Унікальні фізико-механічні властивості надтвердих матеріалів дозволили їм відразу знайти можливість широкого використання в багатьох галузях народного господарства. Особливу групу з них представляють синтетичні полікристалічні алмази (СПА).

Незважаючи на розвиток нових і вдосконалення існуючих методів виробництва СПА та все більш широке застосування їх у різних галузях промисловості (ріжучі, бурові, волочильні, вигладжувальні та інші інструменти, елементи пар тертя, контактні наконечники у вимірювальних приладах тощо), технологія їх обробки залишається на рівні 80 - 90 - х років ХХ століття, коли завдяки розмаїттю різних й у першу чергу паливно-енергетичних ресурсів збільшення обсягів випуску виробів часто супроводжувалося пропорційним зростанням втрат цих ресурсів.

Сказане особливо відноситься і до проблеми обробки СПА, витрати на виготовлення виробів з яких дуже великі, так як наука і техніка поки не мають абразивних матеріалів, твердість яких перевищувала б твердість алмазу на необхідну з точки зору процесу різання величину.

Дана робота присвячена вирішенню проблеми формоутворення лезових інструментів з СПА на базі вдосконалення відомих та розробки нових ефективних процесів обробки цих матеріалів. Методологічною основою є комплексний підхід, заснований на широкому використанні концепції 3D моделювання, методів математичної обробки даних експерименту, а також комп'ютерних програмних засобів з максимальним залученням експериментальних даних.

Розділи 3 та 4 монографії написані одноосібно Волошкіною І. В., останні у співавторстві з Пижовим І. М., та Федоровичем В. О. з переважною її долею.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ГАЛУЗІ ВИРОБНИЦТВА, ЗАСТОСУВАННЯ СИНТЕТИЧНИХ ПОЛІКРИСТАЛІВ АЛМАЗА І ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ НА ЇХ ОСНОВІ

У розділі проведено аналіз сучасних світових тенденцій, які намітилися в останні роки в області виробництва, застосування і методів обробки СПА. На основі аналізу джерел інформації виявлені питання, які залишаються невирішеними у цій предметній області.

1.1 Сучасні тенденції в області застосування синтетичних алмазів

З давніх часів алмаз відомий як один із найкрасивіших і найдорожчих мінералів. Високі значення твердості та оптичні властивості ставлять його поза конкуренцією серед інших ювелірних каменів. Проте цінність алмазу як технічного матеріалу незрівнянно вища. Широке поширення в промисловості алмаз набув, насамперед, через свою твердість. Це зумовило його застосування в буровій техніці, в каменеобробці, у лезовому та абразивному інструментах для обробки високотвердих та ін. матеріалів [82]. У зв'язку з цим подальший прогрес у даному напрямку визначатиметься успіхами у створенні технологій синтезу алмазу, оскільки широкомасштабне застосування природних кристалів цього матеріалу для технічних потреб [144] не є доцільним через їхню вкрай високу вартість. Теоретичною основою для успішної реалізації алмазного проекту вважається виконаний професором О.І. Лейпунським термодинамічний розрахунок лінії рівноваги графіт-алмаз, що послужило основою синтезу алмазу з графіто-металевої суміші в апаратах високого тиску [66]. Перелік галузей народного господарства де ще не знайшли застосування інструменти на основі надтвердих полікристалів і насамперед СПА неухильно скорочується.

Як відомо природний алмаз є монокристалом. Синтетичні алмази можуть бути як монокристалами, так і полікристалами [12], [110], [143]. СПА

вигідно відрізняються від монокристалу алмазу, що володіє властивостями анізотропії та підвищеною чутливістю до ударів. Полікристали алмазу мають ізотропію властивостей, що значно покращує його механічні властивості і в першу чергу ударну в'язкість. На сьогоднішній день використовуються три основні способи одержання синтетичного алмазу.

Монокристали, вирощені при високих тисках і температурах. На сьогоднішній день можуть бути величиною до кількох міліметрів і більше [110], [95], [82]. Існує думка, що запаси природних алмазів вичерпаються вже до середини нашого століття, і у зв'язку з цим технології вирощування монокристалів алмазу стрімко набувають все більшої актуальності. Використання розглянутого методу вирощування монокристалів алмазу (High Pressure High Temperature, HPHT) дозволяє досягти хороших результатів. Так достатньо сказати, що вже вирощуються кристали алмазу досить великих розмірів. Наприклад, синтезований алмаз типу Ib [145] масою 103,50 карата, а з вирощеного кристала вагою 55,94 карата виготовлений діамант вагою 20,22 карата [144].

Проведений аналіз можливостей використання природних алмазів як у ювелірній справі, так і в промисловості показав, що різноманітний дефектно-домішнний склад природних алмазів не дозволяє широко використовувати їх у технічних напрямках. З природного алмазу можна зробити унікальний датчик, але клонувати його неможливо, оскільки у природі немає однакових за властивостями кристалів. Такі можливості виникають при їх вирощуванні, коли можна керувати їх морфологією та дефектно-домішнім складом, який визначає їх властивості. В результаті з вирощених кристалів можна серійно виготовляти однакові за властивостями пластини, лінзи, алмазні ковадла та інші вироби. При цьому слід зазначити, що вимоги до технічних характеристик кристалів алмазу для технічного застосування можуть бути на порядок жорсткіші ніж для виготовлення діамантів [144].

Основними проблемами при вирощуванні кристалів методом HPHT є підтримка технологічних параметрів вирощування (тиск і температура) з

високою точністю протягом тривалого часу – більше двох тижнів за певним законом, а також забезпечення хімічної чистоти та стабільності властивостей використовуваних матеріалів для деталей контейнера [144].

Таким чином, на сьогоднішній день ринки вирощених та природних алмазів та діамантів співіснують і мають досить помітний вплив один на одного. Істотною перевагою вирощених алмазів слід вважати їхню досконалість.

Полікристали (PCD), отримані при високих тисках і температурах. Отримуються прямим переходом (синтезом) графіту в алмаз або спіканням з мікропорошків алмазу [79], [82], [110], [142], [143], [68].

По-перше це полікристали, одержувані внаслідок фазового переходу графіту в алмаз [68], [82]. Основною особливістю цього способу є те, що для збільшення швидкості перетворення графіту в алмаз і відведення теплоти кристалізації в реакційну камеру апарату високого тиску вводиться стрижень металу-каталізатора (сплав на хромонікелевій основі). Нині матеріали цієї групи у промислових обсягах не випускають.

По-друге це полікристали, які отримують спіканням алмазних зерен [68], [82]. Існують три основні технології. Коротко розглянемо їх.

У першому випадку спікання порошків алмазу відбувається без добавок, що вимагає використання високих тисків і температур. З'єднання алмазних зерен у єдиний полікристал здійснюється в результаті перекристалізації. При високих температурах поверхня алмазу піддається графітизації. Тонкі графітові прошарки, що утворилися, точніше острівці плівки графіту, розташовуючись в місцях контакту окремих алмазних зерен, піддаються впливу надвисоких тисків і можуть переходити в алмаз.

У другому випадку для спікання порошків алмазу використовуються активуючі добавки. Це дозволяє вести процес при дещо знижених тисках та температурах. Як активуючі добавки використовують метали, тугоплавкі карбіди та інші сполуки, які забезпечують високу міцність зв'язку по межах зерен [68], [82]. Як відомий представник такого матеріалу можна назвати

СПА марки «СВ» [73], який показав хороші результати при виготовленні алмазних волок та лезових інструментів.

У третьому випадку спікання порошків алмазу відбувається з використанням сполучних матеріалів. Метод має переважне (промислове) застосування, тому що здійснюється при порівняно невеликих тисках і температурах, що забезпечує економічне виготовлення СПА досить великих розмірів (до 100 мм). У структурі цих матеріалів зерна алмазу, як правило, не утворюють суцільного каркаса, а розділені зв'язкою, хоча за наявності безпосереднього контакту між зернами може спостерігатися часткова перекристалізація. Як зв'язування використовуються карбідоутворюючі елементи, що забезпечують надійне з'єднання зерен з нею. Полікристали цього типу виготовляються, як правило, на підкладках із твердих сплавів. Це забезпечує поєднання високої твердості та зносостійкості алмазозного шару з оптимальними пружнопластичними властивостями твердосплавної підкладки. Найхарактернішими представниками таких СПА є СКМ-Р (Полтавський алмазний завод, Україна), Comrax (General Electric, США), Syndite (компанія Element Six Ltd, Шаннон, Ірландія).

Полікристалічні алмази, отримані за технологією CVD. Отримуються хімічним синтезом при низькому тиску з використанням технології CVD (Chemical Vapour Deposition) як алмази завтовшки від кількох мікрометрів (плівки) до кількох міліметрів [63], [104].

У багатьох відношеннях CVD-алмази мають надзвичайно високі хімічні та фізичні параметри природних алмазів (див. таблицю), а також алмазів отриманих синтезом в умовах високих тисків і температур (НРНТ). Фактично, це чистий вуглець, який не містить сполучної фази. Однак, оскільки алмаз складається зі зрощених мікрокристалів алмазу, він є справді полікристалічною речовиною [147].

Цю технологію вважають іншою технологією вирощування кристалів [144], [14], [15]. Утворення алмазної речовини відбувається у поліконденсаційних процесах при послідовному приєднанні атомів вуглецю

до полівуглецевої речовини. Газ нагрівається в реакторах до кількох тисяч градусів Цельсія у плазмі, а вуглець відокремлюється з неї у формі алмазних кристалів на підкладку.

Таблиця 1.1 – Властивості алмазів, отриманих за різними технологіями [147].

Показник	Марка алмазу		
	CVDITE	Монокристал	SYNDITE
Щільність ($\times 10^3$ кг/м ³)	3,52	3,52	4,12
Мікротвердість (ГПа)	85-100	85-100	50
Міцність на руйнування (МПа м. експ. 0,5)	5,5-8,5	3,4	8,81
Модуль Юнга (ГПа)	1000-1100	1000-1100	776
Коефіцієнт Пуассона	0,07	0,07	0,07
Межа міцності на розтягування(МПа)	450-1100 (Зростання-зародження)	1050-3000 (Залежить від орієнтації)	1260
Поперечна міцність на розрив (ГПа)	1,3	2,9	1,2
Міцність на стискання (ГПа)	9	9	7,6
Теплопровідність за 20°C (Вт/м·К)	500-2200	600-2200	560
Теплопровідність за 200°C (Вт/м·К)	500-1100	600-1100	200
Термічна дифузія (см ² /с)	2,8-11,6	5,5-11,6	2,7
Коефіцієнт теплового розширення			
300 К	1,21	1,21	4,2
500 К	3,84	3,84	-
1000 К	4,45	4,45	6,3

Важливим є те, що CVD – алмази мають фізико – хімічні властивості близькі до природних алмазів [95], [147] (Табл. 1.1).

Для збільшення згинальної міцності СПА, а також суттєвого спрощення їх кріплення в лезових інструментах методом паяння, алмазний шар переважно виконувати на підкладках (як правило, із твердого сплаву).

Наукові та виробничі організації продовжують інвестувати значні кошти у вдосконалення методів отримання СПА та інших ПНТМ.

1.2 Сучасні тенденції в галузі використання лезових інструментів та інших виробів на основі синтетичних алмазів

Особливості та галузі застосування синтетичних алмазів. Унікальні фізико-механічні властивості алмазу визначають потенційні можливості його застосування у ряді таких галузей науки, техніки та виробництва, розвиток яких визначає перебіг технічного прогресу загалом. Розглянемо деякі особливості застосування синтетичних алмазів.

Що до вирощених монокристалів алмазу, всі вони з успіхом починають замінювати природні алмази. Поки великих кристалів не так багато, але динаміка цього процесу показує, що протягом кількох років кожен другий огранений дрібний діамант буде вирощеним. Що стосується техніки, то вирощені монокристали стануть гідною заміною природним алмазам [144]. Це такі специфічні вироби та інструменти як наконечники твердомірів, склорізи, медичні скальпелі, прецизійні лезові інструменти та ін.

У вирішенні проблеми вдосконалення машин в останні роки все більш помітну роль, як і раніше, відіграють лезові інструменти з СПА та інших надтвердих полікристалів, які все частіше приходять на зміну традиційним інструментальним матеріалам. Вони найбільш широко використовуються у вигляді різців, фрез, свердел та інших інструментів для тонких та прецизійних процесів обробки деталей із кольорових металів та сплавів, неметалічних та інших специфічних матеріалів. За умови пред'явлення високих вимог до жорсткості та вібростійкості технологічної системи СНІД, а також у разі використання малих значень подач (в діапазоні 0,01 – 0,1 мм/об.) та глибин обробки (у межах 0,05 – 0,25 мм) ці інструменти допускають ведення процесу зі швидкостями різання до 1000 м/хв і більше. Це дозволяє забезпечувати низьку шорсткість поверхонь виробів та високу точність їх розмірів. Доля інструментів із ПНТМ вже досягла 20 – 30% від використання твердого сплаву [103].

Області використання СПА дуже великі [112], [96], [142], [143]. Там де

СПА можуть замінити природний алмаз, не потрібна така необхідна для алмазних монокристалів операція як їхня орієнтація з урахуванням «м'яких» та «твердих» напрямків [39], [40], [95].

Приклади конструкцій алмазних інструментів. Деякі приклади конструкцій різальних інструментів із СПА наведено на рисунках 1.1 – 1.2.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Приклади конструкцій інструментів із СПА [96]: алмазна кінцева фреза (а) та комбінований інструмент швейцарської (ALUWAG) та німецької (Kempf GmbH) фірм (б)



Рисунок 1.2 – Приклади конструкцій інструментів із СПА [96]:

алмазні фрези зі сталевим та титановим корпусами (а)
та алмазна дискова пилка (б) для деревообробки

Алмазні елементи кріпляться в державках механічно або пайкою [86]. До важливої особливості використання алмазних інструментів слід віднести той факт, що при призначенні оптимальних режимів різання стійкість не є фактором, що лімітує. Навпаки, часто у існуючого парку верстатів недостатньо кількості обертів шпинделя для їхнього найефективнішого використання. Це дає переваги при реалізації принципу концентрації технологічних операцій [39], [71] за рахунок багато інструментальної обробки [96], у тому числі шляхом використання комбінованих інструментів (рис. 1.1, б).

Наведені вище конструкції інструментів СПА є представниками лише малої частини всієї гами інструментів, що випускаються промисловістю в даний час.

1.3 Фізичні та технологічні особливості процесів шліфування СПА та можливі шляхи їх удосконалення

Аналіз алмазного шліфування СПА з позицій уявлень про пристосованість двох поверхонь, що контактують. З урахуванням

пропозицій Б.І. Костецького [60], в роботі [129] процес алмазного шліфування пропонується розглядати як пристосованість двох різних по топографії поверхонь: дискретної робочої поверхні кола (РПК) та квазісуцільної оброблюваної поверхні СПА. Під пристосованістю тут розуміється здатність технічної системи «СТМ-зерно-зв'язка» набувати у процесі еволюції властивості, які забезпечують стабільність її функціонування, які зазвичай характеризуються мінімумом енергетичних витрат.

Ефективність будь-якого процесу абразивної обробки визначається рівнем пристосовуваності взаємодіючих поверхонь та можливостями зміни цього рівня за рахунок вибору умов шліфування (режими обробки, введення в зону шліфування додаткової енергії тощо). Як основні аспекти пристосованості прийняті такі її складові, як топографічна, структурно-фазова та енергетична [129].

Принципова особливість процесу алмазного шліфування СПА полягає в тому, що контактують рівнотверді матеріали із гранично високими значеннями твердості. При реалізації традиційного процесу алмазного шліфування СПА заздалегідь заправленими кругами на металевих зв'язках процес пристосовуваності реалізується аномально швидко (1-2 хвилини) [137], [107]. Шляхи підвищення ефективності цього процесу, зрештою, зводяться до зміни інтенсивності процесу пристосовуваності, так як вона, зрештою, визначає продуктивність та якість обробки, а також інтенсивність зносу робочої поверхні інструменту.

На відміну від класичної теорії різання у разі шліфування СПА немає 1,5-2 кратного перевищення твердості інструментального матеріалу над оброблюваним, немає впровадження алмазних зерен в оброблюваний СПА, немає чіткого поняття товщини зрізу, а матеріали, що взаємодіють, до того ж мають граничну в природі твердість, властиву алмазним структурам. Ефективність процесу визначається характером та інтенсивністю взаємної руйнації елементів системи «СТМ-зерно-зв'язка» [107], [129].

На сьогоднішній день є доведеним, що в умовах, коли мікротвердість оброблюваного СПА та обробного (алмазні зерна кола) матеріалів рівні або співставні, впровадження зерен в оброблюваний матеріал практично відсутнє, а знімання припуску здійснюється за рахунок крихкого мікроруйнування СПА [107]. А для цього необхідно, щоб на алмазних зернах постійно були гострі мікро- та субмікрокромки. Необхідність цього ілюструється даними рисунків 1.3 – 1.4. Так, наприклад, на рисунку 1.3 показано вплив часу шліфування СПА на зміну стану РПК попереднього заправленого алмазного круга на металевій зв'язці.

Видно, що в умовах високосилової контактної взаємодії з СПА висота виступу алмазних зерен (H) над рівнем зв'язки різко знижується і одночасно зростає кількість зерен з майданчиками зносу. Гострі мікро- і субмікрокромки швидко зникають, а майданчики зношування на зернах набувають сталості (рис. 1.4) [97].

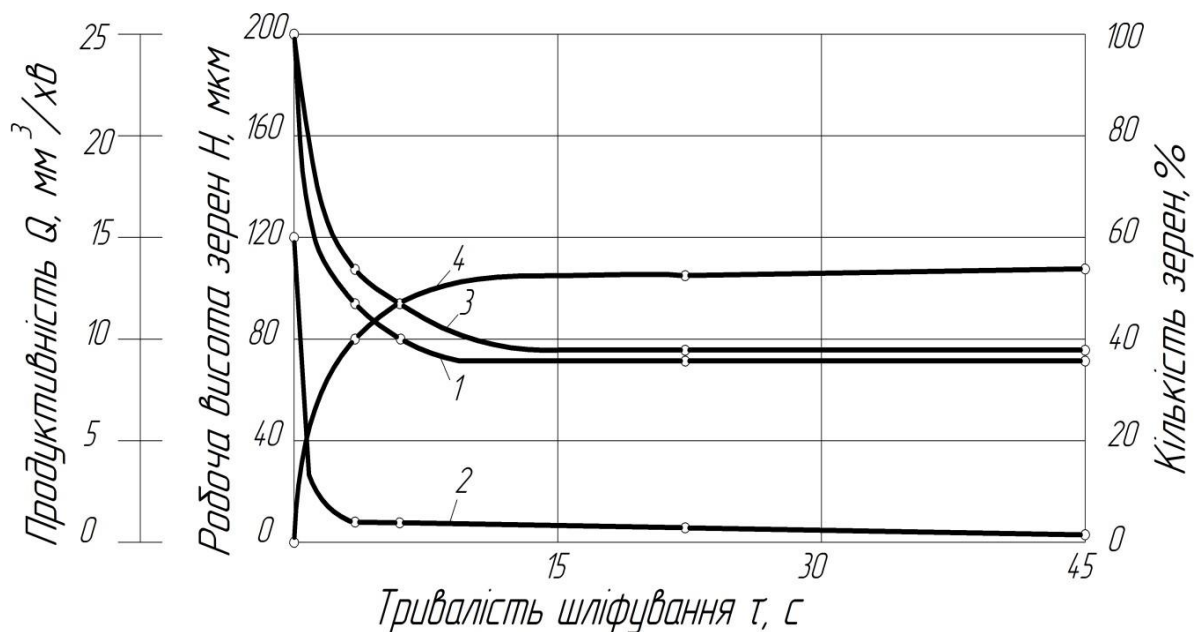


Рисунок 1.3 – Вплив часу шліфування СПА на зміну стану РПК:

1-Н (Z-200/160); 2-Q; 3, 4-кількість зерен гострих (3) та з майданчиками зносу (4)

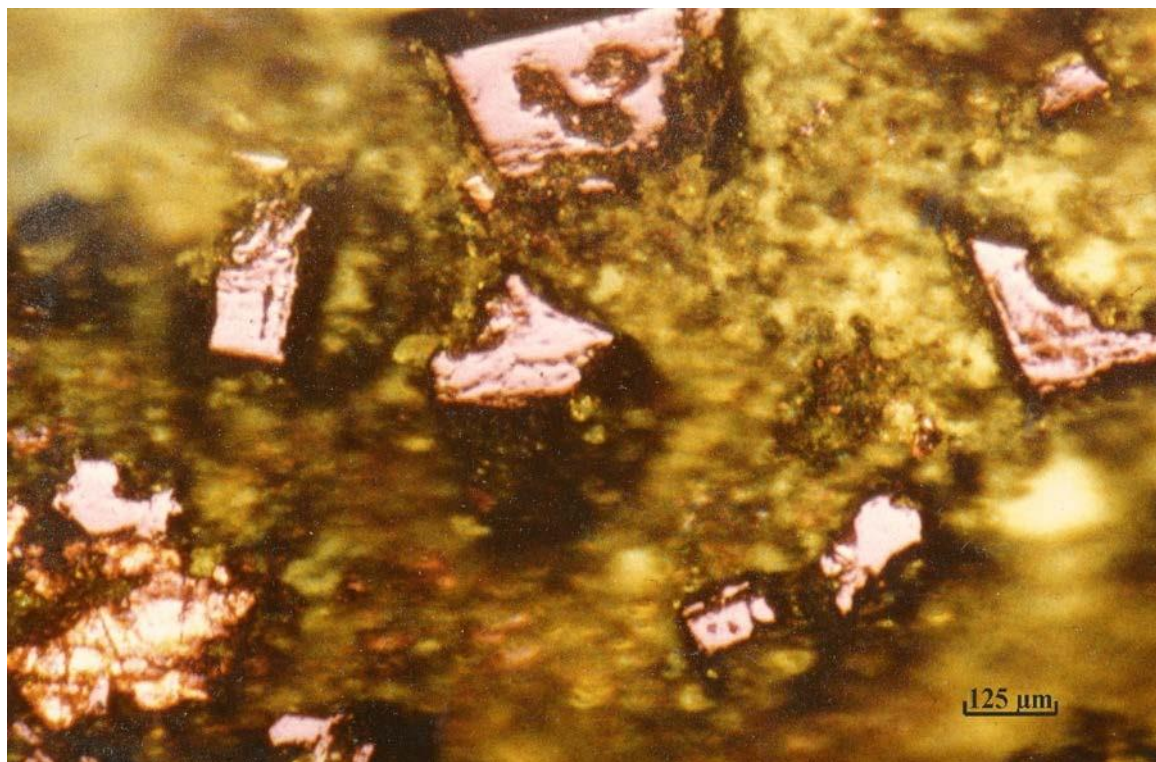


Рисунок 1.4 – РПК після 15 секунд шліфування СПА

З огляду на явище пристосовуваності процес шліфування катастрофічно швидко трансформується у процес тертя високотносистоїкої пари «СПА – алмазні зерна». Лінійне знімання припуску з СПА практично припиняється. В результаті цього продуктивність обробки (Q) стає близькою до нуля.

Враховуючи [129] на рисунку 1.3 можна побачити три етапи пристосовуваності: високоінтенсивний (0 - 5 с), перехідний (5 - 30 с) та сталий (понад 30 с). Ці періоди з практичної точки зору можна використовувати для реалізації різних способів шліфування СПА.

Однак для постійного відновлення процесу формування мікро- та субмікромик на зернах круга необхідно створювати умови для ініціювання механізмів їх самозагострення шляхом макро-(мікро-)руйнування або їх комбінації. Таким чином, в основі високопродуктивного процесу шліфування СПА в першу чергу лежить самозаточування алмазних зерен, оскільки

реалізація механізму крихкого руйнування найтоншого поверхневого шару СПА можлива лише за наявності на поверхні алмазних зерен мікро- та субмікрокромов.

Фізичні та технологічні особливості процесу шліфування СПА алмазними колами на органічних зв'язках у режимі самозагострення. Проблема шліфування СПА виникла одразу ж, щойно з'явилися перші промислові алмази, придатні для виготовлення різальних інструментів. Технологія обробки природних алмазів, що існувала до цього, виявилася малопридатною через надзвичайно низьку продуктивність процесу [39]. Тому в якості промислової була прийнята технологія заточування лезових інструментів з СПА алмазними кругами на органічних зв'язках, що самозаточуються. Такі ж рекомендації даються в більшості літературних джерел, що відносяться до виробництва та переточування інструментів із СПА [138].

Слід зазначити, що у далекому зарубіжжі публікації, які стосуються аналізованої предметної області, дуже нечисленні, на жаль, розрізнені, не представляють єдиного напрямку, і мають переважно рекламний характер [96]. У той же час практично всіма дослідниками зазначається, що продуктивність знімання СПА, що досягається, невелика, а обсяг зношених алмазних зерен істотно більше обсягу, знятого з алмазу.

На сьогоднішній день проблем оброблюваності СПА загалом є невирішеною.

Фундаментальні дослідження з проблеми оброблюваності СПА та інших ПСТМ виконані в НТУ ХПІ [27], [32], [36], [56], [57], [68], [74], [85], [96], [105], [107], [129], [137] та ін.

Так у роботах [107], [68] та ін. зазначається, що в порівнянні з органічними зв'язками керамічні зв'язки краще утримують алмазні зерна, хімічно інертні до олійних МОТС, відрізняються більшою крихкістю і краще самозаточуються, що позитивно позначається на зніманні припуску з СПА. Однак для заточування інструментів із СПА вони практично поки що не

знайшли застосування. Основним недоліком як органічних, так і керамічних зв'язок є слабка міцність утримання алмазних зерен, що призводить до підвищеної питомої витрати алмазів круга, величина якої при обробці алмазу може досягати 30 карат на карат знятого СПА [107].

Удосконалення процесу шліфування СПА неможливе без розкриття механізму самозаточування алмазних кругів. Так, наприклад, у роботі [31] зазначається, що є важлива різниця у характері зносу алмазних кругів на органічних зв'язках у разі обробки СПА і, наприклад, твердого сплаву. При шліфуванні твердих сплавів, коли знос алмазних зерен відносно невеликий, самозаточування кругів відбувається за рахунок поступового видалення зв'язки стружкою, що сходить, а також шляхом викидання окремих зерен з неї. Для цього процесу досить невеликого номінального тиску в контакт ($P_n = 0,5 - 1,0$ МПа). У разі ж шліфування СПА, коли відсутнє впровадження зерен круга в оброблюваний матеріал, останні надзвичайно швидко втрачають свою ріжучу здатність, тому що площадки зносу, що виникають на них, призводять до утворення зносостійкої пари тертя «алмаз-алмаз».

Дослідження показали, що зняття припуску із СПА не спостерігається в діапазоні значень нормальних тисків $P_n = 0 - 30$ МПа. Ці дані дозволяють припустити, що процес самозаточування алмазних кругів при шліфуванні СПА має важливі особливості. Одна з них полягає в тому, що цей вид обробки можна кваліфікувати як високосиловий процес [31], [107].

Вести обробку за «пружною» схемою за таких величин тиску в контакті не практично, тому слід використовувати «жорстку» схему [97]. Дослідження процесу обробки СПА за «жорсткою» схемою попередньо заправленим кругом показало, що він протікає не стабільно, а характеризується періодичними сплесками фізичних та технологічних показників обробки (рис. 1.5, [97]). При цьому, як видно з рисунку, процес шліфування можна розділити на дві зони: перша – зона припрацювання ($\tau = 0 - 250$ с) і друга - зона періодичного процесу, що встановився ($\tau > 250$ с). Якщо в першій зоні зміни показників обробки носять випадковий характер, мають

неоднаковий крок і величину і залежать багато в чому від початкового стану РПК, то в другій зоні спостерігається їхня чітка повторюваність через певний період часу (в даному випадку $\tau \approx 80$ с). Така картина спостерігається протягом усього часу роботи круга до повного зносу. Отже, цей результат можна розглядати як позитивну відповідь на питання про можливість самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках при шліфуванні СПА.

Аналізуючи дані, представлені на рисунках 1.5 – 1.6, процес самозаточування попередньо заправленого круга під час роботи за «жорсткою» схемою можна представити так [97]. У початковий момент, коли зерна значно виступають над рівнем зв'язки і мають гострі мікро- та субмікрочки, відбувається знімання СПА та зношування (самозаточування) зерен при відносно малих значеннях складових сили різання ($\tau \leq 30$ с, $P_y = 225$ Н, $P_z = 20$ Н). У міру зменшення висоти зерен зростає їх число в контакті і величина майданчиків зносу, що утворюються на них.

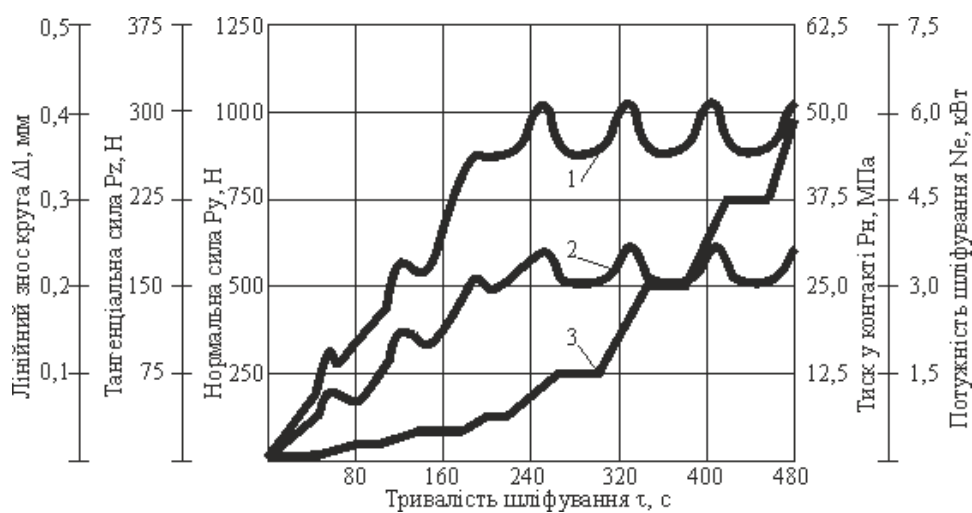


Рисунок 1.5 – Зміна вихідних показників обробки у часі:

1 – P_y (P_n); 2 – P_z (N_e); 3 – Δl

Умови обробки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%
 $V_k = 20$ м/с, $S_{пр.} = 1$ м/хв, СОТС-3%-й розчин Na_2CO_3 у воді.

Матеріал, що обробляється – СПА марки АСБ $Sk \approx 20$ мм²

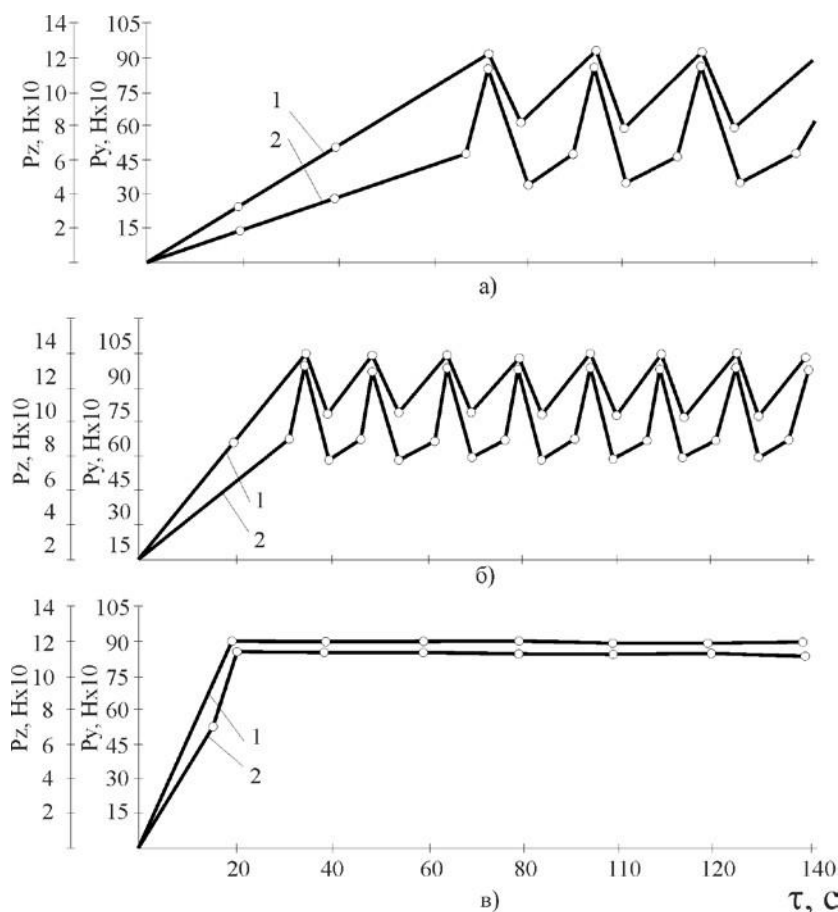


Рисунок 1.6 – Вплив $S_{non.}$ (мм/дв. хід) на складові сили P_y (1) та P_z (2) при шліфуванні АСБ алмазним кругом на зв'язці ТО2 [96]:

а) $S_{non.} = 0,01$; б) $S_{non.} = 0,02$; в) $S_{non.} = 0,03$

Оскільки межа їх міцності на вигин приблизно на порядок менша, ніж на стиск, то при високошвидкісній контактній взаємодії зерен з оброблюваним СПА почнеться процес їх інтенсивного мікроруйнування (самозаточення) з утворенням гострих мікро- та субмікрокромки. Внаслідок цього відбувається сплеск сили P_z , що свідчить про відновлення знімання припуску з СПА. Як видно з рисунку 1.5, сплеск вихідних показників обробки має деяку тривалість у часі ($\tau \approx 5-40$ с). Цьому сприяє, мабуть, три основних фактори: перший полягає в тому, що процес самозагострення зерен, що почався миттєво, в силу своєї динамічності може продовжуватися і при величині зусилля P_y , дещо меншої, ніж та, при якій він почався; другий полягає в тому, що після вдавлювання зерен у зв'язку та виходу їх з контакту з СПА відбувається збільшення висоти виступання зерен на деяку величину

через пружне відновлення зв'язки. В результаті цього зерна будуть входити в контакт з ударом і сприйматимуть згинальні навантаження; по-третє, передбачається, що за час сплеску відбувається додаткове вдавлювання зерен у зв'язку за рахунок здійснення подачі СПА на круг механізмом поперечної подачі верстата, що також сприяє інтенсифікації процесу самозаточування зерен.

Так як сумарна величина лінійного знімання СПА і зносу круга за час сплеску перевищує величину подачі за цей час механізмом поперечної подачі, то сила P_y дещо падає через зменшення натягу в технологічній системі. Це призводить до припинення процесу вдавлювання зерен у зв'язку, а, отже, їх самозагострення. Внаслідок цього сила P_y знову починає зростати. Однак, оскільки зі зменшенням висоти виступання зерен (у міру їх зносу) над рівнем зв'язування круга збільшується їх кількість у контакті з СПА через різновисотність зерен, то чергове вдавлювання зерен у зв'язку відбудеться вже при більшому значенні сили P_y . Цьому сприяє також той факт, що в міру вдавлювання зерен у зв'язку відбувається збільшення концентрації алмазів на РПК у порівнянні з вихідним значенням, що саме по собі робить алмазоносний шар жорсткішим і ускладнює процес вдавлювання. Тому наступне вдавлювання відбудеться за ще більшого значення сили P_y і т. д. До настання періодичності процесу зносу круга таких сплесків (місцевого значення) може бути кілька. Наприклад, для умов, представлених рисунку 1.5 їх три.

Зростання складових сил різання припиняється після досягнення свого максимального для даних умов значення ($P_y = 1060$ Н, $P_z = 160$ Н, $\tau = 250$ с), після того, як у контакт із СПА увійде зв'язка. І тут періодичність всіх параметрів (знос круга, лінійний знімання СПА, сили різання та інших.) встановлюється, тобто відбуваються чергуючи через певний період (у конкретному випадку $\tau \approx 80$ с) сплески та згасання значень вихідних показників обробки. У цей час періодичність процесу обумовлена в основному тільки тим, що сумарна величина знімання СПА і зношування

круга в момент самозаточування останнього перевищує величину подачі, внаслідок чого відбувається зменшення натягу в технологічній системі, а отже, і нормальної сили різання ($P_y \min \approx 875 \text{ Н}$), що, у свою чергу, призводить до припинення процесу самозагострення зерен, а отже, знімання СПА. Цей процес відновлюється при досягненні нормальною силою свого максимального для даних умов значення ($P_y \max = 1060 \text{ Н}$, $P_z \max = 60 \text{ Н}$), коли СПА знову впроваджується у зв'язку, одночасно втискаючи в неї зерна, які знову починають працювати на вигин, і т.д. Враховуючи високу інтенсивність зносу кола ($\geq 200 \text{ мкм/хв}$), можна припустити, що оброблюваний СПА в момент впровадження в алмазоносний шар є ніби різцем по відношенню до круга, видаляючи з його робочої поверхні зерна та зв'язку, сприяючи, таким чином, його самозаточуванню.

Мінімальні значення сил P_y та P_z значною мірою залежать від величини поперечної подачі, що компенсує зменшення натягу в технологічній системі.

Таким чином, шліфування СПА з постійною поперечною подачею показало, що цей процес йде нестабільно, періодично відновлюючись і загасаючи (рис. 1.5). Така періодичність є фактором, що призводить до нестабільності якості обробки та обмежує продуктивність шліфування. Останнє є поясненням проблеми забезпечення розмірної точності при обробці СПА. І хоча процес шліфування можна стабілізувати підбором значення S_{non} [7] (рис. 1.6), його висока силова напруженість обумовлює великі деформації технологічної системи, а це є перешкодою для забезпечення високої точності обробки.

Таким чином, алмазні круги на органічних зв'язках можуть успішно здійснювати шліфування СПА в режимі самозагострення без додаткового правки до повного зносу алмазоносного шару. Однак такий процес є високосиловим. Для подальшого вдосконалення розглянутого процесу шліфування СПА необхідні дослідження, що дозволяють глибше розкрити фізичні особливості процесу та уточнити механізм самозагострення

алмазоносного шару. Це можна здійснити, наприклад, на базі широкого використання методології 3D-моделювання напружено-деформованого стану (НДС) [29], [62] зони шліфування (система «зв'язка круга – алмазні зерна – СПА») [129].

Фізичні та технологічні особливості керованого процесу шліфування СПА алмазними кругами на металевих зв'язках. Як було показано вище (рис. 1.3), головною характерною особливістю процесу шліфування СПА алмазними кругами є надзвичайно швидка втрата ними ріжучих властивостей, що зумовлено інтенсивною зміною (згладжуванням) їх ріжучого рельєфу. Періодична правка абразивними брусками є засобом лише тимчасового відновлення ріжучої здатності кругів.

У таких умовах для забезпечення високої ефективності процесу запропоновано забезпечувати постійну розвиненість мікро- та субмікрорельєфу алмазних зерен за рахунок керування висотою та кількістю алмазних зерен круга в контакті з СПА. Для цього в процесі шліфування міцна металева зв'язка алмазного круга піддається безперервному електрохімічному розчиненню за допомогою спеціального автономного катодного пристрою [27], [107]. Способи електрохімічної правки та пристрої для їх здійснення наведені в [96].

Завдяки роботам НТУ ХПІ встановлено, що особливістю такого процесу також є періодичність його вихідних показників, що характеризується тривалістю періоду, діапазоном значень та амплітудою. Вона є результатом глибокого взаємозв'язку між природою та змінною інтенсивністю зносу алмазних зерен, силами різання на одиничних зернах та міцністю алмазоутримання, співвідношенням інтенсивності зносу зерен та швидкості цілеспрямованого знімання зв'язки в зоні управління [27], [107], [30] (рис.1.7). Якщо сила струму в ланцюзі управління, нижче цілком визначеного для даних умов рівня, усунути періодичність за рахунок характеристики круга та режимів шліфування неможливо. Інтенсивність дозованого руйнівного впливу на зв'язку є найбільш універсальним

інструментом усунення періодичності та забезпечення сталості статистичних характеристик рельєфу алмазного круга, його потенційних ріжучих властивостей, стабілізації вихідних показників шліфування, наприклад збільшення продуктивності до двох разів. Це підтверджується даними рисунку 1.7 (шліфування за «пружною» схемою) [30]. Збільшення сили струму від 35 до 125 А зменшує період проходження пульсацій, а якщо величина струму досягає 150 А процес шліфування стабілізується (рис.1.7, г). Викладене вище дозволяє зробити висновок, що періодичність зміни параметрів ріжучого рельєфу круга є фактором, що обмежує продуктивність шліфування і призводить до зростання питомої витрати алмазів круга. Це пояснюється тим, що при незначних величинах тисків в контакті для забезпечення безперервності самозагострення алмазних зерен необхідно за рахунок видалення (розчинення) зв'язки круга збільшувати висоту виступання останніх над рівнем зв'язки, а отже, зменшувати їх число в контакті з СПА. Значна частина зерен випадатиме з зв'язки не використавши свій ресурс.

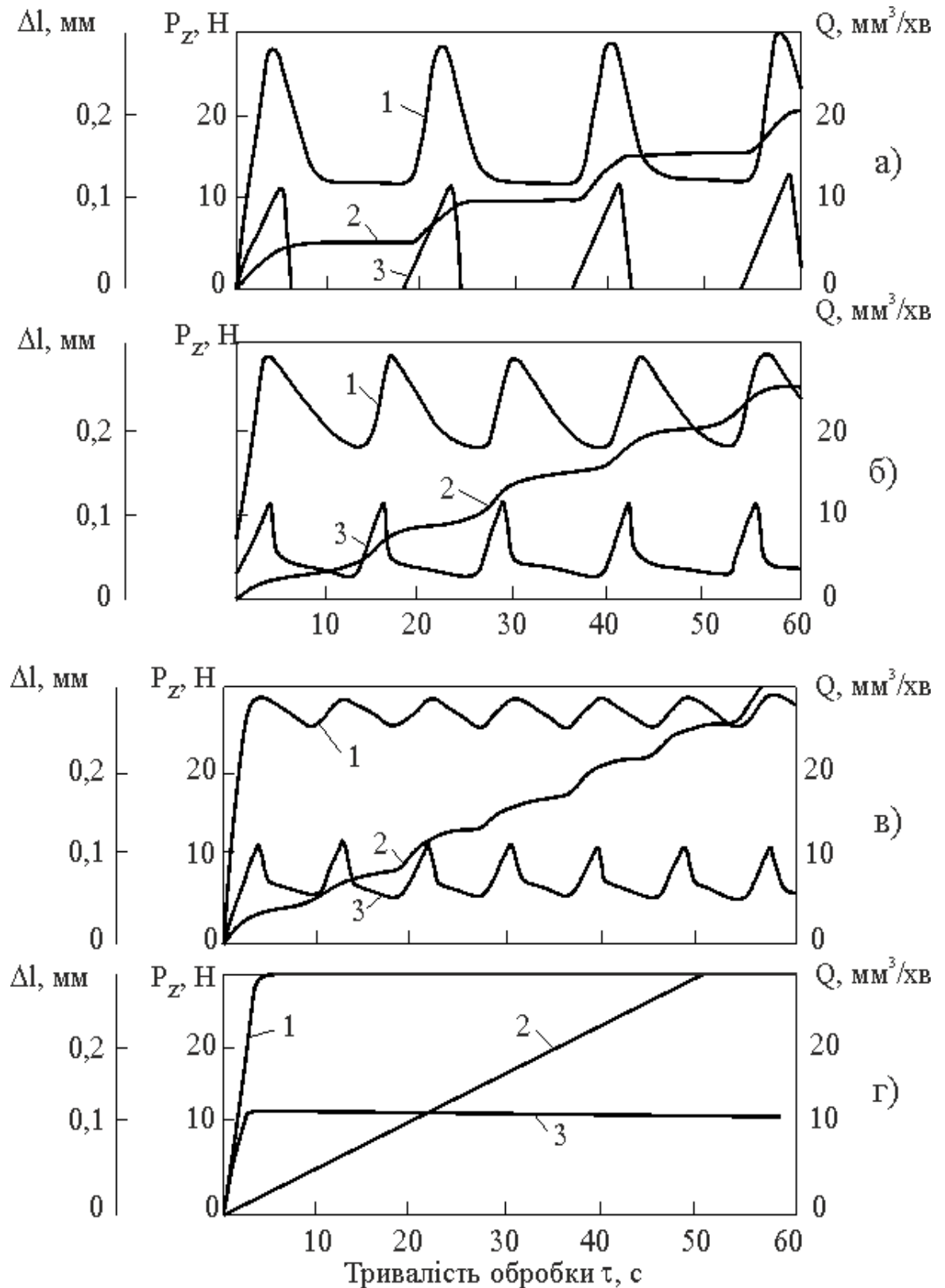


Рисунок 1.7 – Вплив сили струму на періодичність процесу при шліфуванні АСБ [30]:

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 АС6 125/100 ПМ12 100%

$V_k = 30\text{м/с}$; $P_n = 2,5\text{ МПа}$; $S_{np.} = 0,6\text{ м/xb}$.

1 – P_z ; 2 – Δl ; 3 – Q

а) $I=35\text{A}$; б) $I=55\text{A}$; в) $I=125\text{A}$; г) $I=150\text{A}$

На думку авторів [94], [169] значним резервом при обробці високотвердих і крихких матеріалів є введення в зону шліфування механічних коливань.

Встановлено значний ефект при використанні коливань як з інфра- [28], [169], так і ультразвуковою [94] частотою. Він пояснюється тим, що механічні коливання ініціюють процес самозагострення алмазних зерен при їх меншій висоті виступання над рівнем зв'язки, а отже, при більшій кількості в контакт з СПА.

Відома фірма Agathon AG (Швейцарія), що займається розробкою технологій та виробництвом обладнання для заточування різальних інструментів з різних інструментальних матеріалів, запропонувала споживачам так звану EcoDress-технологію та верстат Agathon 350 Combi EcoDress для її реалізації [148]. Ця технологія (рис. 1.8 - 1.9) ґрунтується на керованому процесі шліфування непереточуваних пластин з кубічного нітриду бору алмазними кругами на металевих зв'язках, ріжучий рельєф яких підтримується в розвиненому стані електрохімічним способом (МОТС - електроліт).

Для стабілізації процесу на верстаті (рис. 1.8) застосована слідча система, яка використовує як датчик сили струму в ланцюзі управління тангенціальну складову сили різання або потужність шліфування.

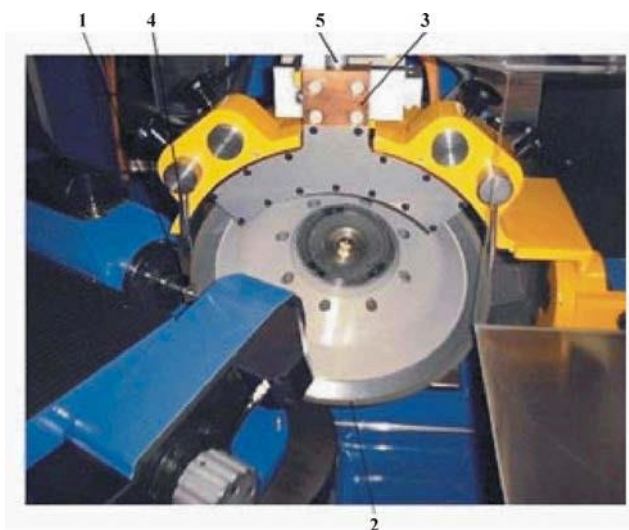
На рисунку 1.9 наведено фото багатогранних ріжучих пластин із кубічного нітриду бору, заточених за цією технологією. Для обробки пластин з СПА відомостей немає, що пов'язано, мабуть, з набагато більшою складністю його обробки.

Висновки, постановка завдань та вибір напрямків досліджень

1. Наукові та виробничі організації різних країн продовжують інвестувати значні кошти у вдосконалення методів отримання СПА та інших ПСТМ, що свідчить про те, що вони потрібні у різних галузях народного господарства.



а)



б)

Рисунок 1.8 – Загальний вигляд (а) [96] та робоча зона (б) [96] верстата для реалізації EcoDress-технології Agathon AG, Solothurn, Швейцарія:

1 – заготовка; 2 – алмазний круг; 3 – мідний електрод; 4 – підведення МОТС у зону обробки; 5 – підведення МОТС у міжелектродний зазор

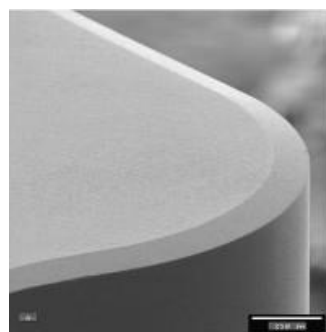
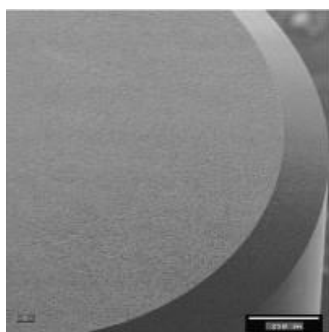


Рисунок 1.9 – Фото пластин заточених за технологією EcoDress [96]

На сьогоднішній день використовуються три основні способи

одержання синтетичного алмазу: 1). Як вирощені при високих тисках і температурах монокристали завбільшки за кілька міліметрів і більше. 2). Як полікристали (PCD), отримані при високих тисках і температурах прямим переходом (синтезом) графіту в алмаз або спіканням із мікропорошків алмазу. 3). Як алмази товщиною від кількох мікрометрів до кількох міліметрів, отримані хімічним синтезом при низькому тиску з використанням технології CVD (Chemical Vapour Deposition). Слід зазначити істотне збільшення частки СПА, отриманих методом CVD.

2. До важливої особливості використання алмазних інструментів слід віднести той факт, що при призначенні оптимальних режимів різання стійкість, як правило, не є фактором, що лімітує. Навпаки, часто у існуючого парку верстатів недостатньо кількості обертів шпинделя для їхнього найефективнішого використання. Це дає переваги при реалізації принципу концентрації технологічних операцій за рахунок багатоінструментальної обробки, у тому числі шляхом використання комбінованих інструментів. Оскільки обробка проводиться тривалий час без зміни інструменту, то точність та якість значно зростають за одночасного скорочення технологічного часу до 25%.

3. Процес алмазного шліфування СПА можна розглядати як пристосованість двох різних за топографією поверхонь: дискретної РПК та квазісуцільної оброблювальної поверхні СПА. В основі високопродуктивного процесу шліфування СПА в першу чергу лежить самозаточування алмазних зерен, оскільки реалізація механізму крихкого руйнування найтоншого поверхневого шару СПА можлива лише за наявності на поверхні алмазних зерен мікро- та субмікрокромок. Однак для постійного відновлення процесу формування мікро- та субмікромок на зернах круга необхідно створювати умови для ініціювання механізмів самозагострення їх шляхом макро (мікро) руйнування або їх комбінації.

Надалі цікавить раціональне використання (у плані реалізації різних способів шліфування СПА) трьох етапів пристосовуваності:

високоінтенсивного, перехідного і сталого, що мають місце.

4. Процес самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках при шліфуванні СПА має важливі особливості. Одна з них полягає в тому, що цей вид обробки можна кваліфікувати як високосиловий процес. Дослідження процесу обробки СПА за "жорсткою" схемою попередньо запровадленим кругом показало, що він у загальному випадку протікає не стабільно, а характеризується періодичними сплесками фізичних та технологічних показників обробки.

Надалі для вдосконалення розглянутого процесу шліфування СПА необхідні дослідження, що дозволяють глибше розкрити фізичні особливості процесу та уточнити механізм самозаточування алмазоносного шару круга. Це можна здійснити, наприклад, на базі широкого використання методології 3D моделювання НДС зони шліфування (система «зв'язка круга – алмазні зерна – СПА»).

5. Особливістю керованого процесу шліфування СПА алмазними кругами на металевих зв'язках є періодичність його вихідних показників, яка свідчить про недовикористання ресурсу алмазних зерен. Ефективність будь-якого процесу абразивної обробки визначається рівнем пристосовуваності взаємодіючих поверхонь і можливостями зміни цього рівня за рахунок вибору умов шліфування (умови обробки, введення в зони шліфування та управління РПК додаткової енергії тощо). Зокрема, встановлено значний ефект при використанні коливань як з інфра – так і з ультразвуковою частотою. Він пояснюється тим, що механічні коливання ініціюють процес самозагострення алмазних зерен при їх меншій висоті виступання над рівнем зв'язки, а отже, при більшій кількості в контакт з СПА.

Надалі для поліпшення розглянутого процесу шліфування СПА необхідно провести дослідження щодо вдосконалення як процесу управління станом РПК, так і параметрів механічних коливань. Потребують подальшого розвитку дослідження, наприклад, шляхом 3D моделювальної ПДВ системи шліфування в умовах введення механічних коливань з

частотою вище частоти інфразвуку до зони обробки, що сприятиме розвитку уявлень про фізичні особливості такого процесу.

На підставі проведеного аналізу була висунута робоча гіпотеза, суть якої полягає у можливості підвищення ефективності процесів обробки СПА шляхом удосконалення способів алмазного шліфування.

Об'єднуюча ідея представленої роботи полягає у комплексному теоретико - експериментальному дослідженні фізичних та технологічних особливостей процесів шліфування СПА, встановленні на цій основі основних передумов для реалізації режимів примусового самозаточування алмазних зерен та їх практична реалізація у запропонованих способах шліфування.

На рисунку 1.10 представлена структурно – логічна схема роботи, що відображає постановку завдання та шляхи досягнення поставленої мети.

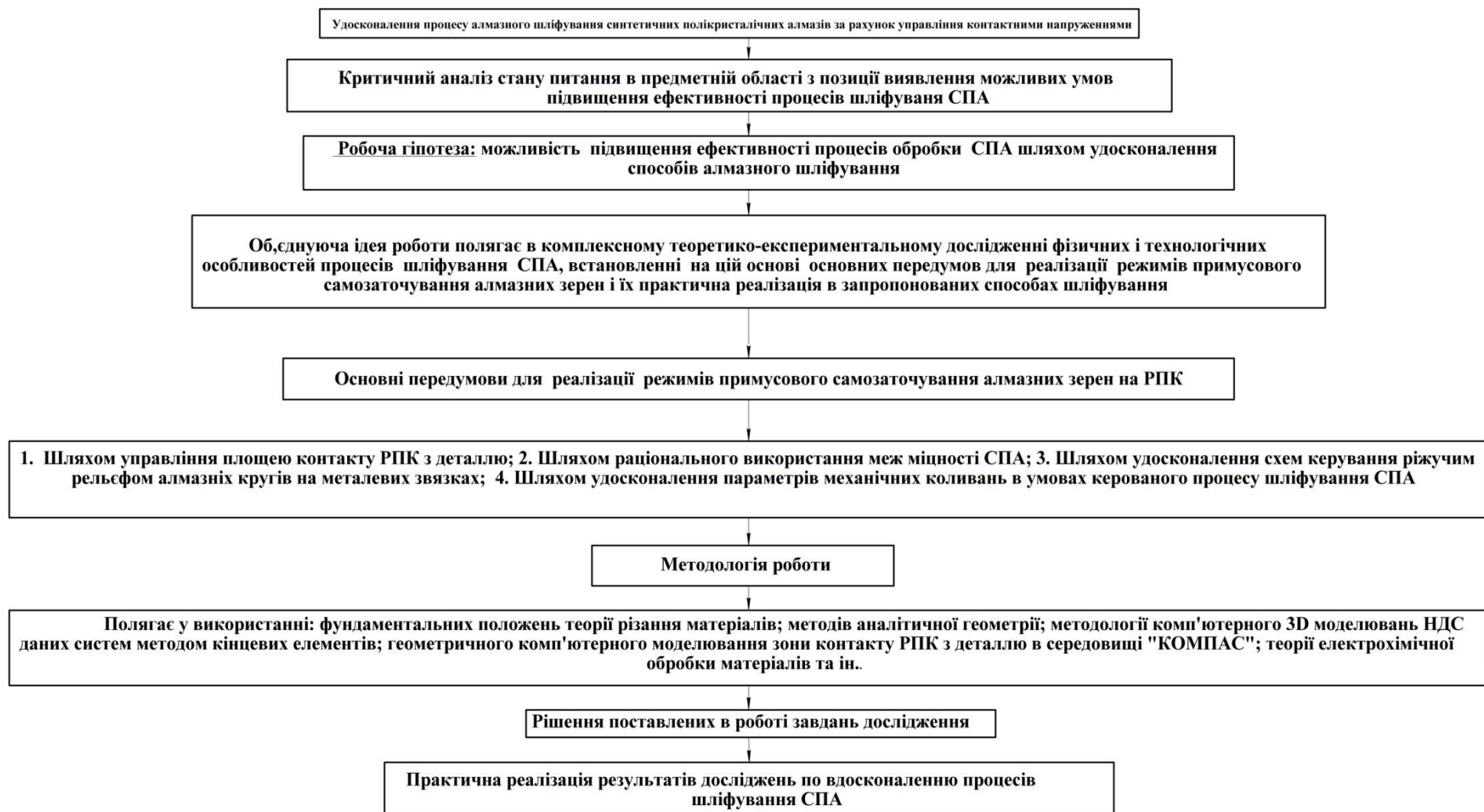


Рисунок 1.10- Структурно-логічна схема роботи

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНІ УМОВИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі викладена загальна методика проведення досліджень, а також наведено дані стосовно ряду приватних методик. Серед них ряд таких, що визнані винаходами. На їх основі виконана систематизація методик контролю лінійного зносу круга і лінійного знімання деталі. Наведено дані по математичній обробці результатів експериментальних досліджень.

2.1. Загальна методика досліджень

Устаткування. Результати теоретичних досліджень проходили підтвердження шляхом проведення практичних (верстатних) експериментів. Вони виконувалися на базі спеціального контрольного станку [36] до складу якого входили модернізовані універсально – заточувальні мод. 3Д642Е, 3В642, електрохімічний заточувальний мод. 3622Е та круглошліфувальний верстат мод. 3У12. Модернізація верстата мод. 3Д642Е (рис. 2.1) полягала в оснащенні його спеціальною вертикальною шпиндельною головкою для реалізації процесу плоского торцевого шліфування [56]. Ця головка була встановлена через ізоляційну плиту, що давало можливість здійснення електрофізикохімічної правки РПК. Зазначена вище головка мала можливість здійснення контрольованого додаткового її повороту у напрямку поздовжньої подачі на кут $\alpha \leq 5^\circ$. Це давало можливість з одного боку управління площею контакту РПК з СПА, а з іншого підвищити повноту використання алмазоносного шару круга [88]. Верстат мав можливість реалізації комбінованого процесу шліфування алмазними кругами на міцних металевих зв'язках з одночасним управлінням станом параметрів їх РПК за рахунок цілеспрямованого дозованого видалення металевої зв'язки електрофізикохімічним способом. Це створювало умови для забезпечення сталості процесу обробки [61], [107], [25]. Модернізація верстата полягала в

оснащенні його спеціальними пристроями для механізації поперечної ($S_{\text{поп.}}=0,005 - 0,1$ мм/подв. хід) та поздовжньої ($S_{\text{под.}}=0 - 5$ м/хв.) подач.

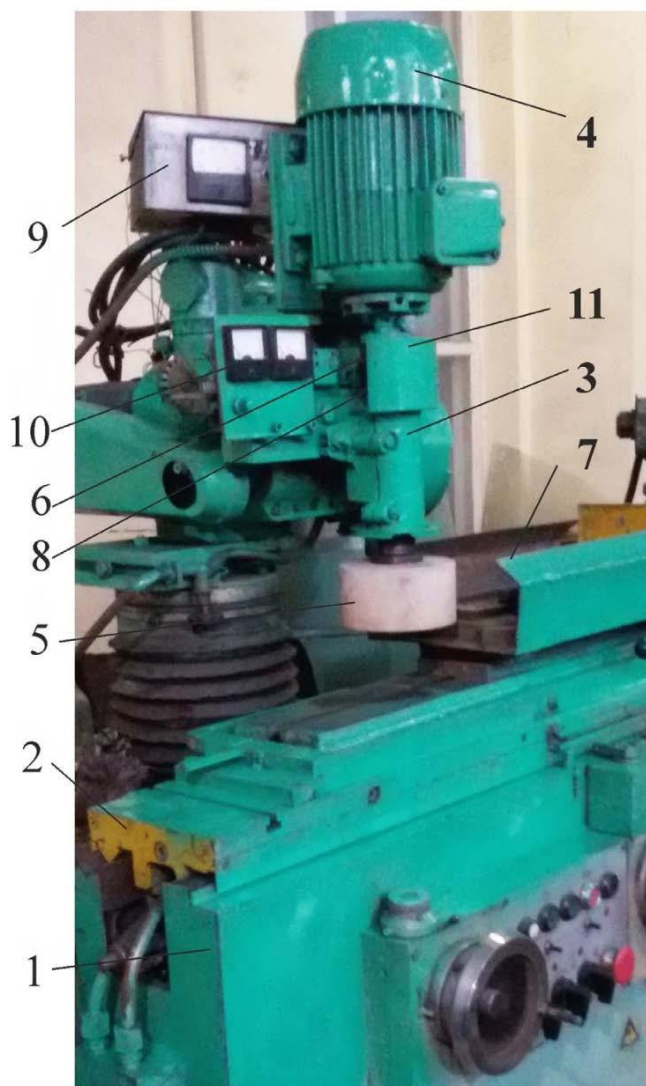


Рисунок 2.1 – Модернізований верстат мод. 3Д642Е [56]:

1 – станина; 2 – стіл; 3 – шпиндельний вузол; 4 – додатковий електродвигун; 5 – торцевий круг; 6 – муфта пружна (під захисним кожухом); 7 – ванна; 8 – струмоз'ємник (під захисним кожухом); 9 – блок автоматики; 10 – контрольні прилади; 11 – захисний кожух

Комбіновані процеси алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів, як і раніше, є затребуваними і в даний час [107]. Зокрема вони є незамінними при виробництві лезових інструментів та виробів із СПА. Для практичної реалізації таких процесів шліфування необхідно використовувати відповідну автоматичну систему [25] яка вирішувала б завдання зміни

керованого сигналу в залежності від невідомого заздалегідь змінного впливу, що задає.

Як відомо, інтенсивність електрохімічного розчинення металевої зв'язки алмазного круга в міжелектродному зазорі (МЕЗ) між правлячим катодом та РПК є функцією сили струму (щільності технологічного струму) [27], [107]. У нашому випадку є дві реальні можливості регулювання та стабілізації інтенсивності електрохімічного розчинення зв'язування круга (рис. 2.2 та 2.3). Перший заснований на регулюванні електричного опору МЭЗ (заповненого електролітом) шляхом цілеспрямованого зміни величини цього зазору при незмінному значенні технологічного напруги джерела постійного струму.

Для цього автономний катод встановлюють з можливістю здійснення переміщення перпендикулярно до РПК, наприклад, за допомогою реверсивного електродвигуна. У другому випадку при постійній або змінній величині МЕЗ щільність технологічного струму регулюють шляхом зміни напруги джерела технологічного струму (ІТТ). Для цього джерела струму передбачають механізм регулювання напруги, наприклад за допомогою автотрансформатора додатково оснащеного реверсивним електродвигуном. Тобто. в даному випадку може використовуватися та сама стабілізуюча автоматична система, що і у разі регулювання сили струму зміною величини МЕЗ.

Відмінність полягає лише в тому, що двигун керує не переміщенням катода (оскільки відсутня можливість змінювати силу струму в ланцюзі управління за рахунок регулювання величини МЕЗ), а пристроєм для зміни напруги джерела живлення (наприклад, за допомогою автотрансформатора).

Ілюстрація першого випадку представлена на рис. 2.2. Інтенсивність (швидкість) розчинення зв'язки круга, а, отже, і відновлення його ріжучих властивостей визначається величиною сили струму в ланцюзі управління (ланцюг: «мінус» ІТТ, катод 2, алмазний круг 1, струмознімач 3, «плюс» ІТТ). Регулювання сили струму при постійній напрузі джерела живлення

здійснюється величиною міжелектродного зазору Δ (внаслідок чого змінюється його електричний опір).

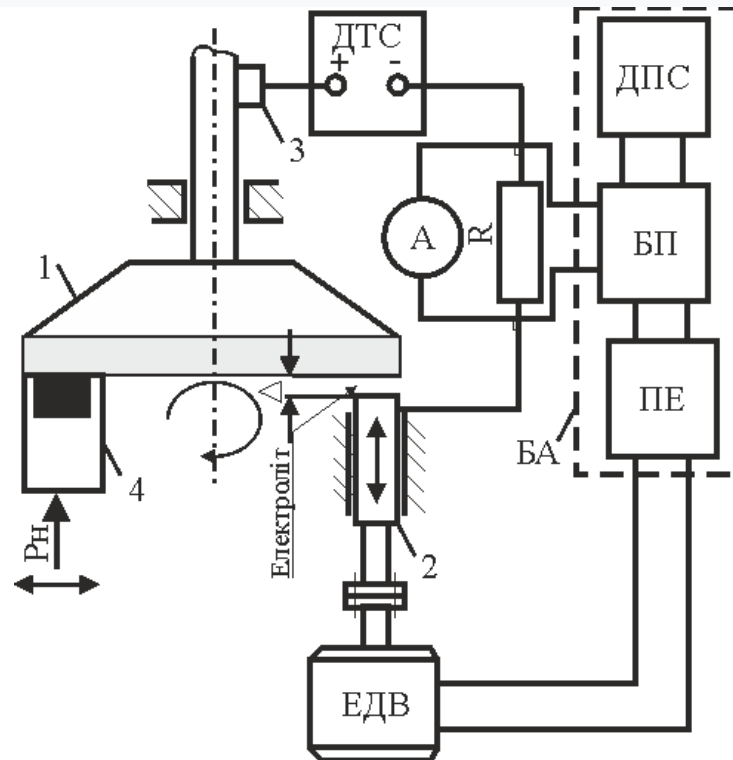


Рисунок 2.2 – Принципова схема комбінованого процесу шліфування з автоматичною стабілізацією сили струму в ланцюзі управління за рахунок зміни величини МЕЗ:

1 – алмазний круг; 2 – автономний катод; 3 – струмоз'ємник; 4 – ОМ

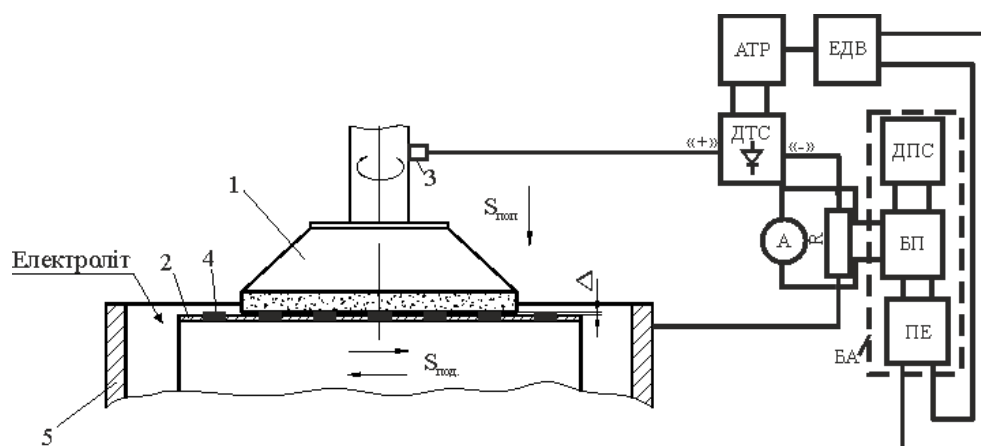


Рисунок 2.3 – Принципова схема комбінованого процесу шліфування з автоматичною стабілізацією сили струму в ланцюзі управління за рахунок зміни напруги ДТС:

1 – алмазний круг; 2 – катод (сепаратор); 3 – струмоз'ємник; 4 – ОМ; 5 – ванна

Підведення катода 2 до круга 1 або відведення від нього (залежно від величини сили струму в ланцюзі управління) відбувається автоматично за допомогою механізму переміщення катода 2. Для цього у складі зазначеного механізму є реверсивний конденсаторний електродвигун (ЕДВ), який у свою чергу керується блоком автоматики (БА). Основними елементами цього блоку є джерело стабілізованої напруги (ДСН), блок порівняння (БС), електронний підсилювач (ЕП).

Інформація про величину сили струму ланцюга управління знімається з шунта опором R у вигляді падіння напруги, значення якого залежить від сили струму. Ця напруга порівнюється в блоці порівняння (БП) із стабілізованою напругою джерела (ДСН). Результуючий сигнал посилюється електронним підсилювачем (ЕП) та надходить на реверсивний електродвигун (ЕДВ, наприклад типу РД-09). Залежно від полярності такого сигналу двигун або підводить катод 2 до круга 1, або відводить від нього. При цьому відбувається зміна величини зазору Δ , отже, і сили струму в ланцюзі управління.

На практиці цей варіант не завжди може бути здійсненим. Наприклад, у разі плоского торцевого багатомісного шліфування деталей, розміщених у сепараторі (рис. 2.3). У таких умовах можливий лише другий випадок регулювання сили струму шляхом зміни технологічної напруги ланцюга управління. Як видно з рисунка 2.3, використовується той самий блок автоматики БА, що й у першому випадку (рис. 2.2). Сигнал із шунта опором R і заданий сигнал із джерела стабілізованої напруги (ДСН) надходять до блоку порівняння (БП), а результуючий сигнал посилюється електронним підсилювачем (ЕП).

Залежно від полярності цього сигналу реверсивний електродвигун (ЕДВ, наприклад типу РД-09) змінює напрямок обертання та за допомогою спеціального механізму (наприклад, на базі автотрансформатора АТР), або збільшує, або зменшує напругу ДПС, яка після випрямлення подається на електроди (круг 1 та катод 2). Таким чином, в даному випадку може

використовуватися та сама стабілізуюча автоматична система, що і в разі регулювання сили струму зміною величини МЕЗ.

Автоматичний пристрій управління ріжучим рельєфом РПК забезпечував надійну стабілізацію сили струму на заданому рівні у межах 10 – 300А. У якості джерела технологічного струму використовувався спеціальний діодний випрямляч (рис. 2.2). Автотрансформатор забезпечував плавне підтримання напруги в діапазоні $U \text{ J } 30\text{В}$ (рис. 2.3).

Додаткове устаткування. При підготовці необхідних зразків заготовок з робочим елементом з СПА методом запаювання СПА в державках використовувалася спеціальна електроконтактна установка потужністю 3 кВт [56]. Напруга на первинній обмотці основного трансформатору регулювалася за допомогою лабораторного автотрансформатору ЛАТР-9А. На вторинній обмотці основного трансформатору, яка була зроблена з мідної шини перетином 30 x 7,5 мм² напруга знаходилася у межах 0-5 В. Кінці шини мали електричний зв'язок з двома пластинами, виконаними у вигляді напівпризм, виготовлених з електротехнічної міді перетином 75 x 15 мм. Використовували стандартні припої: на основі срібла марки ПСР 40 ($T_{\text{пл.}}=610^{\circ}\text{C}$) ГОСТ 19738-74 і мідно - цинковий марки ПМЦ - 54 ($T_{\text{пл.}}=880^{\circ}\text{C}$) ГОСТ 23137-78.

Вирізання зразків СПА необхідних розмірів з відносно великих заготовок (таблеток) для виготовлення алмазних вставок використовували електроерозійні дріт'яні вирізні верстати з ЧПК мод. 4732ФЗМ [68], [96] та Sodick AQ327L.

Можливість чи неможливість обробки СПА таким способом оцінювалася одним з двох методів. Звісно, що необхідною і достатньою умовою для здійснення можливості електроерозійної обробки на даному рівні розвитку техніки є значення питомого електричного опору СПА (не більше 0,1 Ом·м [167]). Другим показником є об'ємний вміст металічних включень в СПА (не менш ніж 3,6% [68]). В нашому випадку були використані СПА марки СКМ – Р, отримані методом спікання, які

задовольняли цим вимогам. Оскільки CVD алмази є практично діелектриками, то їх можна розрізати тільки лазером [14],[15].

Оброблювальні та інструментальні матеріали. В якості оброблюваних були прийняті наступні представники ОМ: на основі СПА – СКМ –Р, АСБ, АСПК, СВ та CVD. Для виготовлення державок використовували конструкційну сталь 45 ГОСТ 1050-74.

Шліфувальні круги. В основному у дослідженнях використовувалися алмазні шліфувальні круги: 6 А2х150х20х32 АС6 200/160 100 % М2 – 01 та 12А2 – 45⁰ 150х20 (10)х3х32 з алмазними зернами марок АС4, АС6 на металевих (М2 – 01 та М2 – 02) і органічних (В2 – 01 та ТО2) зв'язках.

При шліфуванні СПА кругами на органічних зв'язках в якості ТР використовувався трьох – відсотковий розчин кальцинованої соди (Ca_2CO_3) у воді з додаванням триетаноламіну 0,5–1%, а у разі застосування електрохімічного процесу з управлінням РПК – електроліт - водний розчин NaNO_3 – 3%, та Ca_2CO_3 – 1,5%. Для забезпечення стабільності протікання керованого електрохімічного впливу на РПК ємність з охолоджувальною рідиною верстата мала систему її фільтрації методом відстою [105].

Засоби вимірювання. Вимірювання параметрів і чинників процесу шліфування виконувалося за необхідністю з використанням можливостей спеціального стенду [96]. Деякі конкретні дані щодо використання стенду наведені по ходу опису досліджень.

Вибір засобів і умов вимірювання, що забезпечують необхідну точність проводився з урахуванням вимог та рекомендацій ГОСТ 8.051-81 та РД 50-98-86. Цей стандарт містить значення допустимих похибок вимірювань в залежності від номінальних розмірів і допусків на виготовлення. Таким чином враховувалось найбільше можливе значення відхилення яке уявляє собою граничну похибку вимірювання ($\Delta_{\text{гран}}$). Гранична похибка вимірювань розглянутого засобу не повинна була перевищувати допустиму ($\Delta_{\text{лоп}}$), тобто дотримувалися виконання умови $\Delta_{\text{гран}} < \Delta_{\text{лоп}}$. Для настроювання вимірювальних засобів використовувались установочні кінцеві міри 3 класу.

Відомості про використані у проектному технологічному процесі засоби вимірювання наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні засоби вимірювання

№ з/п	Параметр вимірювання (контролю)	Засіб вимірювання (контролю)
1.	Потужність шліфування.	Ватметр Д566, вимірювальний комплекс К50.
2.	Складові сили різання.	Динамометр 3-х компонентний з тензорезисторами ПКБ (база 10 мм) R=200 Ом (24 шт.). Мікроамперметр М 226.
3.	Напруга та сила струму в ланцюзі правки.	Вольтметр М336 (0-30 В). Амперметр М 362 з набором шунтів на струми 5, 25, 50, 100, 200 та 300 А.
4.	Лінійні значення зносу круга (Δh) та знімання СПА (Δl).	Штангенциркуль цифровий ШЦЦ – 125 з ціною ділення 0,01; мікрометри гладкі цифрові типу МКЦ з ціною ділення 0,001 мм. Індикатор 1 МИГ – 0 ГОСТ 9696 – 82 з ціною ділення 0,001 мм і межею вимірювання 0 – 1 мм.

Статистична обробка даних і математичне планування експериментів. При проведенні досліджень в необхідному обсязі використовувалися методи математичної статистики [37], [58], [117], [151]. Зокрема, результати дослідів перевірялися на предмет виявлення грубих похибок, середні значення отриманих даних обчислювалися з одночасним визначенням їх довірчих інтервалів; проводився аналіз суттєвості відмінності середніх значень [58] в результаті чого приймалися відповідні рішення.

При визначенні оптимальних умов алмазного шліфування СПА кругами на органічних і металевих зв'язках використовувалося математичне планування багатофакторного експерименту. Зокрема реалізовувався D - оптимальний план другого порядку типу В4 [74], [91], [113]. Розрахунки виконувалися з використанням пакетів програм Maple та Exel [9].

2.2. Методика проведення мікроскопічних досліджень

Для дослідження стану оброблювальної поверхні СПА та РПК та інше

застосовувався метод мікроскопічних досліджень [56]. Для цього використовували мікроскоп МБС 9 (<http://www.mbs10.ru/mbs-9.html>), який призначений для спостереження об'ємних предметів для різних галузей застосування (машинобудування, приладобудування та інші галузі науки і техніки). Окуляр мікроскопу мав збільшення $12,5^{\times}$, а набір об'єктивів у діапазоні $0,8 - 7^{\times}$. Таким чином діапазон збільшення складав $10 - 87,5^{\times}$.

Для забезпечення візуалізації об'єктів що розглядалися, використовували цифрову камеру TouPCam UCMOS01300KPA (<http://www.laboratorium.dp.ua/item/12>) сумісну з більшістю моделей мікроскопів вітчизняного і зарубіжного виробництва (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Мікроскоп у зборі з цифровою камерою [56]

Основні характеристики цифрової камери: максимальна роздільна здатність 1280×1024 пікс.; діагональ матриці - $1/2''$ ($6,66 \text{ мм} \times 5,32 \text{ мм}$,

діагональ 8,52 мм); розмір пікс. - 5,2 x 5,2 міІнтерфейс - USB 2; динамічний діапазон - 60,0 дБ. Поле зору приблизно відповідає 10^X окуляра.

Програмне забезпечення камери TourView багатофункціональне, дозволяє здійснювати попередній перегляд поточного зображення (в звичайному або повноекранному режимі), робити фотографії досліджуваних об'єктів (з можливістю подальшого редагування), записувати відеофайли і проводити обробку отриманих матеріалів.

Отримані зображення можна зберегти в більшості форматів (BMP, JPEG, PNG, TIFF і т.д.), формат відеофайлу залежить від підтримуваної системи кодеків. Баланс білого виконується як вручну, так і автоматично, і дозволяє отримати зображення з природною передачею кольору. Матриця забезпечує чітке зображення з якісним промальовуванням елементів.

2.3. Методики контролю лінійного зносу алмазного круга

Літературний аналіз і патентний пошук в даній предметній області показали на відсутність системного підходу. Існують два основних метода визначення зносу шліфувального круга. Перший ваговий і другий лінійний (ГОСТ 16181-72). В першому випадку круг знімають з верстата, що є його суттєвим недоліком. В другому вимірювання зносу круга здійснюють безпосередньо на верстаті прямим методом за допомогою спеціальних пристроїв [125]. Але всі вони потребують зупинки верстата. У зв'язку з цим було поставлено завдання розширення технологічних можливостей процесу контролю лінійного зносу шліфувального круга при одночасному забезпеченні достовірності отриманих результатів. Нижче наведені запропоновані методики

Методика прямого контролю лінійного зносу алмазного круга безпосередньо в зоні шліфування. Суть способу полягає в тому, що у якості деталі, що шліфується використовують трубчастий елемент якому повідомляють обертальний рух навколо своєї осі, робочу торцеву поверхню трубчастого елемента вводять у контакт з робочою поверхнею круга, що

обертається і підтискають до неї з постійним зусиллям, а відстеження положення робочої поверхні круга здійснюють опосередковано для чого вимірювальний елемент вводять у контакт безпосередньо з робочою торцевою поверхнею трубчастого елемента (пат. 146527 Україна).

Технічний результат полягає в тому, що торцева поверхня трубчастого елемента постійно шліфується кругом, а, отже, знаходиться на тому ж самому рівні, що і робоча поверхня круга. Але на відміну від останньої вона гладка, а тому мало впливає на зношування вимірювального щупа. А це гарантує отримання достовірних результатів вимірювання лінійного зносу круга незалежно від марки абразивних зерен.

Таким чином, відстеження положення робочої поверхні круга опосередковано шляхом введення вимірювального елемента у контакт безпосередньо з робочою торцевою поверхнею трубчастого елемента, суттєво розширює технологічні можливості процесу контролю лінійного зносу круга.

Як видно з рисунка 2.5 (1 – шпиндель; 2 – шліфувальний алмазний круг; 3 – алмазоносний шар круга; 4 – трубчастий елемент; 5 – ніжка індикатора), круг 2, встановлюється на шпинделі 1 верстата. Робочою частиною круга є алмазоносний шар 3.

Саме він зношується при шліфуванні деталі 4 у якості якої виступає трубчастий елемент. Останній встановлюється на пристосуванні (на рисунку 2.5 а не показане) з можливістю здійснення обертального і прямолінійного поступального рухів. В першому випадку використовується, наприклад, електродвигун, а в другому кулькові напрямні з пружиною стиску для створення постійного зусилля (P) підтискання трубчастого елемента 4 до робочої поверхні 3 круга 2. З вільною частиною робочого торця трубчастого елемента 4 знаходиться в постійному або періодичному контакті ніжка індикатора 5 за допомогою якого у даному випадку здійснюється контроль лінійного зносу круга. Величину зносу круга Δh розраховують як різницю показань індикатора після (h_2) та до (h_1) процесу обробки у продовж

визначеного часу (рис. 2.5, б). Замість індикатора можуть бути застосовані і інші вимірювальні пристрої (тензометричні балочки, ємнісні, індукційні датчики та ін., що дозволяє вести безперервний запис лінійного зносу круга 2). Таким чином відстеження положення робочої поверхні круга здійснюють опосередковано шляхом введення вимірювального елемента у контакт не з робочою (різальною) поверхнею круга, а безпосередньо з гладкою робочою торцевою поверхнею трубчастого елемента.

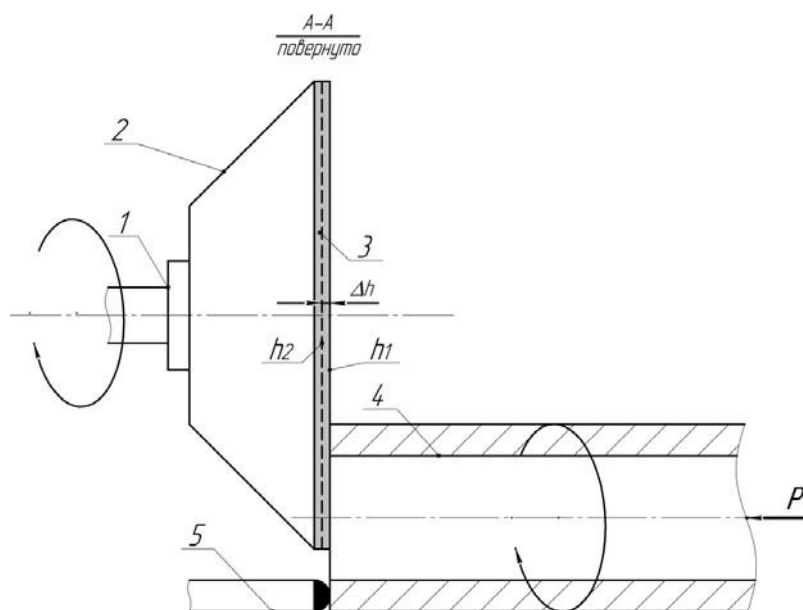
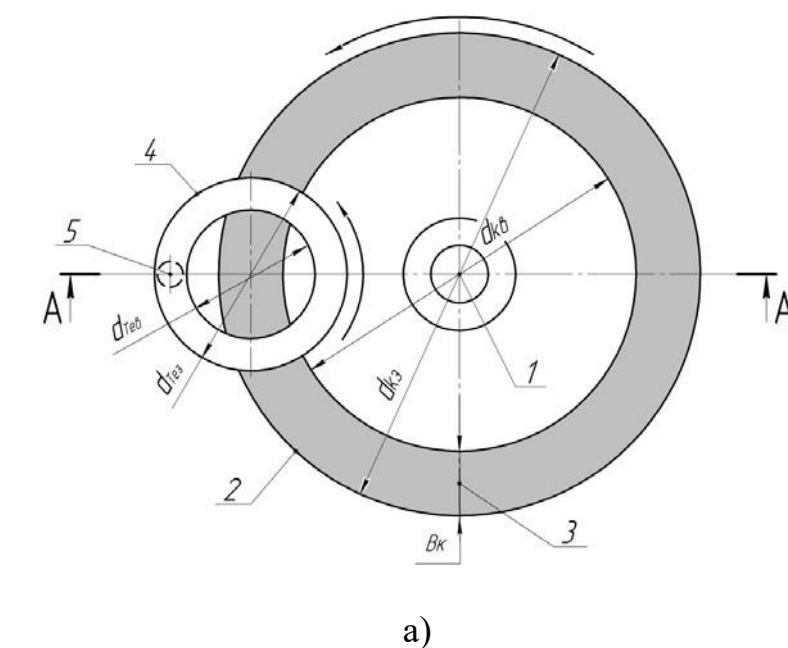


Рисунок 2.5 – Схема способу прямого контролю лінійного зносу круга в зоні обробки

Зовнішній діаметр трубчастого елемента ($d_{\text{тез}}$) обирається з конструктивних міркувань. Внутрішній діаметр трубчастого елемента ($d_{\text{тев}}$) повинен бути більшим ніж ширина робочої поверхні круга (B_k), яка уявляє собою половину різниці між зовнішнім ($d_{\text{кз}}$) і внутрішнім ($d_{\text{кв}}$) діаметрами шліфувального круга.

Методика прямого контролю лінійного зносу алмазного круга в автономній зоні. Його суть полягає в тому, що трубчастий елемент встановлюють в автономній зоні, повідомляють йому поступальний рух в напрямку зносу круга з постійною швидкістю, значення останньої приймають більше ніж інтенсивність лінійного зносу круга, а у якості матеріалу робочої частини трубчастого елемента обирають такий, що з одного боку має мінімальний вплив на знос круга, а з іншого володіє мастильним ефектом, наприклад, на заставі графіту (пат. 148089 Україна).

Технічний результат полягає в тому, що розміщення трубчастого елемента в автономній зоні дозволяє проводити вимірювання лінійного зносу круга при шліфуванні деталей різної форми, а це суттєво розширює технологічні можливості процесу контролю лінійного зносу шліфувального круга. Повідомлення трубчастому елементу поступального руху в напрямку зносу круга з постійною швидкістю, значення якої приймають більше ніж інтенсивність лінійного зносу круга гарантовано забезпечує сталість його контакту з робочою поверхнею круга, а, отже, і достовірність результатів вимірювання. Використання матеріалу робочої частини трубчастого елемента на заставі графіту практично не впливає на знос круга, а завдяки наявності мастильного ефекту сприяє поліпшенню ефективності процесу шліфування в цілому.

Як видно з рис. 2.6 (1 – шпиндель; 2 – шліфувальний алмазний круг; 3 – алмазоносний шар круга; 4 – оброблювальна деталь; 5 – трубчастий елемент (робоча частина); 6 – ніжка індикатора), круг 2, встановлюється на шпинделі 1 верстата. Робочою частиною круга 2 є алмазоносний шар 3 який зношується при шліфуванні деталі 4. Остання встановлюється в

пристосуванні (на рисунку не показано) з можливістю здійснення прямолінійного поступального руху в напрямку перпендикулярному робочій поверхні 3 круга 2 (рис. 2.6, б).

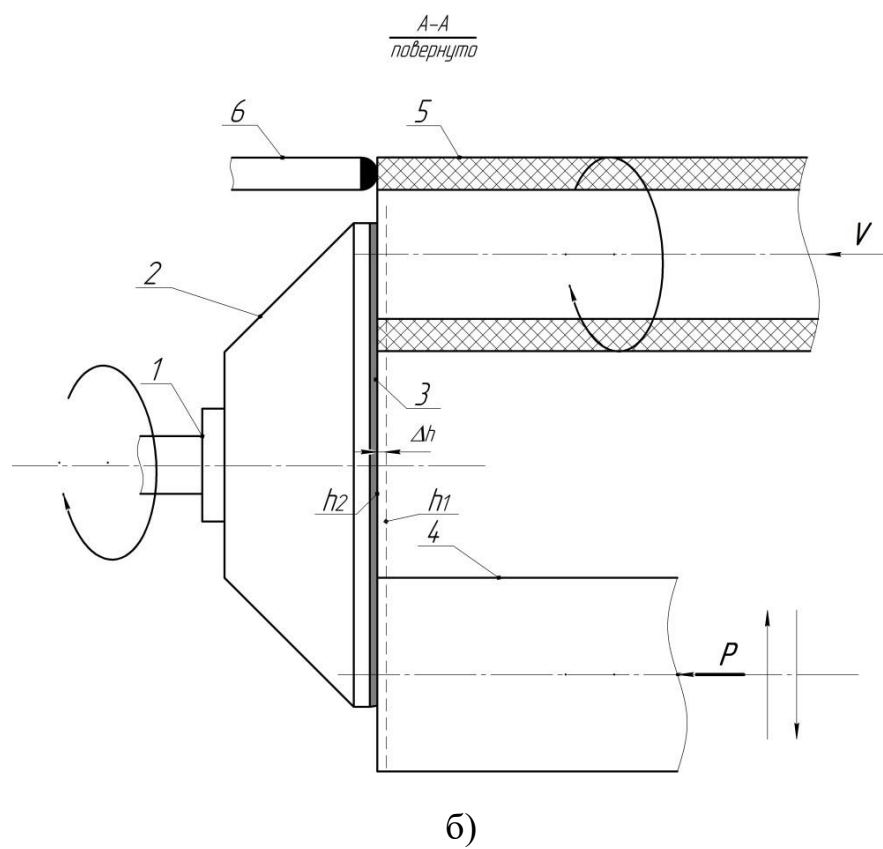
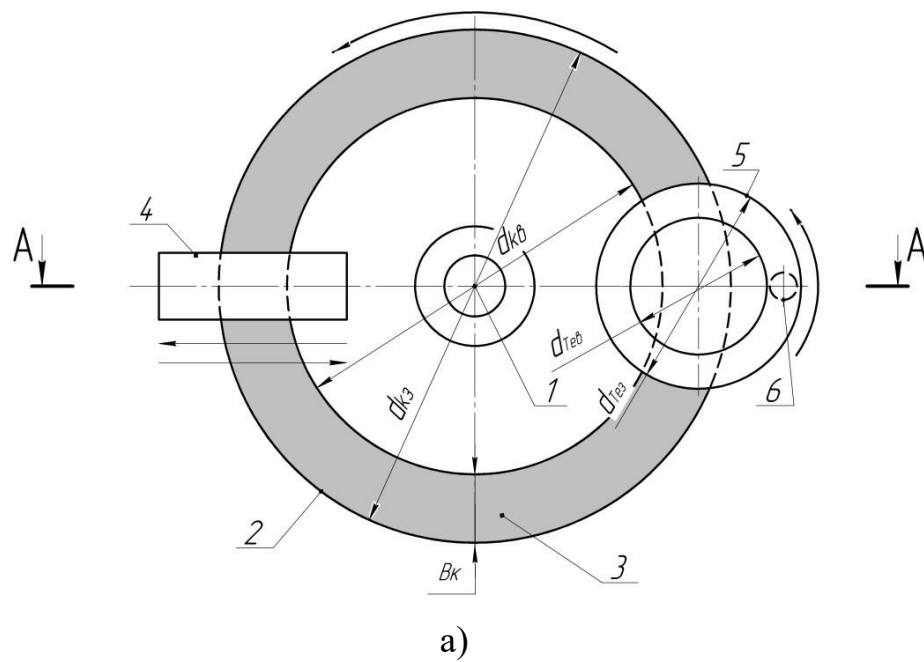


Рисунок 2.6 – Схема способу прямого контролю лінійного зносу круга в автономній зоні

Для цього зручно використовувати, наприклад, кулькові напрямні з пружиною стиску для створення постійного зусилля (P) підтискання деталі 4 до робочої поверхні 3 круга 2. Шпиндельна голівка або стіл верстата мають можливість здійснення осциляції (рух подовжньої подачі) в напрямку паралельному робочій поверхні круга. Трубчастий елемент 5 встановлюється в автономній зоні з можливістю здійснення примусового поступального руху в напрямку зносу круга з постійною швидкістю V . Цей рух необхідно здійснювати за жорсткою схемою. Значення швидкості V приймають більше ніж інтенсивність (швидкість) лінійного зносу круга. З вільною частиною робочого торця трубчастого елемента знаходиться в постійному або періодичному контакті ніжка індикатора 6 за допомогою якого у даному випадку здійснюється контроль лінійного зносу круга. Величину зносу круга Δh розраховують як різницю показань індикатора після (h_2) та до (h_1) процесу обробки у продовж визначеного часу. Замість індикатора можуть бути застосовані і інші вимірювальні пристрої (тензометричні балочки, ємнісні, індукційні датчики та ін., що дозволяє вести безперервний запис лінійного зносу круга 2).

Зовнішній діаметр трубчастого елемента ($d_{\text{тез}}$) обирається з конструктивних міркувань. Внутрішній діаметр трубчастого елемента ($d_{\text{тев}}$) повинен бути більшим ніж ширина робочої поверхні круга (B_k), яка уявляє собою половину різниці між зовнішнім ($d_{\text{кз}}$) і внутрішнім ($d_{\text{кв}}$) діаметрами шліфувального круга.

Методика непрямого контролю лінійного зносу алмазного круга. В основі способу закладена відома ідея про те, що у процесі шліфування опосередковано відстежують положення робочої поверхні круга в напрямку її зношування, а величину лінійного зносу круга встановлюють шляхом її розрахунку як частки розміру, котрий відстежують. Його суттєвим недоліком є складність застосування. Це пов'язано з тим, що він потребує використання додаткового пристрою для опосередкованого відстеження положення робочої поверхні шліфувального круга.

В основі способу, що пропонується поставлено завдання спрощення контролю лінійного зносу шліфувального круга при одночасному забезпеченні достовірності отриманих результатів.

Поставлена мета досягається тим (пат. 148076 Україна), що упродовж певного часу відстежують сумарне лінійне переміщення деталі у напрямку зношування робочої поверхні круга, вимірюють лінійний з'їм деталі у тому ж напрямку і за той же час, а лінійний знос круга розраховують за виразом:

$$\Delta h = \Delta S_{\Sigma} - \Delta l, \quad (2.1)$$

де Δh – лінійний знос круга, мм; ΔS_{Σ} – сумарне лінійне переміщення деталі, мм; Δl – лінійний з'їм деталі, мм.

Технічний результат полягає в тому, що при відстеженні робочої поверхні круга деталь, яка постійно знаходиться у контакті з нею, переміщується у напрямку зносу круга на сумарну величину до складу якої входять як величина зносу круга, так і припуск знятий з деталі. І якщо вилучити з сумарної величини переміщення деталі значення знятого припуску то можна з високою точністю визначити лінійний знос круга.

Такий підхід значно спрощує контроль лінійного зносу круга при одночасному забезпеченні високої достовірності отриманих результатів.

Як видно з рисунка 2.7 (1 – шпиндель; 2 – шліфувальний алмазний круг; 3 – алмазоносний шар круга; 4 – оброблювальна деталь; 5 – верстатне пристосування; 6 – ніжка індикатора), круг 2, встановлюється на шпинделі 1 верстата. Робочою частиною круга є алмазоносний шар 3. Саме він зношується за певний час при шліфуванні деталі 4 на величину Δh яка знаходиться між двома положеннями (h_1 та h_2) робочої поверхні круга до та після обробки відповідно (рис. 2.7 б). Стіл верстата або шпиндельний вузол мають можливість здійснювати осциляцію в напрямку паралельному робочій поверхні шліфувального круга. Деталь 4 встановлюється в пристосуванні 5 з можливістю здійснення разом з ним прямолінійного поступального руху в напрямку перпендикулярному робочій поверхні шліфувального круга. Для цього зручно використовувати кулькові напрямні з пружиною стиску для

створення постійного зусилля (P) деталі 4 до алмазного шару 3 круга 2. З елементом пристосування 5 знаходиться в контактні ніжка індикатора 6 за допомогою якого у даному випадку здійснюється відстеження сумарного лінійного переміщення деталі 4 (Δl_{Σ}).

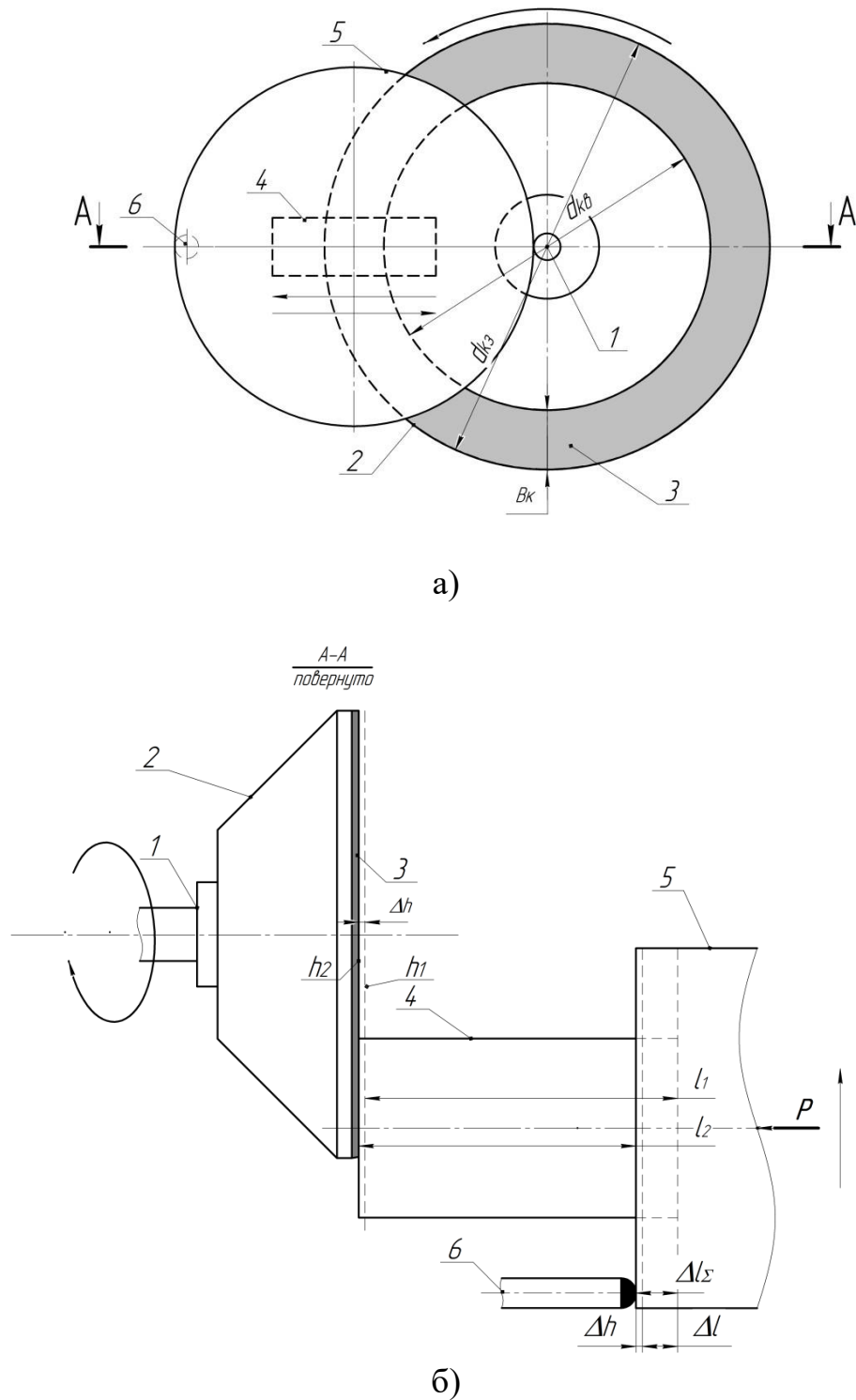


Рисунок 2.7 – Схема способу непрямого контролю лінійного зносу алмазного круга

Величину знятого припуску Δl з деталі визначають як різницю показань замірів деталі до (l_1) та після (l_2) процесу обробки у продовж визначеного часу. Замість індикатора 6 можуть бути застосовані і інші вимірювальні пристрої (тензOMETричні балочки, ємнісні, індукційні датчики та ін., що дозволяє вести безперервний запис лінійного переміщення деталі).

При використанні пружної схеми обробки у процесі шліфування осциляція деталі реалізується таким чином, щоб деталь не виходила за межі ширини робочої поверхні круга (B_k), яка уявляє собою половину різниці між зовнішнім ($d_{kз}$) і внутрішнім ($d_{кв}$) діаметрами шліфувального круга.

2.4. Розробка методики непрямого контролю лінійного знімання деталі

Методика, що пропонується базується на ідеї згідно якої упродовж певного часу відстежують сумарне лінійне переміщення деталі у напрямку зношування робочої поверхні круга, а величину лінійного знімання деталі встановлюють шляхом її розрахунку як частки розміру, котрий відстежують. Суттєвим недоліком такого підходу є практична неможливість безперервного відстеження лінійного знімання деталі у процесі шліфування.

Для усунення цього недоліку запропоновано (пат. 148076 Україна) у процесі шліфування додатково здійснювати контроль лінійного зносу круга, а лінійне знімання деталі розраховувати за виразом:

$$\Delta l = \Delta S_{\Sigma} - \Delta h, \quad (2.2)$$

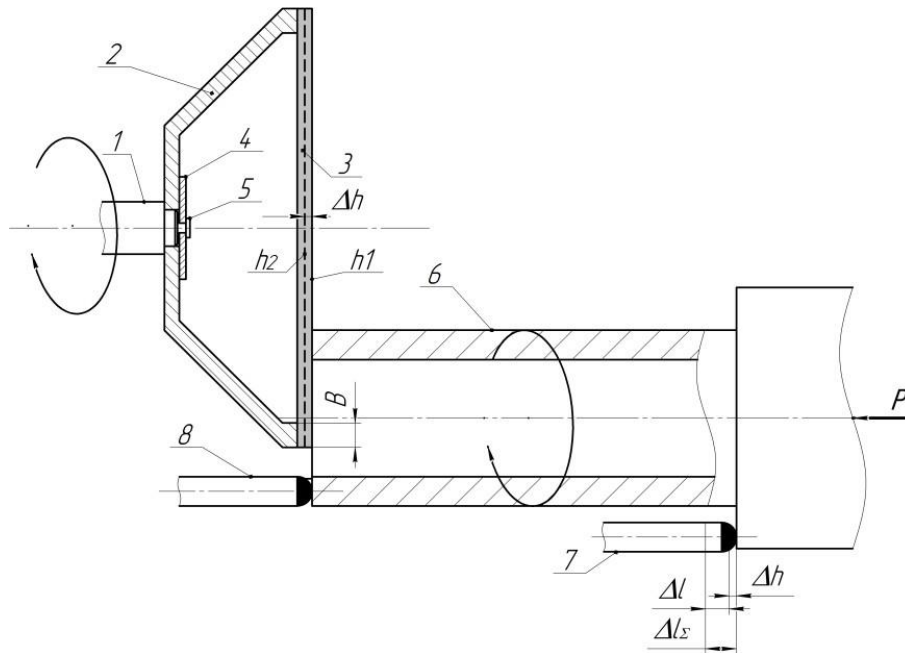
де Δl – лінійне знімання деталі, мм; ΔS_{Σ} – сумарне лінійне переміщення деталі, мм; Δh – лінійний знос круга, мм., причому значення вказаних параметрів визначають за один і той же інтервал часу.

Технічний результат полягає в тому, що при відстеженні робочої поверхні круга деталь, яка постійно знаходиться у контакті з нею, переміщується у напрямку зносу круга на сумарну величину до складу якої входять як величина зносу круга, так і знімання деталі. Якщо вилучити з

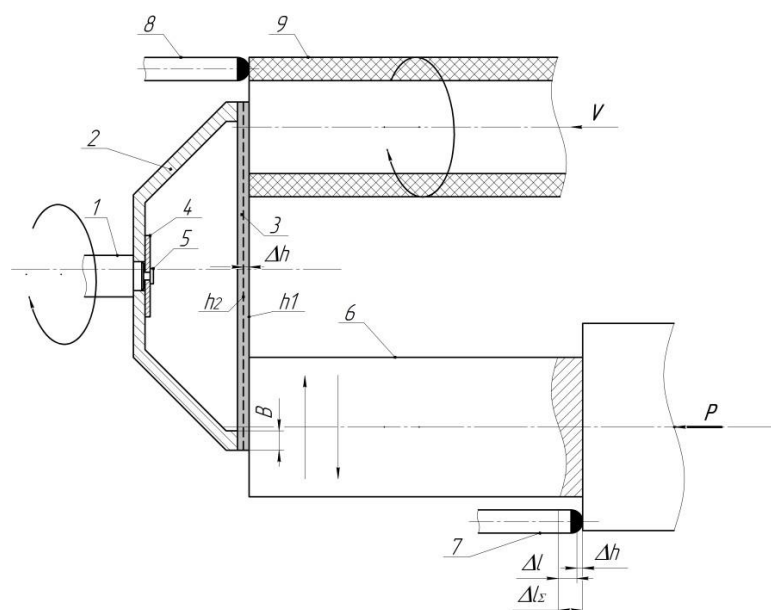
сумарної величини переміщення деталі лінійний знос круга, то можна з високою точністю визначити значення лінійного знімання деталі.

Такий підхід не тільки спрощує контроль лінійного знімання деталі, а дає можливість робити це безперервно у часі.

Суть методики пояснюється рисунками стосовно деталей трубчастої (рис. 2.8, а) та звичайної (рис. 2.8, б) конструкцій.



а)



б)

Рисунок 2.8 – Схема способу непрямого контролю лінійного знімання деталі

Значення позицій 1-8 на фігурах співпадають. Як видно з рисунку 2.8, а (1 – шпиндель; 2 – шліфувальний алмазний круг; 3 – алмазоносний шар круга шириною (В); 4 – шайба; 5 – болт; 6 – деталь трубчастої форми; 7, 8 – індикатори для відстеження сумарного лінійного переміщення ΔS_{Σ} деталі 6 та лінійного зносу Δh алмазоносного шару 3 відповідно), круг 2, встановлюється на шпинделі 1 верстата. Робочою частиною круга є алмазоносний шар 3. Саме він при шліфуванні деталі 6 зношується за певний час на величину Δh , яка знаходиться між двома положеннями (h_1 та h_2) робочої поверхні круга (до та після обробки відповідно). Деталь 6 встановлюється в пристосуванні з можливістю здійснення обертального руху і підтискається до робочої поверхні круга з постійним зусиллям (Р).

Якщо деталь 6 має звичайну форму (рис. 2.8, б), то вона встановлюється в пристосуванні з можливістю здійснення зворотно поступального руху в напрямку паралельному робочій поверхні круга 2 і підтискається до неї з постійним зусиллям (Р). Для відстеження сумарного лінійного переміщення (ΔS_{Σ}) деталі 6 застосовується індикатор 7. Контроль лінійного зносу (Δh) алмазоносного шару 3 круга 2 здійснюється в автономній зоні за допомогою індикатора 8 і трубчастого елемента 9 який обертається навколо своєї осі і переміщується перпендикулярно робочій поверхні круга 2 зі швидкістю (V), дещо більшою ніж швидкість зносу алмазоносного шару 3. Замість індикаторів 7 та 8 можуть бути застосовані і інші вимірювальні пристрої (тензометричні балочки, ємнісні, індукційні датчики та ін.), що дозволяє вести безперервний запис у часі лінійного переміщення деталі та зносу алмазоносного шару круга, а, отже, і лінійного знімання деталі.

2.5. Методика визначення продуктивності, питомих витрат алмазів круга та енергоємності процесу шліфування

Продуктивність обробки Q ($\text{мм}^3/\text{хв.}$). Продуктивність обробки визначалася як обсяг матеріалу, знятого в одиницю часу, і розраховувалася за формулою [96]:

$$Q = \frac{\Delta V}{\tau} = \frac{\Delta l \cdot S}{\tau}, \quad (2.3)$$

де ΔV - об'єм, знятий з полікристалу, мм^3 ; τ - тривалість шліфування, хв.; Δl - лінійне зняття, мм; S - оброблювальна площа, мм^2 .

Відносна похибка визначення продуктивності не перевищувала 5%.

Питомі витрати алмазних зерен круга q (мГ/мм^3). Оскільки основну масу експериментів проводили з застосуванням алмазних кругів, працюючих торцем, то нижче наводимо формулу для визначення q саме для них:

$$q = \frac{200 \cdot \Delta h \cdot Ka}{t \cdot \Delta V}, \quad (2.4)$$

де Δh - лінійний знос круга, мм; Ka - маса алмазів в алмазоносному шарі круга, карат; t - товщина алмазоносного шару круга, мм.

Силіві та енергетичні характеристики. Вимірювання складових сили різання (P_z , P_y , P_x) здійснювалося трикомпонентним динамометром з восьмигранними пружними елементами [96]. Останній підключався до тензометричної станції Топаз-3-01, вихідний сигнал з якої, пропорційний деформацій пружних елементів, подавався на вхід самописних приладів.

Додатково до розглянутих вище показників визначалася питома енергоємність процесу шліфування B (Дж / мм^3). Її оцінювали як енергію, що витрачалася на зняття об'єму матеріалу [124], [125]:

$$B = \frac{P_z \cdot V_K}{Q}, \quad (2.5)$$

де P_z - тангенціальна складова сили різання, Н; V_K - швидкість шліфувального круга, м/с.

2.6. Методика визначення середніх значень вихідних параметрів в умовах явища періодичності процесів шліфування

Наявність такої особливості процесів шліфування СПА як періодичність зміни вихідних показників у часі (див. розділ 1) дало

можливість з одного боку поглибити фізичні уявлення про нього, а з іншого поставило певні вимоги стосовно визначення середніх значень деяких з цих параметрів.

Цей підхід стосується в першу чергу визначення таких технологічних параметрів, як лінійний знос круга, лінійне знімання СПА, а, отже питомих витрат алмазів круга (q , мг/мм³) та продуктивності обробки (Q , мм³/хв.) які розраховуються на їх основі. При проведенні досліджень для коректного визначення середніх значень цих та інших параметрів витримувалися декілька вимог. По-перше приробку алмазного круга здійснювали на тих самих режимах що і основні випробування до появи трьох-чотирьох стабільних в часі сплесків прийнятого вихідного параметра. По-друге час основних випробувань приймався кратним періоду слідування відзначених сплесків. По-третє кількість сплесків за один експеримент приймалася виходячи з співвідношення між похибкою вимірювального пристрою і абсолютним значенням параметру (за один сплеск), що контролювався з урахуванням вимог та рекомендацій ГОСТ 8.051-81 та РД 50-98-86.

Запропонований методичний підхід дозволяв забезпечити достатню точність вимірювання значень контрольованих параметрів при суттєвому зниженні часу на випробування.

2.7. Методика математичної обробки експериментальних даних

Завдання математичної обробки експериментальних даних вирішувалось скориставшись рекомендаціями [151], [56], [94]. Для прикладу встановимо узагальнену залежність імпульсу сили ΔP від маси вантажу m та амплітуди механічних коливань A . Це додасть зручності при практичному користуванні. Для цього будемо в Excel приватні одномірні графіки ступеневих залежностей $\Delta P = f(A)$ (а) та $\Delta P = f(m)$ (б), які показано на рисунку 2.9.

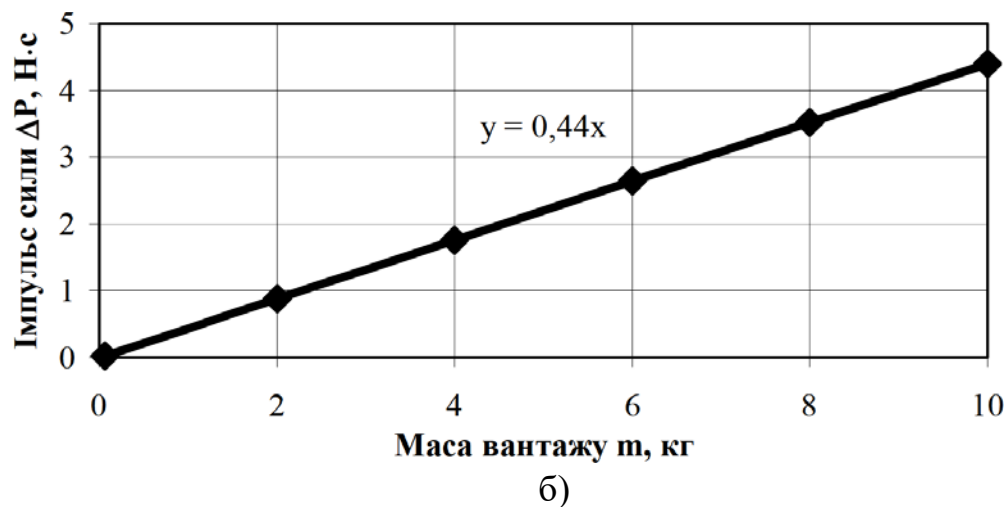
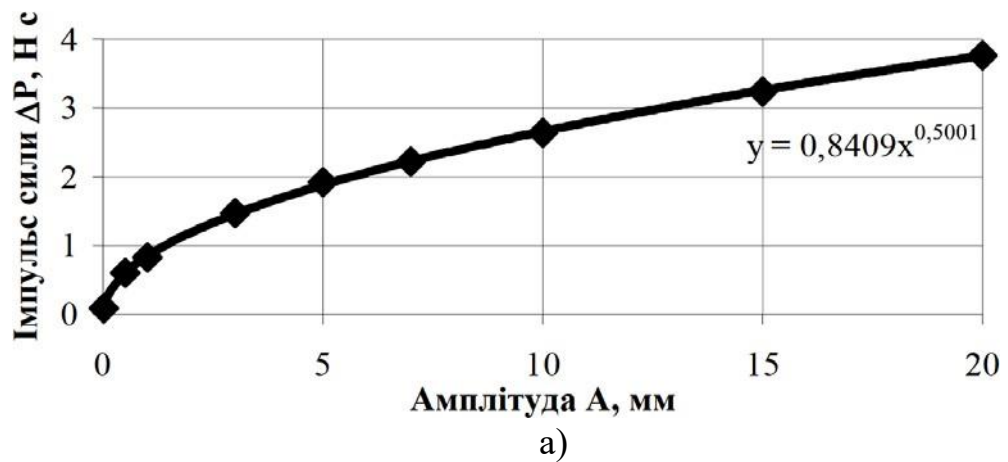


Рисунок 2.9 – До визначення узагальненої залежності $\Delta P = f(A, m)$

Для цього треба скористатися командою «Майстер діаграм». Приватні (одномірні) залежності, які відображують вплив одного фактора, у готовому вигляді пропонує програма Ексел (для цього існує команда «Формат лінії трейду»). В нашому випадку вони мають вигляд:

$$\Delta P = 0,84 \cdot A^{0,5}; \Delta P = 0,44 \cdot m^1$$

Звідси маємо коефіцієнти $A_1 = 0,84$, а $A_2 = 0,44$.

Визначаємо приватні постійні:

$$C_A = \frac{0,84}{m^1} = \frac{0,84}{6^1} = 0,14; \quad C_m = \frac{0,44}{A^{0,5}} = \frac{0,44}{10^{0,5}} = 0,14$$

Тоді загальна постійна буде дорівнювати:

$$C_{\Delta P} = \frac{C_A + C_m}{2} = \frac{0,14 + 0,14}{2} = 0,14$$

Отримуємо остаточний вид шуканої функціональної залежності:

$$\Delta P = 0,14 \cdot m \cdot A^{0,5},$$

де параметри m та A беруться відповідно в кг та мм.

Ці дані будуть використані нами у розділі 4 при розробці способу шліфування з введенням в зону обробки низькочастотних механічних коливань.

Висновки

1. Дослідний стенд, який використовувався для проведення експериментів, в максимальному ступені забезпечує реалізацію відомих і оригінальних методик. В його основу покладено запропонована конструкція плоскошліфувального верстата, що включав в себе ряд технічних рішень, захищених низкою патентів України на корисні моделі.

2. Для мікроскопічного дослідження оброблювальних поверхонь і РПК безпосередньо на робочому місці використана оригінальна методика на базі біноккулярного мікроскопу МБС 9 і цифрової камери TourCam UCMOS01300KPA.

3. Запропоновані дві оригінальні методики прямого контролю як безпосередньо в зоні шліфування (*патент № 146527, Україна*), так і в автономній зоні (*патент № 148089, Україна*), а також методику непрямого контролю (*патент № 148076, Україна*) лінійного зносу алмазного круга які орієнтовані на процес шліфування СПА.

4. Запропоновано оригінальну методику непрямого контролю (*патент № 146527, Україна*), лінійного знімання деталі орієнтовану на процес шліфування СПА.

5. На основі запропонованих оригінальних методик виконана систематизація методик контролю лінійного зносу круга і лінійного знімання деталі.

6. З метою підвищення точності визначення середніх значень вихідних параметрів в умовах явища періодичності процесів шліфування використана оригінальна методика основана на врахуванні особливостей приробки алмазного круга і оптимального часу проведення основних випробувань.

7. Для математичної обробки експериментальних даних використана удосконалена методика отримання степеневих залежностей вихідних показників від параметрів обробки.

РОЗДІЛ 3

УТОЧНЕННЯ МЕХАНІЗМУ САМОЗАТОЧУВАННЯ АЛМАЗНИХ КРУГІВ ШЛЯХОМ 3D МОДЕЛЮВАННЯ НДС СИСТЕМИ «СПА-АЛМАЗНЕ ЗЕРНО-МЕТАЛОФАЗА-ЗВ'ЯЗКА КРУГА»

В розділі наведено результати 3D моделювання напружено-деформованого стану системи шліфування «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» метою якого є уточнення механізму самозаточування алмазних кругів на металевих та органічних зв'язках як основи для розробки пропозицій по удосконаленню існуючих процесів шліфування СПА алмазними кругами на металевих і органічних зв'язках.

3.1 Особливості методики 3D моделювання НДС системи «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»

Виходячи з особливостей СПА та ін. надтвердих матеріалів можна припустити, що механізм самозаточування алмазних кругів при їх шліфуванні повинен мати принципову відмінність в порівнянні з обробкою матеріалів звичайної твердості. Ця обставина свідчить про необхідність проведення фізичних досліджень, які б дозволили встановити фізичну сутність процесу самозаточування алмазних кругів при обробці особливої групи високотвердих ОМ, що може дозволити запропонувати шляхи удосконалення, а, отже, і підвищення ефективності процесу їх шліфування.

У зв'язку з цим було проведено теоретичні модельні дослідження, спрямовані на вивчення напружено-деформованого стану (НДС) системи шліфування («СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»). В даному випадку застосовано 3D моделювання, для якого визначено методологічний підхід, що ґрунтується на таких положеннях:

1. Застосування модельних експериментів, заснованих на методі скінчених елементів (МСЕ), що значною мірою полегшує дослідження, скорочує їх час і вартість та дозволяє варіювати параметри умов у широкому

діапазоні.

2. Прийняття припущень при моделюванні просторових 3D систем, які б могли максимально наблизитися до відображення реальних процесів обробки.

3. Розгляд у взаємодії всіх елементів досліджуваної системи шліфування та умов обробки.

4. Використання в теоретичних розрахунках експериментальних даних, отриманих для досліджуваних надтвердих матеріалів в ідентичних умовах.

5. 3D моделювання систем, що розраховуються, проводилося в програмних комплексах Solid Works.

6. Розрахунок НДС, переміщень, ступеня деформації та руйнування елементів систем що моделювалися проводилися у програмних комплексах Cosmos Simulation та Abaqus.

У цьому дослідженні модельована система представляється як сукупності об'єктів, орієнтованих у просторі певним чином стосовно друг до друга і певним чином взаємодіючих один з одним. Основними елементами системи при моделюванні процесів обробки є заготовка (або її частина) та інструмент (або його частина), що здійснюють відносні рухи зі швидкостями різання та подачі.

В загальному випадку відносний рух інструменту і заготовки реалізується за рахунок відносного руху робочих органів верстата, у яких закріплені об'єкти. Безперечно, всі об'єкти взаємодіють між собою по контактних поверхнях, створюючи один в одному деформації за рахунок дії контактних сил (нормальної та опору ковзанню), що визначаються заданою моделлю тертя на контактній поверхні пари об'єктів. Кожен об'єкт чинить опір деформуванню, створюючи внутрішні сили (напруги) відповідно до заданої моделі матеріалу об'єкта. Якщо міцність об'єкта недостатня, відбувається його руйнація.

Кожен об'єкт модельованої системи шліфування є матеріальним тілом, що характеризується геометричними розмірами та формою, теплофізичними

властивостями матеріалу та властивостями контактної взаємодії з іншими тілами моделі шліфування, що вивчалися.

В загальному випадку реалізації моделі процесу шліфування вся ця інформація має бути задана: геометричними розмірами і формою - скінченно-елементною сіткою (рис. 3.1); теплофізичними властивостями; параметрами моделей матеріалу та руйнування (рис. 3.2); властивостями контактної взаємодії – моделлю тертя; граничними умовами (рис. 3.3). Для розрахунків використовувалася статична модель системи «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» (рис. 3.1).

При моделюванні процесу шліфування СПА використані такі типи кінцевих елементів: балкові, оболонкові, елементи-бруски, товстостінні типи елементів (рис. 3.2).

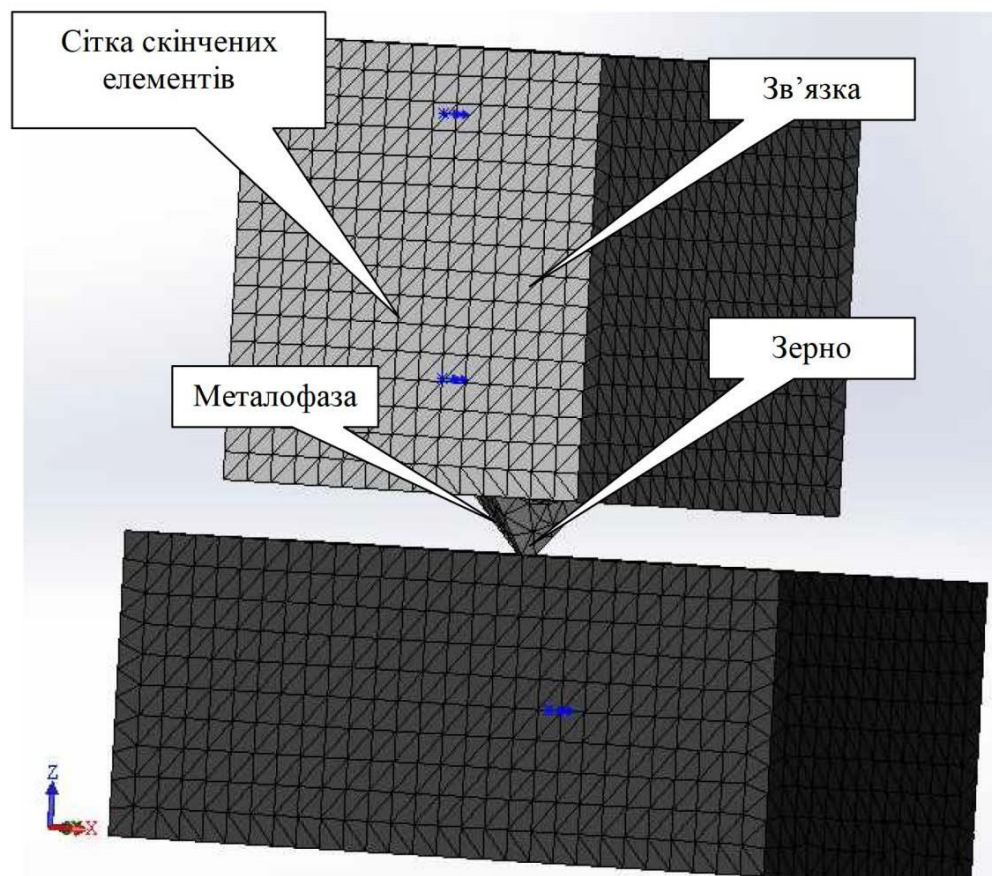


Рисунок 3.1 – Скінченно-елементна модель системи «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»

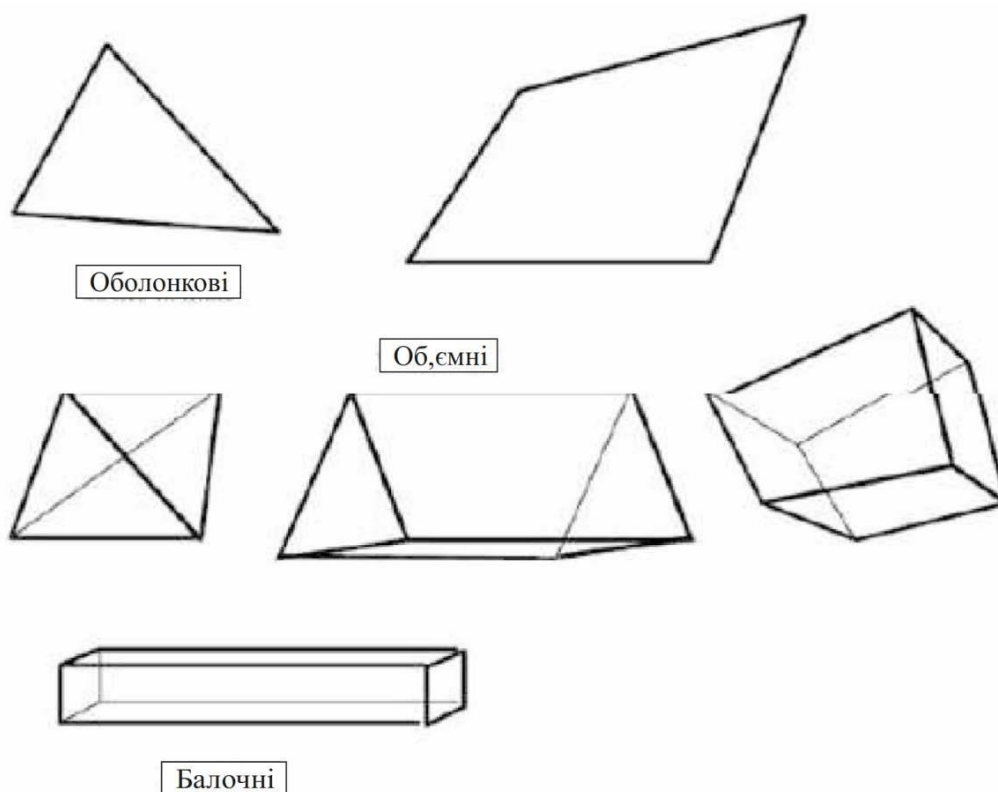


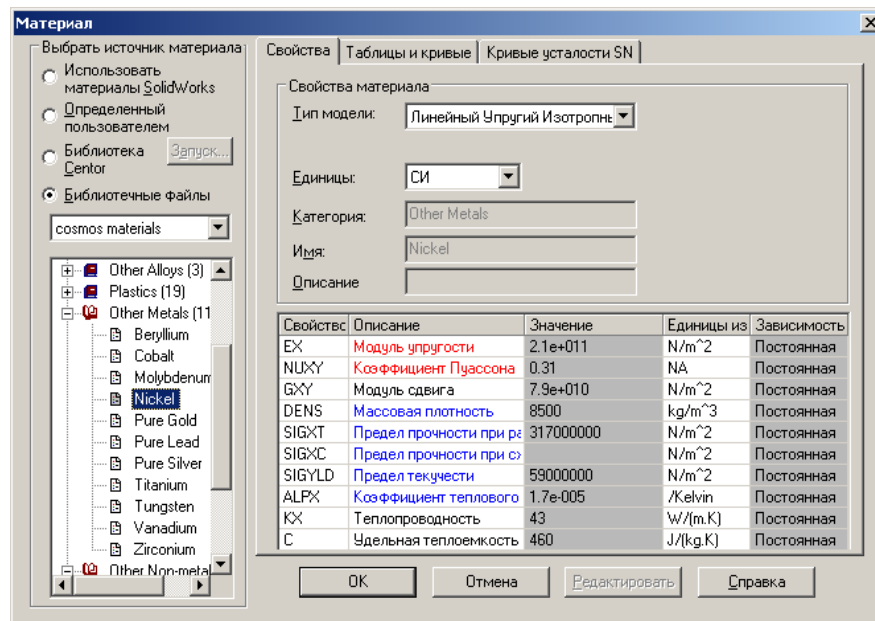
Рисунок 3.2 – Скінченні елементи, використані для моделювання процесів алмазної обробки СПА

Важливою особливістю цих елементів при моделюванні процесів шліфування СПА є їх реалізація в формі, що деформується і не деформується, – у вигляді абсолютно жорсткого тіла (rigid body [106], [157]).

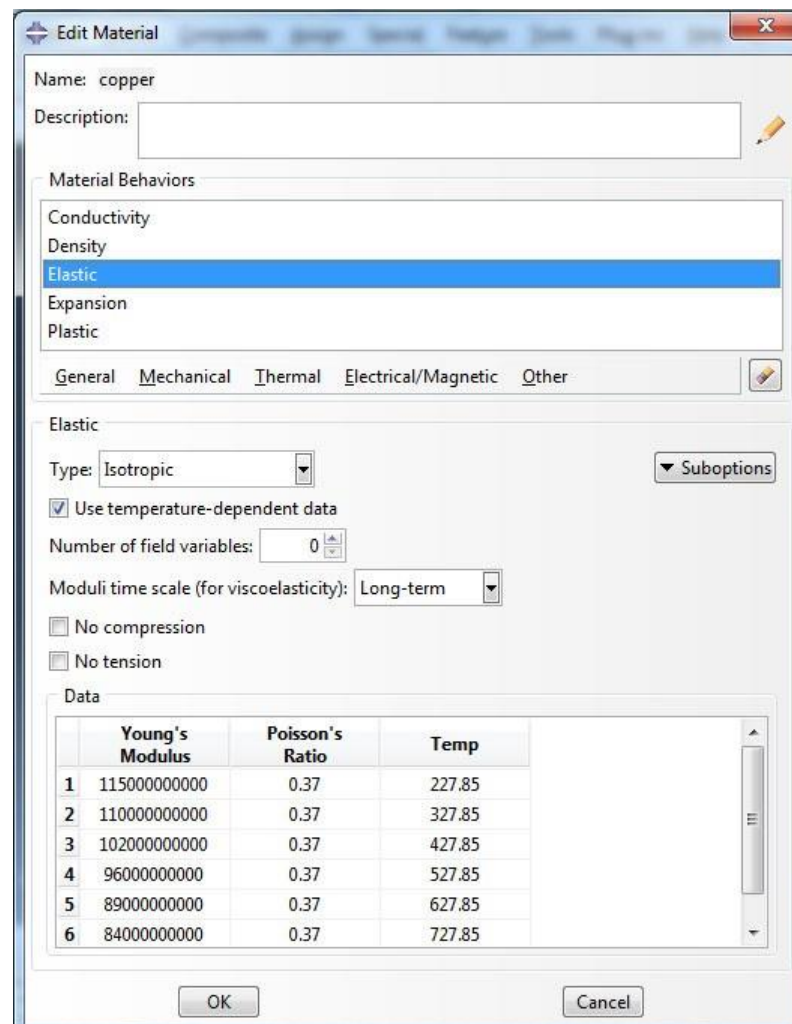
Умови обробки імітувалися шляхом застосування тиску, що імітує поперечну подачу або нормальну силу при шліфуванні, а також сил, що діють на бічні грані зерна (імітується тангенціальна сила різання).

При дослідженні взаємодії алмазних зерен розглядалися моделі, в яких зв'язка, зерно, металофаза та ОМ покладаються суцільними пружними тілами. Оскільки найбільш поширеною формою кристалітів (монокристалів) алмазу вважається октаедр, форму їх 3D кінцевих елементів у МСЕ приймали близькою до нього.

У розрахункову модель закладалися такі характеристики матеріалів: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, масова щільність матеріалу, коефіцієнт лінійного термічного розширення, теплопровідність матеріалу, його питома теплоємність та деякі інші (рис. 3.3).



а)



б)

Рисунок 3.3 – Задані параметри моделі матеріалу системи шліфування в CosmosSimulation (а) і визначення моделі руйнування її елемента (поведінка матеріалів залежно від температури) у розрахунковому комплексі Abaqus (б)

Розрахунки за методом скінченних елементів дозволяють кількісно оцінити головні та наведені напруги, енергію деформації та щільність енергії деформації в елементах системи залежно від їх розмірів, фізико-механічних властивостей та умов обробки (температура, сили різання тощо).

Обсяги матеріалів вважалися зруйнованими, якщо наведена напруга та/або щільність енергії деформації в них перевищували відповідні граничні значення. Настільки докладний опис вимагає значних обчислювальних ресурсів, які до нині залишаються не остаточно реалізованими.

Однак при моделюванні можуть бути прийняті ті чи інші припущення. [106]. Наприклад, при реалізації моделі на першому і другому рівнях деталізації систему шліфування можна обмежити лише чотирма тілами, прийнявши жорсткість технологічної системи рівної нескінченності [46] під час здійснення модельних експериментів.

На сьогоднішній час на основі узагальнення великої кількості експериментальних даних, спеціально поставлених досліджень та порівняльного аналізу критеріїв за типами матеріалів та НДС найбільш перспективним та обґрунтованим є критерій Писаренко-Лебедева у формі: деформації і розміщення матеріалу, тоді як член $(1-x)$ характеризує ту частку розтягуючих напружень, яка відповідає за розкриття мікротріщин на поверхні руйнування. Критерій добре експериментально обґрунтований. При значенні $x = 0$ (ідеально крихкий матеріал) він набуває вигляду, що відповідає критерію максимального нормального напруження; при $x=1$ (ідеально пластичний матеріал) співвідношення до розрахунку напружень перетворюється на рівняння енергетичної теорії Мізеса-Генки. Параметр x визначається за результатом двох дослідів, проведених при різних НДС, наприклад, розтягуванні - стисканні, розтягуванні - чистому зрушенні і т. д.

Критерій може бути застосований для оцінки міцності структурно-неоднорідних матеріалів (графіту, чавуну, термореактивних пластмас тощо). Таким чином, до параметрів розрахунку міцності і несучої здатності необхідно додати характеристики матеріалу на стиск або параметр x .

За результатами випробувань на стиск σ_k [177]:

$$\sigma_k = \frac{P}{d \cdot t}, \quad (3.1)$$

де σ_k – середня за перерізом міцність, яка визначається при діаметральному стиску зразка діаметром d і висотою t руйнівним зусиллям P . Для переходу від σ_k до σ_p використовувався вираз виду:

$$\sigma_p = B \cdot \sigma_k, \quad (3.2)$$

де B - коефіцієнт, що залежить від вибору критерію міцності.

Використання цього критерію у виразі (2) привели до виразу:

$$\sigma_p = \frac{0,41 \cdot \sigma_k \cdot \sigma_c}{\sigma_c - 1,89 \cdot \sigma_k}, \quad (3.3)$$

де σ_c - межа міцності при одновісному стисканні.

Граничні умови вибиралися з припущень, прийнятих при моделюванні процесу шліфування СПА (рис. 3.4).

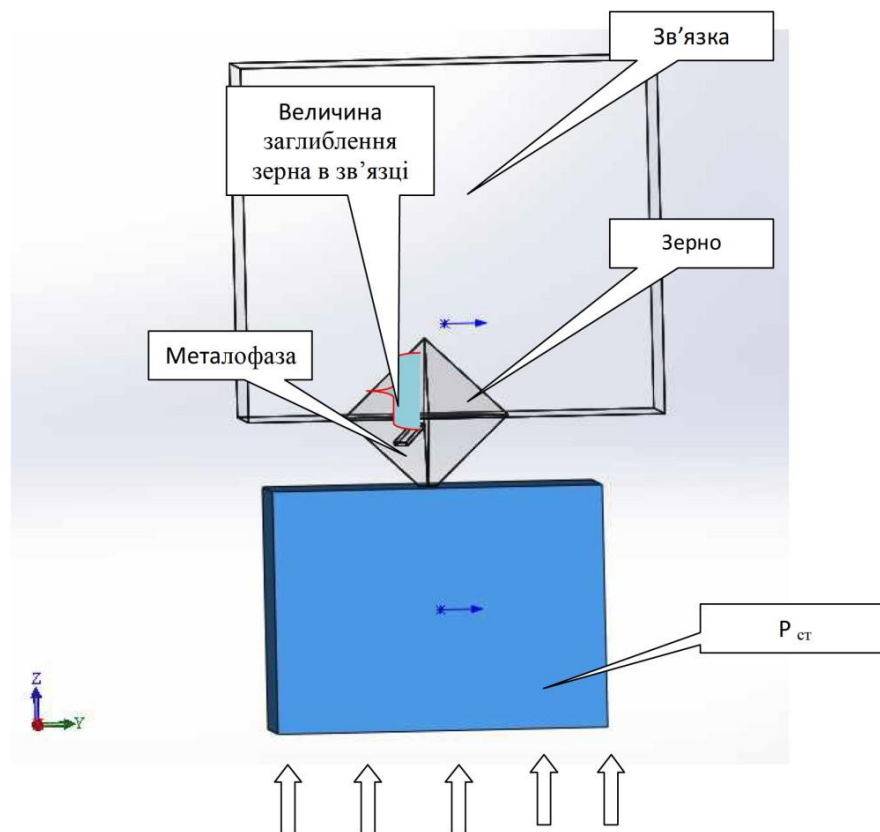


Рисунок 3.4 – Граничні умови, що імітують процес шліфування СПА при моделюванні дії нормальної складової сили $P_{ст}$.

Було поставлене завдання отримати за результатами розрахунків залежності еквівалентних напруг у системі, що вивчається, від нормальної складової сили різання. Оскільки кількість зерен у контакті з оброблюваним СПА є значною, побудова такої розрахункової моделі неможлива. Тому приймалося припущення, у якому нормальну складову сили різання можна представити як силу стиску $P_{ct.}$, яка діятиме на одиничне зерно (рис. 3.4) і визначається за формулою:

$$P_{ct.} = \frac{P_y}{n_z} \geq [P_{ct.}], \quad (3.4)$$

де $P_{ct.}$ - навантаження, що діє на одне зерно, Н; P_y - нормальна складова сили різання, Н; n_z – кількість зерен у контакті з СПА, шт.

Тобто теоретично руйнування зерен відбудеться в тому випадку, якщо буде дотримуватися наведена вище умова:

При варіюванні величиною сили $P_{ct.}$ важливо встановити її значення, при якому відбудеться вдавлювання зерен у зв'язку. Наступною частиною дослідження було встановлення залежності еквівалентних напруг у системі, що вивчається, від головної складової сили різання P_z .

Для проведення модельних експериментів скористаємося створеною моделлю системи шліфування «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» однак змінимо граничні умови та параметри розрахунків, як показано на рис. 3.5.

Модель перебудовується таким чином, щоб отримати систему різання одиничним зерном при заданій величині «впровадження» СПА в оброблюваний матеріал і можливістю варіювання значенням головної складової сили P_z . При варіюванні величиною сили P_z важливо встановити її значення, при яких відбудеться руйнування (самозаточування) зерна або вирив його зі зв'язування.

Результати модельних експериментів наведені нижче.

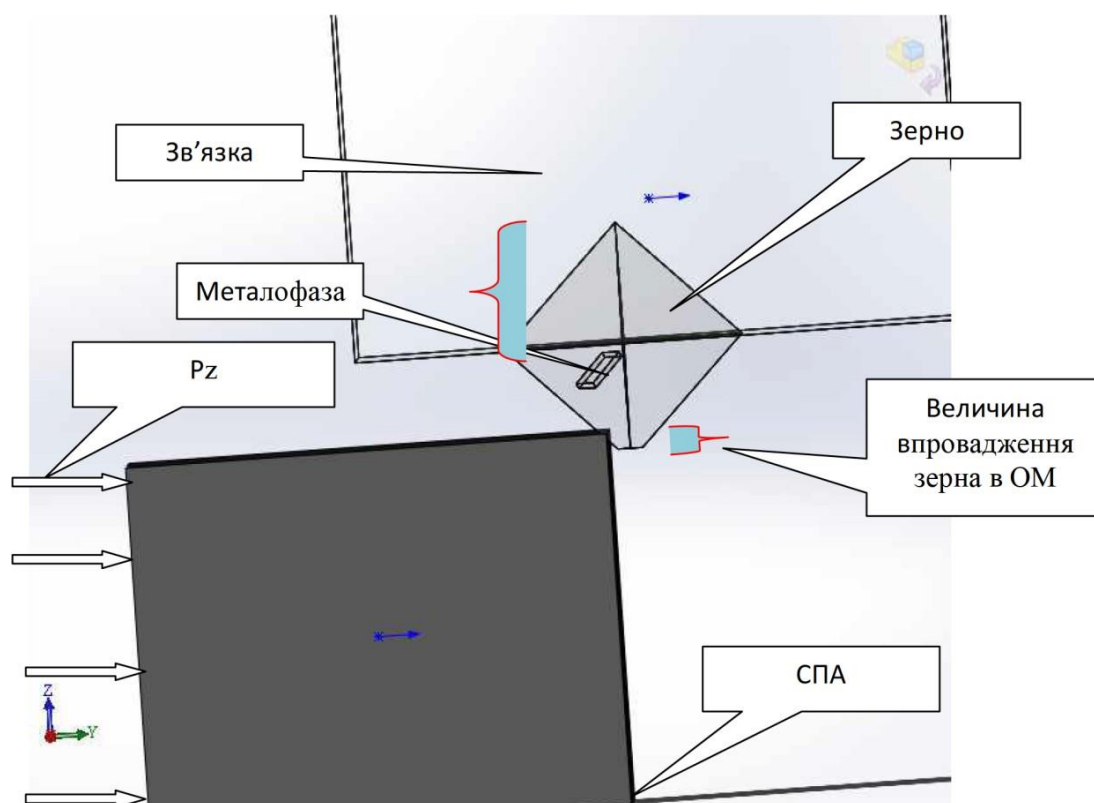


Рисунок 3.5 – Граничні умови, що імітують процес шліфування СПА під час моделювання дії головної складової сили P_z

3.2 Теоретичне визначення сили взаємодії зерен круга з оброблювальним матеріалом

При взаємодії елементів системи «СПА-алмазне зерно-зв'язка» механізм знімання припуску вивчався при навантаженні силою шліфування або величиною поперечної подачі, що забезпечує зміну стану СПА в зоні шліфування від пружного деформування до руйнування. Характер навантаження прийнятий статичним, проте, величина його розраховувалася з урахуванням динамічного характеру взаємодії та коригувалась за експериментальними даними.

Силу взаємодії можна приблизно оцінити, скориставшись теорією зіткнення куль, викладеною в [34]. Основною гіпотезою цієї теорії є припущення про те, що властивості і розміри тіл, що стікаються,

розрізняються не надто сильно. Для таких тіл (куль) час зіткнення дуже великий порівняно з періодом нижчої форми їх коливань.

Одне з тіл (СПА) можна вважати як кулю нескінченно великих радіусу і маси. І тут період нижчої форми коливань стає дуже великим, прагнучи нескінченності. Однак і в цьому випадку експериментально певна тривалість зіткнення досить добре узгоджується з результатами зазначеної теорії [141]. Відповідно до цієї теорії тривалість зіткнення дорівнює:

$$t = 2,94 \frac{\alpha_1}{V}, \quad (3.5)$$

де V - швидкість зіткнення,

$$\alpha_1 = \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{V^2}{nn_1} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (3.6)$$

$$n = \sqrt{\frac{16 \cdot R_1 R_2}{9 \pi^2 \cdot (k_1 + k_2)}}, \quad (3.7)$$

де R_1 и R_2 - радіуси куль, які стикаються;

$$n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}, \quad (3.8)$$

де m_1 и m_2 - маси куль, які стикаються:

$$k_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i}, \quad (3.9)$$

де ν_i , E_i - коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга для матеріалів куль.

Оскільки в нашому випадку матеріал тіл, що стикаються, однаковий, а одна поверхня плоска ($1/R_1 = 0$), то:

$$n = \sqrt{\frac{4 E^2 \cdot R_2}{9 (1 - \nu^2)^2}}. \quad (3.10)$$

Маса деталі нескінченно велика у порівнянні з масою зерна ($\frac{1}{m_i} = 0$),

$$n_1 = \frac{1}{m_2}. \quad (3.11)$$

Зближення тіл під час стиску під впливом статичної сили $P_{ст.}$ можна визначити:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9 \pi^3 \cdot P_{ст.} \cdot (k_1 + k_2)^2}{16 \cdot R_2}}, \quad (3.12)$$

де значення величин, що входять у формулу, збігаються зі згаданими вище.

Тоді можна отримати:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{P_{ст.}}{n^2}}. \quad (3.13)$$

Якщо припустити, що під впливом сили $P_{ст.} = P_{max.}$ зближення при стиску статичне і максимальне при зіткненні будуть приблизно рівні $\alpha \approx \alpha_1$, то можна оцінити значення $P_{max.}$:

$$P_{max} \approx n^2 \left(\frac{5 V^2}{4 n n_1} \right)^5. \quad (3.14)$$

Радіус плями контакту за формулою зі статички дорівнюватиме:

$$a_{max} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_{max.} \cdot (k_1 + k_2) \cdot R_2}{4}}. \quad (3.15)$$

У тому випадку, коли радіус заокруглення зерна $R_2 = 100$ мкм, швидкість круга $V = 30$ м/с, модулі пружності зерен та СПА $E = 800$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $= 0,1$, маса зерна $m_2 = 0,1$ г отримуємо $P_{max} = 0,28$ Н. За цією методикою розраховувалася величина силового навантаження системи «СПА – алмазне зерно - зв'язка» і коректувалася за результатами експериментального визначення сил різання та коефіцієнта шліфування при обробці СПА.

3.3. Обґрунтування механізму самозаточування алмазного круга на металевій зв'язці на базі 3D моделювання НДС систем шліфування

Завданням цього підрозділу було уточнення механізму самозаточування алмазних зерен в кругах на металевих зв'язках при

шліфуванні СПА с в умовах використання імпульсів нормальної сили при введенні в зону обробки механічних коливань низької частоти (див. розділ 4). Це потребує доказу висунутої наукової гіпотези про можливість вдавнення частини зерен в зв'язку під дією імпульсів нормальної сили з наступним їх руйнуванням під дією тангенціальної сили враховуючи мале значення межі міцності алмазу на вигин. Для цього використане моделювання системи «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» в пакеті SolidWorksSimulation за певних граничних умов (див. підрозділ 3.1), показаних на рисунку 3.4, що дозволило нам теоретично розраховувати значення напружень та деформацій у зоні обробки взагалі і зв'язці зокрема.

Значення сили, які були отримані у підрозділі 3.2, для застосування в моделюванні процесу шліфування СПА, варіювалося у діапазоні $P_{ст.} = 0,6-3,4$ Н з шагом 0,2 Н (рис. 3.6 – 3.7). Основні фізико-механічні властивості зв'язки, закладені в модель, показані в таблиці 3.1.

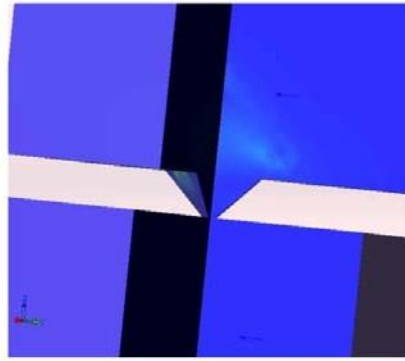
Таблиця 3.1 – Основні фізико-механічні властивості зв'язки, прийняті до використання у модельних експериментах

Показник	Зв'язка круга (М2-01)
Модуль пружності, Н/м ²	10 ¹¹
Коефіцієнт Пуассона	0,33
Коефіцієнт термічного розширення (КТР), K ⁻¹	17,5 · 10 ⁻⁶
Щільність, кг/м ³	8,8 · 10 ³

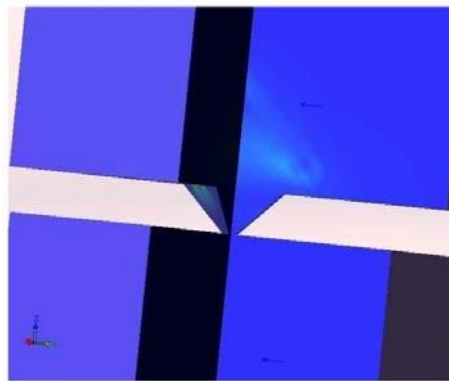
Даний шаг сили $P_{ст.}$ був обраний по проведенню кількох експериментів, які показали видимі зміни в картині розподілу напружень в системі шліфування СПА, що вивчається. На рисунку 3.6 наведено приклади експериментів зі значеннями сили стискання $P_{ст.}$ рівними 0.6, 0.8 та 1.0 Н.

Як видно з рисунку можна спостерігати, що виразні контури напруг навколо зерна спостерігаються тільки при прикладення сили $P_{ст.} = 1$ Н (рисунок 3.6 в). При значеннях сили $P_{ст.}$ менших ніж 1 Н значних змін у

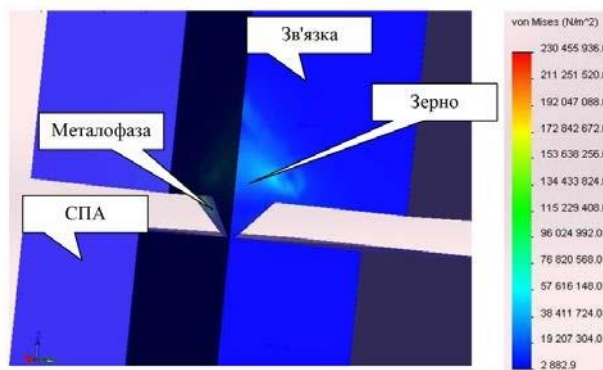
картині розподілу напружень навколо закладення зерна у зв'язці не відбувається. Варто зазначити, що поля напруги в точці контакту зерна з СПА на рисунках спеціально «погашені» при відображенні результатів візуалізації, оскільки вони спотворюють картину навколо закладення зерна у зв'язці, яка найбільш актуальна в даному дослідженні.



а)



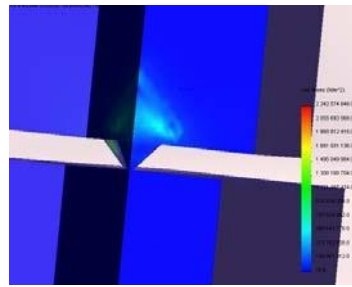
б)



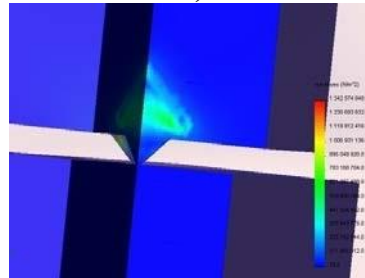
в)

Рисунок 3.6 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»:

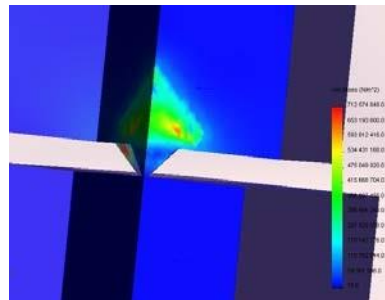
а) $P_{ст.} = 0,6 \text{ Н}$; б) $P_{ст.} = 0,8 \text{ Н}$; в) $P_{ст.} = 1,0 \text{ Н}$



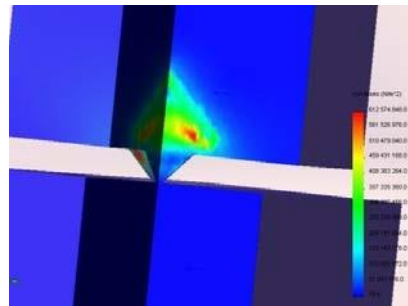
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.7 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»

а) $P_{ст.} = 1,4 \text{ Н}$; б) $P_{ст.} = 2,0 \text{ Н}$; в) $P_{ст.} = 3,3 \text{ Н}$; г) $P_{ст.} = 3,4 \text{ Н}$

Залежність $\sigma_{екв.мах}$ в зоні контакту алмазного зерна зі зв'язкою круга від нормальної загрузки представлена на рис. 3.8.

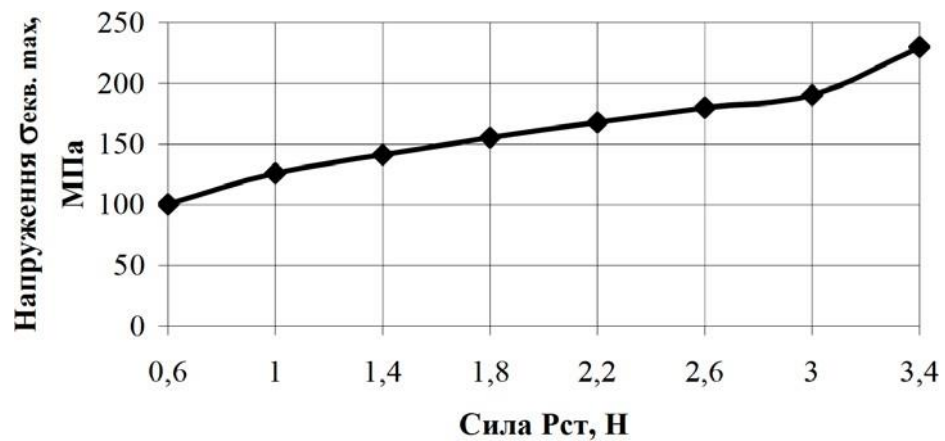


Рисунок 3.8 – Залежність $\sigma_{екв.мах}$ в зоні контакту алмазного зерна зі зв'язкою круга від нормальної загрузки

За результатами серії модельних експериментів виявлено, що критичною величиною $P_{ст.кр.}$ є значення 3,3 Н (рис. 3.7). Покажемо візуалізацію полів напруг та деформацій у зоні шліфування СПА на рисунку 3.8.

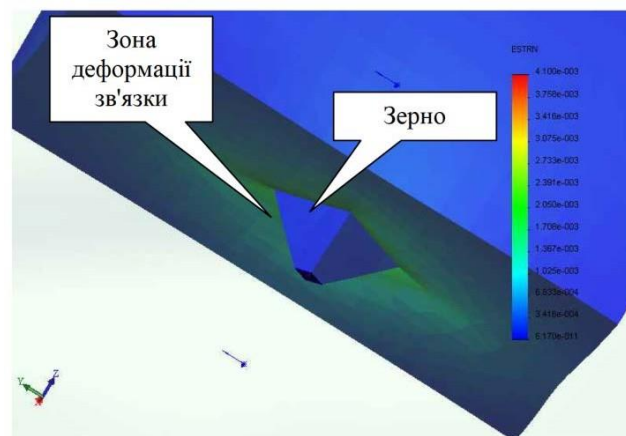
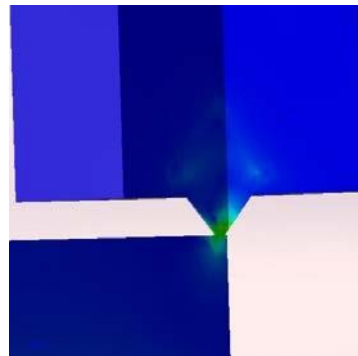


Рисунок 3.8 – Епюра деформації для значення $P_{ст.} = 3,3$ Н

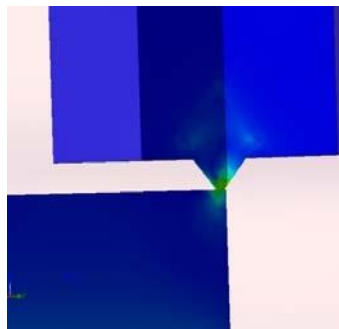
На наступному етапі розрахунків використовувалася модель «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» за граничних умов, показаних на рисунку 3.5, дозволило нам теоретично розраховувати значення напружень та деформації при використанні металевої зв'язки при різних значеннях тангенціальної сили P_z .

Значення складової сили P_z , використані при моделюванні процесу шліфування СПА, варіювалися в діапазоні 0,15 – 1,35 Н з кроком 0.075 Н.

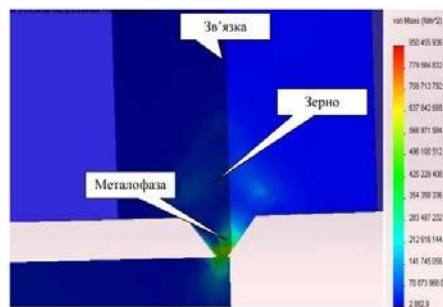
Даний крок так само був обраний по проведенню декількох експериментів, які показали видимі зміни в картині розподілу напруги в системі шліфування СПА, що вивчається. На рисунку 3.9 наведемо приклад експериментів 1, 2 та 3 зі значенням P_z 0,15, 0,225 та 0,3 Н відповідно.



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»:

а) $P_z = 0,15$ Н; б) $P_z = 0,225$ Н; в) $P_z = 0,3$ Н

На рисунку 3.9 можна спостерігати, що виразні контури напружень навколо зерна спостерігаються лише за значень складової сили починаючи з $P_z = 0.3$ Н (рисунок 3.9, в).

Тобто використання значень сили P_z менш ніж 0.3 Н не призводить до значних змін у картині розподілу напружень навколо закладення зерна у зв'язці. Оскільки модель створена для вивчення дії складової сили P_z при «впровадженні» зерна в ОМ на епюрах показані так само і поля напружень у точці контакту зерна з СПА (рисунок 4.9), які мають значно більшу (порівняно з напруженнями навколо закладення зерна у зв'язку) щільність і значення еквівалентної напруги.

Залежність $\sigma_{екв.мах}$ в зоні контакту алмазного зерна зі зв'язкою круга від нормальної загрузки представлена на рис. 3.10.

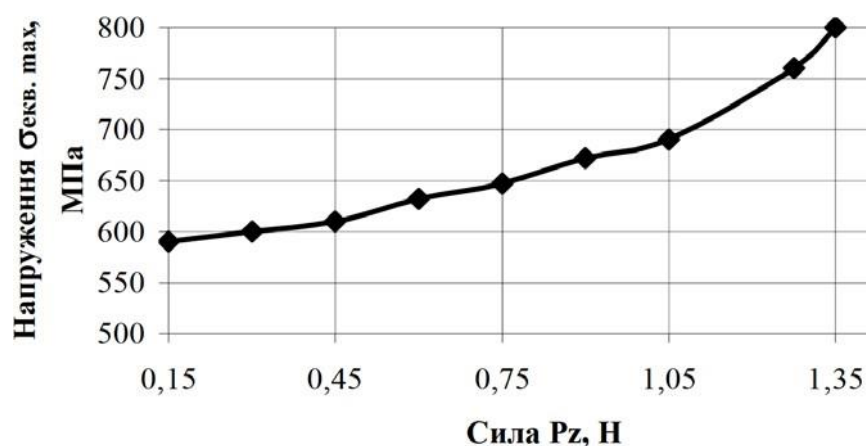


Рисунок 3.10 – Залежність $\sigma_{екв.мах}$ в зоні контакту алмазного зерна зі зв'язкою круга від тангенціальної загрузки

За наслідками серії модельних експериментів виявлено, що критичною величиною $P_{zкр.}$ є значення 1,275 Н. Покажемо візуалізацію полів напружень в зоні шліфування СПА при навіколокритичних значеннях P_z (рисунок 3.11).

Як видно з цього рисунку при подальшому збільшенні складової сили P_z : понад 1.275 Н поле критичної напруги значно посилюється. Руйнування зв'язки відбувається вже за значень складової сили $P_z = 1.275$ Н.

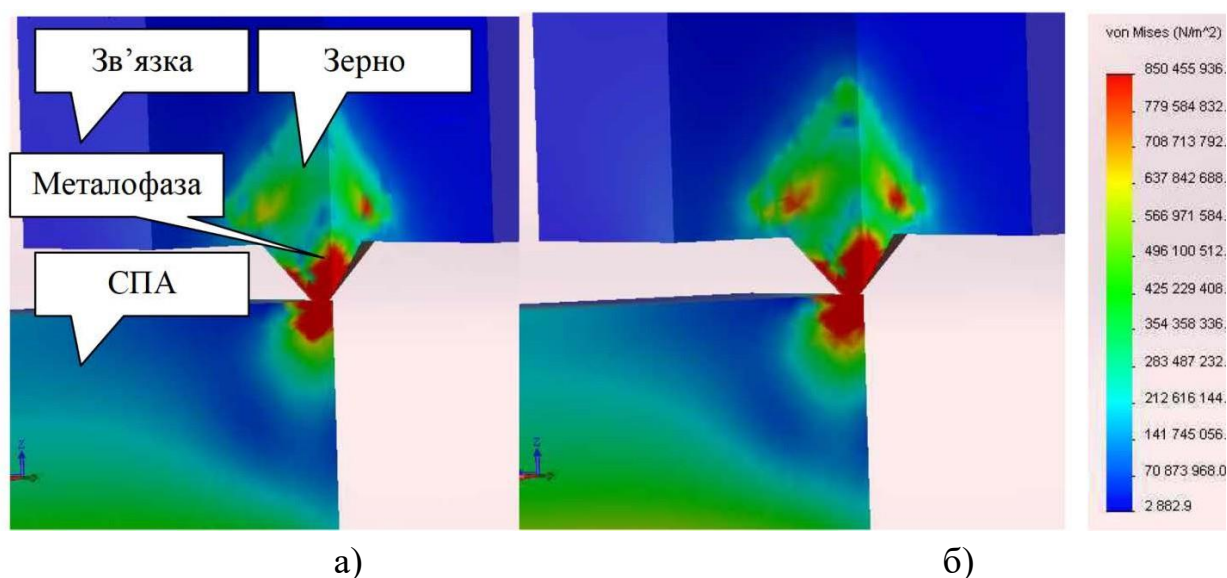


Рисунок 3.11 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга»

а) $P_z = 1,275$; б) $P_z = 1,35$ Н

3.4 Уточнення механізму самозаточування алмазного круга на органічній зв'язці на базі 3D моделювання НДС систем шліфування

Завданням цього підрозділу було уточнення механізму самозаточування алмазних зерен в кругах на органічних зв'язках при шліфуванні СПА с в умовах використання «жорсткої» схеми обробки (шліфування з поперечною подачею). Для цього такі ж серії модельних експериментів для вивчення впливу сили $P_{ст.}$ та складової сили P_z проведені використовуючи розроблені моделі (рисунки 3.4 та 3.5) стосовно органічної зв'язки на основі бакеліту. Граничні умови та крок варіювання сил аналогічні описаним вище експериментам (див. розділ 5).

Для порівняння з результатами розрахунків для металевої зв'язки покажемо результати для критичних значень нормальної сили $P_{ст.}$ та тангенціальної сили P_z для бакелітової зв'язки В1-01 (рисунки 3.12 та 3.13).

Результати розрахунків показали, що критичні значення сил $P_{ст.}$ та P_z при шліфуванні алмазними кругами на органічній зв'язці зменшуються

приблизно в 1.8 рази порівняно з металевою зв'язкою на основі бронзи що сприяє інтенсифікації процесу їх самозаточування.

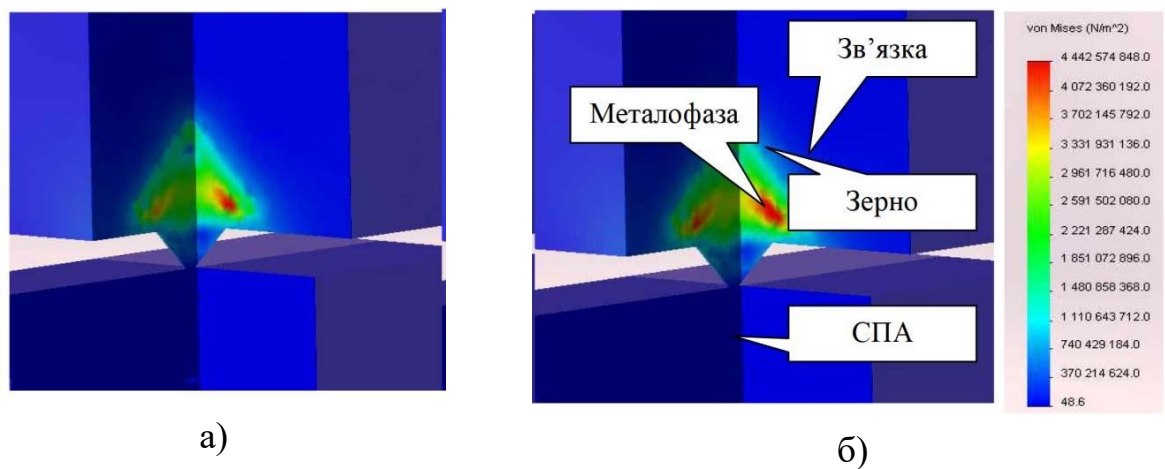


Рисунок 3.12 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» для бакелітової зв'язки:

а) $P_{cm} = 1,8 \text{ Н}$; б) $P_{cm} = 2,0 \text{ Н}$

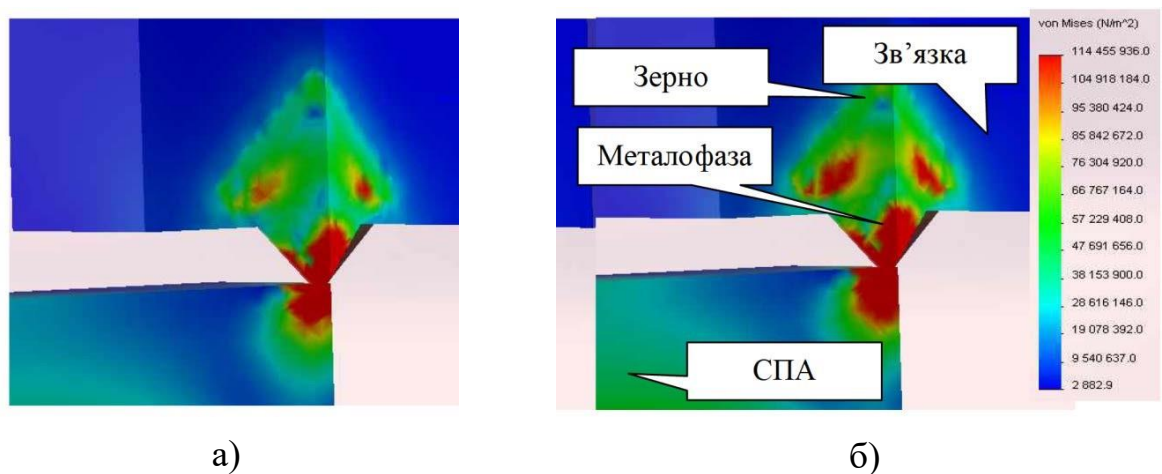


Рисунок 3.13 – Поля наведених напружень в системі «СПА-алмазне зерно-металофаза-зв'язка круга» для бакелітової зв'язки:

а) $P_z = 0,75 \text{ Н}$; б) $0,95 \text{ Н}$

Таким чином можна вважати підтвердженням механізм самозаточування РПК згідно якому під дією нормальної сили P_{cm} зерна алмазного круга спочатку вдавлюються в зв'язку на деяку глибину, а зерна що «набігають» на СПА починають працювати на вигин. Враховуючи, що межа їх міцності на

вигин практично на порядок менше ніж на стиск вони під дією сили P_z починають інтенсивно самозаточуватися з утворенням мікро- і субмікрокромов, що у свою чергу призводить до інтенсифікації знімання припуску з ОМ. Іншими словами можна сказати, що в даному випадку ОМ паралельно йдуть два процеси. З одного боку алмазний круг шліфує СПА, а з іншого СПА «оточує» РПК. Або по аналогії з процесом правки абразивних кругів методом обточування ОМ виступає в ролі правлячого олівця по відношенню до РПК.

Звісно, що для практичної реалізації цього механізму потрібні значні нормальні зусилля. Як було показано вище, при використанні керованого процесу шліфування СПА це можна забезпечити шляхом використання імпульсів сили від механічних коливань низької частоти і амплітуди (розділ 4), а у випадку використання кругів на органічних зв'язках за рахунок створення відповідних контактних напружень за допомогою поперечної подачі.

Цілком природно, що таке представлення механізму самозаточування є дещо укрупненим оскільки частина зерен випадає зі зв'язки круга, під дією сили P_z , друга частина зерен, які мають внутрішні дефекти, руйнуються безпосередньо під дією сили P_{cm} і таке інше. Але реалізація відміченого механізму дозволяє вести процес шліфування при малих висотах виступання зерен над рівнем зв'язки, а, отже при великій їх кількості в контакті з СПА, що в кінцевому підсумку забезпечую високі техніко-економічні показники процесу обробки в цілому.

Висновки

1. Дослідження процесу самозаточування алмазних кругів на металевих і органічних зв'язках при обробці СПА запропонована методологія 3D моделювання системи шліфування «СПА – алмазне зерно – зв'язка круга» яка дозволяє визначити еквівалентні напруження і деформації в зоні контакту

алмазного зерна зі зв'язкою круга.

2. Вперше запропоновано теоретичне визначення сили взаємодії зерен круга з оброблювальним матеріалом основане на використанні теорії зіткнення куль. Характер навантаження прийнятий статичним, проте, величина його розраховувалася з урахуванням динамічного характеру взаємодії та коригувалась за експериментальними даними.

3. На основі використання методології 3D моделювання системи «СПА – алмазне зерно – зв'язка круга» шляхом розрахунків деформацій і напружень вперше доказана можливість реалізації механізму самозаточування зерен за рахунок того, що зерна вдавлюються в зв'язку круга і починають працювати на вигин. Цьому сприяє мале значення межі міцності алмазу на вигин ($\sim 0,2$ ГПа), що і призводить до самозаточування зерен шляхом їх мікро- і макроруйнування.

4. Самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках реалізується при контактних напруженнях приблизно у два рази нижчих, ніж на металевих зв'язках.

5. Практична реалізація уточненого механізму самозаточування дозволяє вести процес шліфування при малих висотах виступання зерен над рівнем зв'язки, а, отже при великій їх кількості в контакті з СПА, що в кінцевому підсумку забезпечую високі техніко-економічні показники процесу обробки в цілому.

6. На базі уточнення механізму самозаточування як основи для розробки пропозицій по удосконаленню існуючих процесів шліфування СПА алмазними кругами на металевих і органічних зв'язках було зроблено висновок, що для його практичної реалізації потрібні значні нормальні зусилля.

7. Потрібні нормальні зусилля при використанні керованого процесу шліфування СПА можна забезпечити шляхом використання імпульсів сили від механічних коливань низької частоти і амплітуди, а у випадку використання кругів на органічних зв'язках за рахунок створення відповідних контактних напружень за допомогою поперечної подачі.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРОВАНОГО ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ СПА ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕМІННИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ВІД НИЗЬКОЧАСТОТНИХ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

В розділі наведено результати теоретико-експериментальних досліджень по удосконаленню комбінованого процесу шліфування СПА алмазними кругами на металевих зв'язках який включає в себе безперервне електрохімічне видалення зв'язки в автономній зоні та одночасне введення в зону обробки низькочастотних механічних коливань як основних складових управління контактними напруженнями, а, отже, і вихідними показниками процесу обробки. Вперше використаний такий комплексний фактор, як імпульс сили, який в даному випадку є результатом одночасного прояву таких параметрів процесу, як маса додаткового вантажу і амплітуди механічних коливань. Встановлено вплив умов обробки на технологічні показники процесу шліфування.

4.1. Аналіз можливих резервів існуючого процесу шліфування СПА з введенням в зону обробки низькочастотних механічних коливань

Процес алмазного шліфування синтетичних полікристалів алмазу (СПА) можна розглядати як пристосованість двох різних по топографії поверхонь: дискретної робочої поверхні круга (РПК) і квазісуцільної оброблювальної поверхні СПА [107], [129]. Ефективність будь-якого процесу абразивної обробки визначається рівнем пристосовуваності взаємодіючих поверхонь і можливостями зміни цього рівня за рахунок вибору умов шліфування (режими обробки, введення в зону шліфування додаткової енергії тощо [28], [64], [129]. Цей висновок підтвердила практика використання відомого керованого способу алмазного шліфування надтвердих матеріалів алмазними кругами на міцних металевих зв'язках за

пружною схемою, коли заготовку підтискають до РПК відносно незначним постійним навантаженням ($P_H=1 - 5$ МПа) [107]. Це дозволяє забезпечувати мінімальний відсоток бракованих виробів з СПА. А недоліком процесу є низька продуктивність процесу обробки та підвищені питомі витрати алмазних зерен, що пов'язане з двома основними причинами. Перша полягає в тому, що в умовах постійного притискання СПА до РПК самозаточування алмазних зерен круга на металевій зв'язці протікає періодично (див. розділ 1) і практично повністю залежить інтенсивності електрохімічного розчину останньої. Як результат маємо ситуацію, коли це процес реалізується при значній висоті виступання зерен над рівнем зв'язки. У наслідок цього значна кількість зерен випадає не використав свої потенційно високі ріжучі можливості. Друга причина полягає в тому, що при статичному характері притиснення СПА до РПК ініціювати процес самозаточування можливо лише при використанні дуже великих навантажень на алмазні зерна ($P_H=50 - 60$ МПа і більше). Це призводить до підвищеного відсотку браку СПА по причині сколів кромek та виникнення мікро- та макротріщин на поверхні, що обробляється.

Теорія і практика шліфування СПА показали високу ефективність комбінованого процесу більш високого порядку, який включає в себе власне алмазне шліфування, дозоване електрохімічне видалення зв'язки круга в автономній зоні та енергію механічних коливань в зоні обробки. Як відомо, коливання – це зміна у часі рівня будь-якої величини стосовно заданого вихідного рівня.

Тобто для додаткової активації керованого процесу шліфування запропоновано введення в зону обробки механічних коливань з інфра- або ультразвуковою частотою [28], [169], [64]. Обов'язковою умовою реалізації таких способів при шліфуванні СПА алмазними кругами на металевих зв'язках є безперервне регульоване електрохімічне видалення зв'язки у процесі шліфування, що створює необхідні умови для безперервного самозаточування кругів.

Наведені способи мають суттєві недоліки, які обмежують їх практичне використання. Ультразвукове шліфування ($20 \text{ кГц} < f < 1 \text{ ГГц}$) дуже складне в практичній реалізації, а інфразвукове $f < 16 \text{ Гц}$ хоч і забезпечує суттєве покращення значень продуктивності обробки та питомих витрат алмазних зерен круга забезпечує низьку якість обробки, що пов'язане з одночасним використанням великих амплітуд і низьких частот прикладення періодично діючого додаткового навантаження [28], [169]. При такому способі шліфування СПА підтискають до робочої поверхні алмазного круга одночасно постійним і додатковим навантаженнями, причому додаткове навантаження прикладається періодично з фіксованими значеннями частоти і амплітуди шляхом падіння (близького до вільного) додаткового вантажу. Тобто маємо передбачуваний періодичний процес який повторюється через регулярні проміжки часу. Під «вільним падінням» розуміється рух тіла вертикально вниз без початкової швидкості.

Сказане вище пояснюється рисунком 4.1. Як видно з рисунку, оброблювальний матеріал 1 встановлюється в пристосуванні 2 і притискається за допомогою поршнів 3 та 4 гідравлічного пристрою постійним вантажем 5 до РПК 6.

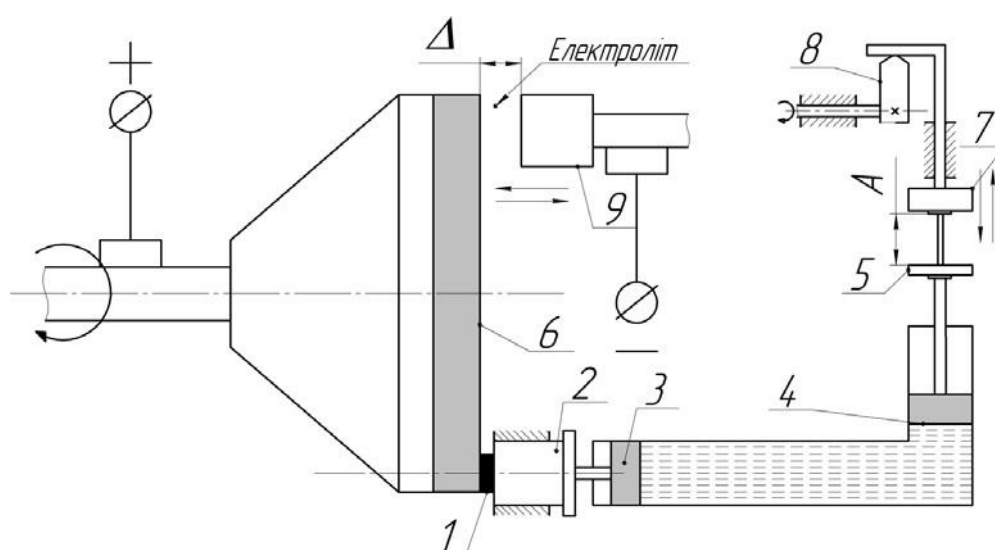


Рисунок 4.1 – Схема реалізації комбінованого процесу шліфування СПА з введенням в зону обробки механічних коливань низької частоти [28], [169]

Періодично діюче додаткове навантаження на оброблювальний матеріал створюється додатковим вантажем 7 який періодично піднімається у граничне верхнє положення змінним кулачком 8 (в залежності від потрібної величини амплітуди A), а потім падає з прискоренням близьким до вільного [16].

Амплітуда A уявляє собою відстань, яку проходить додатковий вантаж 7 у вільному падінні. Частоту обертів кулачка 8 можна регулювати, наприклад, шляхом використання електродвигуна постійного струму.

На практиці більші значення амплітуди (з меншими частотами) можна призначати на чорнових, а менші (з більшими частотами) треба використовувати на чистових етапах обробки. Для реалізації електрохімічної правки робочої поверхні круга використовується спеціальний електрод 9 (катод) [107]. Катод 9 підключають до негативного, а круг 6 до позитивного полюсів джерела постійного струму. У зазор Δ між ними подають електроліт, а силу струму (a , отже і інтенсивність електрохімічного розчинення металевої зв'язки круга 6) регулюють шляхом зміни величини цього зазору (оскільки при цьому змінюється його електричний опір [8], [19]).

Розглянутий спосіб шліфування було досліджено у наступних діапазонах значень параметрів коливань: $A=0 - 10$ мм, $f=0 - 10$ Гц, $m=2 - 10$ кг. Досягнуті результати: $Q=10 - 13$ мм³/хв., $q=5 - 8$ мГ/мм³ що у рази краще ніж при звичайному процесі обробки (без механічних коливань).

Таким чином подальше удосконалення керованого процесу шліфування СПА з механічними коливаннями низької частоти і амплітуди можливе шляхом виявлення раціональних поєднань значень параметрів механічних коливань.

4.2. Теоретичні дослідження граничних поєднань значень амплітуд і частот механічних коливань

Основними параметрами механічних коливань є частота, амплітуда а також величина імпульсу сили, яку вони забезпечують. Для забезпечення потрібної якості обробки при високій продуктивності і низькому значенні

питомих витрат алмазних зерен у кругах треба прагнути к використанню механічних коливань з меншими амплітудами і максимально допустимою частотою (з точки зору можливостей механічної системи). Передбачається, що зменшення одиничного імпульсу сили буде компенсовано збільшенням їх кількості в одиницю часу. А для цього треба дослідити взаємозв'язок між амплітудою і частотою коливань в тому числі і з урахуванням можливостей механічних пристроїв для їх створення.

Спрощено (враховуючи малість величини A) теоретичну (максимально можливу) частоту можна розрахувати з виразу:

$$f_T = f_{\max} = \frac{1}{t}, \quad (4.1)$$

де t – час вільного падіння додаткового вантажу (приблизно це і час на протязі якого кулачок робить один оберт).

Його можна розрахувати за формулою:

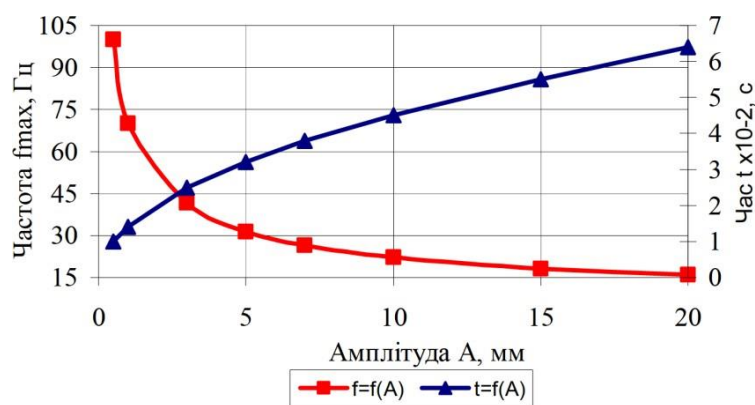
$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot A}{a}}, \quad (4.2)$$

де a – прискорення додаткового навантаження, м/с^2 .

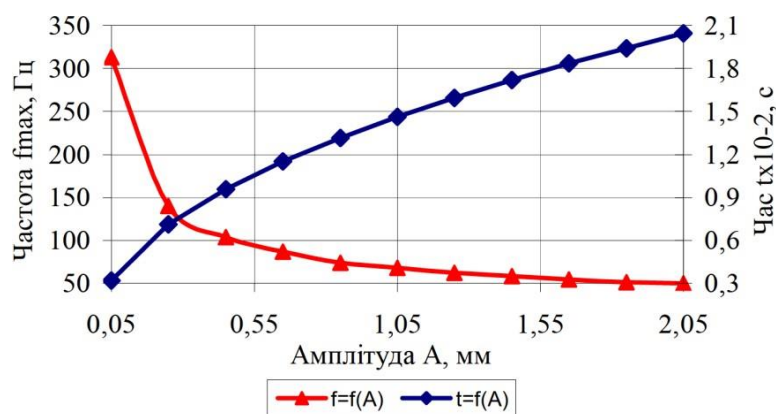
На рисунку 4.2 наведені залежності максимальної частоти коливань та часу переміщення додаткового вантажу від амплітуди в широкому (а) та вузькому (б) її діапазонах.

Вони свідчать про те, що у зоні значень амплітуд менших ніж 5 – 7 мм спостерігається різка залежність f від A .

Оскільки частота механічних коливань позитивно впливає на показники процесу шліфування, наприклад, такі як продуктивність обробки та питомі витрати алмазів в шліфувальних кругах виникає потреба в використанні її максимально можливих значень, які може реально забезпечити вібратор механічних коливань. Стосовно вібратора, заснованого на використанні енергії вантажу, що вільно падає, її обмежують ряд факторів серед яких сила тертя в пристрої, опір повітря та інші. Крім цього треба враховувати жорсткість пристосування для шліфування.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Граничні поєднання параметрів механічних коливань:

а) – широкий діапазон амплітуд; б) – вузький діапазон амплітуд

Врахувати їх вплив теоретичними розрахунками практично неможливо. Саме тому найбільш коректне вирішення цього завдання можливе шляхом застосування експериментального методу який автоматично враховує можливі негативні впливи, які обмежують значення верхньої граничної частоти коливань механічного вібратора. У зв'язку з цим запропоновано (пат. 146996, Україна) верхню граничну частоту коливань механічного вібратора встановлювати безпосередньо у процесі шліфування для чого її плавно збільшують при працюючому пристрої, упродовж іспитів контролюють силовий критерій процесу шліфування, наприклад, нормальну силу, при постійному значенні амплітуди коливань, фіксують частоту початку порушення стабільності прояву силового критерію, приймають її за

критичну, а верхню граничну частоту коливань визначають по формулі:

$$[f] = C_f \cdot f_{кр.}, \quad (4.3)$$

де $[f]$ – верхня гранична частота коливань, Гц; C_f – коефіцієнт запасу, рівний 0,9 – 0,95; $f_{кр.}$ – критична частота коливань, Гц.

Це дозволяє визначити критичну для кожного конкретного значення амплітуди коливань частоту на основі якої можна розрахувати її реальне для практичного застосування значення (з гарантованим запасом).

Сказане пояснюється схемою, представленою на рисунку 4.3. На ньому схематично наведено вплив часу обробки на нормальну силу P_y , яка коливається від мінімального значення $P_{y \min}$ (створена постійним вантажем) до максимального $P_{y \max}$ (сумарна сила від дії постійного і додаткового вантажів одночасно) при зміні частоти коливань.

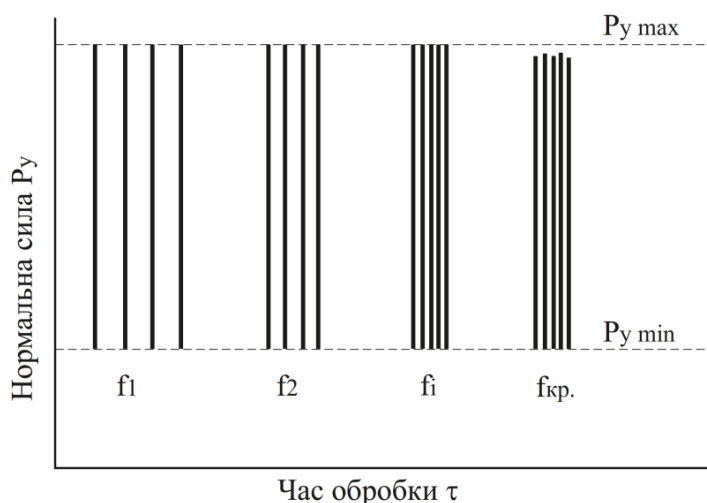


Рисунок 4.3 – До визначення верхньої граничної частоти коливань механічного вібратора

Тобто у межах частот, які може забезпечити вібратор, її значення стабільне. При досягненні частотою свого критичного ($f_{кр.}$) для даного пристрою значення ця картина порушується і нормальне функціонування системи неможливе. Це вимагає зменшення реальної частоти шляхом введення поправочного коефіцієнта. Ця частота може вважатися як верхня гранична частота коливань механічного вібратора.

На основі теоретичного аналізу і практичного застосування процесу, що розглядається, нами вперше (пат. 146996, Україна) запропоновано амплітуду додаткового навантаження задавати в зменшеному інтервалі (0,5 – 8) мм, а діапазон фактичних частот його застосування приймати вище верхнього значення частоти інфразвуку виходячи з нерівності:

$$f_i < f_\phi \leq \frac{C_f \cdot \eta}{\sqrt{(2 \cdot A/a)}}, \quad (4.4)$$

де, A , f_ϕ , a – відповідно амплітуда (мм), фактична частота (Гц) додаткового навантаження і його прискорення (мм/с²); $f_i=16-20$ – верхнє значення діапазону частот інфразвуку; $\eta=0,85-0,90$ – коефіцієнт корисної дії механізму реалізації додаткового навантаження; C_f – конструктивний коефіцієнт, значення якого призначають з виразу:

$$C_f = 0,95 \cdot \exp(-0,012 \cdot A) \quad (4.5)$$

Найкращий результат можна очікувати у випадку, коли обробка буде реалізовуватися при максимально можливій частоті коливань для конкретного значення амплітуди. Ця частота залежить від можливостей механічного пристрою (вібратора) який її створює. Апріорі використання механічних коливань в зоні менших амплітуд повинно позитивно вплинути на якість обробки. Процес треба реалізовувати в зоні частот які з одного боку перевищують верхнє значення діапазону частот інфразвуку, яке складає 16 Гц (ліва частина нерівності (4.4)), а з іншого – можуть бути практично достатньо легко реалізовані з використанням механічної системи створення періодичних навантажень. Мова йде про використання того ж самого пристрою для створення коливань (рис. 4.1). Права частина нерівності (4.4) враховує теоретично можливу частоту з урахуванням часу падіння додаткового навантаження близького до вільного (цей час залежить від параметрів A та a). Отримана теоретична частота на практиці підлягає корегуванню (зменшенню до фактичного значення), як цього вимагає реальна конструкція механічного пристрою (наприклад, кулачковий механізм для

підняття додаткового вантажу у вихідне положення). Саме для цього у склад нерівності (4.4) введено конструктивний коефіцієнт C_f значення якого призначають з виразу (4.5). Максимальне значення амплітуди додаткового навантаження $A = 8$ мм гарантує знаходження його частоти за межами інфразвукового діапазону. Використання значення амплітуд $A < 0,5$ мм не рекомендується по причині необхідності використання занадто великих для механічної системи частот.

На рисунку 4.4 показано взаємозв'язок між частотою f (теоретичною f_T та фактичною f_ϕ) і амплітудою A додаткового навантаження стосовно пристрою згідно з рисунком 4.1. Криві $f_T (f_\phi) = f(A)$ побудовані на базі використання формул (4.4) та (4.5).

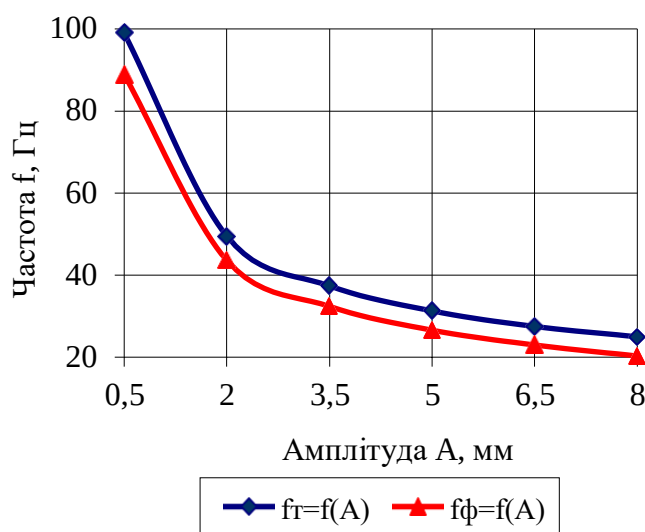


Рисунок 4.4 – Граничні сполучення параметрів механічних коливань

4.3. Теоретичні дослідження імпульсу сили як фактора для управління контактними напруженнями

Додаткове навантаження 7 (рис. 4.1) починає рухатися рівноприскорено зі стану спокою (без початкової швидкості) [136] і при зіткненні з вантажем 5 створює імпульс сили (ΔP) певної величини [109]. В зоні шліфування цей імпульс здійснює силовий вплив на зерна круга і таким

чином ініціює процес їх самозаточування. Як відомо, імпульс сили являє собою векторну фізичну величину на короткому часовому інтервалі рівну добутку сили на час її дії (міра впливу сили на тіло за даний інтервал часу в поступальному русі). Тривалість імпульсу сили - це час її зміни від нульового значення до максимального та назад до нульового.

Імпульс сили можна визначити за формулою [109]:

$$\Delta P = P \cdot t, \quad (4.6)$$

де P – сила, яка створює імпульс, H ; t – проміжок часу, c .

Силу P можна розрахувати як $P = m \cdot a$. Тут a – прискорення додаткового навантаження, m/c^2 .

З іншого боку імпульс сили можна визначити як:

$$\Delta P = m \cdot V, \quad (4.7)$$

де m – маса додаткового навантаження, $кг$; V – швидкість переміщення додаткового навантаження ($м/с$) через проміжок часу t .

Для нашого пристрою (рис. 4.1) швидкість і час переміщення вантажу є функцією амплітуди A (відстані, яку проходить вантаж масою m) і може бути визначена, як:

$$V = a \cdot t = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A}{a}} = \sqrt{2 \cdot a \cdot A}. \quad (4.8)$$

Графіки залежностей $V = f(A)$ та $t = f(A)$ наведено на рисунку 4.5.

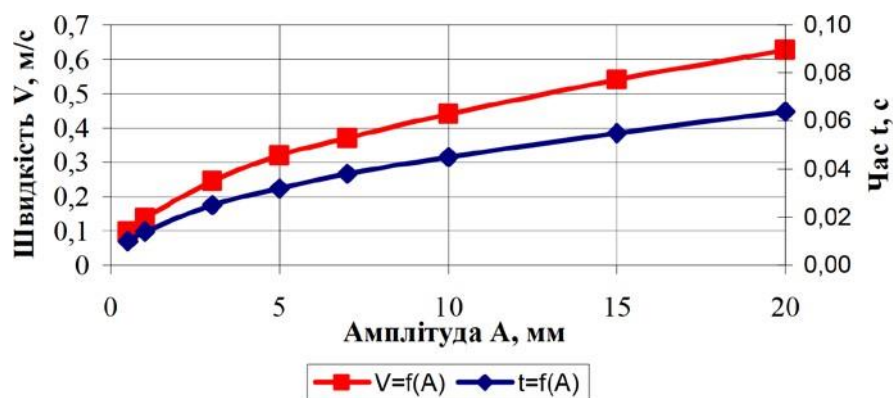
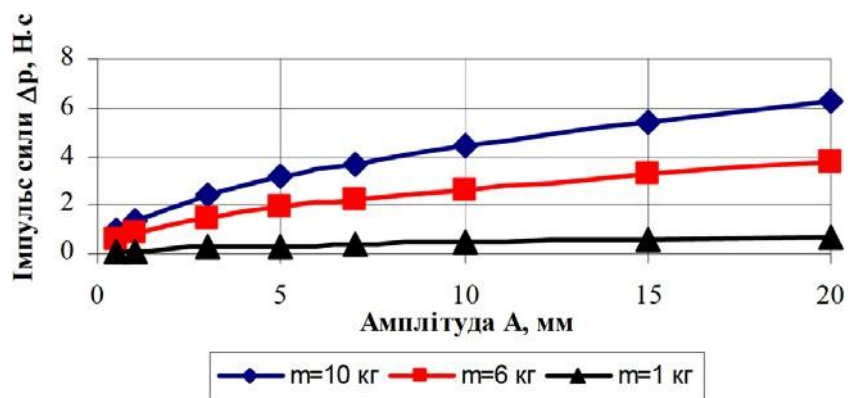


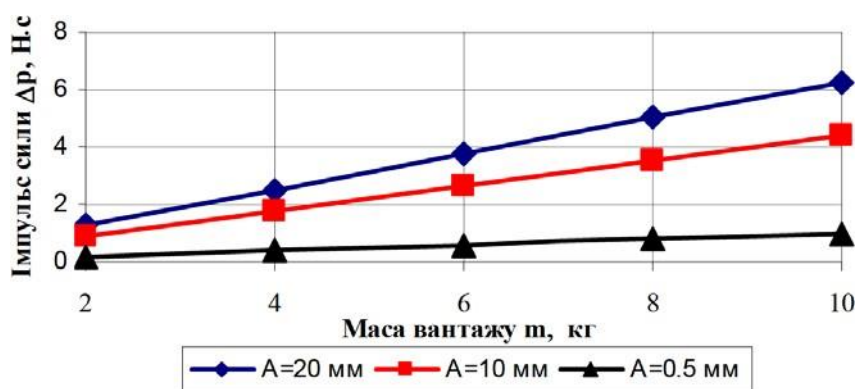
Рисунок 4.5 – Графіки залежностей $V = f(A)$ та $t = f(A)$

На рисунку 4.6 а, б представлені залежності $\Delta P = f(A)$ та $\Delta P = f(m)$.

Практика використання пристрою (рис. 4.1) свідчить про те, що маса постійного навантаження 5 (рис. 4.1) не повинна бути великою і знаходитись у межах 0,25 – 0,5 кг. Вона мусить бути достатньою для забезпечення невідривності контакту СПА з РПК. В іншому випадку вона може гасити ефект від прояву додаткового навантаження 7 маса якого знаходиться у діапазоні 2 – 10 кг.



а)



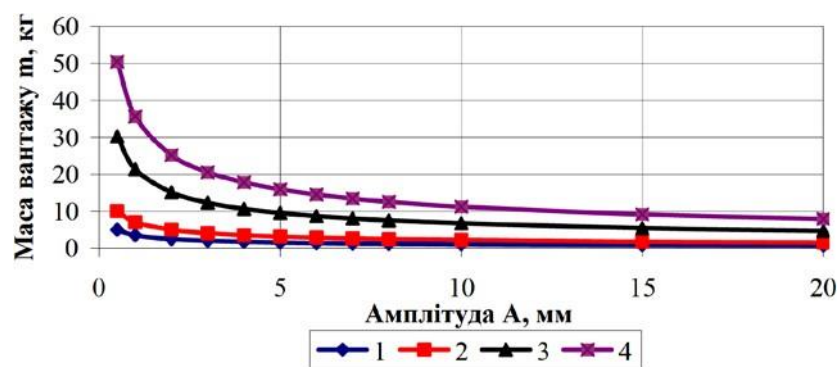
б)

Рисунок 4.6 – Залежності $\Delta P = f(A)$ та $\Delta P = f(m)$

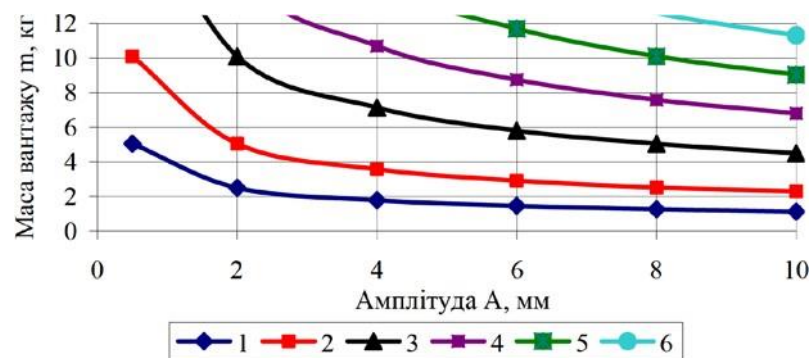
Оскільки імпульс сили є комплексною фізичною величиною, яка одночасно залежить від двох параметрів ($\Delta P = f(A, m)$), то це означає, що однакові величини ΔP можна реалізувати при різних поєднаннях параметрів m і $A(V)$. На практиці це суттєво розширює можливості технолога при розробці і впровадженні у виробництво керованого процесу шліфування з

введенням у зону обробки механічних коливань. Крім цього додатковим інструментом впливу на зерна алмазного круга є частота імпульсів механічних коливань. Тому апріорі задача підвищення якості обробки може бути успішно вирішена шляхом використання коливань зі зниженими значеннями імпульсів сили і підвищеними частотами їх реалізації.

На рисунку 4.7. наведено двомірні залежності, які відображають одночасний вплив двох параметрів механічних коливань (маси вантажу m та амплітуди коливань A) на імпульс сили ΔP в різних діапазонах амплітуд.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Двомірні залежності $\Delta P = f(A, m)$ в різних діапазонах амплітуд:

- а) широкому 1 – $\Delta P=0,5$ Н с; 2 – $\Delta P=1$ Н с; 3 – $\Delta P=3$ Н с; 4 – $\Delta P=5$ Н с;
 б) вузькому 1 – $\Delta P=0,5$ Н с; 2 – $\Delta P=1$ Н с; 3 – $\Delta P=2$ Н с; 4 – $\Delta P=3$ Н с; 5 – $\Delta P=4$ Н с;
 6 – $\Delta P=5$ Н с

Тут кожна крива являє собою лінію однакового імпульсу сили при

різних поєднаннях m та A . Виходячи із сказаного вище, до впровадження у виробництво слід рекомендувати дані вузького діапазону амплітуд. Причому більші амплітуди слід використовувати для чорнової, а менші – для чистової обробки СПА.

На основі виконаних досліджень було запропоновано оригінальний керований спосіб шліфування з введенням в зону обробки механічних коливань низької частоти (пат. 146996, Україна) згідно якому у якості основної характеристики механічних коливань приймають імпульс сили, процес шліфування ведуть при постійній його величині, яку створюють додатковим вантажем шляхом визначеного поєднання значень його амплітуди і маси, причому останню розраховують за емпіричною залежністю (див. розділ 2):

$$m = \frac{\Delta P}{0.14 \cdot \sqrt{A}}, \quad (4.9)$$

де m – маса додаткового вантажу, кг; ΔP – імпульс сили, Н·с;

A – амплітуда, мм., а інтенсивність впливу механічних коливань на робочу поверхню алмазного круга додатково регулюють шляхом зміни їх частоти.

Технічний результат полягає в тому, що для отримання стабільної якості обробки треба насамперед забезпечувати однакову інтенсивність впливу механічних коливань на напружено-деформований стан в зоні шліфування. Саме тому при визначенні умов обробки треба оперувати основною комплексною характеристикою механічних коливань якою є імпульс сили. Останній являє собою функцію таких параметрів як маса додаткового вантажу та амплітуда його переміщення. Тобто однакові значення імпульсу сили можна забезпечувати поєднанням різних значень амплітуди і маси. З точки зору стабільності якості обробки важливо, щоб процес шліфування відбувався при раціональному постійному його значенні (у межах $\Delta P = 0,5-4,0$ Н·с) незалежно від того яким поєднанням маси і амплітуди він забезпечений. Для визначення раціонального поєднання цих параметрів служить наведена вище емпірична формула. Без зміни величини

імпульсу додаткове покращення технологічних характеристик процесу шліфування можливе шляхом регулювання значення такого параметра механічних коливань, як їх частота. Її максимальне значення обмежується можливістю механічного пристрою (вібратора).

Таким чином, використання імпульсів сили постійної величини дає можливість забезпечення стабільної якості обробки при високій продуктивності і низькому значенні питомих витрат алмазних зерен у кругах.

На практиці це дозволяє технологу розширені можливості при розробці технологічної операції шліфування в плані призначення режимів обробки.

4.4. Удосконалення способу електрохімічної правки струмопровідного алмазного круга

В роботі [28] встановлено, що високопродуктивне шліфування СПА в умовах введення в зону обробки низькочастотних механічних коливань потребує збільшених значень швидкостей електрохімічного розчину металевої зв'язки круга та її стабільної підтримки. Остання вимога особливо важлива з точки зору отримання потрібної якості обробки. Розглянуті у розділі 2 відомі способи безперервної правки струмопровідних алмазних кругів в яких силу електричного струму регулюють окремо шляхом регулювання або величини міжелектродного зазору (унаслідок чого змінюється його електричний опір) або напруги джерела постійного струму. Практика їх використання показала що вони мають обмежені технологічні можливості в плані розширення діапазону щільності струму правки, що стримує його впровадження у виробництво.

У зв'язку з цим було запропоноване рішення (пат. 146479, Україна) здійснювати регулювання заданої сили струму шляхом зміни величини МЕЗ і напруги в технологічному ланцюгу поперемінно, причому спочатку при напрузі 9 – 12 вольт катод підводять до робочої поверхні круга до моменту досягнення силою струму заданого значення після чого подальшу її

стабілізацію здійснюють при нерухомому катоді шляхом зміни напруги, а при досягненні останнього значення 24 – 27 вольт процес повторюють знову. Технічний результат цього рішення полягає в тому, що при нерухомому катоді забезпечується стабільність протікання електрофізикохімічних явищ в ньому, що позитивно впливає на стан макро- та мікропрофілю робочої поверхні алмазного круга. А це сприяє зниженню питомих витрат алмазних зерен та забезпеченню стабільної якості обробки.

Як видно з рисунка 4.8 інтенсивність розчинення зв'язки круга, а, отже, і відновлення його ріжучих властивостей задається величиною сили струму в ланцюзі управління (ланцюг: мінус джерела технологічного струму ДТС, катод 2, алмазний круг 1, струмознімач 3, плюс ДТС).

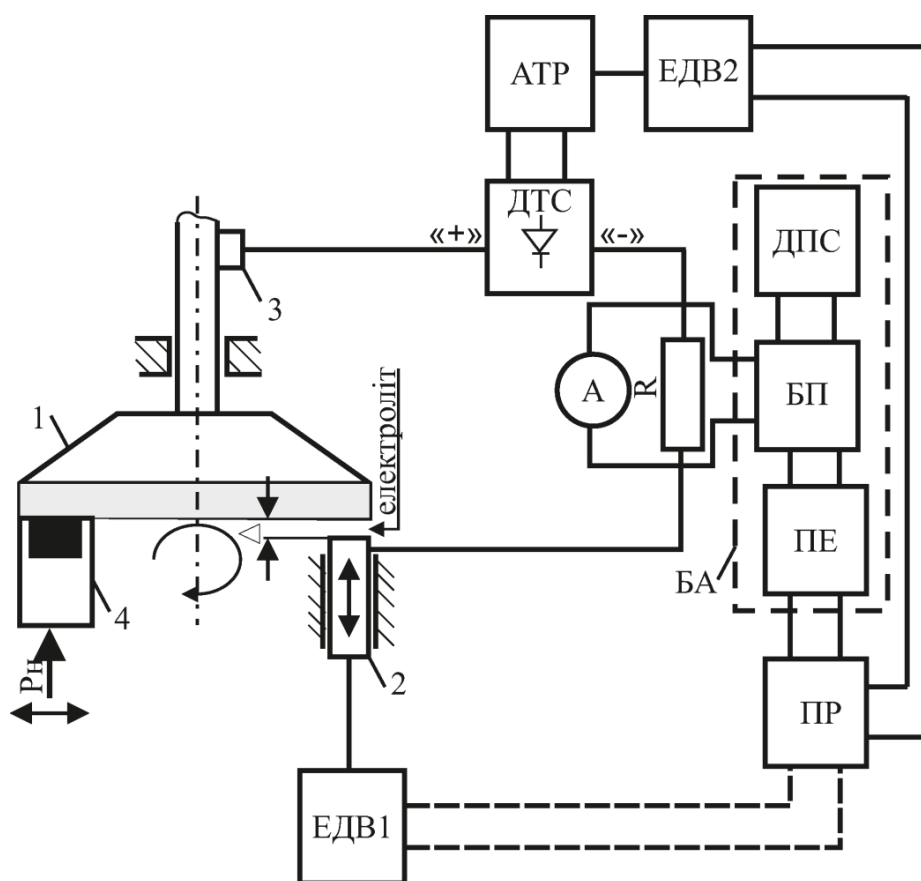


Рисунок 4.8 – Універсальна схема стабілізації струму в ланцюгу електрохімічної правки круга

Регулювання сили струму при постійній напрузі джерела живлення здійснюється величиною $ME3 \Delta$ (в результаті чого змінюється його

електричний опір). Підведення катода 2 до круга 1 або відведення від нього (в залежності від величини сили струму в ланцюзі управління) відбувається автоматично за допомогою механізму переміщення катода 2. Для цього в складі зазначеного механізму є реверсивний конденсаторний електродвигун (ЕДВ1), який в свою чергу управляється блоком автоматики (БА). Основними елементами цього блоку є джерело постійної стабілізованої напруги (ДПС), блок порівняння (БП), електронний підсилювач (ЕП).

Інформація про величину сили струму в ланцюзі управління знімається з шунта опором R у вигляді падіння напруги, значення якого залежить від сили струму. Ця напруга порівнюється в блоці порівняння (БП) зі стабілізованою напругою джерела (ДПС). Результуючий сигнал посилюється електронним підсилювачем (ЕП) і надходить на реверсивний електродвигун (ЕДВ1, наприклад типу РД-09). Залежно від полярності такого сигналу двигун буде або підводити катод 2 до круга 1, або відводити від нього. При цьому відбувається зміна величини МЕЗ (Δ), а, значить, і сили струму в ланцюзі управління.

Представлений пристрій має можливість здійснювати автоматичне регулювання сили струму і шляхом зміни технологічного напруги ланцюга в ланцюзі управління. Як видно з фігури, використовується той же самий блок автоматики БА, що і в першому випадку. Сигнал з шунта опором R і заданий сигнал з джерела стабілізованої напруги (ДПС) надходять в блок порівняння (БП), а результуючий сигнал посилюється електронним підсилювачем (ЕП).

Залежно від полярності цього сигналу реверсивний електродвигун (ЕДВ2, наприклад типу РД-09) змінює напрямок обертання і за допомогою спеціального механізму, наприклад, на базі автотрансформатора (АТР), або збільшує, або зменшує напругу джерела (ДТС) яка після випрямлення подається на електроди (круг 1 і катод 2).

Як видно з фігури сигнал з електронного посилювача (ЕП) надходить на розподільчий пристрій (РП), а потім на один з реверсивних електродвигунів в залежності від необхідності. Періодична стабілізація сили

струму в ланцюзі правки при нерухомому катоді за рахунок зміни напруги джерела технологічного струму сприяє поліпшенню характеристик процесу правки алмазного круга, а, отже, і шліфування в цілому.

Якщо прийняти напругу джерела технологічного струму менше ніж 9 вольт підвищується ризик виникнення електроерозійного пробую МЕЗ, що не допустимо. Гранична напруга 27 вольт прийнята з міркувань техніки безпеки. У подальшому експерименти проводили з використанням даного способу правки круга.

4.5. Експериментальні дослідження вихідних показників процесу шліфування

Основними технологічними показниками процесу шліфування СПА вважаються його продуктивність (Q), питомі витрати алмазів круга (q), та відсоток браку виробів з СПА. Що стосується Q і q то рівень їх значень в основному визначається, по-перше, кількістю алмазних зерен в контакті з оброблювальним СПА, а по-друге, інтенсивністю їх самозаточування. Для практичної реалізації цих вимог у свою чергу достатньо забезпечити дві умови. По-перше безперервне видалення металевої зв'язки круга в автономній зоні з заданою інтенсивністю [107], а по-друге введення в зону обробки механічних коливань [28] (див. п. 4.1). Поєднання цих умов є запорукою вирішення поставлених завдань. Саме для цього і був запропонований комбінований процес шліфування який розглядається. Стосовно цього процесу була сформульована наукова гіпотеза, яка полягає в тому, що його використання в діапазоні частот механічних коливань нижня межа яких перевищує частоту інфразвуку, а верхня обмежується можливістю механічного вібратора (~50 Гц), може дати дозволити практично без погіршення значень Q і q суттєво підвищити якісні показники процесу шліфування СПА. Під якісними показниками на даному етапі обробки річ йде в першу чергу про відсоток браку СПА. Оскільки кінцевою стадією

обробки СПА як правило є процес їх доведення на якому і формується остаточна якість, то важливо щоб СПА не були відбраковані на попередніх стадіях обробки за причинами сколів та тріщин.

Для підтвердження наукової гіпотези була проведена серія верстатних експериментів основні результати яких наведені нижче (рис. 4,9 – 4,10).

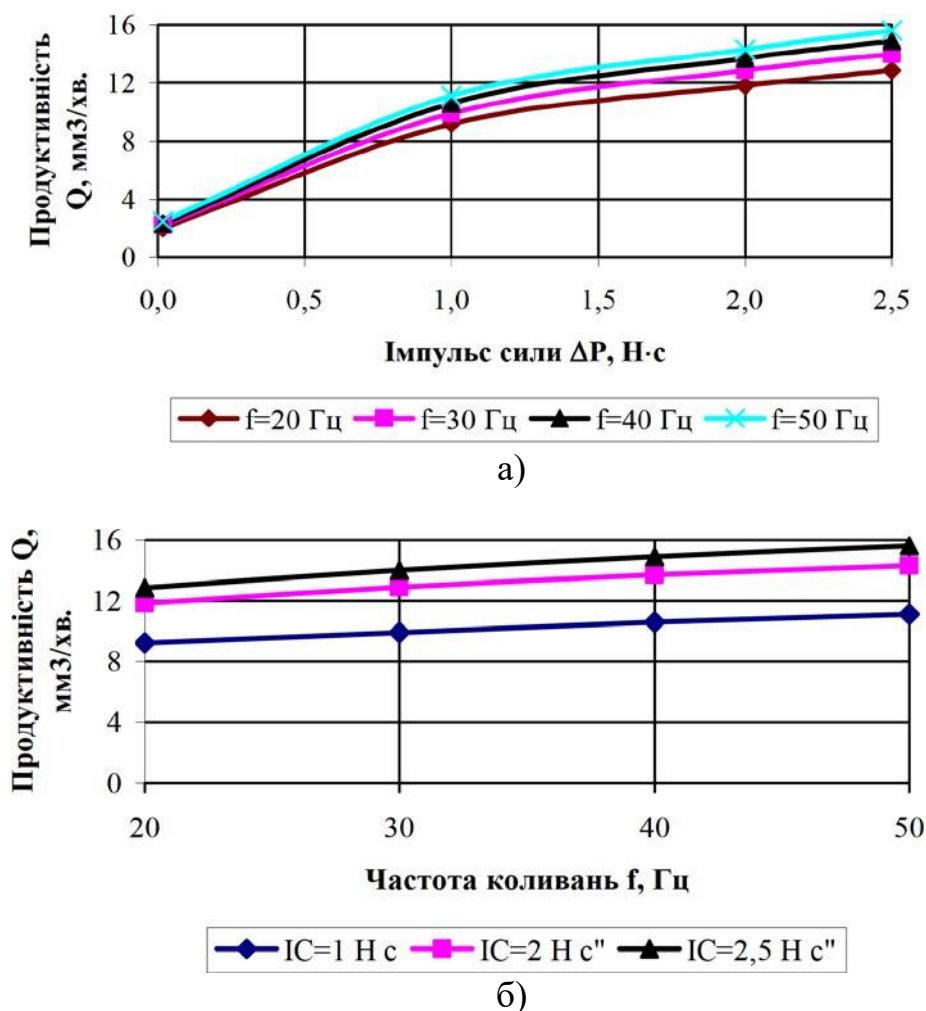


Рисунок 4.9 – Залежності $Q = f(\Delta P, f)$ та $Q = f(f, \Delta P)$

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x20x3x32 AC6 100/80 M2-01 100 %;
 $V_k = 20$ м/с; $S_{под.} = 1$ м/хв.; $I = 100$ А; $f = 30$ Гц

Порівняно з відомими дослідженнями [28], присвяченими використанню механічних коливань з підвищеними значеннями амплітуд в інфразвуковому діапазоні частот, принципіальні відмінності запропонованого процесу полягали в наступному: використовували діапазон низькочастотних коливань за межами частоти інфразвуку (20 – 50 Гц); у

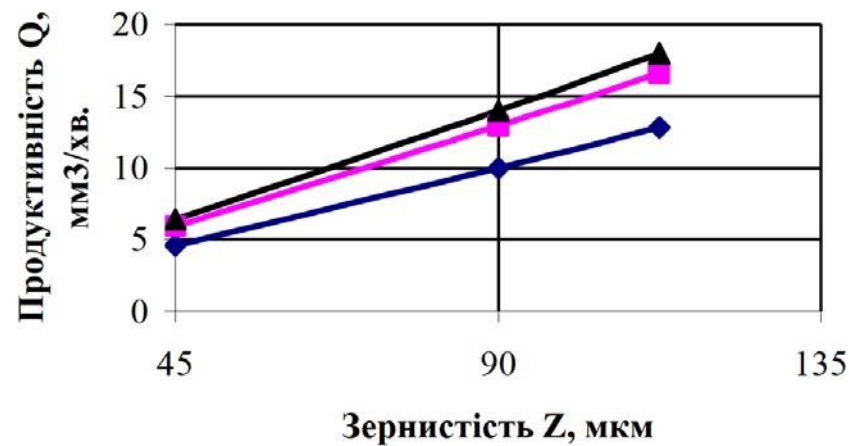
якості фактора впливу використовувався такий фізичний показник, як імпульс сили ΔP , значення якого приймалися щадними ($\Delta P \leq 2,5 \text{ Н}\cdot\text{с}$); використовували зменшені діапазони амплітуд механічних коливань ($A=0,5 - 8\text{ мм}$) та зернистості алмазного круга ($Z=50/40 - 125/100$). Цього вимагала необхідність підвищення якості обробки.

Як свідчать дані рисунку 4.10, а, б, навіть в діапазоні щадних значень імпульс сили має значний вплив на інтенсивність самозаточування алмазних зерен, про що свідчить восьмикратний ріст продуктивності обробки. У даних умовах можна припустити два можливі механізми самозаточування зерен. Перший-під дією імпульсів сили зерна, які мають у своєму складі критичну величину дефектів, просто розтріскуються. Це можуть бути як мікро-, так і макротріщини. Другий-під дією імпульсів сили друга частина зерен вдавлюються в зв'язку круга і починають працювати на вигин. При обробці СПА зерно в такому випадку не може знімати стружку в класичному понятті і в умовах високошвидкісного зіткнення двох рівно твердих матеріалів обов'язково повинно зруйнуватися. Цьому сприяє мале значення межі міцності алмазу на вигин ($\sim 0,2 \text{ ГПа}$), що і призводить до самозаточування зерен шляхом мікро- і макроруйнування. В обох випадках на зернах утворюються мікро-і субмікрокромки, що і призводить до інтенсифікації механізму крихкого руйнування СПА, а, отже, зняття припуску з його поверхневого шару [107].

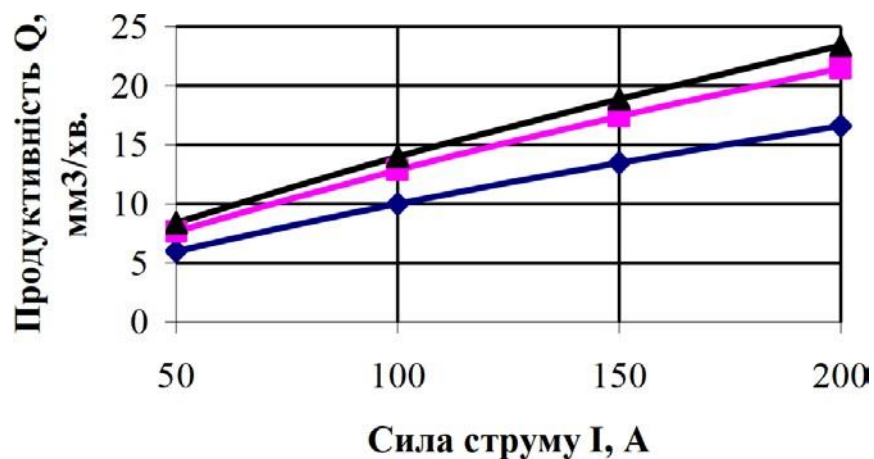
Частота механічних коливань визначає кількість прикладених до алмазних зерен імпульсів сили, а отже безпосередньо впливає інтенсивність їх самозаточування. Треба мати на увазі, що однаковий результат обробки можна отримати, як при використанні імпульсів сили однакової величини, отриманих шляхом поєднання значень маси додаткового вантажу та амплітуди, так і шляхом збільшення частоти при зменшенні імпульсу сили (і навпаки). Це значно розширює технологічні можливості процесу шліфування, що розглядається.

Зернистість алмазного круга має суттєвий вплив на вихідні показники

процесу шліфування СПА (рис. 4.10 а). З її підвищенням від 50/40 до 125/100 ріст продуктивності становить 2,5 рази.



а)



б)

Рисунок 4.10 – Залежності $Q = f(Z, \Delta P)$ та $Q = f(I, \Delta P)$

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x20x3x32 AC6 M2-01 100 %;

$V_k = 20$ м/с; $S_{nod.} = 1$ м/хв.; $f = 30$ Гц;

а)-I = 100 А; б)-Z = 100/80

Як відмічалось вище, прояв можливостей того чи іншого фактору впливу може бути реалізований в тому випадку, якщо металева зв'язка круга буде безперервно видалятися в автономній зоні з необхідною швидкістю електрохімічним способом. Ця швидкість залежить від сили постійного

електричного струму в зоні правки РПК.

Як свідчать дані рисунка 4,11 б, і в нашому випадку цей вплив дійсно дуже значний (у діапазоні сили струму 50 – 200 А збільшення продуктивності становить 3 рази).

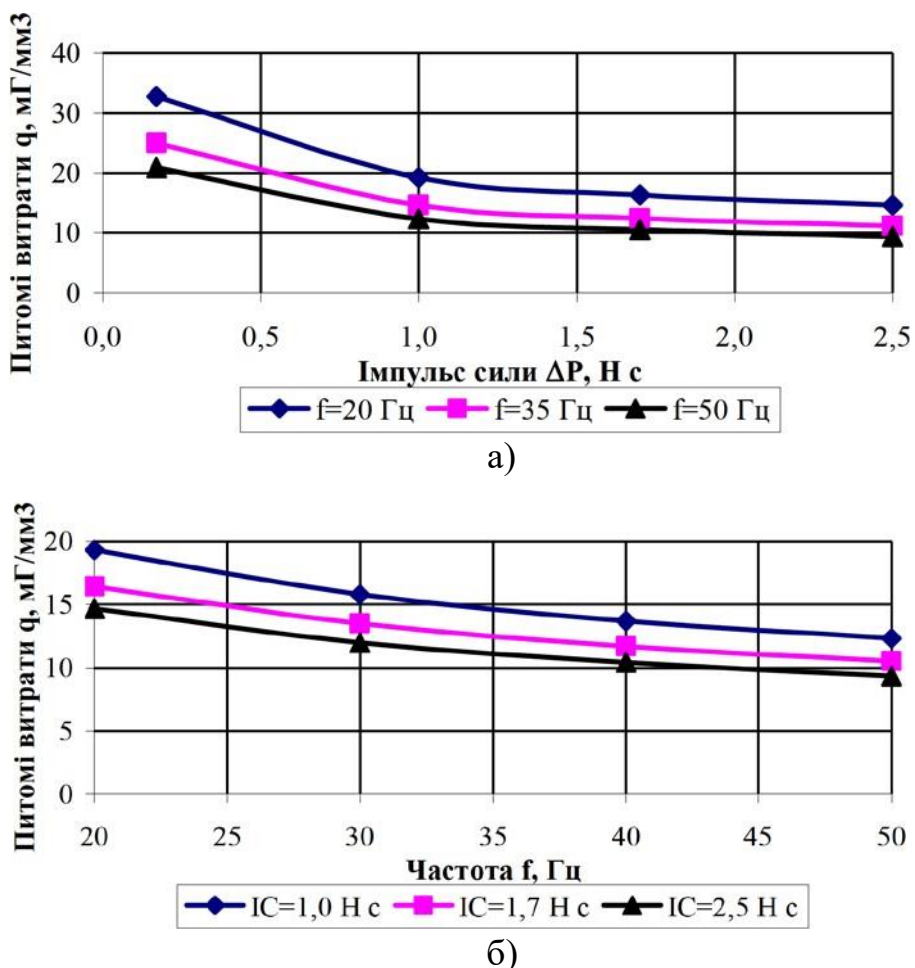


Рисунок 4.11 – Залежності $q = f(\Delta P, f)$ та $q = f(f, \Delta P)$

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x20x3x32 AC6 100/80 M2-01 100 %;
 $V_k = 20$ м/с; $S_{под.} = 1$ м/хв.; $I = 100$ А; $f = 30$ Гц

А суворо кажучи є визначальним. Другими словами прояв фактору впливу, який сприяє інтенсифікації самозаточування алмазних зерен можна реалізовувати до тих пір, поки буде можливе оновлення ріжучого рельєфу круга електрохімічним способом. Вичерпання можливостей по швидкості видалення зв'язка круга стосовно конкретного режиму чиправлячого пристрою в цілому одночасно буде означати і вичерпання всіх інших

можливостей.

Оскільки в умовах прикладення в зону обробки механічних коливань алмазні зерна можуть руйнуватися при значно менших виступаннях над рівнем металевої зв'язки, яка безперервно видаляється електрохімічним способом з достатньо високою швидкістю, то це означає, що їх число в контакті з СПА значно збільшується. Одночасно з цим зменшується кількість зерен, які випадають зі зв'язки, то коефіцієнт їх використання значно збільшується. Все це позитивно відображається на рівні їх питомих витрат. Підтвердженням цього є експериментальні дані, наведені на рисунках 4.11 – 4.12. Вони свідчать про те, що умови обробки, які призводять до підвищення продуктивності обробки, в даному випадку забезпечують зниження питомих витрат алмазів круга. Винятком є вплив сили струму у ланцюзі видалення зв'язки круга (рис. 4.12, б). Але в даному випадку він свідчить про деяку невідповідність між швидкістю видалення зв'язки і інтенсивністю дії механічних коливань, що потребує додаткових досліджень по оптимізації розглянутого процесу шліфування. Порівняння удосконаленого керованого способу шліфування СПА з введенням в зону обробки механічних коливань з базовим показало, що його використання дозволяє вирішити і завдання підвищення якості обробки. Про це свідчать дані рисунку 4.13.

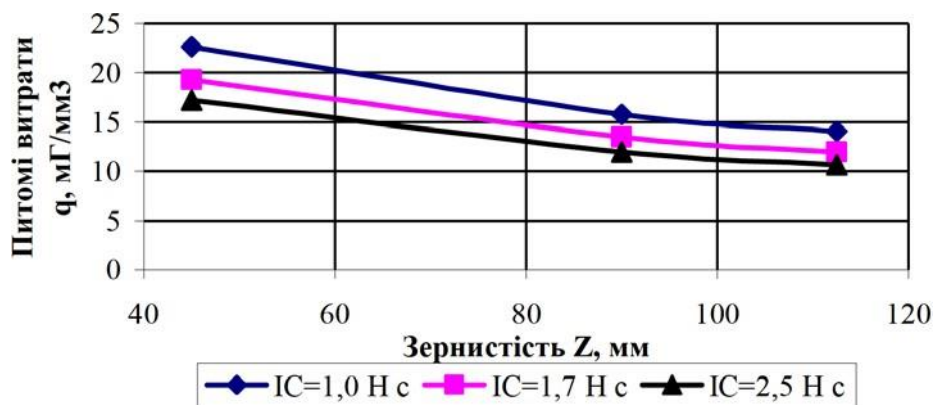
Як свідчать наведені фото (рис. 4.13, а, б), спосіб шліфування з підвищеними амплітудами і низькими частотами (інфразвуковий діапазон) механічних коливань рисунку може бути використаний тільки на чорнових стадіях обробки, коли перед кінцевою операцією передбачається чистове шліфування оскільки великі сколи видаляти доводкою на раціонально.

Що стосується запропонованого (удосконаленого) процесу, то він не має такого недоліку (рис. 4.13, в, г).

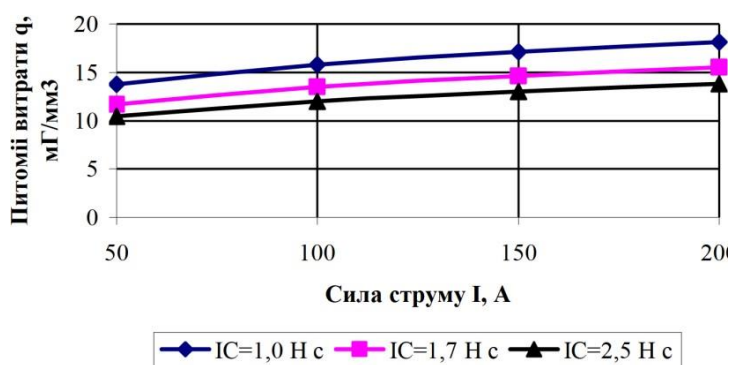
Таким чином в цілому можна зробити висновок, що завдання удосконалення процесу шліфування за рахунок управління контактними напруженими в зоні обробки виконане.

Висновки

На основі виконаних досліджень за розділом можна зробити наступні висновки.



а)



б)

Рисунок 4.12 – Залежності $q = f(Z, \Delta P)$ та $q = f(I, \Delta P)$

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x20x3x32 AC6 M2-01 100 %;

$V_k = 20$ м/с; $S_{nod.} = 1$ м/хв.; $f = 30$ Гц;

а) $I = 100$ А; б) $Z = 100/80$

а), б) $f = 10$ Гц; А=8 мм; в), г) $f = 30$ Гц; А=0,5 мм

1. Використання керованого процесу шліфування з введенням в зону обробки механічних коливань з інфра- або ультразвуковою частотою для реалізації чистової обробки СПА є недоцільним. В першому випадку використовується надмірне силове навантаження, що пов'язане з одночасним використанням великих амплітуд і низьких частот прикладення періодично діючого додаткового навантаження, а в другому цьому заважає значна

складність практичного використання процесу.

2. Дослідженнями встановлено, що подальше удосконалення керованого процесу шліфування СПА з механічними коливаннями низької частоти заснованого на використанні енергії додаткового вантажу, що вільно падає доцільне за рахунок виявлення раціональних поєднань значень параметрів механічних коливань. Для поліпшення якості обробки потрібно прагнути використовувати верхні граничні для механічних вібраторів частоти при зменшених амплітудах (пат. 146996, Україна).

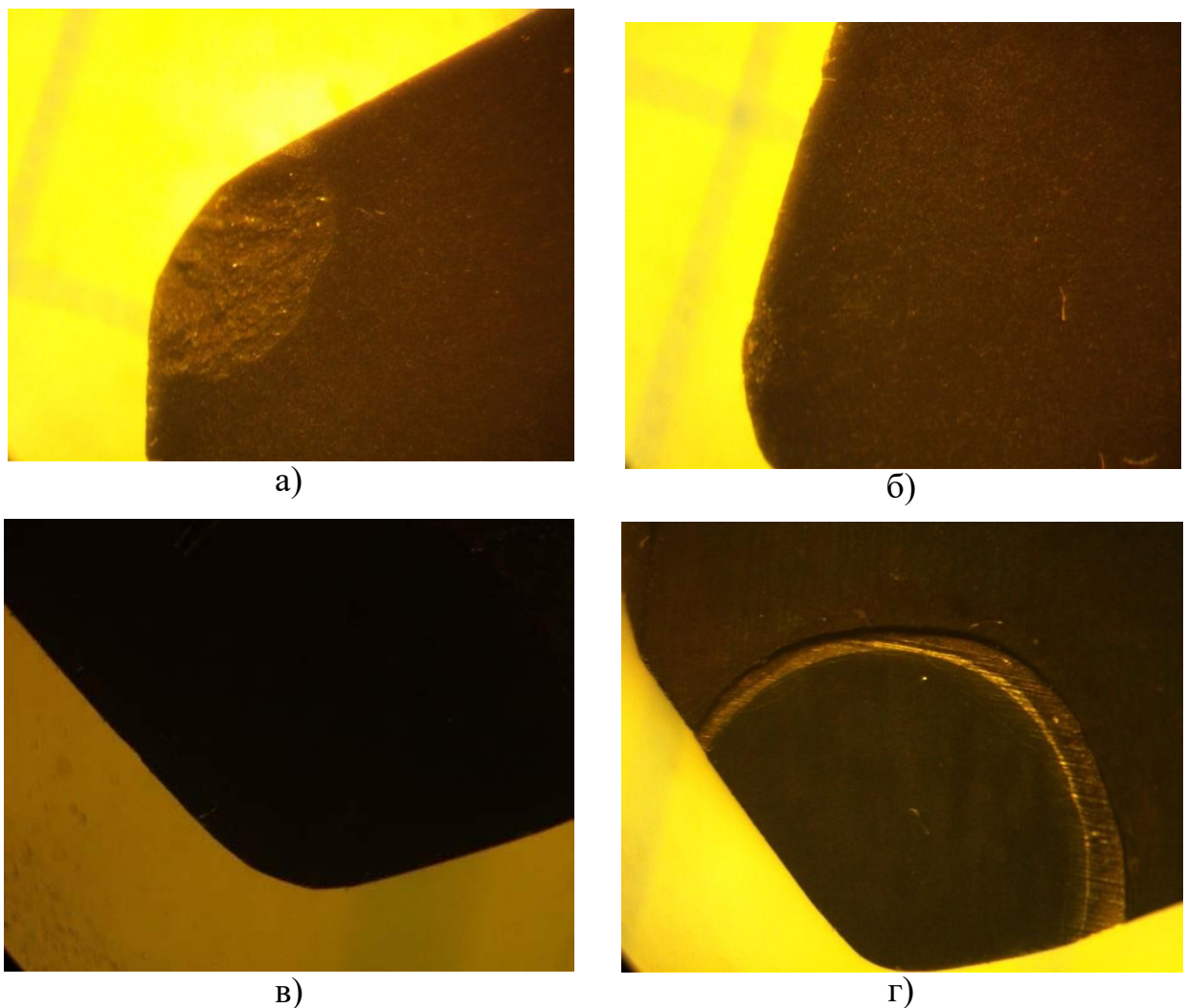


Рисунок 4.13 – Стан ріжучих кромки інструментів після обробки базовим (а, б) та удосконаленим способами шліфування (в, г) 25^х

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x20x3x32 AC6 100/80 M2-01 100 %;
 $V_k = 20$ м/с; $S_{nod.} = 1$ м/хв.; $I=100A$

3. Верхню граничну частоту коливань механічного вібратора потрібно

встановлювати безпосередньо у процесі шліфування для чого її плавно збільшують при працюючому пристрої, упродовж іспитів контролюють силовий критерій процесу шліфування, наприклад, нормальну силу, при постійному значенні амплітуди коливань, фіксують частоту початку порушення стабільності прояву силового критерію, приймають її за критичну (пат. 146996, Україна).

4. Вперше використаний такий комплексний фактор, як імпульс сили (пат. 146996, Україна), який в даному випадку є результатом одночасного прояву таких параметрів процесу, як маса додаткового вантажу і амплітуди механічних коливань. Це дозволяє створювати в зоні обробки перемінні контактні напруження, які позитивно впливають на процес самозаточування алмазних зерен. Задача підвищення якості обробки може бути успішно вирішена шляхом використання коливань зі зниженими значеннями імпульсів сили і підвищеними частотами їх реалізації. Встановлено, що його значення суттєво впливає на рівень технологічних показників процесу шліфування.

5. Враховуючи встановлений факт, що високопродуктивне шліфування СПА в умовах введення в зону обробки низькочастотних механічних коливань потребує збільшених значень швидкостей видалення металевої зв'язки круга та її стабільної підтримки удосконалено керований процес шліфування СПА оснований на дозованому електрохімічному розчині металевої зв'язки в автономній зоні. Для цього було запропоноване рішення (пат. 146479, Україна) здійснювати регулювання заданої сили струму шляхом зміни величини МЕЗ і напруги в технологічному ланцюгу поперемінно. Це дозволило значно розширити діапазон регулювання сили електричного струму в ланцюзі правки РПК.

6. Встановлено, що умови обробки, які призводять до підвищення продуктивності обробки СПА, забезпечують і зниження питомих витрат алмазів круга. Винятком є вплив сили струму у ланцюзі видалення зв'язки круга. Але в даному випадку він свідчить про деяку невідповідність між

швидкістю видалення зв'язки і інтенсивністю зносу алмазних зерен в умовах дії механічних коливань, що потребує додаткових досліджень по оптимізації розглянутого процесу шліфування.

7. Підтверджено, що визначальною умовою реалізації удосконаленого способу шліфування СПА алмазними кругами на металевих зв'язках є безперервне регульоване електрохімічне видалення зв'язки у процесі шліфування, що створює необхідні передумови для безперервного самозаточування кругів.

РОЗДІЛ 5

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ СПА КРУГАМИ НА ОРГАНІЧНИХ ЗВ'ЯЗКАХ В УМОВАХ ВИСОКИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ

В розділі наведено дані о практичних розробках направлених на удосконалення існуючих процесів шліфування СПА. Зокрема на основі використання явища пристосування вперше запропоновано нові фізичні критерії такі як ефективна складова тангенціальної сили різання і ефективний коефіцієнт шліфування. Стосовно умов високо силових контактних напружень характерних для випадку шліфування алмазними кругами на органічних зв'язках і встановленого механізму їх самозаточування запропоновані удосконалені способи шліфування, які забезпечують підвищення ефективності обробки СПА. Всі технічні розробки виконані на рівні винаходів.

5.1 Особливості процесу шліфування СПА кругами на органічних зв'язках і перспективи його удосконалення

Оскільки алмаз обробляється алмазом, то практично неможливо реалізувати відому в теорії різання матеріалів вимогу перевищення твердості інструментального матеріалу над твердістю оброблюваного. В цьому випадку припуск з ОМ знімається шляхом крихкого мікроруйнування поверхневого шару алмазу при високошвидкісній контактній взаємодії з мікро- і субмікрокромками алмазних зерен. Кромки алмазних зерен повинні бути досить гострими, щоб при реальних термосилових умовах обробки можна було б реалізувати в зоні контакту напруги, достатні для мікроруйнування алмазу [107]. Тобто алмазні зерна в таких умовах можуть ефективно знімати припуск з ОМ навіть при відносно незначних його притиску до РПК оскільки реальні площі контакту мікрокромки з ОМ будуть достатніми для створення в зоні контакту критичних значень контактних напружень. В силу прояву

явища пристосовуваності системи шліфування [129] остання постійно прагне до мінімуму енергії і реалізує цей стан коли за алмазних зернах утворюються сталі майданчики зносу. В даному випадку тангенціальна сила різання трансформується в силу тертя і лінійне знімання ОМ припиняється оскільки утворюється зносостійка пара тертя «алмаз – алмаз». Керуючи контактними процесами в зоні шліфування (для забезпечення потрібної інтенсивності самозаточування алмазних зерен) і зводячи таким чином до мінімуму інтенсивність утворення майданчиків зносу на алмазних зернах можна управляти процесом зняття припуску з СПА, а, отже, підвищити ефективність процесу обробки в цілому.

При шліфуванні СПА кругами на органічних зв'язках за пружною схемою (обробка з регламентованим тиском у контакті) використовуються порівняно малі номінальні значення тиску в зоні контакту ($P_n \leq 3$ МПа). Вони не дозволяють ініціювати примусове самозаточування кругів, тому для цього доводиться додатково використовувати постійну або періодичну їх правку, наприклад, абразивними брусками [107]. Це суттєво знижує продуктивність обробки і культуру виробництва. Більш прогресивною схемою шліфування є жорстка (обробка з регламентованим значенням поперечної подачі) схема обробки [97]. Вона реалізується при високому рівні контактних напружень. Так при шліфуванні СПА $P_n = 30 - 60$ МПа, при обробці надтвердих матеріалів на основі щільних модифікацій нітриду бора $P_n \leq 25$ МПа. В таких умовах ОМ одночасно виконує роль правлячого інструмента (різця), який працює по методу обточування. Оскільки межі міцності алмазних зерен на вигин і розтягнення відносно невисокі, відбувається їх інтенсивне самозагострювання шляхом їх макро- чи мікроруйнування з утворенням на них гострих мікро-і субмікрокромок. Алмазний круг в таких умовах інтенсивно зношується, але забезпечує високу продуктивність шліфування при відносно допустимих значеннях питомих витрат алмазних зерен [97].

Для більш коректного тлумачення працездатності алмазних кругів важливо мати критерії оцінки корисної частки роботи різання, яка витрачається безпосередньо на знімання припуску з ОМ. Це дозволить коректно порівнювати між собою працездатність алмазних кругів різних характеристик в різних умовах шліфування і навіть різні процеси шліфування з метою вибору найбільш оптимального з них.

Як відомо оцінювання ефективності шліфування СПА базується на використанні ряду технологічних та фізичних критеріїв оцінювання. В першому випадку це наприклад продуктивність шліфування, питомі витрати алмазів круга та інші. До фізичних критеріїв відносять ефективну складову тангенціальної сили різання, коефіцієнт шліфування, коефіцієнт тертя, лінійний знос РПК, лінійне знімання ОМ, питому енергоємність та інші. По їх значенням судять про ефективність процесу шліфування [125]. Удосконалення методів їх визначення може сприяти при деяких обставинах удосконаленню процесів шліфування в цілому.

5.2 Особливості визначення і використання деяких фізичних показників для аналізу ефективності і удосконалення процесів шліфування

Розглянемо дещо удосконалений підхід до оцінювання ефективності процесу шліфування за допомогою таких його фізичних критеріїв як тангенціальна сила, коефіцієнт шліфування та в деякій мірі сила тертя. Так, наприклад, коефіцієнт шліфування уявляє собою відношення тангенціальної та нормальної складових сили шліфування, тобто:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}, \quad (5.1)$$

$K_{ш}$ – коефіцієнт шліфування; P_z – тангенціальна складова сили шліфування, Н; P_y – радіальна складова сили шліфування, Н.

Зазвичай $K_{ш}$ є одним із найпоширеніших критеріїв оцінки взаємодії

РПК з ОМ і використовується при аналізі процесу обробки як правило за пружною схемою [125] при шліфуванні матеріалів звичайної твердості. Він відображає процес різання в динаміці, вплив температурно-швидкісного фактора, характеризує властивості оброблюваного матеріалу, умови впровадження рельєфу в нього, а значить і порівняльну ріжучу здатність круга. У випадку шліфування СПА його застосування не є ефективним оскільки алмазоносний шар круга при використанні пружної схеми не самозаточується що може призвести до отримання суперечливих результатів. Розглянутий критерій зазвичай менше одиниці і за певних умов обробки може наближатися навіть до коефіцієнта тертя пари «алмазні зерна – СПА». У межах одного процесу коефіцієнт шліфування оцінюється залежно від різних умов обробки. Зазвичай більшим значенням $K_{ш}$ відповідає краща оброблюваність.

Розглянутий класичний підхід має недолік, який полягає в низькій точності оцінювання $K_{ш}$, тому що він не враховує того факту, що тангенціальна сила при шліфуванні СПА у свою чергу є сумою двох складових: ефективної складової та сили тертя. В умовах тертя зносостійкої пари «алмазні зерна – СПА», остання не приймає участі у знятті припуску з ОМ (в нашому випадку це СПА). Тому в розрахунок треба приймати тільки значення ефективної складової тангенціальної сили шліфування. Її в загальному випадку можна розрахувати за формулою (пат. 128946 Україна):

$$P_{Z\text{ еф.}} = P_Z - P_{TP}, \quad (5.2)$$

де $P_{Z\text{ еф.}}$ – ефективна складова тангенціальної сили шліфування, Н; P_{TP} – сила тертя, Н.

На основі використання ефективної складової тангенціальної сили шліфування можна визначити дійсне (ефективне) значення коефіцієнту шліфування ($K_{шд}$) за залежністю (пат. 141335 Україна):

$$K_{шд} = \frac{P_{Z\text{ еф.}}}{P_H}, \quad (5.3)$$

Використання $K_{шд}$, визначеного за формулою (3.3), тобто на базі ефективної складової тангенціальної сили шліфування, встановленої за залежністю (5.2), дозволяє більш коректно оцінити ріжучу здатність алмазного круга при шліфуванні СПА, а отже ефективність процесу шліфування в цілому.

Було проведено теоретичний аналіз по можливості визначення ефективної складової тангенціальної сили різання яка безпосередньо витрачається на процес видалення припуску з СПА у процесі шліфування. Встановлено, що складові сили P_z , до яких відносяться $P_{z\text{ еф.}}$ та $P_{тр}$, можна визначити на базі використання такої особливості процесу шліфування СПА як періодичність зміни в часі вихідних показників (в тому числі і тангенціальної складової сили різання) обробки [97] (див. розділ 1) в основі якої в свою чергу лежить відоме явище пристосування системи шліфування [129].

Сказане вище ілюструється рисунком 5.1.

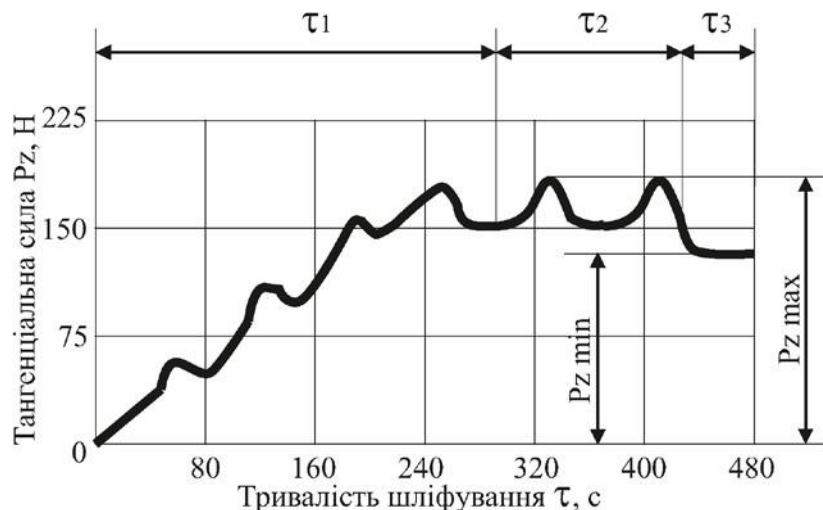


Рисунок 5.1. – Зміна значень вихідних показників процесу шліфування СПА кругом на органічній зв'язці у часі.
Умови обробки згідно рис. 1.5

Для визначення ефективної складової тангенціальної сили у якості фактора примусового впливу на стан різальної поверхні круга можна обрати поперечну подачу на глибину обробки, а її величину визначати за

емпіричною залежністю:

$$S_{\text{ПОП}} = 13,04 \cdot H_{\text{ПНТМ}}^{-3,06} \cdot H_{\text{ЗВ}}^{-1,16} \cdot S_K^{-1,03}, \quad (5.4)$$

де $S_{\text{ПОП}}$ – поперечна подача, мм/подв. хід; $H_{\text{ПНТМ}}$ – мікротвердість полікристалічного надтвердого матеріалу, ГПа; $H_{\text{ЗВ}}$ – твердість (HRB) зв'язки круга; S_K – площа контакту полікристалічного надтвердого матеріалу з різальною поверхнею круга, м².

На протязі періоду обробки τ_1 відбувається приробка круга, яка супроводжується місцевими (локальними) нестабільними актами самозаточування, що призводить до локальних сплесків сили P_Z [4]. На протязі періоду обробки τ_2 акти самозаточування регулярно повторюються через певний період. Максимальне значення сили $P_{Z \text{ max}}$, у цьому інтервалі часу має місце у момент самозаточування алмазних зерен і включає в себе як ефективну складову тангенціальної сили, так і силу тертя. Розпочавшись, процес самозаточування поступово згасає, що супроводжується падінням тангенціальної сили. У цей час доля сили «чистого різання» зменшується, а доля сили тертя, навпаки, збільшується у загальному значенні сили P_Z . Якщо поперечну подачу перервати, то в умовах високошвидкісної контактної взаємодії СПА з алмазними зернами круга на останніх достатньо швидко формуються майданчики зносу і процес різання трансформується у процес тертя зносостійкої пари «СПА – алмазні зерна круга». При цьому тангенціальна сила має мінімальне значення і практично уявляє собою силу тертя ($P_{Z \text{ min}} = P_{\text{ТР}}$). Згідно з залежністю (5.2) різницею між загальним (максимальним) значенням тангенціальної сили і силою тертя практично і є ефективна складова тангенціальної сили різання $P_{Z \text{ еф.}}$ (Пат. 147888 Україна). Значення поперечної подачі на глибину шліфування повинні бути такими, щоб задовольнялась наведена вище залежність. Значення подачі $S_{\text{ПОП}}$, розраховане по залежності (5.4), дозволяє забезпечити чіткий прояв періодичності процесу самозаточування круга без чого визначення максимального значення складової тангенціальної сили різання стає

неможливим. Тривалість періоду шліфування (τ_3) з виключеною поперечною подачею повинна бути не менш ніж 30 секунд. На відміну від пружної схеми шліфування при роботі за жорсткою схемою обидві складові (тангенціальна та нормальна) сили шліфування, які входять у формули (5.1) та (5.3) для визначення коефіцієнта шліфування, залежать від умов обробки.

Були проведені експериментальні дослідження на базі універсально-заточувального верстата мод. 3622Э, модернізованого для реалізації процесу шліфування ПНТМ з поперечною ($S_{\text{поп.}}$) та повздовжньою ($S_{\text{пд.}}$) подачами в автоматичному режимі. Оброблялися ПНТМ на основі синтетичного алмазу марки АСБ та щільної модифікації нітриду бора на основі гексаниту-Р (ДПГ) алмазним кругом на органічній зв'язці в режимі самозаточування.

При цьому для оцінювання ефективності процесу шліфування ПНТМ визначали тангенціальну складову сили шліфування та силу тертя, встановлювали ефективну складову тангенціальної складової сили шліфування як різницю між означеними вище силами і розраховували значення коефіцієнта шліфування за залежністю (5.1).

Дані експериментів та зроблених на їх основі розрахунків наведені у таблицях 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 Значення фізичних показників при шліфуванні АСБ*

P_y , Н	P_z , Н	$P_{z \text{ еф.}}$, Н	P_{TP} , Н	$K_{ш}$	$K_{шд}$	Похибка, %
1050	187	56	131	0,18	0,05	260

*Умови обробки згідно рисунка 1.5.

Таблиця 5.2 Значення фізичних показників при шліфуванні ДПГ**

P_y , Н	P_z , Н	P_{TP} , Н	$P_{z \text{ еф.}}$, Н	$K_{ш}$	$K_{шд}$	Похибка, %
750	125	17	108	0,17	0,14	21

**Умови обробки: круг 12А2-45°150x10x2x32 АС4 125/100 В156 100%
 $V_k=20$ м/с, $S_{\text{поп.}}=0,005$ мм/подв. хід; $S_{\text{пд.}}=0,5$ м/хв

Таким чином, використання ефективної складової тангенціальної

складової сили шліфування призводить до більш точного визначення коефіцієнту $K_{ш}$, а отже може при деяких обставинах вплинути на коректність оцінки ефективності способу шліфування в цілому.

Маючи значення сил P_y та P_{TP} можна визначити усереднене значення коефіцієнту тертя f пари «ОМ – РПК» в реальних умовах шліфування [136]:

$$f = \frac{P_{TP}}{P_y} \quad (5.5)$$

Відомо [84], що при терті чистого алмазу по алмазу на повітрі коефіцієнт тертя дорівнює 0,1. Для умов, представлених в таблиці 3.1, він дорівнює 0,12. Це можна пояснити тим, що по-перше сам СПА має металеві включення у своєму складі, а по-друге має місце його контакт зі зв'язкою круга. В цілому отримані результати можна визнати задовільними.

Що стосується обробки ПНТМ на основі кубічного нітриду бора, то в роботі

[1] повідомляється, що домінуючий вплив на значення коефіцієнта тертя алмазної піраміди зі зразками надтвердих матеріалів на основі BN надає фазовий склад матеріалів контактуючих пар. Максимальний коефіцієнт тертя $f = 0,50$ (100 % cBN); мінімальний – $f = 0,30$ (100 % wBN). Розрахунки по даним таблиці 5.2 показують значно занижене значення коефіцієнта ($f = 0,02$). По всій видимості це пов'язано зі значно меншою мікротвердістю цих матеріалів, що не дозволяє утворення класичної зносостійкої пари тертя.

Таким чином розглянутий підхід до визначення коефіцієнта тертя слід рекомендувати стосовно обробки СПА.

5.3 Удосконалення методу прямого контролю лінійного зносу алмазного круга при шліфуванні СПА на базі явища пристосованості

Цей метод можна віднести до способів прямого контролю лінійного зносу шліфувального круга [5]. Він є оригінальним, оснований на явищі пристосованості (див. розділ 1), дозволяє вести як простий безперервний так і

дискретний контроль лінійного зносу РПК і може бути використана для удосконалення процесів шліфування СПА алмазними кругами на самозаточувальних зв'язках (патент № 147888, Україна). Його основним завданням є розширення технологічних можливостей процесу контролю лінійного зносу шліфувального круга при одночасному забезпеченні достовірності отриманих результатів. Це досягається тим, що контроль лінійного зносу круга виконують у процесі шліфування безперервно, як матеріал наконечника використовують полікристалічний алмаз з мікротвердістю не нижче 80 ГПа, у якості виду контакту алмазного наконечника з робочою поверхнею круга обирають площину, вимірювальний стрижень встановлюють з можливістю здійснення додаткового осцилюючого руху у межах ширини робочої поверхні круга, а щільний контакт алмазного наконечника з останньою здійснюють постійним тиском значення якого обирають у межах 0,25-2,5 МПа.

Технічний результат полягає в тому, що алмазний наконечник, виконаний з полікристалічного алмазу твердістю не нижче 80 ГПа, який має площинний вид контакту з робочою поверхнею круга в силу явища пристосованості практично не зношується в діапазоні малих тисків (0,25-2,5 МПа). А це дає можливість реалізації безперервності контролю і гарантує отримання достовірних результатів вимірювання лінійного зносу алмазного круга, що обертається з робочою швидкістю. Надання вимірювальному стрижню додаткового осцилюючого руху у межах ширини робочої поверхні круга при необхідності дає можливість відслідковувати похибки її форми. Все це суттєво розширює технологічні можливості процесу контролю лінійного зносу круга. Зазначене вище пояснюється рисунками 5.2. та 5.3. Як видно з рисунка 5.2. (1 – СПА, що шліфується; 2 – пристосування шліфувальне; 3 – шліфувальний алмазний круг; 4 – шпиндель верстата; 5 – наконечник з полікристалічного алмазу; 6 – вимірювальний стрижень; 7 – ніжка індикатора; 8 – планка;), круг 3, встановлюється на шпинделі 4 верстата.

Робочою частиною круга є алмазоносний шар товщиною h . Саме він зношується при шліфуванні СПА 1 встановленого в шліфувальному пристосуванні 2 яке має можливість здійснення прямолінійного поступального руху (під дією сили P_1) перпендикулярно РПК 3 і осциляції паралельно їй. Вимірювальний стрижень 6 з наконечником з полікристалічного алмазу 5 також встановлений з можливістю здійснення прямолінійного поступального руху (під дією сили P_2) перпендикулярно робочій поверхні круга 3 і осциляції паралельно їй. За допомогою планки 8 вимірювальний стрижень 6 знаходиться в постійному (а при необхідності і в періодичному) механічному контакті з ніжкою індикатора 7 за допомогою якого у даному випадку здійснюється контроль лінійного зносу круга.

Величину зносу круга Δh розраховують як різницю показань індикатора після та до процесу обробки у продовж визначеного часу. Замість індикатора можуть бути застосовані і інші вимірювальні пристрої (тензометричні балочки, ємнісні, індукційні датчики та ін.), що дозволяє вести безперервний запис лінійного зносу круга 3. Таким чином відстеження положення робочої поверхні круга здійснюють напрямку шляхом введення вимірювального стрижня у контакт безпосередньо з робочою (різальною) поверхнею круга.

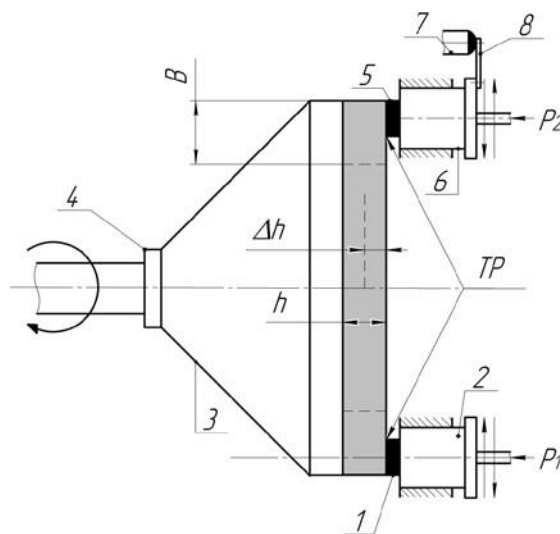


Рисунок 5.2 – Принципова схема способу контролю лінійного зносу

Процеси обробки і вимірювання здійснюють з використанням

технологічної рідини (ТР). Надання вимірювальному стрижню додаткового осцилюючого руху у межах ширини робочої поверхні круга при необхідності дає можливість відслідковувати відхилення її форми (відхилення від площинності), що несе в собі додаткову інформацію про процес шліфування. Чим менше площа контактної поверхні алмазного наконечника, тим вищою буде точність визначення вказаних відхилень. Але з точки зору надійності процесу контролю ця площа, як встановлено експериментально, повинна знаходитися у межах 4 – 7 мм².

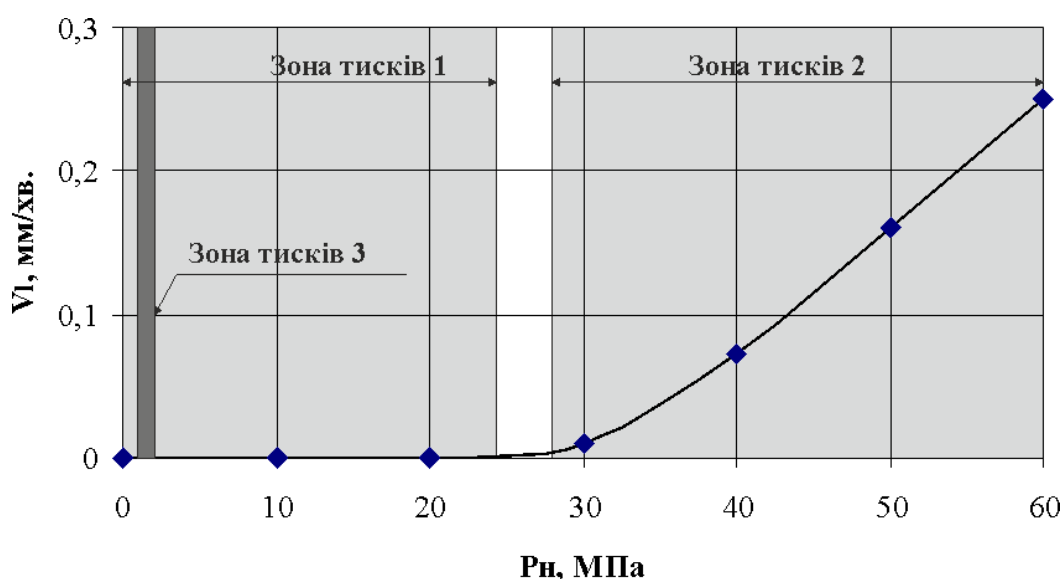


Рисунок 5.3 – Схема впливу нормального тиску P_n на інтенсивність V_l знімання СПА

Фізичне пояснення суті способу наведено на рисунку 5.3 на якому показано вплив нормального тиску P_n на інтенсивність V_l знімання полікристалічного алмазу алмазними зернами круга. Як видно, існує дві принципово різні зони тисків. В першій (зона тисків 1, $P_n < 25$ МПа) тиск недостатній для самозаточування робочої поверхні круга і тому утворюється зносостійка пара тертя «полікристалічний алмаз – алмазні зерна круга». В цій зоні знімання припуску з полікристалічного алмаза практично не відбувається. Теоретично ця зона тисків може бути використана для зони вимірювання.

В другій зоні (зона тисків 1, $P_n > 30$ МПа) тиск достатній для сталого самозаточування робочої поверхні круга і тому гострі алмазні зерна починають ефективно знімати припуск з СПА. Вести вимірювання при таких значеннях тисків не можна.

Таким чином, процес обробки алмазу треба вести у зоні високих тисків (зона тисків 2), а вимірювання – у зоні малих тисків (зона тисків 1). Експериментально встановлено, що оскільки в зоні 2 реалізується процес інтенсивного самозаточування круга, то для гарантованого запобігання «підшліфовки» полікристалічного алмазу у зоні вимірювання треба використовувати тільки частину тисків зони 1 ($P_n = 0,25 - 2,5$ МПа, зона 3). Це забезпечує високу точність контролю лінійного зносу круга. Нижнє значення тиску (0,25 МПа) гарантовано забезпечує достатньо щільний контакт алмазного наконечника з робочою поверхнею круга (без вібрацій).

Приклад використання способу. Експериментальні дослідження проводилися на базі універсально-заточувального верстата мод. 3D642E. Технологічна рідина (ТР) – 0,5% CaCO_3 – інше вода. Використовували чашковий алмазний круг 12A2 45 150x20x3x32 AC4 125/100 4 органічний (самозаточувальний) зв'язці B2-01.

Для перевірки обґрунтованості діапазону тисків у зоні контакту наконечника з робочою поверхнею круга (його вплив на підшліфовку полікристалічного алмазу в зоні вимірювання Δl) провели серію експериментів. У якості заготовки для шліфування був прийнятий полікристалічний алмаз марки АСПК (мікротвердістю 70 ГПа), а тиск у зоні шліфування $P_n = 60$ МПа (при площі контакту у зоні шліфування 14 мм^2 сила притиску $P_1 = 840 \text{ Н}$, рис. 5.2). Процес обробки тривав безперервно на протязі 5 хвилин (машинний час). Дані випробувань наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 Експериментальні дані

Показники	Тиск в зоні вимірювання P_n , МПа						
	0,25	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	5,0
Δh , мкм	0	0	0	0	0	0,5	1,0

Як видно з даних таблиці, запропонований спосіб забезпечує гарантоване отримання достовірних результатів вимірювання лінійного зносу круга завдяки тому що у заявленому діапазоні тисків P_n наконечник з полікристалічного алмаза практично не зношується. Запропонований спосіб є більш універсальним оскільки може бути використаний для контролю відхилень робочої поверхні круга від площинності.

5.4 Розробка і дослідження удосконаленого способу шліфування СПА в умовах високих контактних напружень

Основним недоліком існуючих способів є підвищений відсоток браку при обробці виробів з алмазу в режимі самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках. Це пов'язано з тим, що в умовах, коли оброблювальний матеріал та матеріал, що оброблює, мають практично однакову мікротвердість процес самозаточування реалізується при достатньо високому рівні силової напруженості. Тому в умовах, коли алмаз виходить за межі робочої поверхні круга (РПК), у наслідок значних пружних деформацій поперечна подача збільшується, що призводить до ударів при зустрічі алмазу з кромкою шліфувального круга. Це часто призводить до появи сколів на алмазі, заваленню кромки круга та нерівномірного зносу його робочої поверхні.

Тому було поставлено завдання зниження браку при обробці алмазів за рахунок реалізації їх безударного контакту з алмазним кругом і поліпшення умов активації процесу самозаточування його алмазоносного шару. У зв'язку з цим запропоновано поздовжню подачу здійснювати у межах ширини РПК, вихід полікристала алмазу за межі РПК приймати у межах $1/4 - 1/2$ від його

лінійного розміру у напрямку поздовжньої подачі, швидкість останньої приймати перемінною таким чином, що в крайніх лівому і правому положеннях оброблювального полікристала алмаза вона дорівнює нуля, а в центрі ширини РПК має максимальне значення, причому поперечну подачу реалізують у точках з нульовою поздовжньою подачею оброблювального СПА (пат. 146480 Україна).

Технічний результат розробки що пропонується полягає в зниженні питомих витрат алмазних зерен при високій продуктивності обробки алмаза і створенні умов для бездефектної обробки. По – перше шліфування без повного виходу полікристала за межі РПК виключає можливість ударного контакту алмаза з кромками алмазного круга. По – друге частковий вихід алмазу за межі РПК на $1/4 - 1/2$ від його лінійного розміру у напрямку поздовжньої подачі з одного боку надійно захищає кромки алмазного круга від пошкоджень, а з іншого зменшує площу контакту полікристала з РПК, що ініціює процес самозаточування останнього при меншій силовій напруженості в зоні обробки.

Цьому в значній мірі сприяє факт здійснення поперечної подачі в момент, коли швидкість поздовжньої подачі дорівнює нуля (тобто коли площа контакту алмаза з РПК зменшена). Подальше різке збільшення швидкості (до середини РПК) поздовжньої подачі також сприяє інтенсифікації процесу самозаточування круга. При наближенні до протилежної кромки круга швидкість знову зменшується що захищає кромку.

Таким чином у процесі шліфуванні забезпечується з одного боку інтенсивне самозаточування РПК (а, отже, і низькі питомі витрати алмазних зерен при високій продуктивності обробки алмаза), а з іншого створюються умови для бездефектної обробки.

Сказане вище пояснюється рисунками 5.4 – 5.6. На першому представлений механізм реалізації способу, на другому схема розташування алмазу при обробці у межах ширини РПК, на третьому графік зміни швидкості подачі у межах ширини РПК. Як видно з рисунка 5.4 одним з

варіантів пристрою для його реалізації може бути використаний кривошипно – шатунний механізм [16]. Як відомо, він призначений для перетворення обертового руху у зворотно-поступальний і навпаки. Важливим є те, що він може перетворювати рівномірний обертовий рух в нерівномірний рух що гойдає.

Хід столу ($S_{ст.}$) верстата з одного боку пов'язаний з радіусом кривошипа ($S_{ст.}=2r_k$), а з іншого обмежується шириною РПК. У разі, коли величина виходу алмазу за межі РПК дорівнює половини діаметра полікристала алмазу ($l_1=l_2=0,5d$, рис. 5.5) можна записати, що $r_k=(r_{max}-r_{min})/2$. Тут r_{max} , r_{min} відповідно максимальний і мінімальний радіуси алмазного торцевого круга. Швидкість поздовжньої подачі в даному випадку можна регулювати частотою обертання кривошипу радіусом r_k . Максимальна швидкість подачі має місце при повороті кривошипа на кут φ , близький до 90° (рис. 5.6). Цей факт треба використовувати при налаштуванні верстата. В крайніх лівому (точка 1) і правому (точка 3) положеннях столу верстата (а, отже, і оброблювального полікристала алмаза) швидкість подачі дорівнює нуля (рис. 5.4). На рис. 5.5 цим положенням відповідають кути повороту кривошипа нуль і 180° . Саме в цих точках відбувається поперечна подача алмаза (перпендикулярно РПК). При $\varphi \approx 90^\circ$ (точка 2, рис. 5.4) алмаз повинен знаходитися приблизно на середині РПК.

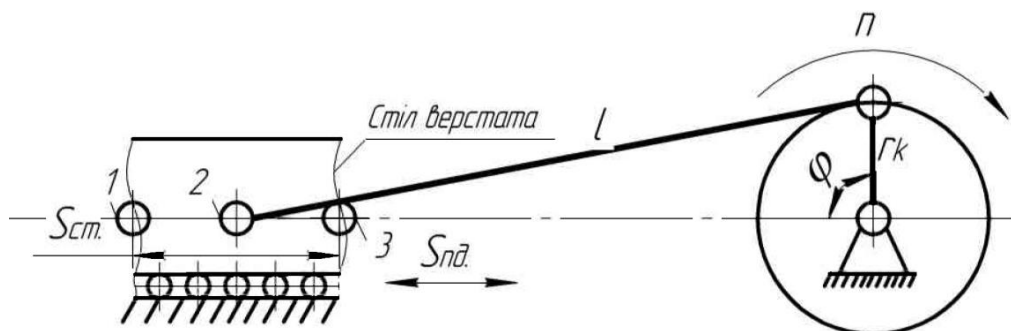


Рисунок 5.4 – Схема запропонованого способу шліфування СПА

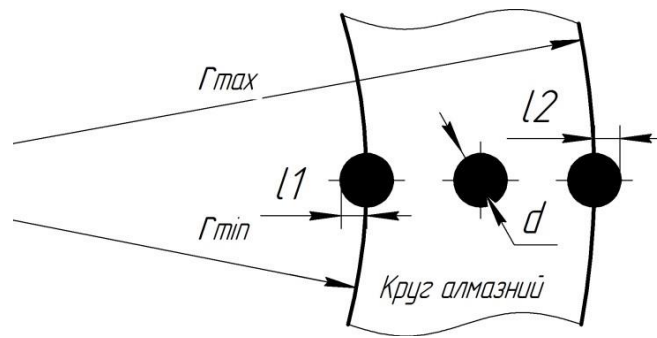


Рисунок 5.5 – Схема розташування СПА при їх обробці у межах ширини РПК

Формула для розрахунку швидкості подовжньої подачі в загальному виді має вигляд:

$$S_{no} = -r_k \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot (\sin \varphi) + \frac{\lambda}{2} \cdot (\sin 2\varphi), \quad (5.6)$$

де $\lambda = \frac{r_k}{l} \leq \frac{1}{4}$; r_k – радіус кривошипу, м; n – число обертів кривошипу, об./хв.;

φ – кут повороту кривошипу, рад.; l – довжина куліси, м.

На рисунках 5.6 – 5.8 представлені графіки залежностей S_{no} від φ , r_k , n .

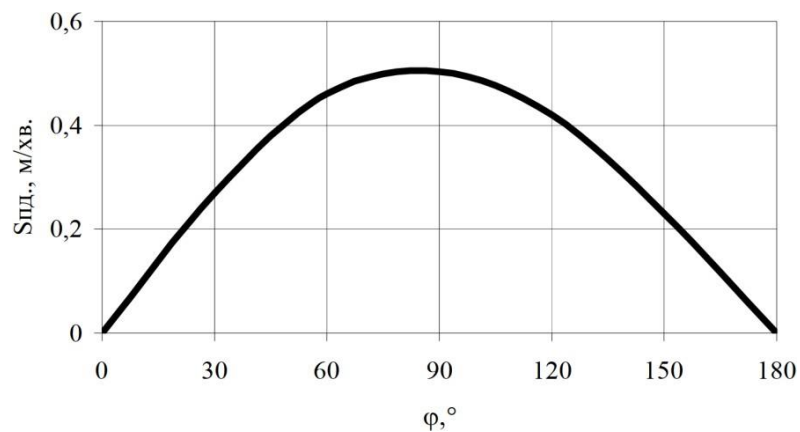


Рисунок 5.6 – Графік залежності швидкості подовжньої подачі від кута повороту кривошипу:

$$r_k = 0,01 \text{ м}; n = 8 \text{ об./хв.}$$

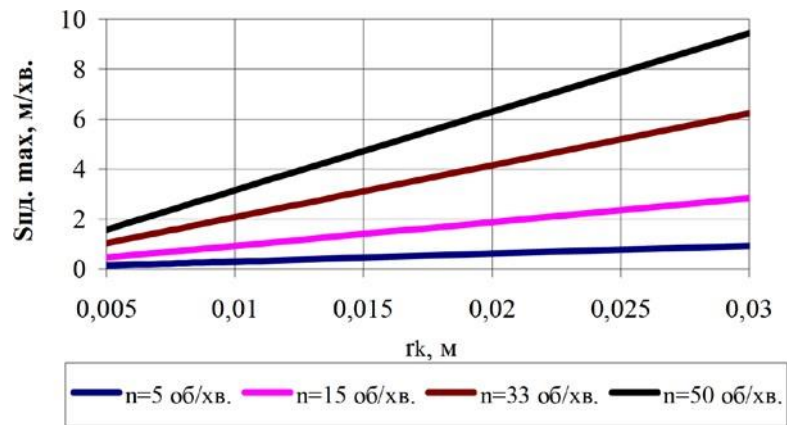


Рисунок 5.7 – Графік залежності швидкості поздовжньої подачі від радіуса кривошипу

Приклад практичної реалізації кривошипно-шатунного механізму для способу шліфування СПА наведений на рис. 5.9.

Були проведені експериментальні дослідження на модернізованому для реалізації процесу шліфування за жорсткою схемою верстаті. Проводили шліфування заготовок синтетичного полікристалічного алмазу марки АСБ діаметром $d=5$ мм. Охолоджувальна рідина 3% – розчин технічної соди у воді. Використовували алмазний торцевий круг 12A2 45°150x20x5x32 AC6 125/100 100% на органічній зв'язці B2-01.

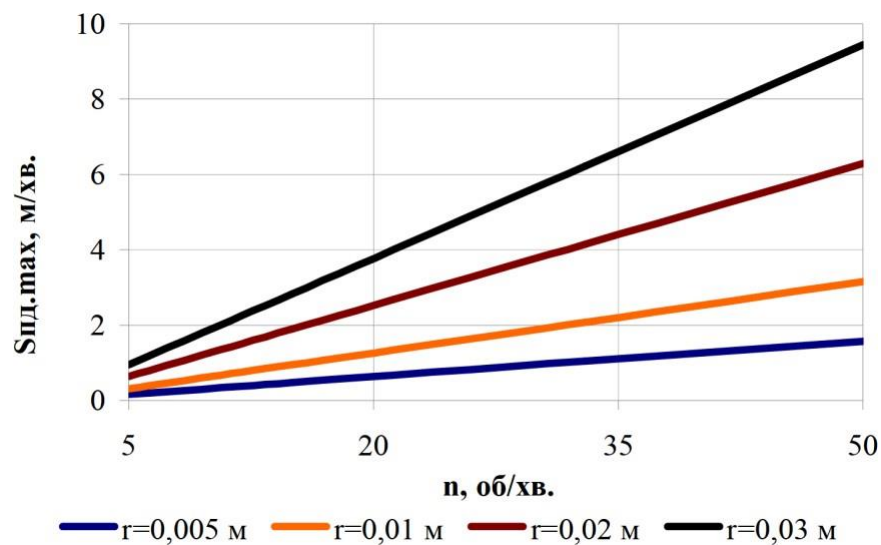


Рисунок 5.8 – Графік залежності швидкості поздовжньої подачі від числа обертів кривошипу

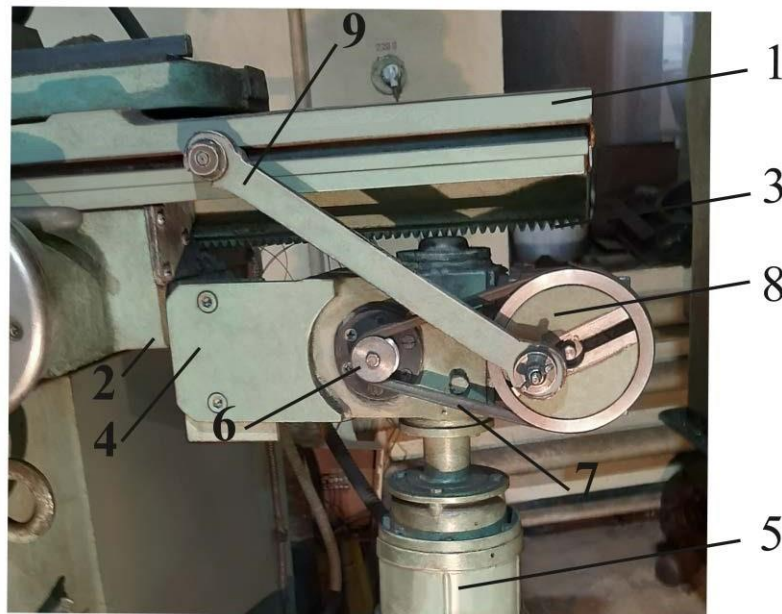


Рисунок 5.9 – Приклад практичної реалізації кривошипно-шатунного механізму:

1 – стіл верстата; 2 – станина; 3 – зубчаста рейка; 4 – редуктор; 5 – електродвигун; 6, 7 – шків; 8 – кривошип; 9 – куліса

Поздовжню подачу здійснювали у межах ширини робочої поверхні круга (20 мм), вихід полікристала алмазу за межі робочої поверхні круга приймали у межах $1/2$ від його лінійного розміру у напрямку поздовжньої подачі (тобто $l_1=l_2=0,5d=2,5$ мм, рис. 5.4), швидкість останньої приймали перемінною ($S_{nd} \approx 0.5$ м/хв.).

Поперечна подача виконувалася на кожний хід стола верстата (як за, так і в межах РПК) і в обох випадках складала $S_{поп.}=0,0025$ мм/хід. У способі, що пропонується, хід стола верстата дорівнював ширині РПК ($S_{ст.}=20$ мм). Радіус кривошипа при цьому дорівнював $r_k=10$ мм, а частота його обертання дорівнювала $n=8$ об/хв.

Як видно з даних таблиці 5.4, запропонований спосіб забезпечує рівень показників кращий ніж базовий спосіб.

На жаль суттєвий недолік кривошипно-шатунного механізму полягає в нерівномірності ходу повзуна, що, в свою чергу, викликає появу сил інерції.

Таблиця 5.4 – Порівняльні дані способів обробки

Спосіб обробки	Питомі витрати алмазних зерен q , карат/карат.	Шорсткість поверхні R_a , мкм	Брак виробів, %
Базовий	15	0,1	5,0
Запропонований	10	0,05	0,5

Практика використання способу свідчить про те, що граничне значення S_{nd} не повинно перевищувати 1 м/хв.

5.5 Розробка і дослідження удосконаленого способу заточування і доведення лезових інструментів з СПА

СПА багато в чому відрізняються від природних алмазів і перш за все наявністю у їх складі металевих включень (металофази) що обумовлюється технологіями їх виготовлення. В умовах значного термічного навантаження при заточуванні (доведенні) лезових інструментів з СПА в місцях скупчення металофази виникають значні термосилові напруження, які здатні призвести до руйнування СПА і особливо різальної кромки інструментів. Це пояснюється значною відмінністю значень коефіцієнтів термічного розширення металофази і алмазу. Головним фактором, який чинить вплив на величину температури у зоні заточування (доведення), є зусилля притиску інструмента до робочої поверхні алмазного круга. Для оцінки інтенсивності термосилового фактора часто використовується такий фізичний показник, як еквівалентні напруження, а для їх визначення методологія 3D-моделювання процесів алмазного шліфування (див. розділ 3). В багатьох випадках процес доведення відрізняється від процесу заточування використанням більш щадних режимів та алмазних кругів з мікропорошками алмазів.

З літературних джерел відомі технічні рішення згідно з якими для забезпечення потрібної якості під час їх заточування для обмеження зусилля притиску різця до РПК використовують фізичні критерії, наприклад, температуру в зоні обробки [7]. Недоліком такого підходу є його значна

складність та підвищений відсоток бракованих лезових інструментів. Це пов'язане з тим, що спосіб не враховує відповідність режимів заточки (доводки) інструментів з умовами їх експлуатації. В першу чергу це стосується рівнів термосилового навантаження в обох випадках.

В основі даної розробки поставлено завдання виключення цього недоліку. Для цього в якості фізичного вихідного показника обробки запропоновано (пат. 139199 Україна) використовувати величину еквівалентних напружень в зоні заточування алмазного лезового інструмента, а їх допустиме значення розраховувати по залежності:

$$\sigma_2 = K \cdot \sigma_1, \quad (5.7)$$

де σ_1 – величина еквівалентних напружень характерна для екстремальних умов експлуатації алмазного лезового інструмента, ГПа; σ_2 – величина еквівалентних напружень в зоні заточування алмазного лезового інструмента, ГПа; K – коефіцієнт, рівний 1,06–1,1.

Завдяки використанню величини еквівалентних напружень як критерію для встановлення оптимальної величини зусилля притиску алмазного лезового інструмента до робочої поверхні алмазного круга (а отже і температури заточування) значно спрощуються процеси заточування та доведення (оскільки відсутня слідкуюча система) та зменшується відсоток можливого браку алмазних лезових інструментів завдяки забезпеченню необхідній відповідності значень еквівалентних напружень при заточуванні і експлуатації різців. Основний вплив на еквівалентні напруження в обох випадках надає термосилове навантаження. Рівень еквівалентних напружень при лезовій обробці та при заточуванні встановлюється шляхом проведення модельних експериментів оснований на методі скінчених елементів. Для цього використовуються відомі пакети прикладних програм (див. розділ 3).

Використання еквівалентних напружень у якості фізичного вихідного показника обробки дозволяє отримувати більш коректні результати стосовно зменшення відсотку браку лезових інструментів з СПА (наприклад у порівнянні з температурою обробки) з тієї причини, що такий підхід має

можливість враховувати відсоток металофази у конкретній марці СПА, її розміри та характер розташування в СПА і т.д.

Приклад використання способу. Експерименти проводили на заточувальному верстаті мод. 3622Е, який було оснащено механізмом автоматичної поперечної подачі ($S_{\text{поп.}} = 0,001-0,1$ мм/подв. хід) та пристроєм для пружної обробки ($P \leq 10$ МПа). Умови заточування різців з СПА марки СКМ-Р були наступні: круг 12A2 45°150x20x3x32 АСМ 40/28 100% В2-01

$V_k = 20,4$ м/с, $S_{\text{пр.}} = 1$ м/хв., МОТС - тривідсотковий содовий розчин у воді.

Модельні експерименти з використанням програмного пакета SolidWorks Simulation дозволили виявити вплив присутності в СПА включень металофази (їх кількості, складу і розмірів) на напружено-деформований стан системи «алмазний різець–металофаза» при лезовій обробці з урахуванням температурного фактора. Визначені еквівалентні напруження при лезовій обробці ($\sigma_1 = 1,36$ ГПа) використовувалися для розрахунку оптимальних значень еквівалентних напружень при заточуванні. В нашому випадку згідно з формулою, що наведена вище, це $\sigma_2 = 1,45 - 1,50$ ГПа. Їм відповідають значення $P = 0,5 - 1,7$ МПа.

Отримані дані стосовно впливу коефіцієнта K та еквівалентних напружень при заточуванні σ_2 зведені до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Вплив коефіцієнта K та еквівалентних напружень при заточуванні σ_2

Фактор впливу	σ_1 , ГПа	$\frac{\sigma_2}{P}$, ГПа/МПа	Брак при заточуванні, %	Брак при лезовій обробці, %	Примітка
K	1,36	$\frac{1,36}{0,5}$	2	11	K=1
		$\frac{1,45}{1}$	2	–	K=1,06
		$\frac{1,50}{1,5}$	2	–	K=1,10
		$\frac{1,56}{1,7}$	6	–	K=1,15

Вони свідчать про те, що при узгодженні значень еквівалентних

напружень σ_1 та σ_2 можна суттєво знизити відсоток бракованих алмазних лезових інструментів як при заточуванні, так і в процесі експлуатації.

Висновки

1. Тангенціальна сила при шліфуванні СПА є сумою двох складових: ефективної складової та сили тертя. В умовах тертя зносостійкої пари «алмазні зерна – СПА», остання не приймає участі у знятті припуску з СПА. Тому в розрахунок треба приймати тільки значення ефективної складової тангенціальної сили шліфування (пат. 128946 Україна) і на її основі оцінювати ефективність процесів шліфування СПА.

2. Використання коефіцієнта шліфування, встановленого на базі ефективної складової тангенціальної сили шліфування дозволяє більш коректно оцінити ріжучу здатність алмазного круга при шліфуванні СПА, а отже ефективність процесу шліфування в цілому (пат. 141335 Україна).

3. Удосконалено метод прямого контролю лінійного зносу алмазного круга при шліфуванні СПА. Він є оригінальним, оснований на явищі пристосованості, дозволяє вести як простий безперервний так і дискретний контроль лінійного зносу РПК і може бути використана для удосконалення процесів шліфування СПА алмазними кругами на самозаточувальних зв'язках (патент № 147888, Україна).

4. Удосконалено спосіб шліфування СПА в умовах високих контактних напружень якими характеризується процес самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках (пат. 146480 Україна). Технічний результат розробки що пропонується полягає в зниженні питомих витрат алмазних зерен при високій продуктивності обробки алмаза і створенні умов для бездефектної обробки. По – перше шліфування без повного виходу полікристала за межі РПК виключає можливість ударного контакту алмаза з кромками алмазного круга. По – друге частковий вихід алмазу за межі РПК на $1/4 - 1/2$ від його лінійного розміру у напрямку поздовжньої подачі з одного боку надійно захищає кромки алмазного круга від пошкоджень, а з іншого зменшує площу

контакту полікристала з РПК, що ініціює процес самозаточування останнього при меншій силовій напруженості в зоні обробки.

5. Запропоновано удосконалений спосіб заточування і доведення лезових інструментів з СПА згідно якому для оцінки інтенсивності термосилового фактора часто використовується такий фізичний показник, як еквівалентні напруження, а для їх визначення методологія 3D-моделювання процесів алмазного шліфування (пат. 139199 Україна).

Загальні висновки

1. Наукові та виробничі організації різних країн продовжують інвестувати значні кошти у вдосконалення методів отримання СПА та інших ПСТМ, що свідчить про те, що вони потрібні у різних галузях народного господарства. На сьогоднішній день використовуються три основні способи одержання синтетичного алмазу. 1. Як вирощені при високих тисках і температурах монокристали завбільшки за кілька міліметрів і більше. 2. Як полікристали (PCD), отримані при високих тисках і температурах прямим переходом (синтезом) графіту в алмаз або спіканням із мікропорошків алмазу. 3. Як алмази завтовшки від кількох мікрометрів до кількох міліметрів, отримані хімічним синтезом за низького тиску з використанням технології CVD (Chemical Vapour Deposition). Слід зазначити істотне збільшення частки монокристалічних алмазів та СПА, отриманих методом CVD.

2. Процес алмазного шліфування СПА можна розглядати як пристосованість двох різних за топографією поверхонь: дискретної РПК та квазісуцільної оброблювальної поверхні СПА. В основі високопродуктивного процесу шліфування СПА в першу чергу лежить самозаточування алмазних зерен, оскільки реалізація механізму крихкого руйнування найтоншого поверхневого шару СПА можлива лише за наявності на поверхні алмазних зерен мікро- та субмікрокромки. Однак для постійного відновлення процесу формування мікро- та субмікромок на зернах кола

необхідно створювати умови для ініціювання механізмів самозаточування їх шляхом макро (мікро) руйнування або їх комбінації.

3. Дослідження процесу самозаточування алмазних кругів на металевих і органічних зв'язках при обробці СПА запропонована методологія 3D моделювання системи шліфування «СПА – алмазне зерно – зв'язка круга» яка дозволяє визначити еквівалентні напруження і деформації в зоні контакту алмазного зерна зі зв'язкою круга. На її основі вперше доказана можливість реалізації механізму самозаточування зерен за рахунок того, що зерна вдавлюються в зв'язку круга і починають працювати на вигин. Цьому сприяє мале значення межі міцності алмазу на вигин ($\sim 0,2$ ГПа), що і призводить до самозаточування зерен шляхом їх мікро- і макроруйнування. Самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках реалізується при контактних напруженнях приблизно у два рази нижчих, ніж на металевих зв'язках.

4. Практична реалізація уточненого механізму самозаточування дозволяє вести процес шліфування при малих висотах виступання зерен над рівнем зв'язки, а, отже при великій їх кількості в контакті з СПА, що в кінцевому підсумку забезпечую високі техніко-економічні показники процесу обробки в цілому. Потрібні нормальні зусилля при використанні керованого процесу шліфування СПА можна забезпечити шляхом використання імпульсів сили від механічних коливань низької частоти і амплітуди, а у випадку використання кругів на органічних зв'язках за рахунок створення відповідних контактних напружень за допомогою поперечної подачі.

5. Використання керованого процесу шліфування з введенням в зону обробки механічних коливань з інфра- або ультразвуковою частотою для реалізації чистової обробки СПА є недоцільним. В першому випадку використовується надмірне силове навантаження, що пов'язане з одночасним використанням великих амплітуд і низьких частот прикладення періодично діючого додаткового навантаження, а в другому цьому заважає значна

складність практичного використання процесу. Подальше удосконалення керованого процесу шліфування СПА з механічними коливаннями низької частоти заснованого на використанні енергії додаткового вантажу, що вільно падає доцільне за рахунок виявлення раціональних поєднань значень параметрів механічних коливань. Для поліпшення якості обробки потрібно прагнути використовувати верхні граничні для механічних вібраторів частоти при зменшених амплітудах.

6. Верхню граничну частоту коливань механічного вібратора потрібно встановлювати безпосередньо у процесі шліфування для чого її плавно збільшують при працюючому пристрої, упродовж іспитів контролюють силовий критерій процесу шліфування, наприклад, нормальну силу, при постійному значенні амплітуди коливань, фіксують частоту початку порушення стабільності прояву силового критерію, приймають її за критичну. Вперше використаний такий комплексний фактор, як імпульс сили, який в даному випадку є результатом одночасного прояву таких параметрів процесу, як маса додаткового вантажу і амплітуди механічних коливань. Це дозволяє створювати в зоні обробки перемінні контактні напруження, які позитивно впливають на процес самозаточування алмазних зерен. Задача підвищення якості обробки може бути успішно вирішена шляхом використання коливань зі зниженими значеннями імпульсів сили і підвищеними частотами їх реалізації. Встановлено, що його значення суттєво впливає на рівень технологічних показників процесу шліфування.

7. Враховуючи встановлений факт, що високопродуктивне шліфування СПА в умовах введення в зону обробки низькочастотних механічних коливань потребує збільшених значень швидкостей видалення металевої зв'язки круга та її стабільної підтримки удосконалено керований процес шліфування СПА оснований на дозованому електрохімічному розчину металевої зв'язки в автономній зоні. Для цього було запропоноване рішення здійснювати регулювання заданої сили струму шляхом зміни величини МЕЗ і напруги в технологічному ланцюгу поперемінно. Це дозволило значно

розширити діапазон регулювання сили електричного струму в ланцюзі правки РПК.

8. Встановлено, що умови обробки, які призводять до підвищення продуктивності обробки СПА, забезпечують і зниження питомих витрат алмазів круга. Винятком є вплив сили струму у ланцюзі видалення зв'язки круга. Але в даному випадку він свідчить про деяку невідповідність між швидкістю видалення зв'язки і інтенсивністю зносу алмазних зерен в умовах дії механічних коливань, що потребує додаткових досліджень по оптимізації розглянутого процесу шліфування. Підтверджено, що визначальною умовою реалізації удосконаленого способу шліфування СПА алмазними кругами на металевих зв'язках є безперервне регульоване електрохімічне видалення зв'язки у процесі шліфування, що створює необхідні передумови для безперервного самозаточування кругів.

9. Удосконалено спосіб шліфування СПА в умовах високих контактних напружень якими характеризується процес самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках. Технічний результат розробки що пропонується полягає в зниженні питомих витрат алмазних зерен при високій продуктивності обробки алмаза і створенні умов для бездефектної обробки. По – перше шліфування без повного виходу полікристала за межі РПК виключає можливість ударного контакту алмаза з кромками алмазного круга. По – друге частковий вихід алмазу за межі РПК на $1/4 - 1/2$ від його лінійного розміру у напрямку поздовжньої подачі з одного боку надійно захищає кромки алмазного круга від пошкоджень, а з іншого зменшує площу контакту полікристала з РПК, що ініціює процес самозаточування останнього при меншій силовій напруженості в зоні обробки. Запропоновано удосконалений спосіб заточування і доведення лезових інструментів з СПА згідно якому для оцінки інтенсивності термосилового фактора часто використовується такий фізичний показник, як еквівалентні напруження, а для їх визначення методологія 3D-моделювання процесів алмазного шліфування.

Список використаних джерел

- [1]. Адамовский А.А. Коэффициент трения природного алмаза по материалам на основе кубического нитрида бора / А.А. Адамовский, А.Д. Костенко // Надтверді матеріали, 2019, № 4. – С. 87-89.
- [2]. Азаров А.С. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении / А.С. Азаров. – М., -Л.: Машгиз, 1963. – 416 с.
- [3]. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии / П.С.Александров.-М.: Главная редакция физматлитературы, 1968. -911с.
- [4]. Алмазная обработка технической керамики / [Д.Б. Ваксер, В.А. Иванов, Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович]. - Л.: Машиностроение, 1976. – 160с.
- [5]. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Под ред. Е.И. Педя. – М.: Машиностроение, 1978, – 352 с.
- [6]. Антонюк В.С. Теплові явища при обробці різанням: Навч. Посібник / В.С. Антонюк, С.Ан. Клименко, С.А. Клименко. – К.: НТУ України «КП», 2014. – 156 с.
- [7]. А.с. № 716789 СССР. В24В 3/34. Станок для заточки алмазных резцов / Л.Б. Ганзбург, В.Н. Козлов, А.П. Надточий и др. -№.2604153/25-08; заявлено 13.04.1978; опубл. 28.02.1980, Б.И. № 7.
- [8] Аренков А.Б. Основы электро-физических методов обработки материалов / Аренков А.Б. - М.: Машиностроение, 1967.- 372с.
- [9]. Бабенко Е.А. Повышение работоспособности алмазных кругов на полимерных и керамических связках: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабенко Евгений Александрович. - Харьков, 2014. - 203 с.
- [10]. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К.Байкалов. - К.: Наукова думка, 1978. - 207 с.
- [11]. Бакуль В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / [В.Н. Бакуль, Ю.И. Никитин, Е.Б. Верник, В.Ф. Селех] // Уч. пос. для техникумов. -М., Машиностроение, 1975. - 296 с.

[12]. Бакуль В.Н. Поликристаллические сверхтвердые материалы // Синтетические алмазы. - 1975. - № 4. - С. 17-22.

[13]. Барбашин Е.А. Введение в теорию устойчивости / Е.А. Барбашин. – М.: Наука, 1967. - 223 с.

[14]. Безруков Г. Н ., Бутузов В. П ., Самойлович М . И . Синтетический алмаз.— М. : Недра, 1976.— 119 с.

[15]. Блощаневич А.М. Лазерная резка материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора / А.М. Блощаневич, А.В. Бочко, В.В. Пасичный, Я.Н. Филиппов // Порошковая металлургия. - 2004. - № 3-4. - С. 47-54.

[16]. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин // Учебник. Т. II. 3-е изд. – М.: Наука, 1985. – 496 с.

[17]. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига. 2007. – 397 с.

[18]. Васильев Л.А. Алмазы, их свойства и применение / Л.А. Васильев, З.П. Белых.-М.: Недра, 1983.-101 с.

[19]. Вероман В.Ю. Электроалмазное шлифование / В.Ю. Вероман // В сб. Алмазные инструменты в машиностроении. –Л.: Лениздат. -1965.–С. 216-234.

[20]. Внуков Ю.Н. Исследование процесса высокопроизводительного электроабразивного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых поликристаллов: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / Ю.Н. Внуков. - Тбилиси, 1977. - 22 с.

[21]. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике / М.Я. Выгодский.-М.: АСТ: Астрель, 2006. -509с.

[22]. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М: Машиностроение, 1981. – Т. 1. Колебания линейных систем / под. ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с.

[23]. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под. ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с.

[24]. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / [М.Ф. Семко, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др.]. - К.: Вища школа, 1979. - 232 с.

[25]. Гаврилов А.Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении / [А.Н. Гаврилов, Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов и др.]; под ред. А.Н. Гаврилова. - М.: Машиностроение, 1973. - 567с.

[26]. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. - Москва: Машиностроение, 1985. 424 с.

[27]. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А.И. Грабченко. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с.

[28]. Грабченко А.И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки», №1, т.1, 2011.-С. 105-116.

[29]. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2006.– 364 с.

[30]. Грабченко А.И. Повышение производительности шлифования ПСТМ с управлением режущим рельефом круга / Грабченко А.И., Пыжов И.Н // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 5. – С. 34-37.

[31] Грабченко А.И. Особенности контактного взаимодействия алмазных кругов с СТМ при шлифовании / Грабченко А. И., Пыжов И. Н. - В кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях. - Харьков: Вища школа, 1982. - С. 33-37.

[32]. Грабченко А.И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Дис. в форме научн. докл. д-

ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1995. – 59с.

[33]. Джон Уокенбах. Excel 2013: профессиональное программирование на VBA = Excel 2013 Power Programming with VBA / Джон Уокенбах. -М.: «Діалектика», 2014.-960с.

[34]. Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.В., Джонсон В.Л. и др. - М.: Мир, 1985. - 296 с.

[35]. Доброскок В.Л. Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов: Дис... канд. техн. наук, Ростов на Дону, 1986. - 253 с.

[36]. Доброскок В.Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2001. – 447с.

[37]. Дружинин Н.К. Выборочное наблюдение и эксперимент (Общие логистические принципы организации) / НК. Дружинин-М.: Статистика, 1977. -176с.

[38]. Евсеев Д.Г., Попов А.Ю. Измерение сил резания при токарной обработке: Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Резание металлов» - М.: МИИТ, 2006. – с 6.

[39]. Егоров М.Е. Технология машиностроения / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, В.Л. Дмитриев -М.: Машиностроение, 1976. -535 с.

[40] Епифанов В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с.

[41]. Жедь В.П. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник / [В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, П.М. Ипполитов]. –М: Машиностроение, 1987. -320 с.

[42]. Зависимость абразивной способности синтетических алмазных агрегатов с микроструктурой карбонадо (АСПК) от их плотности. / [Л.Ф. Верещагин, Л.Е. Штеренберг, М.Я. Кац, Е.Ф. Долгопольская] // –Сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы». - Вып.5, 1976. -С. 1-3.

[43]. Зайцев Г.Н. Алмазное шлифование керамики с наложением высокочастотных колебаний на стандартные чашечные круги / Г.Н. Зайцев //Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1980. - Вып. 3. - С. 13-14.

[44]. Залога В.А.Исследование процесса высокопроизводительного электроалмазного шлифования инструментальных материалов кругами из АСБ: автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.03.01. «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / В.А. Залога. – Харьков: - 1974. - 22 с.

[45]. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И.П.Захаренко. - К. :Техніка, 1980. – 213с.

[46]. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.

[47]. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. — М: Машиностроение, 2014. — 608 с.

[48]. Интегрированные процессы обработки материалов резанием Учебник [для высших учебных заведений] / [А.И. Грабченко, ВА. Залога, Ю.Н. Внуков и др.]; под общ. ред. А.И. Грабченко и В.А. Залог. –Сумы: Университетская книга, 2017. 451с.

[49]. Исследование зависимости абразивной способности алмазов марки АСБ от их микротвердости / [Н.З. Шишков, А.С .Семенова-Тян-Шанская, М.С. Пивоваров, А.И. Голенко] // –Сб. «Алмазы». - Вып.8, 1971. -С. 1-3.

[50]. Кадомцев С.Б. Аналитическая геометрия и линейная алгебра / С.Б. Кадомцев –М.-ФИЗМАТЛИТ, 2003. -160с.

[51]. Калафатова Л.П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки та забезпечення якості виробів із технічних стекол і ситалів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 «Технологія машинобудування» / Л.П. Калафатова.– Харків: - 2001. – 35 с.

[52]. Кацев П.Г.Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. - М.: Машиностроение, 1974. - 231 с.

[53]. Киндрук М. КОМПАС-3D V10 на 100% / М. Киндрук.–Питер: Санкт-Петербург. 2009. ISBN 978-5-388-00375-1.-559с.

[54]. Киселев Е.С. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке: сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – с.50-55.

[55]. Киселев Е.С. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 140 с.

[56]. Клименко В. Г. Вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони контакту круга з деталлю: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Клименко Віталій Григорович. - Полтава, 2017. - 212 с.

[57]. Козакова Н.В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Козакова Наталья Витальевна. - Харьков, 2004. - 210 с.

[58]. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Я.Д. Колкер - К.: Техника, 1976. - 200 с.

[59]. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак - М.: Машиностроение, 1974. 280 с.

[60]. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. - 1985. Том IV. - № 2. - С. 201-207.

[61]. Краснощек Ю.С. Работоспособность кругов при алмазно-искровом шлифовании твёрдых сплавов / Ю.С. Краснощек, М.Д. Узунян // Резание и инструмент. – 1980. – Вып. 23. – С. 3 – 10.

[62]. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого. Под общей редакцией В.А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450с.

[63]. Кулакова И.И. Химический синтез алмаза и метастабильность / И.И. Кулакова, А.П. Руденко // Proc. 4th International Symposium on Diamond Film and Related Materials. Kharkov: - 1999. - P 61-76.

[64]. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.

[65]. Лавриненко В.И. Коэффициент абразивного резания как характеристика, отражающая эксплуатационные показатели процесса шлифования кругами из сверхтвердых материалов / В.И. Лавриненко // Сверхтвердые материалы. - 2016. - №1. -С. 52 - 60.

[66]Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах / Лейпунский О.И. // Успехи химии. - 1939. - Вып. 8. - С. 1519-1534.

[67]. Лоскутов В.В. Шлифовальные станки / В.В. Лоскутов. -М.: Машиностроение. - 1976. –191с.

[68]. Магазеев М.Г. Повышение эффективности изготовления профильных инструментов из сверхтвердых и керамических материалов за счет сочетания электроэрозионной и алмазной обработки: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Магазеев Михаил Геннадиевич. - Харьков, 1997. - 204 с.

[69]. Мазур Н.П. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Н.П. Мазур, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др. // под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. –2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

[70]. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов / Е.Н. Маслов-М.: Машгиз, 1951. – 179 с.

[71]. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин- Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с.

[72]. Музичка Д.Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Д.Г. Музичка. – Чернігів: - 2015. – 20 с.

[73]. Надуваев В.В. Применение прогрессивных инструментальных материалов алмазов–СВ в машиностроении / В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов, В.П. Лексиков // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XIII международной научно–технической конференции в г.Севастополе 11–16 сентября 2006г. В 5–ти томах.–Донецк: ДонНТУ, 2006. Т.3.–с81–85.

[74]. Наконечный Н.Ф. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования кругами на металлических связках: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Наконечный Николай Федорович. - Харьков, 1984. - 215 с.

[75]. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учеб. пособие / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов и др. – М.: АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.

[76]. Нижник С.Н. Анализ путей снижения теплонапряженности процесса шлифования / С.Н. Нижник, М.А. Курин, А.П. Петренко // Авиационно–космическая техника и технология. 2012, №1.(88).–С.30–33.

[77]. Никифоров И.П. Оптимизация продольной подачи при плоском шлифовании конструкционной углеродистой стали / И.П. Никифоров, П.Н. Мальцев // Вестник ПсковГУ, серия «Экономические и технические науки», 4/2014.-с.146-153.

[78]. Новиков Н.В. Исследование контактного взаимодействия в зоне резания - основа совершенствования режущих инструментов / Новиков Н.В., Клименко С.А., Копейкина М.Ю. // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. – 52. - С. 221 – 233.

[79]. Новиков Н.В., Федосеев Д.В., Шульженко А.А., Богатырева Г.П. Синтез алмазов / Под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наук. думка, 1987. – 160 с.

[80]. Новиков Н.В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Н.В. Новиков, А.Л. Майстренко, В.Н. Кулаковский– К.: Наук. думка, 1993. – 220 с.

[81]. Новиков Ф.В. Теоретический анализ технологических возможностей уменьшения температуры резания при шлифовании / Ф.В.

Новиков // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, 2015, вип. 3(8). – С.–88-95.

[82]. Новые материалы. Колл, авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М: «МИСИС». – 2002 – 736 с.

[83]. Ординарцев И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко.-Машиностроение. Ленинг. отделение, 1987. -846с.

[84]. Основы алмазного шлифования. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С. Киев, «Техніка», 1978. -192 с.

[85]. Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1986. – 245с.

[86]. Пайка и металлизация сверхтвердых инструментальных материалов / [Ю.В. Найдич, Г.А. Колесниченко, И.А. Лавриненко, Я.Ф. Моцак]; под ред. Ю.В. Найдича. – К.: Наукова думка, 1977. – 188с.

[87]. Пат.57966 Україна, МПК (2011.01) B23B25/00. Спосіб визначення допустимої швидкості різання при механічній обробці субмікро– та нанокристалічних металів / Вerezуб М.В., Симонова А.А., Каптай Джордж, Севидова О.К. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».– № и 201009836; заявл. 09.08.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. № 6.

[88]. Пат. 76437 Україна, МПК (2013.01) B24 B 1/00. Спосіб шліфування надтвердих матеріалів / Алексеєнко Д.М., Грабченко А.І., Пишов І.М., Клименко В.Г. Власник Сумський державний університет. -№ и 2012 05440; заявл. 03.05.2012 ; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.

[89]. Пат. 72861 Україна, МПК (2012.01) B24 B 1/00. Спосіб визначення ефективної складової тангенціальної сили різання/ Алексеєнко Д.М., Грабченко А.І., Пишов І.М. Власник Сумський державний університет. -№ и 2012 03280; заявл. 29.12.2011; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 16.

[90]. Петраков Ю.В. Моделирование процессов резания: учебное

пособие.–Старый Оскол: ТНТ, 2011.–240с.

[91]. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко. Под редакцией Б.П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200с.

[92]. Подураев В.Н.Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. -М.: Машиностроение, 1970. -350с.

[93]. Полетика М.Ф.Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов / М.Ф Полетика. –М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. -109с.

[94]. Пижов І.М.Моделювання процесу плоского торцевого алмазного шліфування / І.М. Пижов, В.Г. Клименко, В.О. Федорович, Є.В. Островерх, Л.І. Пупань // Монографія. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 256 с. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/49996>.

[95]. Пыжов И.Н.Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И.Н. Пыжов, А.В. Васильев, В.Г .Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2011.- Вып. 80.-С. 226-235.

[96]. Пыжов И.Н. Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Пыжов Иван Николаевич.– Харьков, 2009. – 405с.

[97]. Пыжов И.Н. Особенности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ / И.Н. Пыжов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.– Харьков: 2018.- Вып. 88. -С. 179-192.

[98]. Пыжов И.Н.Силовые характеристики процесса шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов / И.Н .Пыжов, В.А. Федорович, И.В. Волошкина // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2018.- Вып. 88. -С. 193-203.

[99]. Пыжов И.Н. Совершенствование процесса плоского торцевого шлифования / И.Н. Пыжов, В.Г. Клименко // Монография. - Харьков.: НТУ «ХПИ», 2019. - 157 с. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/39843>.

[100]. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. - М.: Машиностроение, 1969. - 288 с.

[101]. Родин П.Р. Пути развития конструкций режущих инструментов / П.Р. Родин, Н.С. Равская // Высокие технологии в машиностроении. - Харьков: ХПИ. - 1992. - С.67-68.

[102]. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты / П.Р. Родин. Учебник для вузов. - 3-е изд. перераб. и доп. - К.: Вища школа, 1986. - 455 с.

[103] Романов В.Ф. Специальные инструменты из поликристаллических алмазов (PCD), кубического нитрида бора (PCBN) и керамики для высокоскоростного резания деталей из черных и цветных металлов / Романов В.Ф. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2002. – Вып. 63. – С. 139-144.

[104]. Руденко А.П. Химический синтез алмаза. Аспекты общей теории / А.П. Руденко, И.И. Кулакова, В.Л. Скворцова // Успехи химии. – М.: 1993. Т. 62, №2. - С. 99-117.

[105]. Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций "СТМ - сталь": Дис... канд. техн. наук. - Харьков, 1980. - 259 с.

[106]. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд (перевод с английского канд. физ.-мат. наук. А.А. Шестакова). М.: Мир, 1979. - 392 с.

[107]. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, М.Г. Ходоревский. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с.

[108]. Семко М.Ф. Экономическое обоснование выбора алмазного круга / М.Ф. Семко, М.Д. Узунян, ЮфаЭ.П. – Харьков: Изд-во «Прапор», 1971. – 100 с.

[109]. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин // – М., Физматлит. 2002. – Т. 1. Механика – 792 с.

[110]. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3т. / Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – Т.1. Синтез сверхтвердых материалов. – 280с.

[111]. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3т. / Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – Т.2: Композиционные инструментальные сверхтвердые материалы. – 264с.

[112]. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3т. / Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – Т.3: Применение синтетических сверхтвердых материалов. – 280с.

[113]. Сизый Ю.А. Основы научных исследований в технологии машиностроения. Учебн. Пособие / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский.- Харьков: УкрГНТЦ «Енергосталь», «Издательство САГА». - 2007. -212 с.

[114]. Симонова А.А. Определение рациональных параметров лезвийной обработки субмикрокристаллических металлов для сохранения исходных свойств заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Симонова Анастасия Андреевна.– Харьков, 2010. – 211с.

[115]. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием / Под общей ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. 2-е изд. - М.: Машиностроение, 1995. - 496 с.

[116]. Соколов А.Н., Шульженко А.А., Гаргин В.Г. и др. Структура и физико-механические свойств CVD-алмаза различного кристаллического совершенства в материале гибридайт // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 2. – С. 29–40.

[117]. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин.- М.: Машиностроение, 1972. - 216 с.

[118]. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / Под общей ред. Бакуля В.Н. - Киев: Техника, 1971, - 208 с.

[119]. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред.

А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., исправл.–М.: Машиностроение-1, 2003.–912с.

[120]. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., исправл.–М.: Машиностроение-1, 2003.–944с.

[121]. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами/ ВКСтарков. – М.: Машиностроение, 2007.–688с.

[122]. Степанов М.С. Математическое моделирование силы резания при шлифовании в различных условиях / М.С. Степанов, С.М. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. - Харків: 2012. - №2.-С 212-218.

[123]. Тику Ш. Эффективная работа : Solidworks 2004 / Ш. Тику - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.

[124]. Узунян М.Д. Алмазно – искровое шлифование твердых сплавов / М.Д. Узунян.– Харьков: НТУ «ХПУ», 2003. – 359с.

[125]. Узунян М.Д. Шлифование наноструктурных твердых сплавов : учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей дневной и заочной форм обучения / М.Д. Узунян, Р.М. Стрельчук. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – 182 с.

[126]. Узунян М.Д. Реальное число зерен на рабочей поверхности алмазного круга / М.Д. Узунян // Резание и инструмент. – 1978. –Вып.20. – С.23-27.

[127]. Узунян М.Д. Теоретический анализ плотности распределения зерен на рабочей поверхности алмазного круга / М.Д.Узунян // Резание и инструмент. – 1980. – Вып.23. – С.104-110.

[128]. Условия термодинамического равновесия алмаза с различными углеродными материалами. / [Верецагин Л.Ф., Яковлев Е. Н., Бучнев Л. М., Дымов Б. К.] // Теплофизика высоких температур. - 1977. - Т. 15. - № 2. - С. 316-321.

[129]. Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвёрдых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Федорович Владимир Алексеевич. – Харьков, 2002. – 466с.

[130]. Федорович В.А. Использование методологии 3D моделирования при исследовании процессов алмазного шлифования / В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, И.В. Волошкина // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. –Ростов- на-Дону: ДГТУ, 2019. – С. 292-297.

[131]. Федорович В.А. 3D-Моделирование процесса ультразвукового шлифования алмазными головками / В.А. Федорович. И.Н. Пыжов, И.В. Волошкина // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс]: сб. тр. научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева /отв. ред. В.А. Лебедев; Донской гос. техн. ун-т. – Электрон. текстовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. –С. 68-73. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2019616>. – ЭБС ДГТУ.

[132]. Фесенко А.В. Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый //Вестник Сумского государственного университета. Серия «Технические науки. – 2010. – №. 3. – С. 71-100.

[133]. Физические свойства алмаза: Справ. / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: Наук. думка. – 1987. – 188 с.

[134]. Філатов Ю.Д. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Ю.Д. Філатов. - К.: - 1996. - 35 с.

[135]. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / Л.Н. Филимонов. - Л.:

Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 109 с.

[136]. Формулы, интерактивный справочник по математике, геометрии, физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fxyz.ru/>.

[137]. Ходоревский М.Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Х., 1975. - 214 с.

[138]. Хрульков В.А. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / В.А. Хрульков, А.Я. Головань, А.И. Федотов.- М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.

[139]. Худобин Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. - М.: Машиностроение, 1977. - 189 с.

[140]. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев; под общ. ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006. – 544с.

[141]. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Черепанов Г.П. - М.: Наука, 1974. - 640 с.

[142]. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Шишкин В.А., Бочечка А.А. Поликристаллические материалы на основе алмаза / Отв. ред. Н.В. Новиков. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

[143]. Шульженко А.А. Новые сверхтвердые материалы на основе алмаза: получение, свойства. Обзор / А.А. Шульженко, А.Н. Соколов, В.Г. Гаргин // Сверхтвердые материалы. - 2018. - №5. -С. 10 - 24.

[144]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rough-polished.com/ru/exclusive/113736.html?print=Y>.

[145]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://jewelpreciousmetal.ru/technology_gems_diamondtype.php.

[146]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.junker-group.com>.

- [147]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intech-diamond.com/cvd-almaz.html>.
- [148]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rdmomachinetools.ru/шлифование-затачивание-доводка-зачистка-полирование-3/станки-заточные-1/станки-заточные-agathon-350-combi-cnc-1427>.
- [149]. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. Киев-Одесса : Вища шк., 1986. - 176 с.
- [150]. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. - К., Одесса: Лыбидь, 1991.-240 с.
- [151]. Ящерицын П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко. -Минск: Вышэйшая школа, 1981. - 560 с.
- [152]. Ящерицын П.И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента/П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев.– Минск: «Наука и техника», 1972. – 480 с.
- [153]. Audi schlichtet GJV-Zylinderbohrungen mit PKD. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2/05_art/Art05_02_03.htm.
- [154]. Bil H., Tekkaya A.E., Kiliç E.S. (2005). 2D Finite Element Modeling of Machining: A Comparison of Different Approaches with Experiments, VIII International Conference on Computational Plasticity, CIMNE, Available at <http://congress.cimne.com/complas05/admin/files/filepaper/p176.pdf>, Barcelona.
- [155]. Changsheng G., Stephen M. Thermal Analysis of Grinding. Annals of the CIRP, Vol. 56, 2007.
- [156]. Damlos H.H. Profilschleifen im pendel und tiefschleif // Schleifen, Honen. Lappen und Polieren. Verfahren und Maschinen / E. Salje, Jahrb. 51 Ausg. Essen: Vuklan. Verlag, 1982. -S. 203-212.
- [157]. Duane S. Cronin, Khahn Bui, Christian Kaufmann, Grant McIntosh, Todd Berstad Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna, 4th European LS-DYNA Users Conference p 47-60.

[158]. Fritz Clocke. Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping / Fritz Clocke.-Berlin: Springer, 2009. -433 p.

[159]. Fedorovich V. Simulation Methodology of Diamond Burnishing / I. Pyzhov, J. Kundrak, L. Pupan, I. Voloshkina // Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-202, Pages 363-372.

[160]. GittelH.-J.Schneidstoffe in der holzbearbeitenden Industrie. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2/15_art/Art15_02_03.htm.

[161]. Grabchenko A., Fedorovich V., Pyzhov I., Fadeev V., Babenko E., Klimenko V. Simulation of Grinding Process of Polycrystalline Superhard Materials // Key Engineering Materials Vol. 581 (2014) pp 217-223.

[162]. Holesovsky, F., Pan, B., Morgan, M.N., Czan, A. Evaluation of diamond dressing effect on workpiece surface roughness by way of analysis of variance / Tehnicki Vjesnik, 2018, 25, P. 165–169.

[163]. Huang J.M. An Evaluation of Chip Separation Criteria for the FEM Simulation of Machining / J.M. Huang, J.T. Black // of Manuf. Science and Engineering: Trans. of ASME. -1996. -T. 118, № 4. -C. 545- 554.

[164]. Introduction to Nanoscience / G. Hornyak, J. Dutta, H. Tibbals, A. Rao. – N.Y.: CRC Press, 2008. – 815p.

[165]. Yo N.E., Peace T.R.A. Some observation on profile wear in creep feed grinding // Wear, 1983. Vol. 92. P. 51.-66.107.

[166]. Kaselouris, E., Kosma, K., Orphanos, Y., Papadogiannis, N.A., Dimitriou, V. Downscaled finite element modeling of metal targets for surface roughness level under pulsed laser irradiation / Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(3), pp.1–13, 1253.

[167]. König W.Technische Keramiken funkenerosiv bearbeiten / König W., Panten U., Dauw D., Levy G. // Werkslaff und Belrieb. - 1989. - 122. - №8, - S. 665-668.

[168]. Kundrák J., Fedorovich V., Pyzhov I, Markopoulos A, Klimenko V. Some Features of the Surface Micro- and Macroprofile Formation at Flat Face Grinding with Spindle Axis Inclination / *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 809-810 (2015), pp. 45-50, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.45, Trans Tech Publications, Switzerland.

[169]. Kundrák J., Fedorovich V., Pyzhov I, Markopoulos A. Improving the effectiveness of combined grinding processes for processing superhard materials / *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 43, pp. 270–275. 5удар!!!!

[170]. Kundrák, J., Fedorovich, V., Markopoulos, A.P., Romashov, D., Pyzhov, I. High-Speed Sharpening and Thermo-activated Refinement of Blade Tools from Synthetic Diamonds / *Manufacturing Technology*, 2020, 20(4), pp. 474–483. ПАТЕНТ

[171]. Kundrák, J., Fedorovich, V., Markopoulos, A.P., Pyzhov, I., Kryukova, N. Improvements of the dressing process of super abrasive diamond grinding wheels / *Manufacturing Technology*, 2014, 14(4), pp. 545–554.

[172]. Grabchenko, A., Fedorovich, V., Pyzhov, I., Kundrák, J. 3D simulation of vibrating diamond grinding / *Manufacturing Technology*, 2014, 14(2), pp. 153–160.

[173]. Mamalis A.G, Kundrak J, Markopoulos A, et al. (2008). On the finite element modelling of high speed hard turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume: 38 Issue: 5-6 pp.441-446 DOI: 10.1007/s00170-007-1114-9.

[174]. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J. (2012). Simulation of effects of metal phase in a diamond grain and bonding type on temperature in diamond grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, Issue:1-4, pp.195-200 DOI: 10.1007/s00170-011-3382-7

[175]. Peiqi G., Jianhua Z., Tien-Chien J., Lei Z. Study on the Coolant Supply Method in Grind-Hardening. Published in the *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 36, 2008-P. 349-355.

[176]. Stephen Malkin, Uppiliappan Sridharan. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with Nanofluids on Grinding Behavior and Thermal Distortion. Published in the Transactions of NAMRI/SME, Vol. 37, 2009. P. 629 - 636.

[177]. H. Tanaka, S. Shimada, N. Ikawa: An Ideal Surface Processing of Monocrystalline Silicon for Minimal Surface Roughness and Damage Predicted by Molecular Dynamics Analysis, Advances in Abrasive Technology VI, ISAAT, 2002.

[178]. Uhlmann E., Wörner E., Brücher M. Leistungsfähigere Zerspanprozesse durch die wärmespreizende Wirkung von CVD-Diamant? http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_2/07_art/art07_2_02.htm.

[179]. UhlmannE.;BrücherM. Marktanalyse zu CVD-Diamantwerkzeugen [.http://www.idr-online.com/german /pages/archive/2002_1/15_art/art15_1_02.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2002_1/15_art/art15_1_02.htm).

[180]. Verkerk J., Pekelharing A. J. The influence of dressing operation on productivity in precision grinding // CIRP Ann., 1979. Vol.28. P. 487-495.

[181]. Yan, Q.S. (2003) / Q.S. Yan, Z.Q. Zhang, K. Syoji. Machining precision in the face grinding of a groove bottom using a CUP quill, Journal of Material Processing Technology 138, 527-530.

Наукове видання

ПИЖОВ Іван Миколайович
ФЕДОРОВИЧ Володимир Олексійович
ВОЛОШКІНА Ірина Віталіївна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ
НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ
КОНТАКТНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Монографія

Роботу до видання рекомендував Олександр ШЕЛКОВИЙ

В авторській редакції

План 2022 р., поз. 10

Підп. до друку 13.12.2022 р. Гарнітура Таймс.

Видавничий центр НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Самостійне електронне видання