

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“Київський політехнічний інститут”

На правах рукопису

**МИЛОКОСТ ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 621.91:678.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ ПРИ СВЕРДЛІННІ ТОНКОСТІННИХ  
ВИРОБІВ З ОРТОТРОПНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ**

**05.03.01 - Процеси механічної обробки, верстати та інструменти**

Дисертація на здобуття наукового ступеня

Кандидата технічних наук

Науковий керівник

Глоба Олександр Васильович

Кандидат технічних наук,

доцент

Київ - 2016

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 .....	11
ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ ПРИ СВЕРДЛІННІ ПКМ .	11
1.1. Особливості застосування вугле- та склопластиків у авіаційній промисловості. ....	11
1.2. Особливості свердління вугле- та склопластиків. ....	16
1.2.1. Структурне співвідношення видів механічної обробки ПКМ. ....	16
1.2.2. Вплив особливостей вугле- та склопластиків на процес свердління. .	17
1.3. Дефекти, що виникають в конструкціях при їх виготовленні, експлуатації та свердлінні. ....	18
1.4. Аналіз способів свердління вугле- та склопластиків. ....	25
1.4.1. Особливості реверсивного різання. ....	28
1.4.2. Дія сил що виникають при свердлінні. ....	31
1.4.3. Вибір методу моделювання. ....	35
1.5. Мета та завдання дослідження. ....	35
РОЗДІЛ 2 .....	37
РЕВЕРСИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ОТВОРІВ .....	37
2.1. Реверсивне свердління вугле- та склопластиків. ....	37
2.1.1. Обґрунтування схеми реверсивного різання ПКМ. ....	37
2.2. Проблема стружкоутворення при свердлінні вугле- та склопластиків. ...	40
2.3. Вибір типу ПКМ для проведення експериментальних досліджень. ....	43
2.4. Конструкція свердла для реверсивного свердління. ....	45
2.5. Розрахунок силових характеристик при свердлінні. ....	48
2.6. Пристрій для реалізації способу реверсивного свердління. ....	51

	3
2.6.1. Зубчаті передачі пристрою. ....	54
2.6.2. Кінематичний розрахунок пристрою для реверсивного свердління. ..	57
2.7. Висновки. ....	61
РОЗДІЛ 3 .....	62
МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	62
3.1. Методика дослідження розшарування та величини зношування інструменту на основі вібро-акустичного сигналу. ....	62
3.1.1. Пристрій для дослідження величини розшарування ПКМ. ....	64
3.1.2. Методика розрахунку величини зношування свердла шляхом обробки вібро-акустичного сигналу. ....	68
3.2. Методика визначення якості отворів при реверсивному свердлінні. ....	70
3.3. Підготовка та особливості виготовлення реверсивного свердла.....	75
3.4. Методика математичного моделювання якості отворів при реверсивному свердлінні. ....	77
3.4.1. Суть методу групового урахування аргументів.....	79
3.4.2. Формування плану проведення експерименту. ....	82
3.5. Висновки.....	84
РОЗДІЛ 4 .....	85
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ОРТОТРОПНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ .....	85
4.1. Визначення величини критичного навантаження розшарування вугле- та склопластиків. ....	85
4.2. Експериментальне підтвердження методу розрахунку зношування свердла на основі вібро-акустичного сигналу. ....	87
4.3. Порівняльний аналіз зношування свердел різних конструкцій. ....	88

4.4. Дослідження залежності відхилення від круглості отворів у ПКМ від конструкції реверсивного інструменту та частоти обертання шпинделя верстата.....	96
4.5. Побудова матриці експерименту та отримання математичної моделі середньої величини відхилення отворів від круглості.....	100
4.6. Висновки.....	103
РОЗДІЛ 5 .....	105
ЛАБОРАТОРНО-ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	105
5.1. Порівняльний аналіз величини відхилення отворів від круглості для інструменту різної конструкції.....	105
5.2. Експериментальне дослідження температури в зоні різання.....	108
5.3. Оброблення нахилених поверхонь ПКМ с застосуванням реверсивного свердління.....	113
5.4. Розробка рекомендацій по підвищенню якості отворів у вугле- та склопластиках.....	114
5.5. Впровадження результатів роботи.....	116
5.6. Висновки.....	119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
Додаток А .....	138
Додаток Б.....	141
Додаток В .....	143
Додаток Г.....	151
Додаток Д.....	154
Додаток Е.....	162

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Сучасний розвиток авіаційної і космічної промисловості пов'язаний з переходом від металів до полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Умови сучасного ринку зумовлюють націленість міжнародних технічних програм на ПКМ, а саме на вуглепластики, що пояснюється високими фізико-механічними, теплофізичними, діелектричними характеристиками матеріалів.

Однією з особливостей ПКМ є те, що деталі розробляються по інтегральній схемі, коли властивості деталі і матеріалу при її проектуванні розглядаються як єдине ціле у поєднанні з формою деталі, тобто деталь проектується з паралельною розробкою властивостей матеріалу, з якого вона виготовляється, з урахуванням конкретних вимог по міцності різних частин деталі, формі, розмірам тощо. Розширення типів ПКМ і підвищення вимог до якості їх обробки, ставить вимоги до розробників щодо створення нових конструкцій інструмента та способів обробки.

Проблемою свердління отворів у виробах з вуглепластиків займався ряд вітчизняних вчених, зокрема наукові школи М.Ф. Семко, П. Р. Родіна, вчених А.А. Сепанова, Б.В. Лупкіна, Н.А. Криштопи, зарубіжних шкіл під керівництвом А. Кобаяші, F.C.Campbell, Alfred C. Loos, Strong A.B, Tsao.

Проте у літературних джерелах проблема забезпечення якості отворів у вуглепластиках вирішується на базі вітчизняної науки, а також відомі частинні рішення цього питання, не забезпечуючи повністю умови сучасного ринку. Елементи процесів свердління металів повністю переносяться на свердління ортотропних вуглепластиків. При цьому мало враховуються характерні особливості ПКМ, що призводить до появи дефектів нехарактерних для металів (розшарування матеріалу, наявність незрізаних волокон, викришування, непрорізи, прижоги тощо). Отже на сучасному рівні розвитку техніки та виробництва питання якості обробки отворів у вуглепластиках є актуальним, що дозволить забезпечити ефективний перехід від застосування металів до ПКМ.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування в Національному технічному університеті України „Київський політехнічний інститут” у відповідності з тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і є частиною досліджень ініціативної теми «Забезпечення якості отворів при свердлінні композиційних матеріалів за рахунок створення нових конструкцій інструментів та способів обробки» (№ держ. реєстрації 0113U002811) повністю виконаної автором, частиною госпдоговірної теми «Збір, систематизація і аналіз масиву даних для інформаційної підтримки вибору технології обробки отворів під болтове з'єднання складальних одиниць, що включає деталі з ПКМ», частиною госпдоговірної теми «Фізико-технологічні основи підвищення продуктивності обробки композиційних матеріалів шляхом дослідження трибо процесів та нанесення покриттів» (№ держ. реєстрації 0113U000084).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення якості отворів у тонкостінних виробах з ортотропних вуглепластиків при свердлінні за рахунок зниження їх дефектності шляхом застосування схеми реверсивного оброблення та розробки інструменту для його реалізації.

Для досягнення поставленої мети в процесі дослідження необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Проаналізувати особливості застосування вуглепластиків у авіабудуванні (машинобудуванні, промисловості);
2. Провести аналіз дефектів у вуглепластиках під час свердління, розглянути способи механічної обробки вуглепластиків, проаналізувати вплив властивостей матеріалу на процес свердління;
3. Проаналізувати методи свердління вуглепластиків, проаналізувати вплив геометрії інструмента та режимів різання на якість отворів у вуглепластиках при свердлінні, точність і відхилення форми при обробці, температуру різання, ворсистість обробленої поверхні, дослідити переваги

застосування способу реверсивного різання для забезпечення високої якості отворів у вуглепластиках;

4. Обґрунтувати перспективність методу реверсивного свердління ортотропних вуглепластиків та розробити конструкцію реверсивного свердла;

5. Розробити конструкцію пристрою для реверсивного свердління ортотропних вуглепластиків;

6. Розробити методику аналізу розшарування та визначення зношування свердла при обробці ПКМ на базі віброакустичного сигналу;

7. Розробити методику оцінки відхилення від круглості отворів при свердлінні вугле- та склопластиків;

8. Провести вибір методу математичного моделювання процесу свердління;

9. Провести моделювання сукупного впливу факторів процесу свердління на якість отворів;

10. Провести експериментальні дослідження реверсивного свердла (вплив головного кута в плані на температуру різання та відхилення від круглості), провести порівняльні лабораторні випробування зношування свердел різної геометрії зі стандартними свердлами;

11. Провести промислові випробування розробленого інструменту.

*Об'єкт досліджень* - процес свердління отворів у тонкостінних виробах з ПКМ типу ортотропний вуглепластик.

*Предмет досліджень* - вплив конструкції свердла та способу свердління на якість отворів у виробах з ортотропних вуглепластиків.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження базувались на положеннях теорії різання та деформації ПКМ, теорій проектування різальних інструментів та теорії пружності, методах нарисної та аналітичної геометрії. Розробка та моделювання способу оброблення проводилося з застосуванням положень теорії механізмів і машин.

Експериментальна перевірка теоретичних досліджень проводилась за методиками аналізу вібро-акустичного сигналу та застосування термометри для

вимірювання температури в зоні різання. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджена порівняльними лабораторними та виробничими випробуваннями і метрологічними вимірюваннями.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Для підвищення якості отворів у тонкостінних виробках з ортотропних вуглепластиків вперше застосований метод реверсивного свердління;

2. Вперше застосована методика визначення критичного зусилля розшарування ПКМ при статичному навантаженні та оцінки зношування інструменту при обробленні ортотропних вуглепластиків на основі віброакустичного сигналу та визначена її ефективність.

3. Для залежності відхилення від круглості отворів у тонкостінних виробках з ортотропних вуглепластиків при реверсивному свердлінні отримана математична модель, що враховує геометричні параметри інструменту та особливості процесу різання.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблені рекомендації по визначенню геометричних параметрів різальної частини свердла та рекомендації по удосконаленню конструкцій свердел для підвищення якості отворів у ПКМ типу ортотропний вуглепластик.

Розроблено новий пристрій для реверсивного свердління ПКМ, що підтверджено патентом на винахід № а 2014 00844. «Пристрій для осцилюючого свердління композиційних матеріалів»; опубл. 26.08.2014, Бюл. №16/2014, а також нову конструкцію свердла для реверсивного свердління ПКМ, що підтверджено патентом на корисну модель № у 2014 00845 «Свердло для осцилюючої обробки полімерних композиційних матеріалів»; опубл. 26.05.2014, бюл. № 10/2014.

Розроблено пристрій для дослідження розшарування ПКМ, що підтверджено патентом на корисну модель № у 2013 10299. «Пристрій для дослідження розшарування композиційних матеріалів»; опубл. 10.04.2014, Бюл. №7/2014.

Результати роботи передані для впровадження в виробництво на завод ПАО «ЧЕЗАРА» (акт впровадження від 12.08.2014 р.) у м. Чернігові та АО «Хімтекстильмаш» (акт впровадження від 09.06.2014 р.), а також впроваджені в навчальний процес і використовуються в курсах «Теорія різання», «Композиційні матеріали та методи їх обробки», що викладаються для студентів НТУУ «КПІ» (акт впровадження від 20.03.2016 р.), та при виконанні магістерських робіт і дипломних проектів.

**Особистий внесок здобувача.** Основна частина ідей, теоретичних розробок та експериментальних досліджень належать автору. Серед них: проведення обґрунтування можливості застосування та розробка схеми реверсивного свердління до ортотропних вуглепластиків, розробка конструкції та виконання кінематичного розрахунку пристрою для реверсивного свердління, розрахунок силових характеристик при свердлінні вуглепластиків та склопластиків, розробка конструкції та розрахунок свердла для реверсивного оброблення, проведення усіх лабораторно-експериментальних випробувань, синтез математичної моделі параметрів процесу реверсивного свердління. Постановка задач та аналіз результатів досліджень здійснювалась разом з науковим керівником, розрахунки виконані особисто автором.

#### **Апробація результатів роботи.**

Результати роботи були представлені та обговорені на наукових конференціях, серед яких основними є: Загальноуніверситетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвячена дню Науки, Секція "Машинобудування", підсекція "Інтегровані технології машинобудування" (Київ, 2012 р., 2013 р., 2014 р.), Друга технічна конференція українського відділення товариства SAMPE «Технічна модернізація авіабудівного виробництва - ключ до успіху на ринках авіаційної техніки» (Київ, 2012 р.), XI Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2013 р.), X міжнародний конгрес «Машини, технології, матеріали», «Інноваційні рішення для розвитку виробів та процесів» (Болгарія, Варна, 2013 р.), Третя

технічна конференція українського відділення товариства SAMPE «Активізація науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт - шлях до скорочення термінів створення нової конкурентоспроможної техніки та зменшення супутніх витрат» (Київ, 2013 рік), SAMPE Europe student conference 2014 (Франція, Париж, 2014 р.), XV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, 2014 р.), XIV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Машинобудування очима молодих, прогресивні ідеї – наука – виробництво», (Суми, 27-31 жовтня, 2014 р.).

**Публікації.** По темі дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць, у тому числі 9 статей видані в фахових наукових виданнях (6 з яких у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, 1 стаття у закордонному виданні), 4 статті в інших наукових виданнях, 1 патент України на винахід, 2 патента України на корисну модель, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, з яких 1 конференція іноземна.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 155 найменувань на 16 стор, 6 додатків на 27 сторінках. Основний текст дисертації викладено на 120 стор., що містить 101 рисунок, 14 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 165 стор.

## РОЗДІЛ 1

### ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ ПРИ СВЕРДЛІННІ ПКМ

Розширення спектра застосування ПКМ у різноманітних сферах господарства та промисловості потребує розробки ефективних технологій їх механічної обробки. Основні труднощі при цьому – відсутність методики визначення режимів обробки, яка б дозволила визначити параметри якості обробленої поверхні ПКМ. Оброблення ПКМ різанням має ряд особливостей в силу характерних властивостей матеріалу, тому для оптимізації процесів оброблення необхідно розкрити фізичну сутність процесу різання [6,13,16,24,27,30,32,41,44,52,56,74,75,77,90,98,99,106,108,113, 118,139, 144,149, 154].

На сьогоднішній день, ПКМ здатні задовольнити вимоги майже будь-якої галузі промисловості. Саме цим пояснюється така різноманітність типів ПКМ. Вони володіють широким діапазоном властивостей, тому здатні в повній мірі замінити метали в багатьох галузях машинобудування.

#### **1.1. Особливості застосування вугле- та склопластиків у авіаційній промисловості.**

Згідно прийнятої термінології композитний матеріал - гетерофазний матеріал, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жодний з компонентів окремо.

Іншими словами, композити - багатоконпонентні матеріали, що складаються з полімерної, металевої, карбонової, керамічної або іншої матриці (зв'язуючого), армованої наповнювачами з волокон, ниткоподібних кристалів, тонкодисперсних частинок тощо. В композитах конструкційного призначення армуючі елементи звичайно забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу (міцність, жорсткість тощо), а матриця забезпечує спільну роботу армуючих елементів та захист їх від механічних пошкоджень та агресивного хімічного середовища.

Шляхом підбору складу і властивостей наповнювача і матриці, їх співвідношення, орієнтації наповнювача можна отримати матеріали з необхідним поєднанням експлуатаційних і технологічних властивостей. Армуючі наповнювачі беруть на себе основну частину навантаження композиційних матеріалів. Використання в одному матеріалі декількох матриць (поліматричні композиційні матеріали) або наповнювачів різної природи (гібридні композиційні матеріали) значно розширює можливості регулювання властивостей ПКМ. [3,6,29,37,53,103,104].

При використанні вуглецевих, скляних, арамідних волокон, що містяться в матеріалі в кількості 50-70%, створені композиції з ударною міцністю і ударним модулем пружності в 2-5 разів більшими, ніж у звичайних конструкційних матеріалів і сплавів. Крім того, волокнисті композиційні матеріали перевершують метали і сплави по втомній міцності, термостійкості, вібростійкості, шумопоглинанню, ударній в'язкості і іншим властивостям [23].

Визначною при створенні композитів є взаємодія і взаємовплив компонентів в елементарному об'ємі волокно-матриця [6,144]. Взаємодія волокон з матрицею повинна забезпечувати високу реалізацію механічних властивостей волокон в армованому матеріалі і його монолітність. Чим вище необхідні властивості отриманого композиту конструкційного призначення, тим більш складний комплекс вимог повинен витримуватися при виборі початкових компонентів, без виконання яких неможливе отримання якісних виробів [41,58,104].

Композити мають низький коефіцієнт теплового розширення, що забезпечує стабільність їх розмірів. Виробництво композитів займає менше часу і деталь створюються відразу потрібної форми, що зменшує час механічної обробки. Композиційні матеріали широко застосовуються в авіа- та ракетобудуванні, автомобільній промисловості, суднобудуванні тощо з кількох причин, зокрема це висока жорсткість і міцність при відносно невеликій вазі. Це актуально для авіапромисловості, де зменшення маси літака, що знижує витрати пального. Процентне співвідношення використання композитів в

різних галузях промисловості [2, 23,41,47,148,152] зображене на діаграмі (рис. 1.1)]

На діаграмі (рис. 1.2) подані перспективи розвитку потреби у використанні ПКМ у різних галузях промисловості до 2017 року [2,5].

При побудові літаків КМ застосовуються для виготовлення елементів обшивки фюзеляжу, модулів та панелей крила, закрилків, елементів хвостової частини та інтер'єру.

Застосування композитів в літаку порівняно з алюмінієм, сталлю, титаном показано на рис. 1.3.

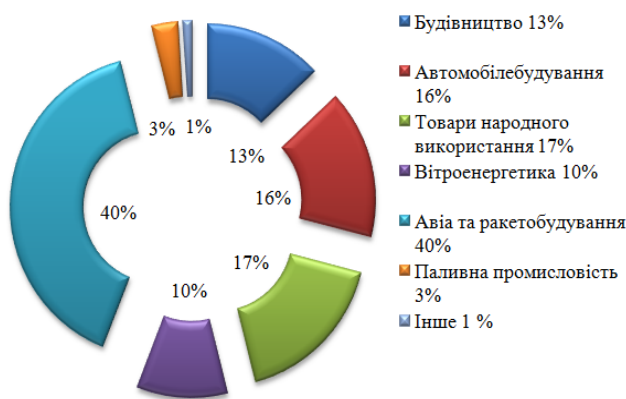


Рис. 1.1. Застосування композитів у промисловості

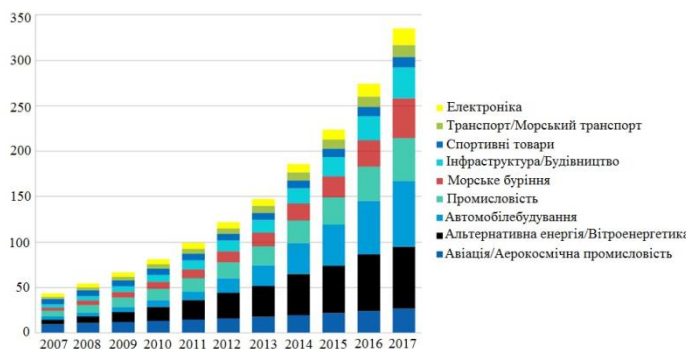


Рис. 1.2. Діаграма зростання попиту на ПКМ у різних галузях промисловості та господарства

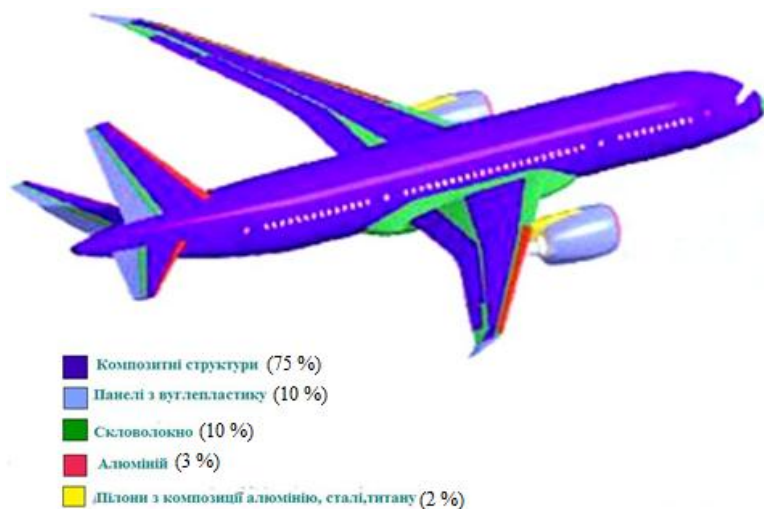


Рис. 1.3. Використання композитів для деталей літака

Наприклад, застосування в літаку АН-158, АН-178 57-65% деталей з ПКМ дозволяє зменшити його злітну масу на 30%, що рівнозначно збільшенню

корисної вантажопідйомності на 10т або збільшенню числа пасажирів на 50 чоловік, дальність польоту на 3000 км [148].

ПКМ здатні поглинати і гасити акустичні шуми. Це використовується для виготовлення звукопоглинаючих панелей для авіадвигунів серії ПС-90А2 [2,23].

Класифікація композиційних матеріалів.

Для композиційних матеріалів існує кілька класифікацій, в основу яких покладено різні ознаки, наприклад матеріалознавча (по природі компонентів); конструктивна (по типу армування та його орієнтації в матриці). Виходячи з існуючих класифікацій, можна виділити кілька груп КМ:

- Композити з полімерною матрицею (пластики). В залежності від природи армуючих волокон виділяють склопластики, вуглепластики, боропластики, органопластики [103];

- Композити з металічною матрицею (металокомпозити);

- Композити з керамічною та вуглецевою матрицями.

За конструктивною ознакою ПКМ можна розділити на (рис. 1.4):

а – хаотично армовані: 1 – короткі волокна, 2 – неперервні волокна;

б – одномірно армовані: 1 – однонаправлені неперервні, 2 – однонаправлені короткі;

в – двомірноармовані: 1- неперервні нитки, 2 – тканини;

г – просторово армовані: 1 – три сімейства ниток, 2 – n сімейств ниток.

Склопластики – матеріали, армовані скляними волокнами. В залежності від взаємної орієнтації волокон склопластики поділяються на однонапрямлені, коли всі волокна розташовані в одному напрямі, і перехресні – волокна розташовані під кутом одне до одного. Ці матеріали відрізняються від інших пластиків конструкційного призначення поєднанням високої міцності, низької щільності і теплопровідності, гарних електроізоляційних властивостей і порівняно низькою вартістю наповнювача. Технологічною перевагою склопластиків являється можливість виготовлення вузлів і конструкцій

складної форми шляхом формування з застосуванням достатньо простого обладнання.

Характеристики міцності та пружності склопластиків залежить від кута між напрямками прикладення навантаження та укладки волокон, що необхідно знати і використовувати при обробці їх різанням [6,29,104].

Вуглепластики - матеріали, у яких в якості армуючих волокон застосовують карбоволокна, які відзначаються поєднанням таких властивостей, як низька щільність, високий модуль пружності, міцність, термостійкість, висока зносостійкість і низький коефіцієнт тертя.

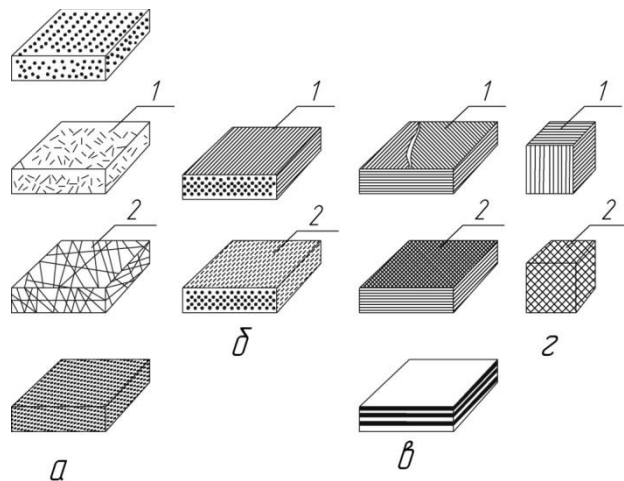


Рис. 1.4. Класифікація композиційних матеріалів за конструктивною ознакою

В якості зв'язуючого для вуглепластиків застосовують головним чином епоксидні смоли, так як вони володіють високою адгезією до вуглецевих волокон і дозволяють формувати вироби при невисоких тисках, що особливо важливо при відносно високій крихкості волокон [6,37 ,103]. Відмінною рисою вуглепластиків є також їх висока статична і динамічна витривалість, достатньо висока тепло-, водостійкість і хімічна стійкість. Недоліком вуглепластиків як конструкційних матеріалів являється їх низька в порівнянні з склопластиками міцність зчеплення між наповнювачем і зв'язуючим, що впливає на поведінку матеріалу при обробленні, а також висока вартість.

Органопластики - матеріали, в яких в якості наповнювача застосовують синтетичні або природні органічні волокна, тобто вони представляють собою

полімер, наповнений полімером. Органопластики поєднують порівняно низьку щільність з високою міцністю і жорсткістю, стабільністю властивостей при знакозмінних і циклічних навантаженнях [100,144].

Враховуючи те, що ПКМ типу вугле- та склопластик більш широко застосовуються у авіабудуванні та промисловості на відміну від інших видів ПКМ у даній роботі для дослідження були взяті саме матеріали цього типу.

## 1.2. Особливості свердління вугле- та склопластиків.

### 1.2.1. Структурне співвідношення видів механічної обробки ПКМ.

Враховуючи особливості структури та застосування ПКМ виникає задача аналізу особливостей механічної обробки вугле- та склопластиків. В результаті аналізу літературних джерел [5,27,30,44,46,52,65,75,77,98] встановлено, що при виготовленні виробів з вугле- та склопластиків застосовують такі види механічної обробки: точіння, свердління і розгортання, фрезерування, розрізування, шліфування, і нарізування різьби [139]. На діаграмі представлене їх процентне співвідношення (рис. 1.5).

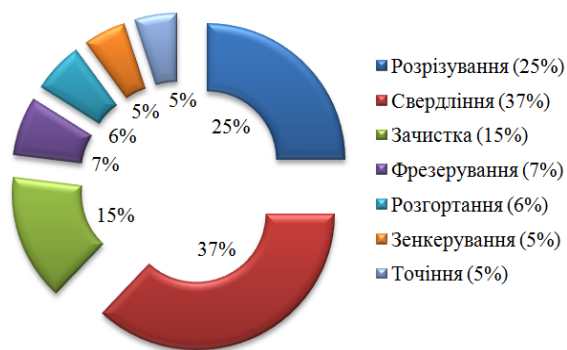


Рис. 1.5. Процентне співвідношення видів механічної обробки ПКМ

Незважаючи на широке розповсюдження композиційних матеріалів, необхідно приймати до уваги і враховувати при обробці деякі їх особливості. Зокрема це, залежність температурної стійкості ПКМ від матеріалу зв'язуючого, гігроскопічність матеріалів, що впливає на процес обробки і поведінку виробів з них, дороговизна виробництва ПКМ. Також потрібно враховувати такі параметри, як товщина матеріалу, вимоги до якості та точності отвору при обробці, будова матеріалу. Для кожного типу матеріалу потрібен індивідуальний підхід до геометрії інструменту [39,90].

Згідно аналізу, представленому на рис. 1.5, свердління композиційних матеріалів є одним з найпоширеніших видів механічної обробки. У вугле- та склопластиках в процесі виробництва створюється велика кількість отворів, частина яких виконується під болтове та заклепкове з'єднання. Вимоги до точності отворів для цих двох видів з'єднань відрізняються. Зокрема у авіаційній промисловості вимоги до точності отворів під заклепки 10-11 квалітет, а для болтового з'єднання 9-10 квалітет [16,100,144].

### **1.2.2. Вплив особливостей вугле- та склопластиків на процес свердління.**

Свердління вугле- та склопластиків має деякі відмінності від механічної обробки металів, викликані рядом їх особливостей. Це пояснюється властивостями і структурою оброблюваного матеріалу. В результаті аналізу літературних джерел [74,75,78,82,90,106,108,113,119] були виділені деякі специфічні особливості, такі як:

1. Яскраво виражена анізотропія властивостей оброблюваного матеріалу. Це визначає різницю процесу різання при обробці вздовж і впоперек волокон матеріалу. Суттєвою є схема армування матеріалу.

2. Відносна складність отримання високої якості поверхні. Причиною цього стають іноді невисокі міцнісні характеристики (особливо при підвищених температурах), шарувата структура, інколи низький адгезійний зв'язок наповнювача з матрицею.

3. Висока твердість наповнювача. Наприклад у композиційних матеріалів на основі волокон бора, твердість перевищує твердість оброблювального інструмента.

4. Низька теплопровідність ПКМ. Це впливає на співвідношення загального теплового балансу і призводить до відведення теплоти через різальний інструмент. Це вимагає вибору спеціального матеріалу та покриття для різального інструмента [1,54,60,88,118,141,144].

5. Абразивна дія наповнювача. Такі наповнювачі як скляні, вугільні чи борні волокна мають абразивну здатність і високу міцність, що призводить до абразивного зношування інструменту.

6. Деструкція полімерної матриці при обробці. В результаті утворюється полімерна поверхнево-активна речовина, що призводить до механіко-хімічного зношування інструмента.

7. Високі пружні властивості ПКМ, що призводить до зношування інструменту в основному по задній поверхні.

8. Технологічний критерій зношування.

9. Низька теплостійкість ПКМ.

10. Високий опір до вібрацій.

11. Виділення дрібних частинок матеріалу при різанні. Це вимагає дотримання правил техніки безпеки при обробці [98,99].

12. Виділення газу, до якого можуть входити отравляючі речовини.

Враховуючи характерні особливості поведінки вугле- та склопластиків при свердлінні, виникає задача аналізу можливих дефектів, що виникають при виготовленні, експлуатації та механічній обробці ПКМ.

### **1.3. Дефекти, що виникають в конструкціях при їх виготовленні, експлуатації та свердлінні.**

Використання при виготовленні виробів з ПКМ недосконалого обладнання, система управління яким не забезпечує задану точність підтримки параметрів технологічного процесу, призводить до виникнення в структурі матеріалу різного роду дефектів, що викликають зниження фізико-механічних характеристик або збільшення їх розкиду, зниження несучої здатності конструкції та інші негативні ефекти. Поява дефектів в конструкціях з композитів, армованих безперервними волокнами або тканинними матеріалами, може бути пов'язано не тільки з відсутністю достатньо досконалого обладнання, але і з низкою інших причин, пов'язаних з суб'єктивними факторами (порушенням технологічного процесу, забрудненістю ділянки формування структури матеріалу та ін) [6,16,29,58]. Дефекти в ПКМ при

виготовленні та експлуатації зручно представити у вигляді блок-схеми, поділивши на різні групи за відносними розмірами та іншим параметрами (рис. 1.6). Враховуючи характерні особливості вугле- та склопластиків, при свердлінні у матеріалах також виникає низка дефектів.

Параметри які слід враховувати при виборі інструменту для обробки композиту - товщина матеріалу, діаметр отвору, вимоги точності, якість отвору та вид оброблюваного матеріалу. Кожному з матеріалів потрібен індивідуальний підхід у виборі параметрів ріжучого інструменту. Також від типу матеріалів залежить швидкість різання і швидкість подачі. На якість отвору, а саме на величину розшарування впливає ступінь зношування інструменту (рис. 1.7).

При свердлінні композиційних матеріалів, шари композиційного матеріалу, які попадають на різальну кромку піддаються місцевій деформації на вигин, що є причиною розшарування матеріалу навколо отвору. Розшарування вимагає невеликого осьового зусилля, особливо коли значення товщини незрізаного шару залишиться незначна, внаслідок чого на виході інструменту буде спостерігатися розшарування матеріалу [17,68].

Можливими дефектами, що виникають при свердлінні ПКМ є розрив шарів матеріалу на вході свердла [11,17,31,68] (рис. 1.8) та розшарування на виході свердла з матеріалу (рис. 1.9).

До розшарування ПКМ призводить зношування свердел, і в першу чергу, шарів матеріалу на виході інструмента із заготовки. Коефіцієнт розшарування збільшується зі збільшенням зношування по задніх поверхнях свердла, а також у точці перетину головної та допоміжної різальної поверхонь на периферії свердла по зовнішньому діаметру (кутик) лез в результаті збільшення осьової сили.

Для спіральних свердел при обробці ПКМ характерним є також і більша, ніж при обробці сталей, величина зношування поперечної ріжучої кромки. Затуплення рузальної кромки свердла, пов'язана з його зношуванням,

призводить до збільшення критичної осрової сили  $P_x$ , а, отже, і до збільшення ступеня розшарування [32].

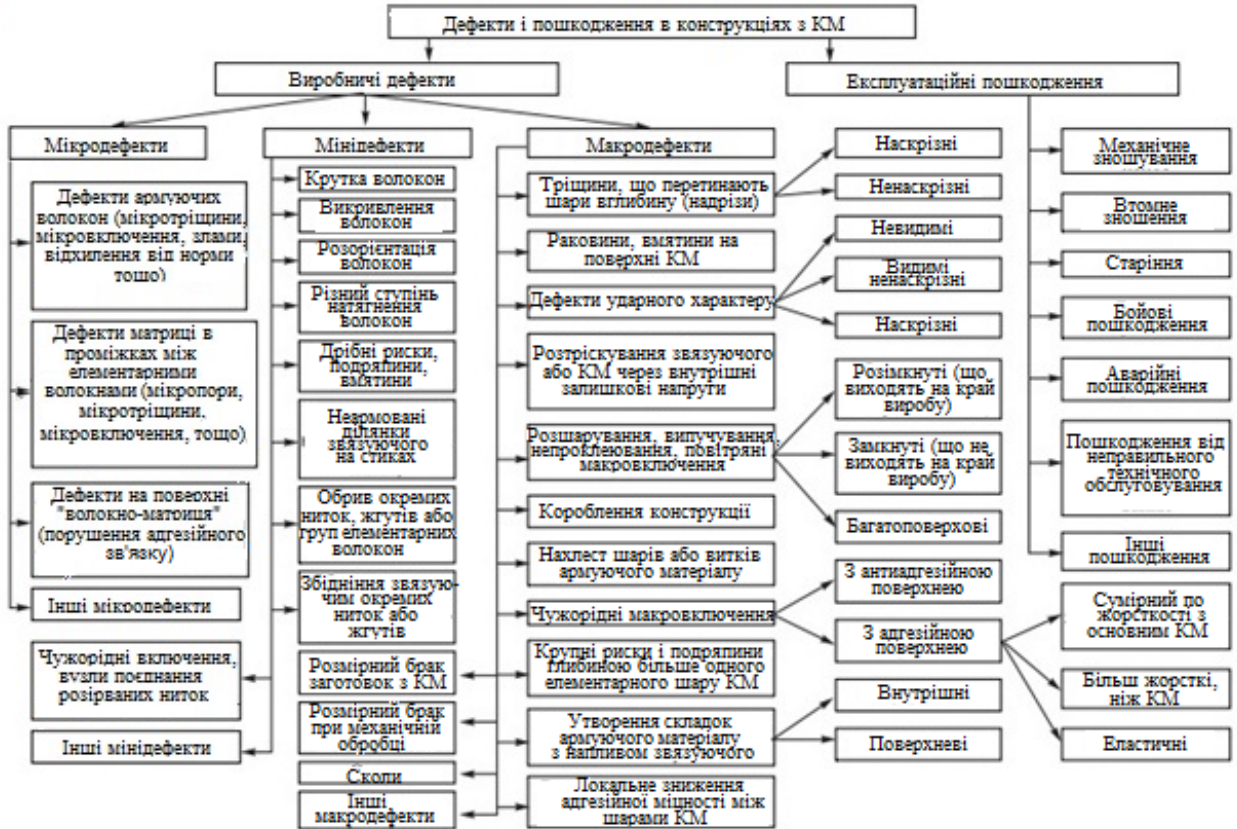


Рис 1.6. Класифікаційна схема виробничих дефектів і експлуатаційних пошкоджень в конструкціях з КМ



Рис. 1.7. Параметри якості обробки поверхонь отворів

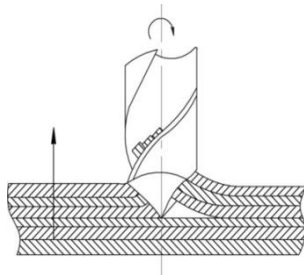


Рис. 1.8. Розрив шарів на вході свердла

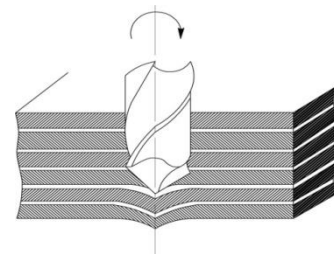


Рис. 1.9. Розшарування на виході свердла

В роботі [62] отримана формула для визначення величини критичного зусилля, що викликає розшарування на виході свердла, що має вигляд:

$$P = 4\pi \sqrt{\frac{G_{IC} 2D(1+\nu)}{(\nu+3)}}$$

де

- $G_{IC}$  швидкість висвободження енергії деформації,
- $D$  жорсткість на згин,
- $\nu$  коефіцієнт Пуассона.

Для попередження розшарування може бути розглянута схема, зображена на рис. 1.10. На рисунку 1.11 показаний вигляд розшарування ПКМ.

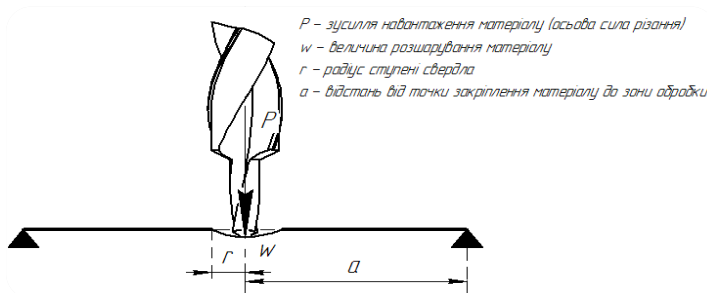


Рис. 1.10. Схема навантаження матеріалу у вигляді балки

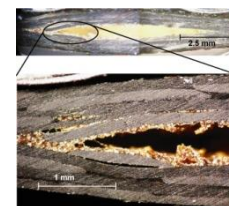


Рис. 1.11. Фото розшарування в розрізі

Типові приклади відшарувань наведені на рис. 1.12. Процес відшарування вимагає енергетичних витрат, при цьому потенціальна енергія вигину накопичується тільки в відшаруванні, а робота руйнування складається з роботи, що витрачається на руйнування матричного прошарку і йде на просування тріщини в відшаруванні. Кожному типу відшарувань,

представлених рис. 1.12, відповідають свої критерії і межі стійкості, що визначаються за Гріффітсом або Ейлером [4,10,11,17,31,53,55,74,83].

Зростання відшарувань в ПКМ при тривалодіючих або циклічних навантаженнях відбувається стійко, якщо параметри відшарування належать області стійкості по Гріффітсу. Однак при тривалому навантаженні в матриці та армуючих елементах виникають розсіяні ушкодження, які знижують опір відшарувань. Для розрахунку зростання розшарувань в стислих елементах потрібно враховувати енергію вигину, що вивільняється при зростанні відшарувань.

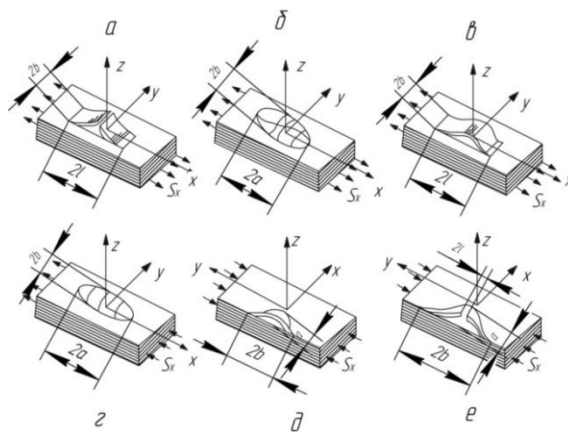


Рис. 1.12. Приклади відшарувань в композитах, а - відкрите відшарування при розтязі, б - еліпсоїдальне при розтягуванні, в- стисле в умовах циліндричного вигину, г - еліпсоїдальне при стисненні, д-кромочне, е - кромочне з вторинною тріщиною.

Деякі якісні особливості росту відшарування, зображеного на рис. 1.12, в, наведені на рис. 1.13. Криві 1-3 відповідають початковим станам. Крива 1 відноситься до випадку, коли початковий розмір відшарування досить великий, але початковий стан субрівноважний. Після закінчення інкубаційної стадії тривалістю  $t^*$  розмір  $l$  починає зростати.

Картина зростання відшарування якісно подібна до тієї, яка спостерігається в разі розтягнення. Крива 2 (рис. 1.13) відповідає випадку, коли початковий стан так само субрівноважний, тому існує деяка нетривала інкубаційна стадія. Після зростання розшарування до нестійкого стану відбувається стрибок до нового субрівноважного стану.

Новий розмір відшарування може бути оцінений, виходячи зі співвідношення енергетичного балансу. При стрибкоподібному зростанні відшарування ступінь пошкодження падає практично до нуля, оскільки фронт відшарування переходить в малопошкоджену область матричного прошарку (рис. 1.13, б, крива 3). Далі йде друга інкубаційна стадія. Після того як буде накопичено достатнє пошкодження, фронт відшарування знову стягується.

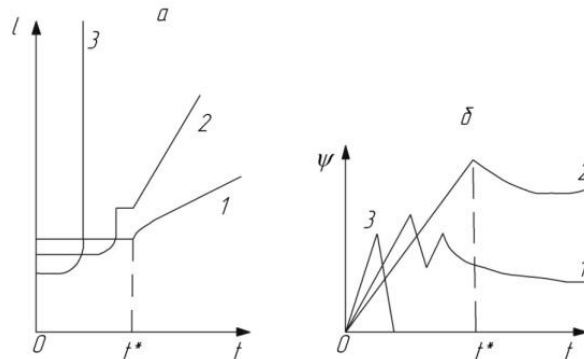


Рис. 1.13. Діаграма відшарувань в композиті при стисненні. а - зростання відшарувань; б - накопичення мікропошкоджень на фронті.

Подальше зростання відбувається стійко. Крива 3 відповідає значенням відшарування, при яких початкова точка знаходиться в досить вузькій смузі, укладеній між областю, де відшарування немає, і областю, в якій відрізок стійкості зростання відшарування завершується повним відщепленням зовнішнього шару. Значення критичної деформації для конструкційних композитів досить високі (близько  $10^3$ ), тому типова поведінка стислих відшарувань описується кривими 1 на рис. 1.13, а, б.

Окрім розшарування під час свердління ПКМ виникає ряд дефектів, поданих у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

#### Можливі дефекти при обробці ПКМ

Вид пошкодження	Характеристика	Причина появи дефекту
Задири, розпушування волокон	Частина волокон на виході інструменту залишається незрізаною	Незрізання волокон нижніх шарів ПКМ через їх деформацію та розшарування, затуплений інструмент, сильний розігрів матеріалу при свердлінні

Міжшарові тріщини	Формування тріщин між шарами багатшарових КМ всередині отвору	Осьова сила перевищує міцність міжшарових зв'язків
Витягування волокон	Витягування (вириви) волокон з матриці	Мала адгезія волокон до матриці при даному значенні осьової сили
Сколи	Мікроруйнування кромки отвору, рівномірного за твірною поверхнею	Підвищена крихкість КМ, вібрації при свердлінні
Термодеструкція (прижоги)	Пошкодження поверхні отвору за рахунок підвищення температури	Температура в зоні різання перевищує граничне значення для даного КМ

Шорсткість для більшості оброблених поверхонь встановлюється в межах Rz20-Rz40. У деталях з ПКМ застосовувані традиційно параметри шорсткості обробленої поверхні не забезпечують повною інформацією про мікрорельєф і якість поверхні отворів [53,56,144] внаслідок наявності, ворсистості. Ворсистість враховується в тих випадках, коли має місце виступання незрізаних волокон над обробленою поверхнею на величину більше 4-5 діаметрів елементарного волокна в кількості більше 20-30% від загальної кількості волокон. Для зменшення ворсистості потрібно підбирати оптимальні режими різання, використовувати гостро заточений інструмент.

Окрім похибок геометричних параметрів виникають похибки, пов'язані з фізико-хімічним станом поверхні, такі як термодеструкція поверхневого шару тощо [1,24,75,88]. При обробці ПКМ різанням за рахунок великих контактних площ на задній поверхні інструмента і дії високих температур в зоні різання можливе виникнення прижогів (рис. 1.15).

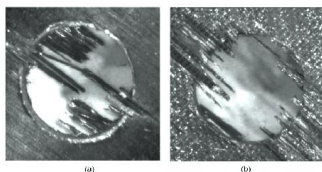


Рисунок 1.14. Сколи на вході (а) та на виході (б) у просвердлених отворах.

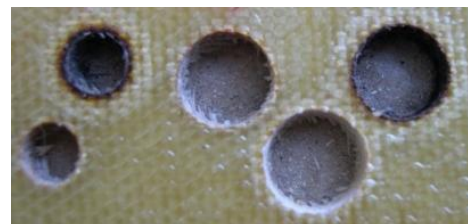


Рис. 1.15. Вигляд термодеструкції у склопластику

В результаті процесу термодеструкції виникає деструктовано-диспергований шар, який погіршує експлуатаційні характеристики виробів з ПКМ. Глибина деструкції залежить від виду і умов обробки і коливається в проміжку 0,003-0,5мм.

Шляхи уникнення дефектів при свердлінні вугле- та склопластиків можна умовно розділити на 4 групи (рис. 1.16). Зокрема методи та способи оброблення будуть докладніше проаналізовані нижче.



Рис. 1.16. Шляхи уникнення дефектів при обробленні ПКМ

Отже, для зниження імовірності появи перерахованих дефектів постає задача аналізу способів свердління отворів у вугле- та склопластиках, а також конструкцій свердел, що застосовуються при цьому.

#### 1.4. Аналіз способів свердління вугле- та склопластиків.

Докладно способами свердління вугле- та склопластиків у науці мало займалися. Є роботи, автори яких застосовували деякі способи свердління до ПКМ, проте не займалися їх вдосконаленням.

У таблиці 1.2. проаналізовані можливості застосування деяких способів свердління вугле-та склопластиків [9,74,78,79,81,87,97].

Таблиця 1.2.

## Способи свердління вугле- та склопластиків

Спосіб свердління	Позитивні особливості застосування способу
Метод клейового закріплення матеріалу при свердлінні	Добра фіксація матеріалу, що запобігає зайвим вібраціям
Застосування вакуумних, холодильних, гідравлічних столів	Збільшення продуктивності обробки за рахунок зменшення часу на круплення матеріалу
Закріплення матеріалу між двома кондукторними втулками	Підвищення якості отворів у шаруватих матеріалах. Проте спосіб є трудомістким, а також можливе неспівпадіння отворів через те, що отвір необхідно просвердлювати двічі.
Обробка з технологічним наповнювачем	Збільшення жорсткості та міцності конструкції, за рахунок нанесення на матеріал рідкого технологічного середовища з наступним його твердінням.
Свердління з заморожкою матеріалу	Збільшення жорсткості та міцності конструкції за рахунок заморожування просоченого водою матеріалу в кріостаті.
Збільшення перерізу зрізаємого шару (спосіб широких зрізів)	Досягнення високої якості поверхні за рахунок зменшення шорсткості.
Зниження величини подачі в процесі свердління, проведення обробки в кілька етапів	Оброблення корпусних деталей з виключенням великих пружних деформацій матеріалу
Метод попереднього руйнування зрізаємого шару	Забезпечення додаткового деформування шару матеріалу для зниження його механічних характеристик, сили різання та температури. Підвищення стійкості свердла, точності обробки за рахунок зменшення зношування свердла та пружних деформацій матеріалу.
Застосування додаткового стиснення матеріалу при свердлінні	Перешкоджання зміщенню шарів ПКМ, запобігання розшарування, сколів, тріщин, створення умов для подрібнення стружки.
Застосування методу терморізання	Підвищення якості обробки за рахунок зменшення ворсу, зниження шорсткості.
Застосування методу вібрисвердління	Запобігання розшарування за рахунок погашення вібрацій шарів матеріалу при свердлінні шляхом накладення вібрацій на свердло вздовж осі
Метод гідрорізання	Відсутність розігрівання матеріалу, виключення термічних напружень і деформацій, виключення появи пилу та газу, за рахунок різання за допомогою високоенергетичного струменя рідини.
Застосування ультразвуку під час свердління	Запобігання появи стружки, шуму, прижогів, виділення пилу та газу. Порівняно з гідро різанням відсутнє

	поглинання рідини, викликане гігроскопічністю вугле- та склопластиків
Реверсивне свердління	Зниження розшарування, шорсткості, уникнення ворсу за рахунок двонапрявленого обертання свердла. Підвищення стійкості інструменту за рахунок зменшення навантаження.

Враховуючи те, що перераховані методи не були якісно досліджені та не проводилося робіт по їх вдосконаленню, не можна оцінити їх ефективність для свердління вугле- та склопластиків. Так як основним фактором, що впливає на якість обробки є зусилля різання, у роботі для дослідження був обраний метод реверсивного свердління, при якому можливо зменшити навантаження на інструмент.

Спосіб оброблення та оброблюваного матеріалу чинить вплив на конструкцію свердла. Тому постає задача проаналізувати конструкції свердел, що застосовуються для обробки вугле- та склопластиків, а також визначити, чи можуть бути ці конструкції ефективними при реверсивному свердлінні.

Трудомісткість операцій свердління на деяких виробках з ПКМ досягає 70-80 % від загальної трудомісткості процесу механічної обробки. Тому в цих умовах неправильний вибір ріжучого інструменту і режимів різання приводить до значних витрат [30,144]. Свердління отворів у ПКМ проводять як вздовж армуючих волокон, так і перпендикулярно до них, причому свердління отворів може бути наскрізне і глухе. Необхідно враховувати те, що у нових типах ПКМ стандартні типи свердел, що застосовуються для металів або ПКМ певного типу не є працездатними, через виникнення тріщин та розшарувань матеріалу [8,13,31].

У роботах [13,24,32,42,43,46,59,71,90] наведені деякі типи свердел, що застосовуються для оброблення ПКМ, а саме свердла зі швидкоріжучої сталі (спіральні свердла з різними типами заточки та підточки, цільні перові свердла тощо) та твердосплавні свердла (свердло конструкції Ісаєва, свердла з твердосплавними пластинами), а також ступінчаті сверла та комбіновані інструменти.

Значно дозволило підвищити якість обробленої поверхні та стійкість інструменту застосування зносостійких покриттів. Найбільш широко застосовуються метод хімічного осадження (Chemical Vapour Deposition — CVD) і метод фізичного осадження покриттів (Physical Vapour Deposition — PVD). Були розроблені різні комбінації з застосуванням зовнішніх твердозмащувальних покриттів (наприклад, TiAlN/MoS<sub>2</sub>). Активно ведуться розробки аморфних вуглецевих покриттів у різних модифікаціях. Проте застосування покриття вимагає додаткових фінансових затрат.

Отже, в залежності від способу оброблення та оброблюваного матеріалу, будь-яка конструкція свердла є ефективного при обробці, лише в тому випадку, коли вона призначена для певного типу ПКМ.

#### **1.4.1. Особливості реверсивного різання.**

Спосіб реверсивного різання дозволяє виконати задачу оптимізації механічної обробки за рахунок підвищення стійкості різального інструменту. Сутність реверсивного різання полягає в роботі тим самим інструментом з будь-яким напрямом подачі або швидкості різання. Операція свердління виконується при обертанні інструмента в обидві сторони [85-87]. Даний спосіб обробки був запропонований Ю.М. Єрмаковим для металів. У даній роботі запропоновано застосування даного методу для оброблення вугле- та склопластиків.

Способи реверсивного різання дозволяють знімати припуск в протилежних напрямках подачі та швидкості різання.

Для реверсивного свердління застосовують двокромочні свердла.

На рис. 1.17 зображене трипере реверсивне свердло, на рис. 1.18 – те ж свердло, вигляд в плані з боку різальних лез, на рис. 1.19 – переріз А-А на рис. 1.17, на рис. 1.20 – двопере свердло вигляд в плані. (Патент РФ №2214318 Реверсивное сверло Ермаков Ю.М. Опубл. 20.10.2003).

Реверсивне свердло (рис. 1.17) має симетричні робочі пера 2 з направляючими стрічками 3 по обидва боки, стружкові канавки 4 і леза, задні

поверхні 5 яких нахилені до вершини свердла під кутом в плані  $\phi$  і розташовані перпендикулярно до площини симетрії однойменного пера.

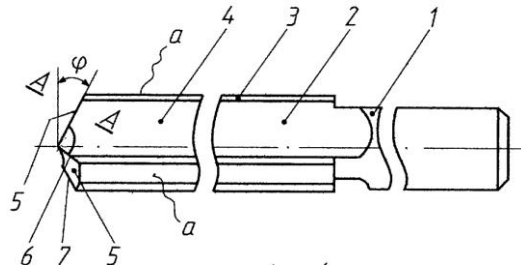


Рис. 1.17. Типове свердло для реверсивного оброблення

Площина симетрії пера проходить через вісь свердла і радіальну вісь симетрії пера (див. рис. 1.18 та 1.19). Зовнішні поверхні "а" пір'їв в поздовжньому напрямку між напрямними стрічками виконані плоскими і розташовані перпендикулярно до площини симетрії однойменного пера.

Задні поверхні 5 ріжучих лез, які є і гранями, зважаючи на свою плоску форму, утворюють на перетині з стружковими канавками 4 і підточкою при вершині свердла ріжучі кромки 6 і 7. Ріжуче лезо має при ріжучій кромці передній кут, який визначається формою стружкової канавки, і задній кут між дотичною до кола оброблюваного отвору і задньою гранню (див. рис. 1.19).

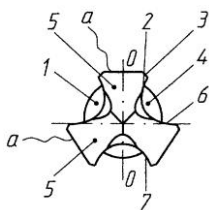


Рис. 1.18. Схема реверсивного свердла

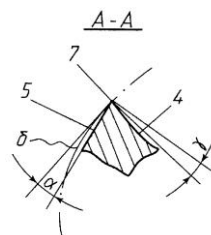


Рис. 1.19. Кути реверсивного свердла

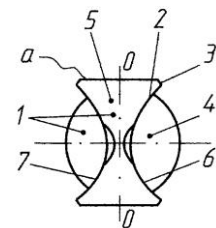


Рис. 1.20. Радіусна заточка реверсивного свердла

Реверсивні свердла малого діаметра можуть мати 2 пера, які розміщені по гвинтовій лінії. Такі свердла відносяться до реверсивних інструментів з постійним положенням різальних кромки. Особливо ефективні свердла, що мають замість перемички сферичну головку. Сферична головка, що виступає перед різальними кромками входить у оброблювальний матеріал та розм'якшує його за рахунок концентрації високих навантажень та високих температур. Це забезпечує центрування свердла та плавне різання без динамічних ударів та

вібрацій, що мають місце при свердлінні звичайними свердлами з призматичною перемичкою.

При свердлінні зі зміною напрямку обертання інструменту можуть бути використані прийоми двох видів: зміна напрямку після тривалого обертання в один бік, а також неперервне реверсування з певною частотою та амплітудою. Зміна напрямку обертання після тривалого свердління в один бік зумовлена зношуванням різальних кромки. Вона виконується для заміни зношених кромки протилежними, що не працювали.

Неперервне реверсивне свердління є більш ефективним. Даний спосіб дозволяє підвищити продуктивність обробки без збільшення навантаження. Свердління виконується багатокромочним свердлом для двонапрявленого різання, напрям коливань якого обирається протилежним напрямку основного обертання, а кут амплітуди - більшим ніж кут між сусідніми однойменними кромками свердла. При обертанні свердла 1 (рис. 1.21) за годинниковою стрілкою працюють різальні кромки 3, проти - різальні кромки 4.

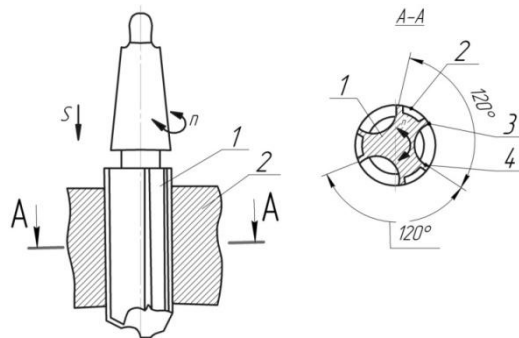


Рис. 1.21. Схема різання типовим реверсивним свердлом

Осьова подача  $s$  виконується постійно в одному напрямі. При цьому методі обробки підвищується продуктивність обробки в результаті збереження постійної величини зрізу, що дозволяє прикладати максимально допустиме навантаження. Стійкість свердел, у яких позмінно працюють різальні кромки з обертанням за годинниковою стрілкою і проти неї більш висока, ніж у звичайних.

Подані конструкції свердел для реверсивного свердління є трудомісткими у виготовленні та переточуванні, тому постає задача пошуку та конструювання

більш простого у виготовленні інструменту. Режими реверсивного свердління не досліджені в повному обсязі через відсутність обладнання, що ставить задачу конструювання пристрою, здатного забезпечити реверсування обертального руху свердла.

#### **1.4.2. Дія сил що виникають при свердлінні.**

Для раціональної роботи свердла необхідно проаналізувати фактори, що впливають на процес різання. Основним фактором є зусилля різання, на яке складові процесу різання впливають у сукупності. Визначення зв'язків між цими факторами є ключовою проблемою.

В процесі свердління ПКМ різальна кромка свердла діє на залишкову частину матеріала з деякою силою, яка може викликати розшарування, особливо при відсутності підкладки [144]. Імовірність розшарування суттєво збільшується при зменшенні товщини неперсвердленої частини (шару) ПКМ. Величина реакції осьової сили, що призводить до відшарування залишкової частини матеріалу залежить від форми різальної кромки і величини тертя між свердлом і матеріалом [99,100].

На розшарування матеріалу при свердлінні суттєво впливає розподіл сил в зоні різання [99,144]. На рисунку 1.22 дана схема сил, що діють на спіральне свердло, із схеми видно, що радіальна сила  $P_y$  не має впливу на розшарування матеріалу, тангенціальну силу  $P_z$  при обробці КМ необхідно враховувати, коли досліджується крутний момент та момент тертя при пружньому відновленні оброблюваного матеріалу. Для дослідження розшарування матеріалу при свердленні необхідно враховувати осьову силу  $P_o$ , яка є сумою сил подачі, діючих на головній ріжущій кромці  $P_x$  та поперечній різальній кромці  $P_{xp}$  (залежить від метода заточки). На величину  $P_o$  впливає кут нахилу канавки свердла. Кут нахилу гвинтової канавки знаходиться в безпосередньому зв'язку з кутом загострення і кутом різання. Збільшення переднього кута призводить до збільшення опору різання [71,134,135,136].

Суттєвий вплив на осьове зусилля надає перемичка. З її збільшенням зусилля опору різання збільшується. Обробка ПКМ пов'язана з великим

абразивним зношенням інструмента, а затуплення свердла вмісті з'єднання фаски з ріжущою кромкою веде до різкого зростання осьового зусилля та крутного моменту.

При свердлінні композиційних матеріалів, шари ПКМ, які попадають під різальну кромку піддаються місцевій деформації на згин, яка є причиною розшарування матеріалу навколо отвору [17,30,100,144].

Розшарування, потребує невеликого осьового зусилля, особливо коли, значення товщини незрізаного шару залишиться незначне, у результаті чого на виході свердла буде спостерігатися розшарування матеріалу. Розшарування матеріалу впливає на якість оброблюваних отворів, тому цей процес має бути змодельовано як у вигляді експериментів, так і розраховано аналітично.

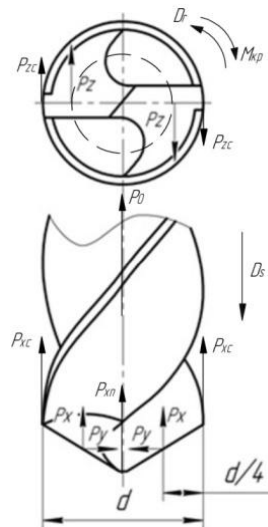


Рис. 1.22. Схема сил, що діють на спіральне свердло

На осьову силу впливають наступні основні фактори [46,75,98,99,100,113,114,144]: 1) оброблюваний матеріал; 2) діаметр свердла і подача; 3) геометричні елементи свердла; 4) змащувально - охолоджуючі рідини; 5) глибина свердління; 6) зношення свердла 7) швидкість різання (частота обертання шпинделя верстата).

1) Оброблюваний матеріал. Чим вище межа міцності при розтязі  $\sigma_b$  або твердість HB оброблюваного матеріалу, тим більша осьова сила різання при свердлінні.

2) Діаметр свердла і подача. Чим більший діаметр свердла і величина подачі, тим більша площа поперечного перетину зрізу, більший об'єм деформованого матеріалу і опір стружкоутворенню, тим більша, відповідно, осьова сила. Діаметр свердла та осьова сила  $P_z$  впливають на крутний момент.

3) Геометричні параметри свердла. Кут нахилу гвинтової канавки  $\omega$  впливає на параметри  $P_z$  настільки, наскільки він впливає на передній кут свердла [71,114,134,135]. З формули 1.1

$$\operatorname{tg} \gamma_x = \frac{r_x}{R} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sin \varphi}, \quad (1.1)$$

видно, що чим більший кут  $\omega$ , тим більший передній кут в кожній точці різальної кромки свердла, тим менша деформація зрізаємого шару, а як наслідок, менша осьова сила  $P_o$  і момент сил опору  $M$ .

Кут при вершині свердла  $2\varphi$  впливає на відношення горизонтальної та вертикальної сил  $P_r$  ( $P_y$ ) і  $P_b$  ( $P_x$ ), а також на товщину зрізу, а тому він не може не впливати на силу  $P_o$  і момент  $M$ . При зменшенні кута  $2\varphi$  збільшуються горизонтальні сили  $P_r$  і зменшуються вертикальні сили  $P_b$ , що призводить до зменшення осової сили  $P_o$ ; при збільшенні ж кута  $2\varphi$  при вершині свердла збільшується й осьова сила  $P_o$ .

Товщина зрізу, що приходиться на одну різальну кромку [134,135]:

$$a = \frac{S}{2} \cos \varepsilon = \frac{S}{2} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \mu \cos^2 \varphi}} \quad (1.2)$$

зменшується зі зменшенням кута  $2\varphi$ . Тонкі стружки деформуються більше, а тому сила  $P_z$  буде збільшуватись зі зменшенням кута  $2\varphi$  і зменшуватись з його збільшенням. Збільшення або зменшення сили  $P_z$  приводить до відповідного збільшення або зменшення моменту від сил опору різання. Таким чином, при збільшенні кута  $2\varphi$  осьова сила збільшиться, а момент від сил опору різанню зменшиться (при інших однакових умовах різання) [71,134].

Відомо, що поперечна кромка значно впливає на осьову силу, так як більше 50 % величини загальної сили  $P$  приходиться на поперечну кромку, яка має несприятливі кути різання. Як наслідок, чим більша довжина поперечної

кромки, тим більшим буде момент від сил опору різанню і особливо осьова сила. Для зменшення  $P_o$  і  $M$  підточують перемичку, завдяки чому зменшується як довжина поперечної різальної кромки, так і кут різання в точках різальної кромки, що розташовані біля осі свердла; осьова сила  $P_o$  при такій підточці зменшиться на 30 - 35 % (в порівнянні зі свердлом, що не має підточки). У свердел зі зрізаною поперечною кромкою кути різання ще більш вдалі; така заточка сприяє зниженню сили  $P_o$  до 4 раз і збільшенню стійкості свердла. При роботі свердлом з подвійною заточкою сила  $P_o$  і момент  $M$  дуже мало відрізняються від  $P_o$  і  $M$  при роботі свердлом з одинарною заточкою [133].

4) Змащувально-охолоджувальні рідини. При свердлінні композиційних матеріалів застосування змащувально - охолоджуваних рідин не рекомендується. Це пов'язано зі специфічною властивістю композиційних матеріалів - водопоглиненням. Водопоглинання відбувається шляхом заповнення дефектів матеріалу, в результаті чого відбувається розтріскування звязуючого в місцях концентрації залишкових напружень. Виникаючі тріщини приводять до зменшення ефективної довжини волокна, а як наслідок до зменшення міцності. В зв'язку з цим після механічної обробки композиційних матеріалів з використанням змащувально - охолоджуючої рідини доводиться вводити додаткову операцію сушіння, що призводить до додаткових затрат часу. В авіабудуванні через великі габарити деяких деталей проведення операції сушіння ускладнено [5,30,78].

5) Глибина свердління. Зі збільшенням глибини свердління умови різання погіршуються. Відведення стружки ускладнюється, тепловиділення збільшується, зміцнення росте. Все це призводить як до зниження стійкості свердла, так і до підвищення осьової сили і моменту від сил опору різанню. Для полегшення різання на великій глибині у свердел роблять стружкороздільні канавки [134,144].

6) Зношування свердла. Зі збільшенням зносу свердла по задній поверхні сила  $P_o$  збільшується; затуплене свердло порівняно з гострим підвищує параметр  $P_o$  на 10 - 16 %.

### **1.4.3. Вибір методу моделювання.**

Процес обробки ПКМ свердлінням можливо розглянути як систему, рівні якої залежать від певної кількості факторів. Характер їх взаємодії визначає неоднорідність системи, складність її математичного опису.

Задача моделювання полягає у визначенні моделей (залежностей), що пов'язує фактори процесу свердління. По своїй постановці ця задача належить до задач регресійного аналізу. Проте застосування регресійного аналізу при великій кількості факторів призводить до апроксимації моделі малого степеню та її неадекватності. Крім того, метод регресійного аналізу при розв'язанні багато параметричних задач вимагає проведення великої кількості спеціально спланованих експериментів.

Процес свердління належить до класу випадкових погано організованих процесів, особливістю яких є те, що у них не можна прослідкувати причинно-наслідкові зв'язки між вхідними та вихідними параметрами.

Аналіз багатьох методів, що найбільш широко використовуються для моделювання, дозволяє обрати метод групового урахування аргументів (МГУА). Можливість застосування методу МГУА для процесів обробки матеріалів була доведена в роботах під керівництвом проф. Равської Н.С., Родіна П.Р., в роботах Кикотя В.С. [96], Ковальнової Л.І [101], Глоби О.В. [61,62,70], та ін. Експерименти по використанню методу МГУА для процесів фрезерування, свердління різноманітних матеріалів показали високу точність і працездатність отриманих математичних моделей і можливість прогнозування результатів експерименту.

### **1.5. Мета та завдання дослідження.**

**Метою роботи** є підвищення якості отворів у тонкостінних виробах з ортотропних вуглепластиків при свердлінні за рахунок зниження їх дефектності шляхом застосування схеми реверсивного оброблення та розробки інструменту для його реалізації.

Для досягнення поставленої мети в процесі дослідження необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Обґрунтувати перспективність методу реверсивного свердління вугле- та склопластиків та розробити конструкцію реверсивного свердла;
2. Розробити конструкцію пристрою для реверсивного свердління вугле- та склопластиків;
3. Розробити методику аналізу розшарування та визначення зношування свердла при обробці ПКМ на базі віброакустичного сигналу;
4. Розробити методику оцінки відхилення від круглості отворів при свердлінні вугле- та склопластиків;
5. Провести вибір методу математичного моделювання процесу свердління;
6. Провести моделювання сукупного впливу факторів процесу свердління на якість отворів;
7. Провести експериментальні дослідження реверсивного свердла (вплив головного кута в плані на температуру різання та відхилення від круглості), провести порівняльні лабораторні випробування зношування свердел різної геометрії зі стандартними свердлами;
8. Провести промислові випробування розробленого інструменту.

## РОЗДІЛ 2

### РЕВЕРСИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ОТВОРІВ

#### 2.1. Реверсивне свердління вугле- та склопластиків.

В результаті аналізу методів оброблення отворів у ПКМ, було виявлене застосування вібраційного свердління з накладенням на свердло вертикальних коливань з метою уникнення появи тріщин та розшарування шляхом погашення власних вібрацій матеріалу [76].

У роботах [85-87] пропонується застосування реверсивного свердління для металів та вказується, що даний метод дозволяє підвищити стійкість інструменту та якість отворів.

Проте процесом реверсивного свердління вугле- та склопластиків не займалися. Даний метод є перспективним для свердління ПКМ, так як при реверсуванні обертального руху свердла, його різальні кромки працюють почергово, що значно знижує період зношування свердла до певного критерію. Проте схема реверсивного різання, прийнята для металів, не може бути повною мірою прийнятою для ПКМ. Це пояснюється тим, що вугле та склопластики мають ряд характерних особливостей, зокрема шарувату будову, схему накладання шарів, особливості напружено-деформованого стану тощо.

#### 2.1.1. Обґрунтування схеми реверсивного різання ПКМ.

При свердлінні наскрізних отворів у вугле- та склопластиках відбувається зношування по задній різальній кромці шляхом її округлення, при чому це зношування нерівномірне. Найбільше зношування спостерігається біля стрічки. Відомо [17,31,68,74,77,99,144], що при певному значенні величини зношування свердла по задній поверхні спостерігається розшарування матеріалу на виході інструменту.

Враховуючи особливості будови вугле- та склопластиків схема реверсивного оброблення отвору наступна.

При реверсивному свердлінні інструмент спочатку обертається за годинниковою стрілкою, при чому припуск зрізує різальна кромка 1 (рис. 2.1). В цей час різальна кромка 2 чинить незначний за рахунок вже знятого припуску

тиск на матеріал забезпечуючи його ущільнення, що призводить до зминання та додаткового крихкого руйнування матеріалу, полегшуючи його зрізання [144]. Стружка відводиться по поздовжнім канавкам 4. Через малу (але не менше одного) кількість обертів інструменту напрям обертання свердла змінюється на протилежний. В роботу вступає різальна кромка 2. Стружка продовжує відводитись по тим самим поздовжнім канавкам.

У процесі свердління приймає участь бічна допоміжна кромка 3, що виконує роль розгортки.

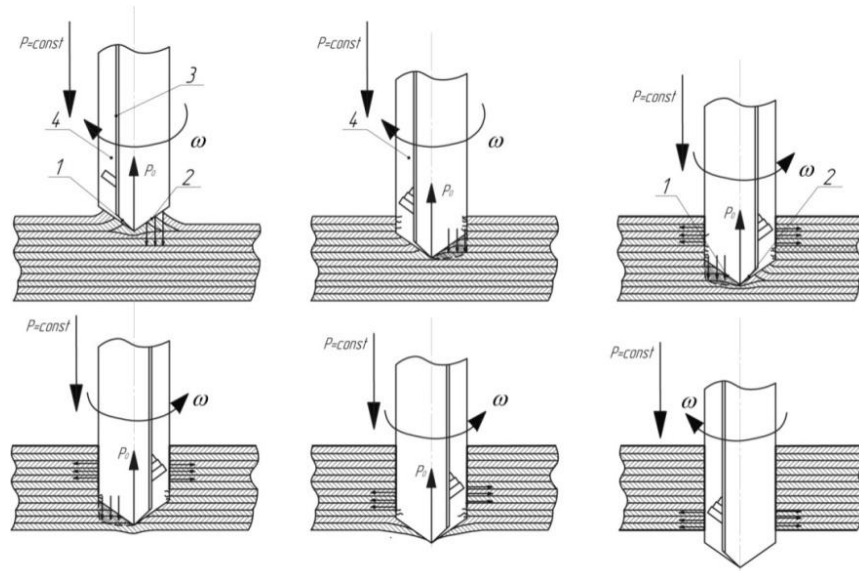


Рис. 2.1. Схема реверсивного різання

У роботі поставлена задача перевірити припущення, що робота бічної різальної кромки дозволяє позбутись розлохмачених волокон матеріалу всередині отвору. Це є одною з відмінностей реверсивного свердління ПКМ та металів, у яких схема зрізання припуску значно відрізняється в силу особливостей будови. Пояснити це можна тим, що процес обробки волокон у вугле- та склопластиках не завжди пов'язаний з їх підрізанням, а часто з загином. При обертанні свердла в одну сторону спостерігається загин волокна та підтримання його в постійному положенні, тоді як при реверсивному свердлінні на волокно діють сили з боку свердла в обидві сторони, що призводить до його відколу.

Реверсивна обробка металів дає можливість подрібнення стружки та покращення її видалення з отвору [85-87]. У вугле- та склопластиках

утворюється пилоподібна стружка. Відмінність при свердлінні ПКМ є зниження дисперсності стружки, що призводить до зниження температури свердла. Характер стружкоутворення та типи стружки залежать від особливостей будови ПКМ та способу їх свердління. Необхідною умовою стружкоутворення є доведення шарів матеріалу до руйнування, яке перебільшує границю пружного деформування. Тому задача розробки схеми різання полягає у зниженні її дисперсності та полегшенні виведення стружки з отвору. Проте взято до уваги, що в тонкостінних виробках, у яких товщина матеріалу менша за діаметр отвору не відбувається потрапляння стружки до шарів матеріалу. Подрібнення стружки можливо забезпечити зміною подачі у моменти зміни напрямку обертання свердла. На цьому положенні базувався вибір схеми різання з забезпеченням постійного осьового навантаження. Також була поставлена додаткова задача розглянути проблему стружкоутворення при свердлінні вугле- та склопластиків а також пояснити вибір матеріалу, взятого для дослідження.

На рис. 2.2 показана зміна кутової швидкості свердла, при постійному осьовому навантаженні.

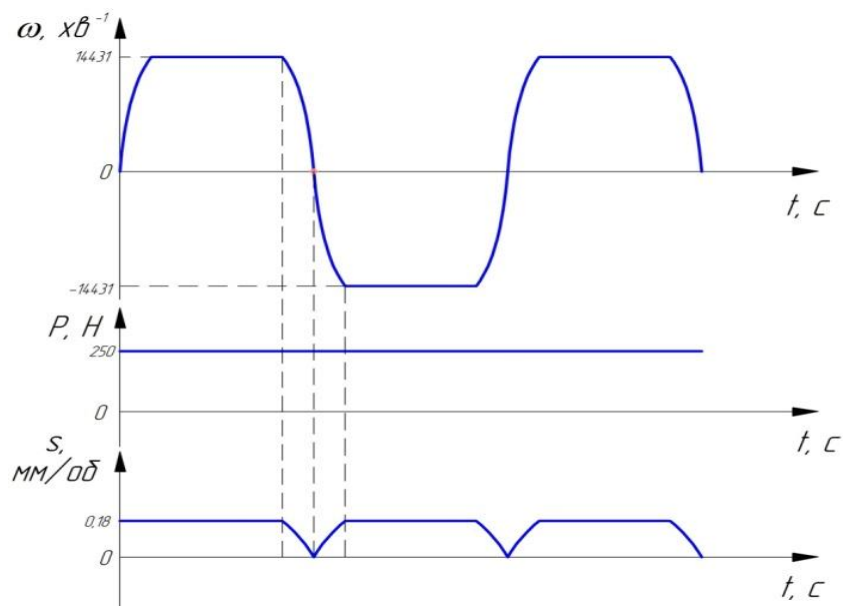


Рис. 2.2.  $P=f(t)$ ,  $s=f(t)$ ,  $\omega=f(t)$  При  $P=Const$

З рисунку видно, що при постійному навантаженні  $P$  в момент  $\omega=0$  відбувається зниження подачі. Це призводить до деякого зниження

продуктивності оброблення. Проте періодична зміна подачі зменшує дисперсність стружки, що дозволяє підвищити якість отворів за рахунок зниження температури в зоні різання та підвищення стійкості інструменту.

## **2.2. Проблема стружкоутворення при свердлінні вугле- та склопластиків.**

Полімерні композиційні матеріали армовані волокнами звичайно проявляють високу анізотропію властивостей в силу їх шаруватої структури. Саме ця характерна властивість зумовлює значні відмінності процесу свердління ПКМ та оброблення металів. Процес стружкоутворення при свердлінні однонаправлених ПКМ залежить від кута направленості волокон та величини кутів свердла (особливо переднього та головного кута в плані). В результаті формується 1 з наступних типів стружки (рис. 2.3): 1 – стружка розшарування (кут напрямленості волокон  $\theta$  прямує до  $0^\circ$ ) (рис. 2.3, а), 2 – стружка поздовжнього згину (кут напрямленості волокон  $\theta$  прямує до  $0^\circ$ , передній кут інструменту нульовий або від'ємний) (рис. 2.3, б), 3 – стружка, що формується зрізанням волокон (волокна ПКМ руйнуються перпендикулярно до своїх осей в результаті міжшарового зсуву зі стиском,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ) (рис. 2.3, в, г, д), 4 – стружка мікророзриву ( $105^\circ < \theta < 150^\circ$ , супроводжується мікроруйнуванням оброблюваного матеріалу) (рис. 2.3, е).

Дослідження впливу різних факторів на процес стружкоутворення показав, що на тип стружки впливають кут напрямленості волокон по відношенню до головного напрямку різання та передній кут інструменту, а також радіус округлення різальної кромки, матеріал матриці та наповнювача, спосіб армування.

Кут спрямованості волокон  $\theta$  і передній кут  $\gamma$  впливають на механізм стружкоутворення і тип стружки при різанні ПКМ найбільше. При різанні з розташуванням вектора швидкості різання паралельно волокнам ( $\theta = 0^\circ$ ) інструментом з великим позитивним переднім кутом  $\gamma$  стружка формується за рахунок розшарування і крихкого зламу [27].

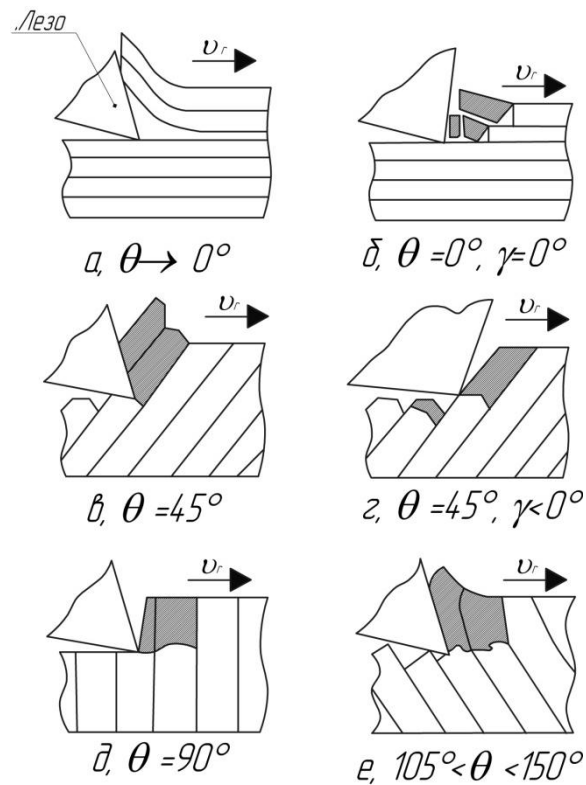


Рис. 2.3. Механізми стружкоутворення і типи стружки, що формуються при прямокутному різанні вуглепластика гостро заточеним інструментом ( $v_r$  – напрям сходження стружки)

Кут спрямованості волокон  $\theta$  і передній кут  $\gamma$  впливають на механізм стружкоутворення і тип стружки при різанні ПКМ найбільше. При різанні з розташуванням вектора швидкості різання паралельно волокнам ( $\theta = 0^\circ$ ) інструментом з великим позитивним переднім кутом  $\gamma$  стружка формується за рахунок розшаровування і крихкого зламу [27].

Задній кут  $\alpha$  не робить істотного впливу на механізм формування стружки або топографію обробленої поверхні, за винятком незначного підвищення якості обробленої поверхні при великих значеннях  $\alpha$  [27].

Радіус округлення різальної кромки. В умовах різання з малим відношенням товщини зрізу до радіусу округлення різальної кромки механізми стружкоутворення змінюються зі зміною  $\rho$ , якщо радіус округлення різальної кромки порівняний або менший за поперечний розмір волокнистого наповнювача, то волокна легко зрізаються і процес еквівалентний процесу різання абсолютно гострим лезом. Волокна відштовхуються (пружно

віджимаються) і погано зрізаються, коли радіус округлення різальної крайки  $r$  приблизно у 5-10 разів більший за діаметр волокна наповнювача.

Матеріал матриці також впливає на процес формування стружки. Армвані вуглецевим волокном реактопласти (вуглепластики), які є більш міцними і більш крихкими в порівнянні з термопластами, утворюють елементну, порошкоподібну стружку за рахунок крихкого руйнування матриці і волокнистого наповнювача. При цьому може спостерігатися розтріскування матеріалу матриці.

Залежно від механічних і фізичних властивостей волокнистого наповнювача ПКМ також проявляють різні механізми руйнування і морфологію стружки при різанні. При різанні ПКМ, армованих вугле - і скловолокном, спостерігається крихкий злам волокон, а при різанні ПКМ на основі арамідних волокон - пластичний розрив волокнистого наповнювача. Різання ПКМ на основі скловолокна супроводжується частковим вигином волокнистого наповнювача і утворенням тріщин. Це призводить до виривання волокон з матеріалу матриці.

Таким чином, особливості будови ПКМ і їх руйнування значною мірою характеризують специфічні умови процесів стружко утворення і зносу робочих поверхонь лезового інструменту.

До них можна віднести:

1. Порівняно малу міжшарову міцність ПКМ, здатну привести до розшарування ПКМ під дією сил різання;
2. Малу пластичність ПКМ, що приводить до утворення при різанні елементної стружки;
3. Значну пружність матеріалу, яка викликає зменшення діаметра отворів при їх обробці, а також великі сили тертя на задніх поверхнях інструменту, що вимагають збільшення задніх кутів леза інструменту;
4. Токсичність і шкідливість стружки, що викликають необхідність в їх ефективному видаленні із зони обробки по всій площі стружкових канавок;

5. Мала теплопровідність ПКМ, яка веде до інтенсивного розігріву інструменту навіть при відносно невеликих швидкостях різання.

### **2.3. Вибір типу ПКМ для проведення експериментальних досліджень.**

Результат свердління ПКМ також значною мірою залежить від типу армування матеріалу. Тому важливою задачею був вибір типу оброблюваного матеріалу за конструкційним принципом.

Відомо, що за орієнтацією і типом армування всі КМ можна розбити на дві групи: ізотропні і анізотропні.

*Ізотропними* називають матеріали, що мають однакові властивості у всіх напрямках. До числа ізотропних відносяться дисперсно-зміцнені і хаотично армовані матеріали. В першому випадку зміцнюючі елементи мають приблизно рівноосну форму, в другому зміцнення здійснюється короткими (дискретними) частинками голчатої форми, хаотично орієнтованими в просторі.

*Анізотропними* називають матеріали, властивості яких залежать від напрямку. До таких КМ відносять матеріали, волокна яких орієнтовані в певних напрямках – однонаправлені, шаруваті і трьохмірноармовані. Анізотропія КМ конструкційна: її спеціально закладають в КМ при виготовленні конструкції, де вона найбільш бажана залежно від технологічних потреб виробництва. На відміну від такої анізотропії існують технологічна анізотропія, що виникає при пластичній деформації ізотропних матеріалів (металів), і фізична анізотропія, властива кристалам у зв'язку з особливостями будови їх кристалічних ґраток.

В техніці найчастіше використовують анізотропні КМ з певною симетрією властивостей. При вивченні їх фізико-механічних характеристик, матеріал представляють як деяке суцільне однорідне середовище, що ідеалізується, з відповідною симетрією будови і властивостей.

Найбільш часто практично важливі орієнтовані КМ вдається представити як ортотропні або як трансверсально ізотропні середовища. *Ортотропними (ортогонально анізотропними)* називають матеріали, що

характеризуються наявністю в кожному елементарному об'ємі трьох взаємно перпендикулярних площин симетрії властивостей. До таких матеріалів можна віднести КМ, армовані волокнами з подовжньо-поперечним укладанням (рис. 2.4), а також шаруваті КМ, армовані в двох неортогональних напрямках  $x_1'$  і  $x_2'$ , під кутом  $2\gamma$  (рис. 2.5) з правильним чергуванням шарів.

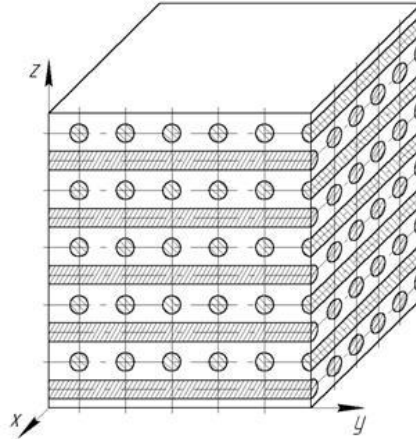


Рис. 2.4. Схематичне зображення структури ортотропного КМ з подовжньо-поперечним укладанням волокон

В останньому випадку площинами симетрії будуть серединна площина листа і дві площини, перпендикулярні до неї які проходять через бісектриси  $x_1$  та  $x_2$  кутів  $2\gamma$  і  $\beta$ .

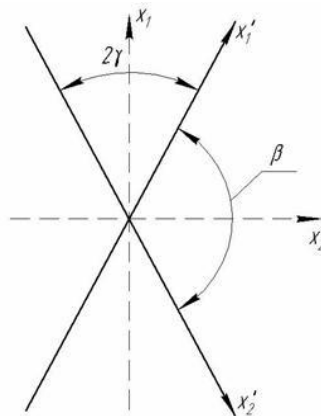


Рис. 2.5. Напрями осей армування в ортотропних КМ з неортогональним укладанням волокон

Зважаючи на технологічність та розповсюдженість, а також полегшення аналізу процесу оброблення, у роботі для дослідження був взяти ортогонально-

анізотропний (ортотропний) вуглепластик з перехресним армуванням під кутом  $\beta=90^\circ$ , у якому при свердлінні перпендикулярно викладці шарів утворюється пилоподібна стружка.

#### **2.4. Конструкція свердла для реверсивного свердління.**

Випробування різноманітних конструкцій свердел (стандартне, двохступінчате, трьохпере), які призначені для однонапрявленого обертання інструменту, показали їхню неефективність при реверсивному обробленні, так як різання здійснюється тільки при обертанні інструмента в одну сторону.

Тому для реалізації реверсивного свердління вугле- та склопластиків основною задачею є створення спеціальної конструкції свердла, що дозволяє здійснювати різання у двох напрямках.

Задачею інструменту є забезпечення високої якості отворів у ПКМ за рахунок реверсивного (двонапрявленого) свердління (Свердло для осцилюючої обробки полімерних композиційних матеріалів: пат. на корисну модель 90542 Україна: МПК-2013 G01L 3/18 B23B 41/16 B29L 9/00 / О.В. Глоба, І.О. Булах, - № у 2014 00845 заявл. 30.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. №10/2014) [140].

Сутність роботи інструменту пояснюється кресленням, де на рис. 2.6 зображена схема інструменту, на рис. 2.7 - модель свердла.

Інструмент рис. 2.6 містить головну різальну кромку 1, допоміжну різальну кромку 2, яка імітує роботу розгортки, робочу частину 3 з прямими стружковими канавками та відсутністю зворотної конусності, шийку 4, циліндричний хвостовик 5 (можливе застосування хвостової частини, виконаної по конусу Морзе).

Відсутність зворотної конусності є важливим параметром свердла тому, що допоміжні бічні різальні кромки виконують роль розгортки (мінімальна конусність розгортки 1:50 - ДСТУ 6312-52). Наявність зворотної конусності, що перевищує мінімальну конусність розгортки, робить неможливою роботу свердла як розгортки при переточуванні.

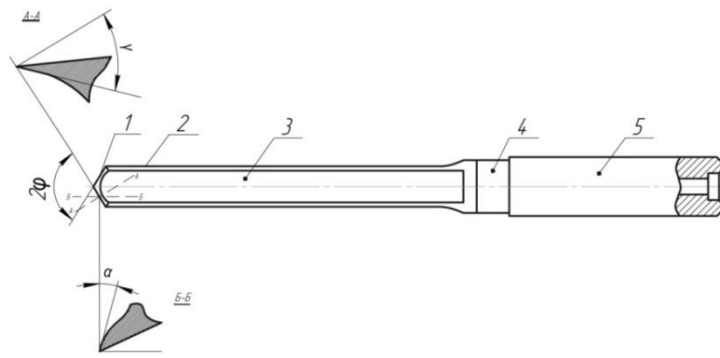


Рис. 2.6. Схема реверсивного свердла для обробки ПКМ

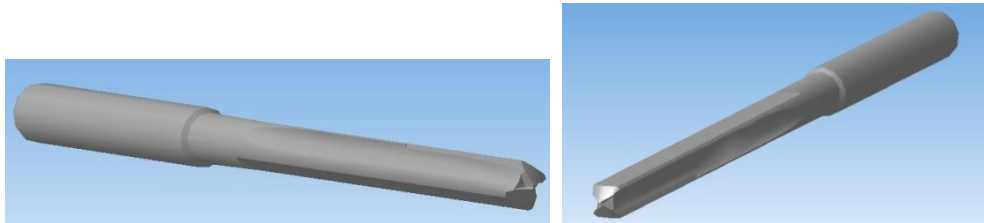


Рис. 2.7. 3D модель реверсивного свердла

На відміну від існуючих конструкцій свердел для оброблення вугле- та склопластиків, запропоноване свердло дозволяє підвищити стійкість за рахунок меншого навантаження на різальну кромку, зменшити нагрівання, за рахунок малої дисперсності стружки і, таким чином, знизити імовірність появи розшарування матеріалу.

Геометричні параметри свердел обирають на основі літературних джерел і рекомендацій до оброблення ПКМ. У таблиці 2.1 наведені рекомендовані для ПКМ параметри інструменту.

Таблиця 2.1

Геометричні параметри різальної частини свердел

Оброблювальний матеріал	Матеріал різальної частини свердла	Геометричні параметри свердла, °		
		$2\varphi$	$\gamma$	$\alpha$
Склопластик	Р6М3, Р6М5, Р12, та ін.	100-110	10-15	10-20
	ВК3, ВК3-М, ВК4, та ін.	100-110	10	10-20
Вуглепластик	Р6М3, Р6М5, Р12, Р18	90...130	10...15	10...20
	ВК3, ВК3-М, ВК6-М, ВК8	90...120	10	15...20

На рисунку 2.8 поданий елемент креслення реверсивного досліджуваного свердла, на якому вказані величини кутів  $\alpha$ ,  $\gamma$  та  $2\phi$ .

Передній кут  $\gamma$ . Передній кут не робить істотного впливу ні на один з досліджуваних вихідних параметрів якості обробки, тому при виборі його значення необхідно керуватися, насамперед, необхідністю забезпечення максимального кута загострення для забезпечення найкращих умов тепловідведення та збереження міцності ріжучого клина.

Задній кут  $\alpha$ . Вплив заднього кута визначається насамперед пружним відновленням оброблюваного матеріалу [134,139], причому із зміною величини заднього кута більш інтенсивно змінюються радіальна складова за рахунок зміни нормальної сили на задній поверхні (збільшення фактичної площі контакту по задній поверхні). Це призводить до зростання напруг  $\sigma_y$  і збільшенню глибини тріщин розшарування вздовж волокна.

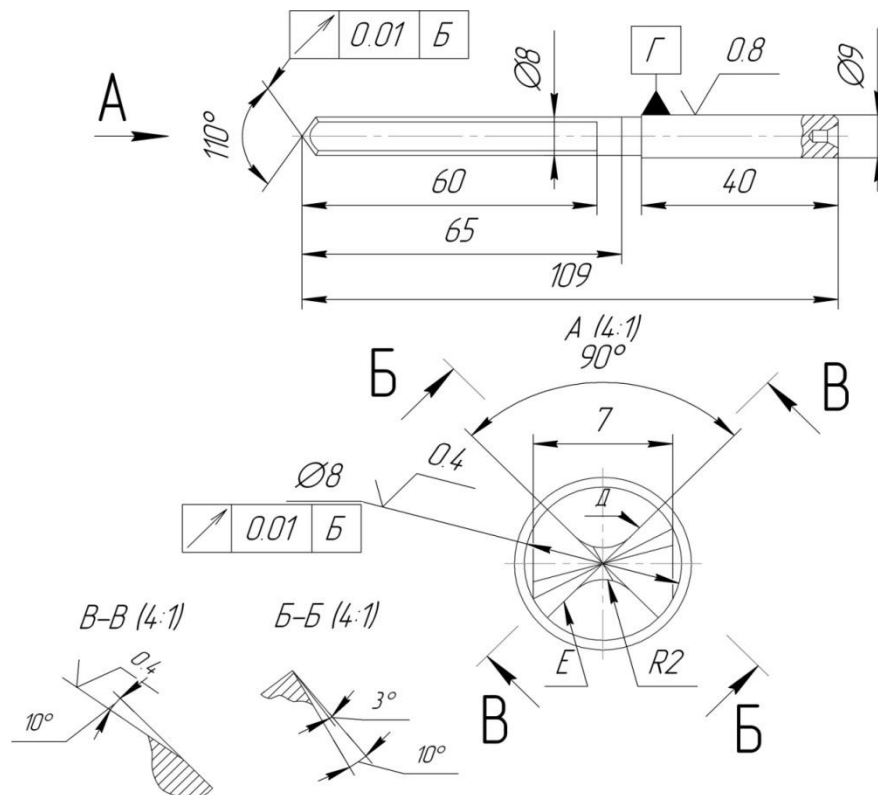


Рис. 2.8. Креслення реверсивного свердла розробленої конструкції

Збільшення заднього кута забезпечує зниження енерговитрат при різанні за рахунок зменшення сил на задній поверхні, однак одночасно з цим погіршуються умови тепловідведення через зменшення кута загострення.

Задній кут був обраний  $10^\circ$ , так як він рекомендований для оброблення вугле- та склопластиків.

За даними [17,32,65,7,144] великий вплив на якість отвору має головний кут в плані  $\phi$ . Вибір головного кута в плані зумовлюється видом напружено-деформованого стану композиту. У роботі була поставлена задача перевірити, чи можна рекомендувати кут  $2\phi$ , рекомендований для стандартних свердел, для реверсивного свердління. Тому для створення оптимальної конструкції реверсивного свердла та дослідження його геометрії було виготовлено 3 свердла з рекомендованими кутами  $2\phi$ , а саме  $110^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ .

Зі збільшенням головного кута в плані зменшується відношення ширини до товщини зрізу, що призводить до зменшення складової -  $P_z$ .

Так як кут в плані чинить вплив на складову осьової сили  $P_z$ , то стоїть задача обрати такі кути  $2\phi$ , які б показали зменшення  $P_z$ . Тому необхідно провести аналіз та розрахувати значення величини  $P_z$  при свердлінні вугле- та склопластиків. Розраховані значення складової  $P_z$  необхідно порівняти з величиною осьового навантаження розшарування, отриманою експериментально, для того щоб перевірити, чи можливо застосовувати реверсивне свердло з обраними кутами  $2\phi$  для підвищення якості отворів у вугле- та склопластиках.

## 2.5. Розрахунок силових характеристик при свердлінні.

Силві характеристики, що діють на свердло в процесі його роботи визначаються осьовою силою  $P_0$  (силі подачі), та крутного моменту  $M_c$  (моменту опору). Згідно досліджень [144], у яких подані результати математичної обробки багатofакторного експерименту по визначенню залежностей для  $P_0$  та  $M_c$  при рівні значущості  $q=0,05$ , були застосовані розрахункові залежності для осьової сили  $P_0$ :

$$P_0 = C_p D^{x_p} S_0^{y_p} K_p,$$

$$K_p = K_{ph} K_{p\phi} K_{p\alpha} K_{p\gamma}$$

Коефіцієнти для оброблюваного матеріалу типу вуглепластик та склопластик наведені у таблиці 2.2 [144].

Таблиця 2.2

Коефіцієнти для розрахунку осьової сили для вугле- та склопластика

Матеріал	$C_p$	D, мм	$x_p$	$y_p$	$S_0$ , мм/об	$K_{Ph}$ (при $h=0$ )	$K_{P\phi}$	$K_{Pa}$	$K_{Py}$
Вуглепластик	79,8	8	1,02	0,85	0,08-0,62	1	1,4	1,15	1
Склопластик	83,4	8	1,03	0,81	0,08-0,62	1	1,4	1,15	1

Для даних матеріалів результати розрахунку осьової сили при в діапазоні значень подачі  $S_0=0,08 - 0,62$  мм/об для вуглепластика (В) та склопластика (С) наведені у таблиці 2.3 та на рис. 2.9.

Таблиця 2.3

Розраховані значення осьової сили при зміні подачі

S	D=6 mm		D=8 mm		D=10 mm		D=12 mm	
	В	С	В	С	В	С	В	С
0,08	93,36	109,9	125,2	147,8	157,2	185,99	189,33	224,41
0,18	186	211,96	249,43	285,06	313,19	358,72	377,20	432,832
0,28	270,79	303,17	363,13	407,73	455,94	513,08	549,13	619,0798
0,38	351,04	388,25	470,76	522,15	591,08	657,07	711,88	792,8177
0,48	428,15	469,13	574,16	630,93	720,9	793,95	868,25	957,9746
0,58	502,87	546,84	674,36	735,45	846,72	925,48	1019,78	1116,671
0,62	532,2	577,2	713,7	776,27	896,11	976,85	1079,26	1178,653

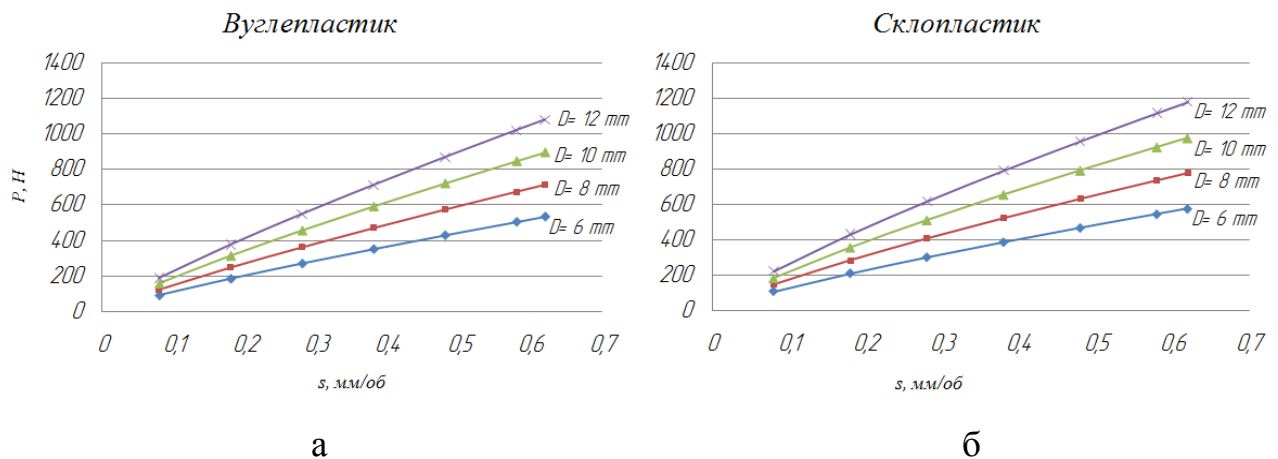


Рис. 2.9. Графічні залежності осьової сили від величини подачі для різного діаметра інструменту (а - вуглепластик, б - склопластик)

Наступним завданням було встановити залежність осьової сили від кута в плані. Для цього змінювався коефіцієнт  $K_{\text{рф}}$  ( $90^\circ - 0,75$ ;  $100^\circ - 1$ ;  $110^\circ - 1,4$ ;  $120^\circ - 2$ ). Досліджувалася залежність  $P_0=f(2\varphi)$  при зміні діаметра свердла та подачі з метою перевірити ступінь впливу цих величин на осьову силу (рис. 2.10, В – вуглепластик, С – склопластик).

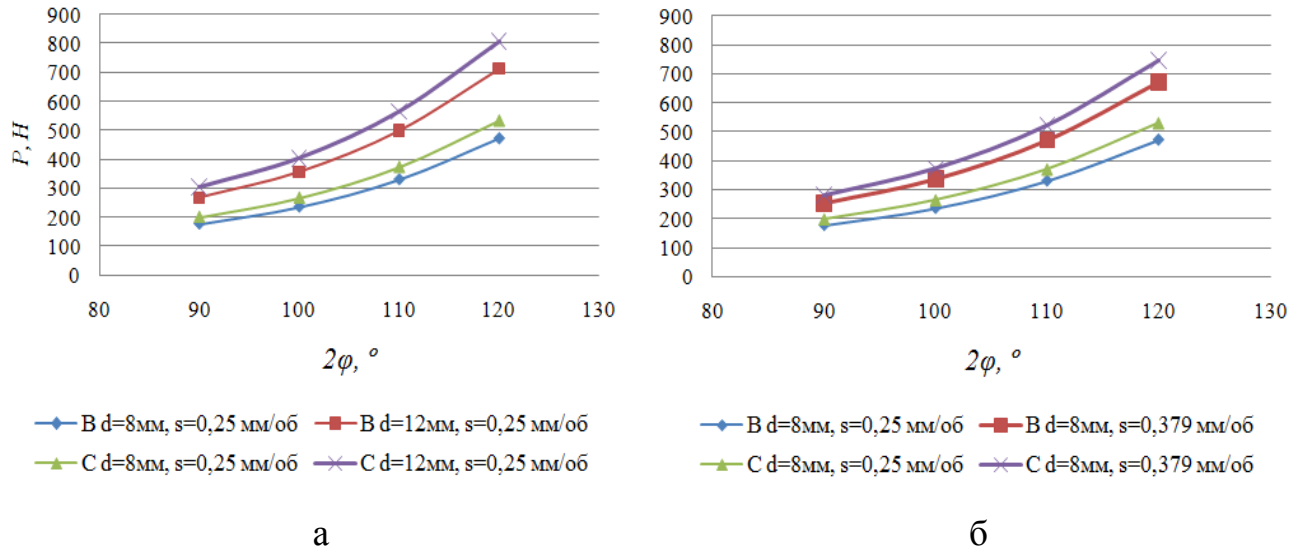


Рис. 2.10. Графічна залежність осьової сили від кута в плані при зміні діаметра свердла і подачі (а – при зміні діаметра, б – при зміні подачі)

З графіків рис. 2.10 видно, що при збільшенні кута в плані осьова сила зростає, а збільшення діаметра інструменту більшою мірою впливає на зміну осьової сили, ніж підвищення подачі. Отже, головний кут в плані чинить достатньо великий вплив на осьову силу. На основі даного розрахунку для дослідження геометричних параметрів свердел для реверсивного свердління взята зміна головного кута в плані при незмінних передньому та задньому кутах.

Наступною задачею є визначення параметра свердління, який необхідно обирати для дослідження шляхом встановлення ступеню впливу кута в плані.

Величину крутного моменту особливо необхідно брати до уваги, коли йдеться про пружне відновлення матеріалу.

Крутний момент було розраховано за наступними формулами [134,144]:

$$M_C = C_m D^{x_m} S^{y_m} K_m,$$

$$K_m = K_{hm} K_{\varphi m}$$

У таблиці 2.4. наведені коефіцієнти для вугле- та склопластиків, взяті для розрахунку (Табл. 2.4):

Таблиця 2.4

Вхідні дані для розрахунку крутного моменту при обробленні вугле- та склопластика

Матеріал	$C_m$	$D$ , мм	$x_m$	$y_m$	$S$ , мм/об	$K_{hm}$ ( $h=0$ )	$K_{\phi m}$
Вуглепластик	0,198	8	1,55	0,97	0,08-0,62	1	0,97
Склопластик	0,21	8	1,66	0,99	0,08-0,62	1	0,97

На рисунках 2.11 та 2.12 Показана залежність крутного моменту від кута в плані при постійному діаметрі свердла ( $D=8$ мм) та від діаметра інструменту при постійній подачі ( $S=0,5$  мм/об).

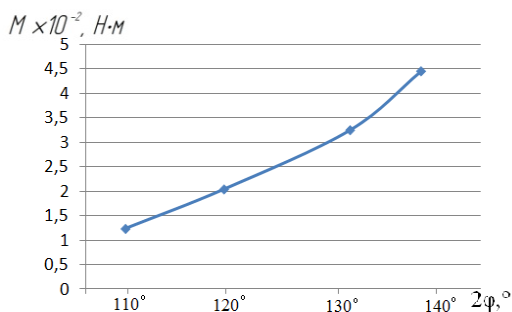


Рис. 2.11. Графічна залежність  $M=f(2\phi)$  для вуглепластика ( $S=0,08$  мм/об,  $D=8$  мм)

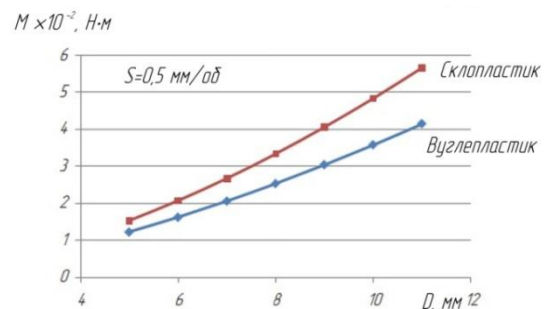


Рис. 2.12. Графічна залежність  $M=f(D)$  для склопластика та вуглепластика ( $S=0,5$  мм/об,  $D=5-12$  мм)

З графіків видно, що крутний момент для склопластика більше, ніж для вуглепластика при одаковій подачі інструмента. Це треба враховувати при виборі параметрів інструменту та процесу різання при обробленні склопластиків.

Вплив кута в плані на крутний момент менш виражений, ніж для осьової сили. Тому для подальшого дослідження як важливий параметр прийнято осьову силу.

## 2.6. Пристрій для реалізації способу реверсивного свердління.

До можливих методів реверсування обертального руху свердла можна віднести зокрема:

1. Застосування ексцентрика для перетворення коливального руху в обертальний [126];

2. Електромеханічні методи реверсування (застосування електричних двигунів), зокрема засновані на реверсі електродвигуна на основі зміни полярності обмоток збудження та застосування диференціальних зубчастих передач тощо. Недоліком такого методу реверсування обертального руху є габаритність установок та складність їх конструкцій.

3. Застосування зубчастих передач (механічний метод реверсування), а саме використання рейкової передачі для перетворення поступального руху в обертальний.

Для реверсування обертального руху свердла в роботі було обрано механічний метод реверсування у зв'язку з відносно низькими затратами на виробництво та можливістю зміни габаритів пристрою.

Для реалізації реверсивного свердління, при якому утворюється мінімально дисперсна структура стружки необхідно було розробити пристрій, забезпечує двонаправлене свердління композиційних матеріалів. (Пристрій для осцилюючого свердління композиційних матеріалів: патент на винахід 106463 Україна: МПК-2013 G01L 3/18 B23B 41/16 B29L 9/00 / О.В. Глоба, І.О. Булах, - № а 2014 00844 заявл. 30.01.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. №16/2014.) [131].

Реверсування забезпечується за рухунок того, що в пристрої наявна пара: рухоме зубчасте колесо та рухома зубчаста рейка, що забезпечує двонаправлений рух свердла. Внаслідок такої конструкції пристрою підвищується ефективність процесу обробки ПКМ та якість і точність отворів.

Сутність пристрою пояснюється на рис. 2.13, де наведена загальна схема пристрою для реверсивного свердління.

Пристрій рис. 2.13 містить корпус 1, хомут 2, посадочне місце для шпинделя верстата 3, посадочне гніздо для конуса шпинделя верстата 4, підшипники 5, воділо 6, підшипники 7, зубчасте колесо 8, зубчастий вінець 9, кулачок 10, запресований в отвір воділа 6, штифт 11 для приводу зубчастої рейки 12 в рух, бронзову втулку 13 для зменшення опору, колесо-шпиндель 14,

підшипники 15, патрон 16, свердло 17, кришка 18.

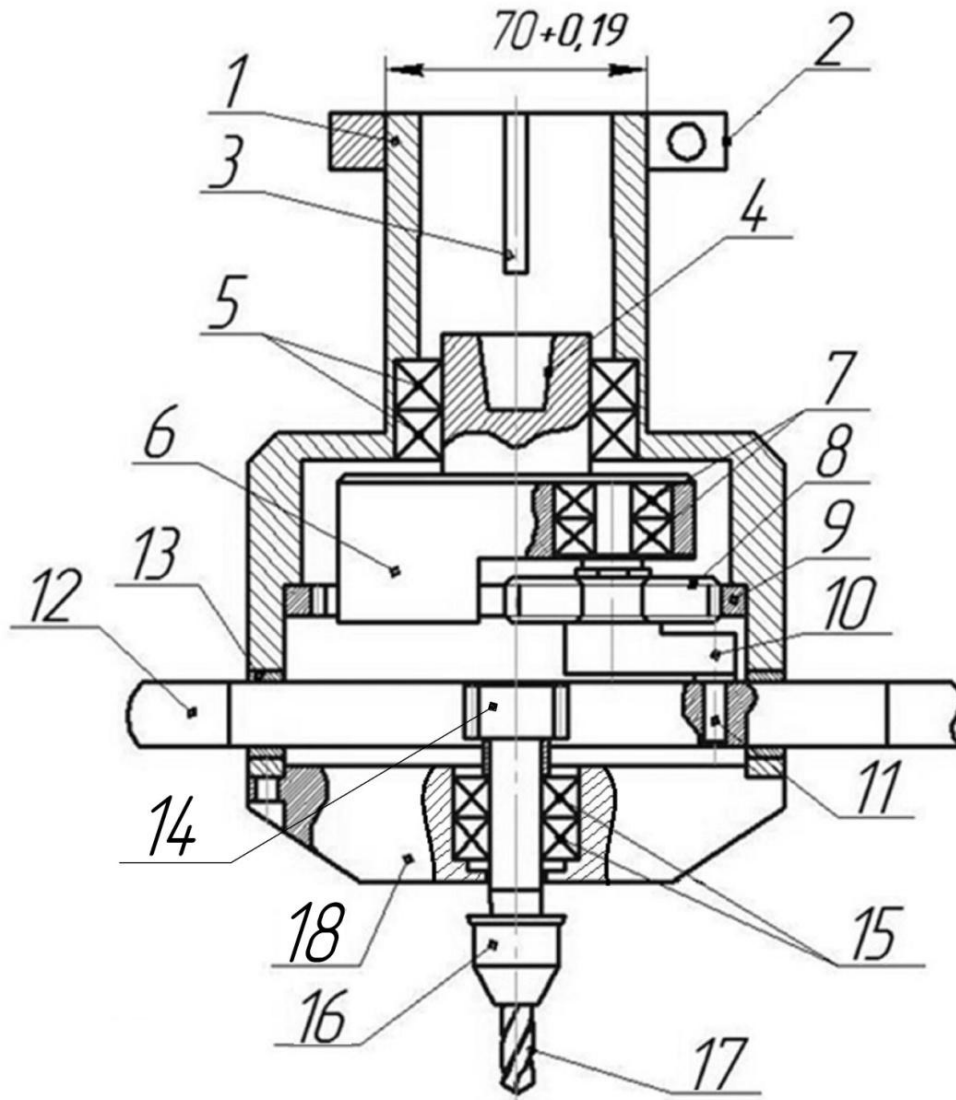


Рис. 2.13. Схема пристрою для реверсивного свердління

Робота пристрою здійснюється наступним чином.

Пристрій встановлюється та закріплюється на пінолі шпинделю вертикального свердлильного верстата за рахунок хомута 2 (рис. 2.13) та посадочної поверхні 3 у посадочне гніздо 4. Обертання шпинделя при вмиканні верстата приводить в рух воділо (маховик) 6, яке поєднане з рухомим зубчастим колесом 8. Це являє собою систему базування та передачі руху від шпинделя верстата.

Зубчасте колесо рухається вздовж зубчастого вінця 9, та за рахунок кулачка 10, що запресований у отвір воділа 6 та штифта 11, що рухомо поєднаний з зубчастою рейкою 12, приводить її в рух. Зубчаста рейка виконує зворотно-

поступальний рух, і в свою чергу, призводить до реверсивного руху зубчатого колеса-шпинделя 14 та свердла 17. Для зменшення опору при русі зубчастої рейки передбачена бронзові втулки 13, а також підшипники 5, 7 та 15.

У роботі поставлена задача перевірити можливість запропонованого пристрою підвищити ефективність обробки отворів у композиційних матеріалах, дозволити уникнути розшарування та розлохмачування волокон матеріалу за рахунок забезпечення реверсивного свердління.

### 2.6.1. Зубчаті передачі пристрою.

У таблиці 2.5 наведені геометричні параметри зубчастих коліс, що застосовані при побудові пристрою для реверсивного свердління.

Суть роботи пристрою полягає у наявності 2-х типів зубчастих передач.

Пріоритет у використанні зубчатих передач був зумовлений їх позитивними рисами, а саме: можливість їх застосування в широкому діапазоні швидкостей, потужностей та передаточних відношень; висока навантажувальна здатність та малі габарити; висока довговічність та надійність роботи; сталість передаточного відношення; простота обслуговування.

Таблиця 2.5

Параметри зубчастих коліс пристрою

Назва параметра	Формула	Зубчасте колесо	Зубчастий вінець	Колесо-шпиндель
Модуль колеса	$m=r/\pi$	1,25	1,25	1,25
Кількість зубів	$z$	43	84	20
Коефіцієнт зміщення	$x$	0	0,528	0,4
Ділильний діаметр	$D=mz$	53,75	105	25

вершин зубів				
Діаметр западин зубів	$d_2 = D - 2*(c+m)$	50,625	108,125	21,875
Радіальний зазор пари вихідних контурів	$c = 0,25m$	0,3125	0,3125	0,3125
Діаметр основного кола	$d_3 = \cos 20^\circ * D$	50,5	98,66	23,49

На рисунку 2.14 показана схема внутрішнього зубчастого зчеплення зубчастого колеса і вінця. За рахунок маховика відбувається передача руху від шпинделя верстата до зубчастого колеса, яке, в свою чергу приходить в рух по зубчастому вінцю.

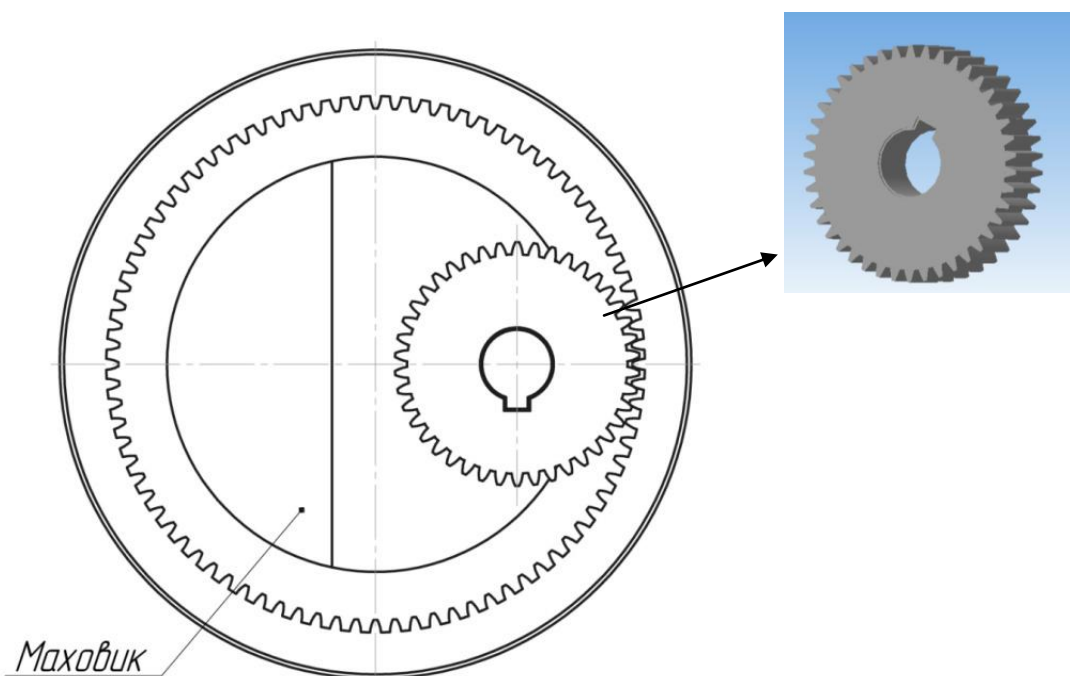


Рис. 2.14. Механізм передачі руху від шпинделя верстата до зубчастого колеса.

На рис. 2.15 показані обидва види зубчастих передач, застосованих у пристрої: зубчаста передача колесо-вінець (внутрішня циліндрична передача), та передача зубчаста рейка - колесо шпиндель.

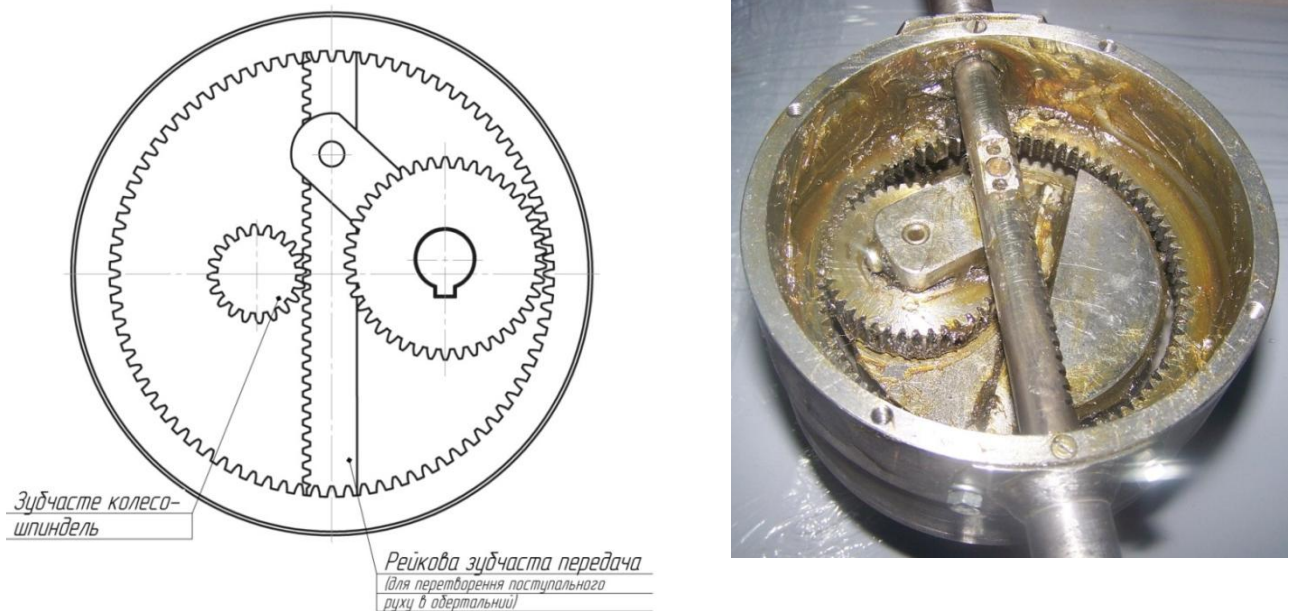


Рис. 2.15. Зубчасті передачі, що застосовані у пристрої

Рейкова зубчаста передача застосована для перетворення зворотно-поступального руху рейки у обертальний рух колеса-шпинделя, що і забезпечує реверсування обертального руху інструменту, закріпленого у шпинделі.

На рисунку 2.16 показаний механізм передачі руху від зубчастого колеса до зубчастої рейки для приведення її у зворотно-поступальний рух. Передача руху здійснюється за допомогою важеля (кулачка) через штифт, що поєднаний нерухомо з рейкою.

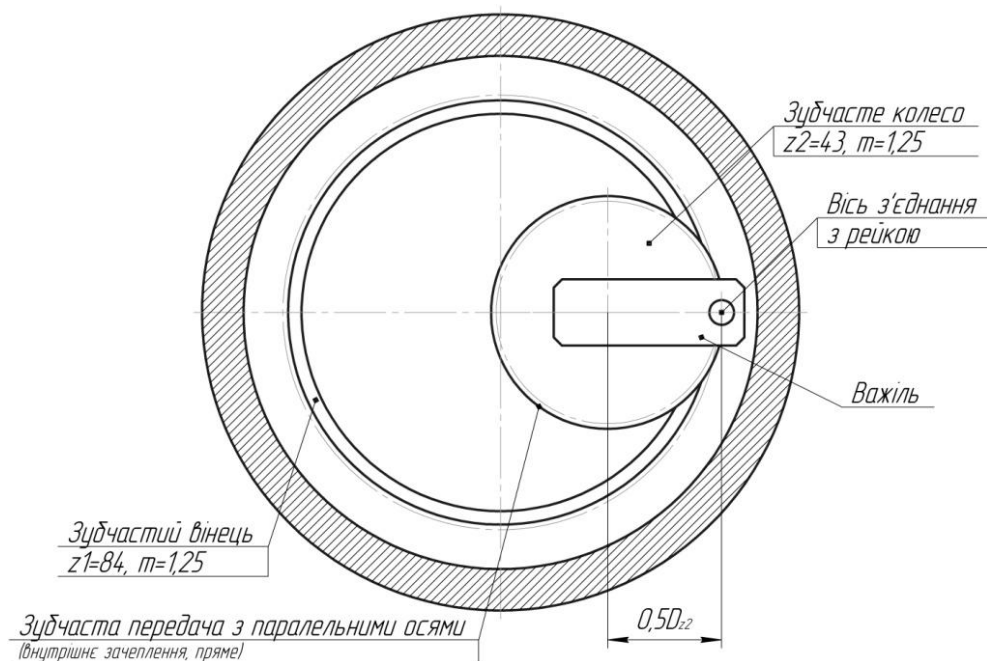


Рис. 2.16. Механізм передачі руху від зубчастого колеса до зубчастої рейки

Важливим моментом було недопущення «мертвої точки» зубчастої рейки. Тому шляхом викреслювання було встановлено, що відстань між віссю зубчастого колеса та віссю з'єднання колеса з рейкою має бути рівна  $l=0,5D_{z2}$  (половина ділильного діаметра зубчастого колеса).

Параметри зубчастої рейки.

Креслення зубчастої рейки приведенне на рисунку 2.17.

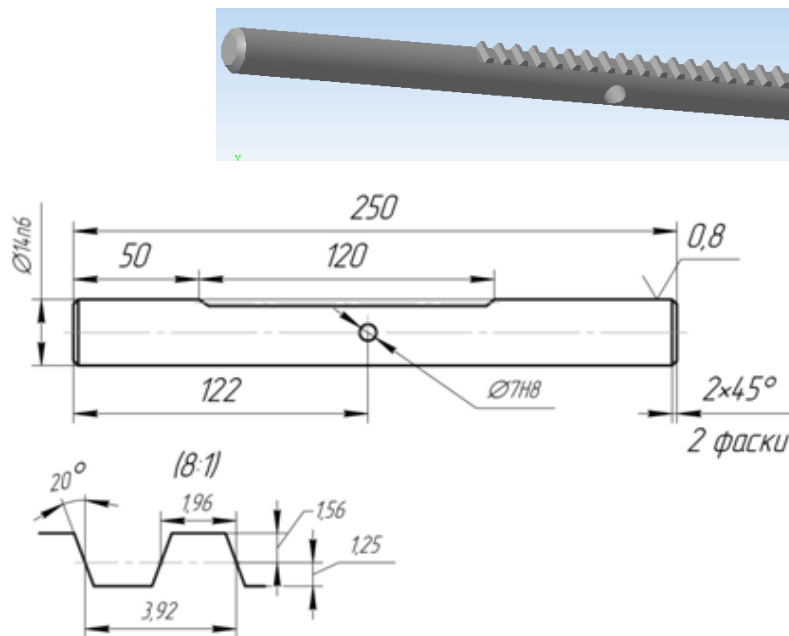


Рис. 2.17. Креслення зубчастої рейки та її 3D модель

Рейкова передача необхідна для перетворення обертального руху в поступальний. В нашому випадку даний тип передачі застосований навпаки для приведення зубчастого колеса-шпинделя в обертальний рух за рахунок зворотно-поступального руху зубчастої рейки.

### 2.6.2. Кінематичний розрахунок пристрою для реверсивного свердління.

Для проведення розрахунку пристрій був поділений на три функціональні вузли: 1) Маховик – зубчате колесо – зубчатий вінець; 2) зубчате колесо – кулачок – зубчата рейка; 3) зубчата рейка – зубчате колесо-шпиндель.

1. Вузол 1 (рис. 2.18). Для розрахунку була взята схема планетарного механізму з нерухомим зубчастим вінцем та сателітом.

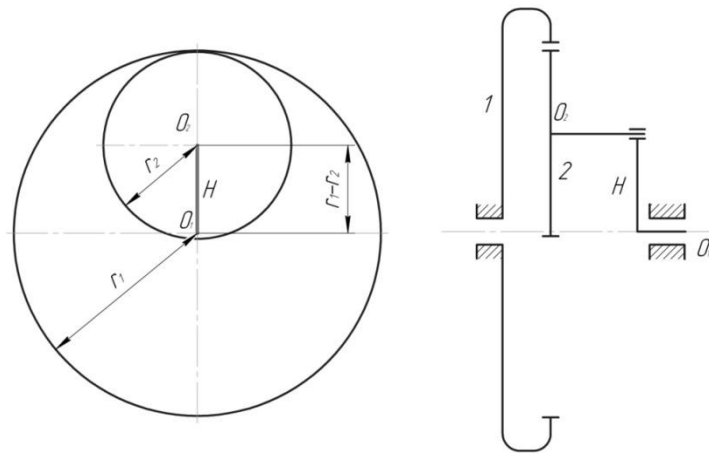


Рис. 2.18. Планетарний механізм

Вхідні параметри:

n = 880 об/хв. – частота обертання

шпинделя вертикально

свердлильного верстата.

$$\omega = 2\pi n = 5526,4 \text{ хв}^{-1}$$

Параметри зубчастих коліс:

$$m = 1,25$$

$$z_1 = 84$$

$$z_2 = 43$$

$$d_1 = 105 \text{ mm}$$

$$d_2 = 53,75 \text{ mm}$$

$$v_{O_2} = \omega_2 r_2 = -\omega_H (r_1 - r_2);$$

$$u_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_H} = \frac{r_2 - r_1}{r_2} = 1 - \frac{r_1}{r_2}$$

$$\omega_H = \omega = 5526,4 \text{ хв}^{-1}; \quad \omega_2 = \frac{\omega_H (r_1 - r_2)}{r_2};$$

$$\omega_2 = \frac{5526,4 \left( \frac{105}{2} - \frac{53,75}{2} \right)}{\frac{53,75}{2}} = 5269,36 \text{ хв}^{-1};$$

$$u_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{43}{84} = 0,51;$$

$$u_{2H} = \frac{\omega_2}{\omega_H} = 1 - u_{21} = 0,48;$$

$v_k = \omega_2 r_2 = 141614,05 \text{ мм/хв}$ ; - лінійна швидкість зубчастого колеса навколо своєї осі

$$v_{Hk} = \omega_H (r_1 - r_2) = 141614 \text{ мм/хв};$$

2. Вузол 2 (рис. 2.19). Для розрахунку даного вузла була обрана схема кривошипно-шатунного механізму.

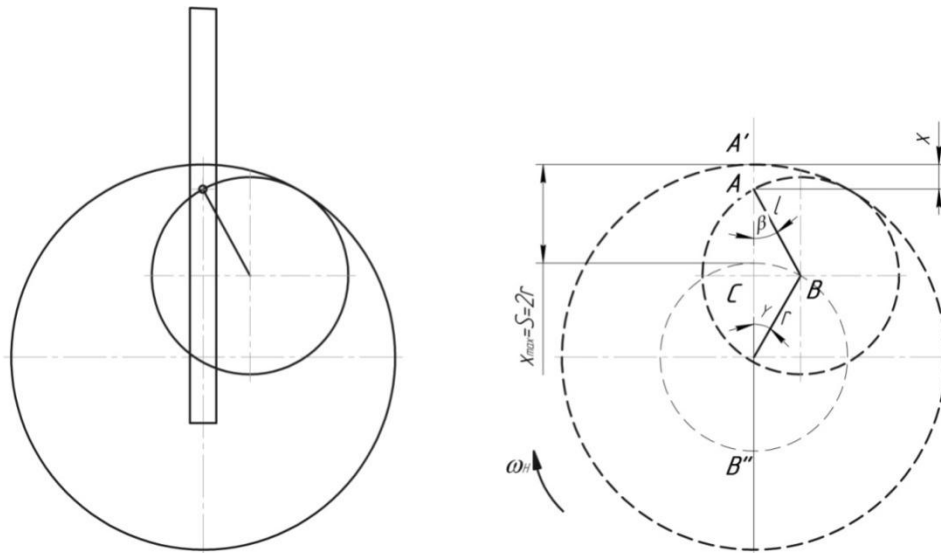


Рис. 2.19. Кривошипно-шатунний механізм

$$\lambda = \frac{r}{r_2} = \frac{2(r_1 - r_2)}{d_1} = \frac{2(52,5 - 26,875)}{105} = 0,51;$$

Система рівнянь для сателіта:

$$\begin{cases} Y = Y(t); \\ \omega = \omega(t); \\ \varepsilon = \varepsilon(t); \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y = \omega t; \\ \omega = \frac{\pi n}{30} = const; \\ \varepsilon = 0. \end{cases}$$

Система рівнянь для зубчастої рейки:

$$\begin{cases} x = x(t); \\ v = v(t); \\ j = j(t). \end{cases} \xrightarrow{\sin\beta = \lambda \sin Y} \begin{cases} x = r((1 - \cos Y) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2Y)); \\ v = \frac{dx}{dt} = r\omega_H (\sin Y + \frac{\lambda}{2} \sin 2Y); \\ j = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = r\omega_H^2 (\cos Y + \lambda \cos 2Y). \end{cases}$$

При підстановці числових даних рівняння зміни координати  $x$  зубчастої рейки:

$$x = 25,625 ((1 - \cos\omega_H t) + 0,127(1 - \cos 2\omega_H t));$$

3. Функціональний вузол 3 (рис. 2.20).

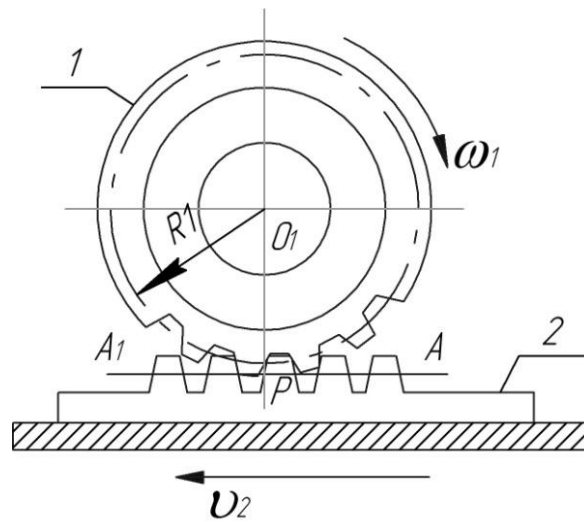


Рис. 2.20. Рейкова зубчата передача

Максимальне відхилення зубчастої рейки:

$x_{max} = 2r_1 = d_1 = 105$  мм – дільний діаметр зубчастого вінця.

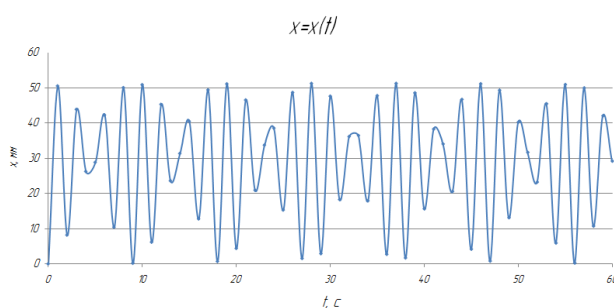
$S = \pi m z$ ;  $z = 20$ ;

$S = 78,5$  мм – шлях зубчастої рейки за 1 оберт зубчастого колеса-шпинделя.

$S_{max} = 105$  мм;

$N = 1,337$  – обертів колеса-шпинделя за 1 прохід зубчастої рейки.

На основі отриманих в ході розрахунків рівнянь були отримані графіки  $x = x(t)$  та  $v = v(t)$  при  $t = 60$  с. (рис. 2.21 та рис. 2.22).

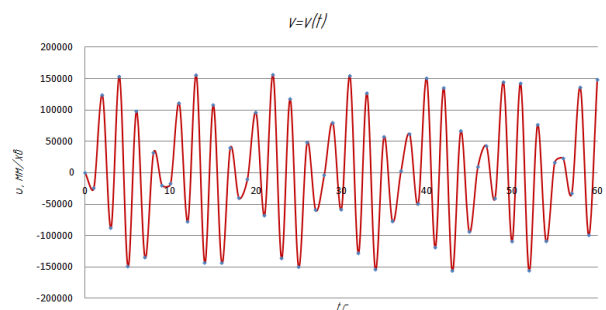
Рис. 2.21 Графік залежності  $x = x(t)$ 

$$v_2 = \omega_1 r_1; \Rightarrow \omega_1 = \frac{v_2}{r_1};$$

$$r_1 = 25 \text{ мм};$$

$$v_{max} = 1563037 \text{ мм/хв} = 2,7 \text{ м/с};$$

$$\omega_1 = \frac{1563037 \text{ мм/хв}}{25 \text{ мм}} = 6252,48 \text{ хв}^{-1}$$

Рис. 2.22 Графік залежності  $v = v(t)$

$\omega_1$  – кутова швидкість на виході пристрою.

Отже, при використанні пристрою для реалізації реверсивного свердління вдається в підвищити кутову швидкість обертання свердла.

## **2.7. Висновки.**

1. Вперше показано, що спосіб реверсивного свердління може бути застосований для оброблення ПКМ.

2. Доведено, що для ПКМ реверсивне свердло має робити не менше одного оберту за та проти годинниковою стрілкою.

3. Вперше розроблено інструмент, особливостями якого є розташування різальних кромки в осьовій площині та доведено, що в процесі інструменту працює одна кромка як кромка свердла, та одна кромка як кромка розгортки. Для інструменту, який одночасно виконує функцію свердла та розгортки вибрані геометричні параметри.

4. Вперше розроблений механізм для здійснення реверсивного свердління. Встановлено, що для здійснення реверсивного свердління з метою забезпечення продуктивності порівняно зі стандартним свердлінням, частота обертання свердла повинна бути в 2 рази більша, що забезпечується кінематичним розрахунком.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою експериментальних досліджень є визначення способів підвищення якості обробленої поверхні отвору за рахунок визначення раціональної геометрії та режимів різання для реверсивного свердління. Основним оціночним параметром є середнє відхилення оброблених отворів від круглості.

Загальна методика експериментальних досліджень складається з кількох підрозділів.

- Визначення критичного зусилля навантаження розшарування вугле- та склопластиків;
- Проведення експериментальних досліджень впливу геометричних параметрів свердла та режиму різання на стійкість свердла.
- Проведення експериментальних досліджень якості отворів при їх свердлінні інструментом різної геометрії для проведення математичного моделювання.
- Обґрунтування та вибір методу моделювання;
- Обґрунтування вибору змінних та границь їх варіювання;
- Складання статистичного плану проведення експерименту;
- Отримання математичної моделі процесу свердління.

На рис. 3.1. зображена загальна блок-схема проведення досліджень.

#### **3.1. Методика дослідження розшарування та величини зношування інструменту на основі вібро-акустичного сигналу.**

Для вимірювання величини критичного осьового навантаження на зразок ПКМ була застосована методика реєстрації та подальшої комп'ютерної обробки вібро-акустичного сигналу, що виникає при руйнуванні шару ПКМ при осьовому навантаженні такому, що виникає при свердлінні.

Для контролю дефектів в ПКМ застосовується ряд методів неруйнуючого контролю, зокрема ультразвуковий метод [7-10,11,14,19,31,55,58,73,92].

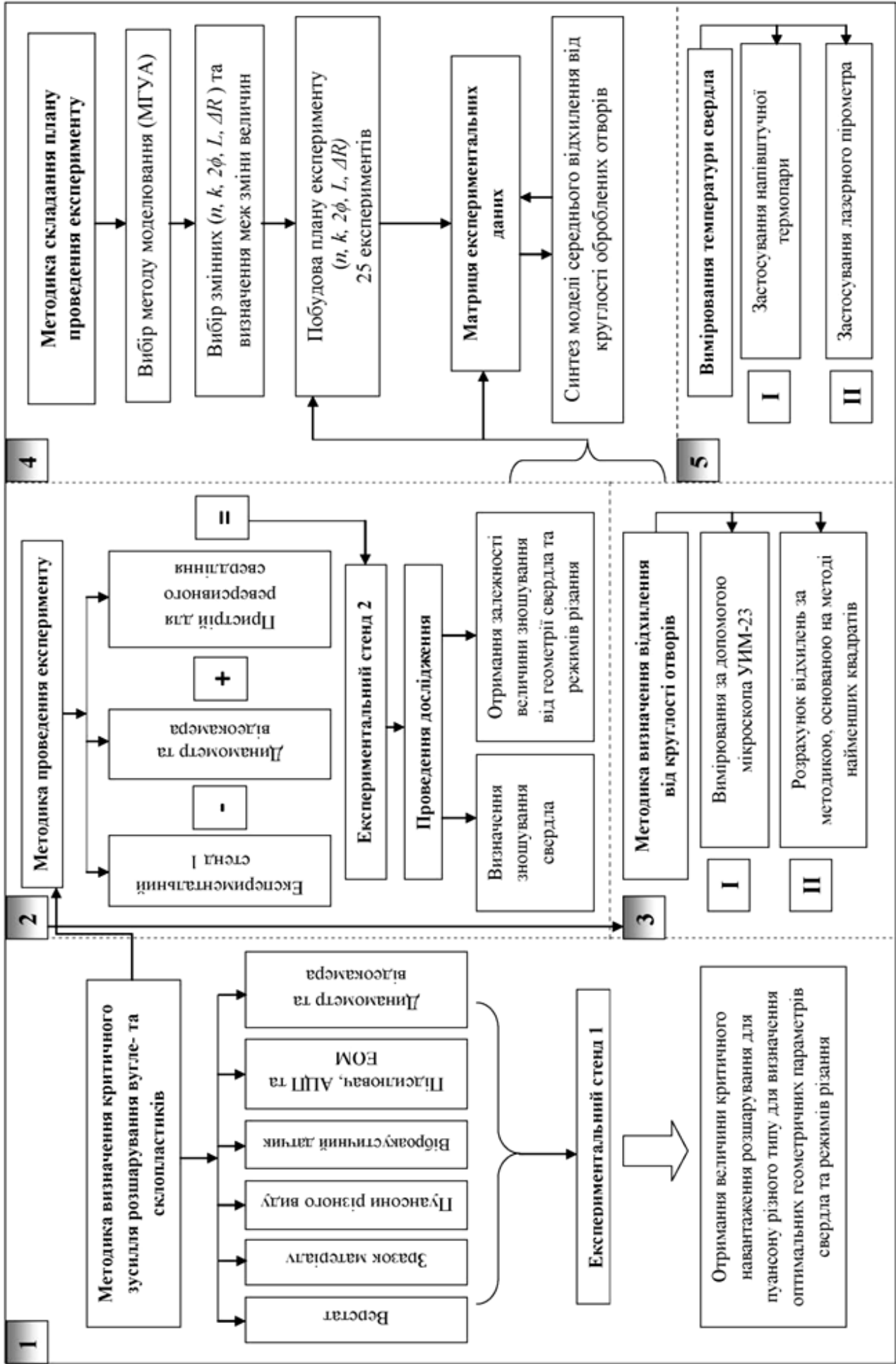


Рис. 3.1.1. Загальна блок-схема проведення досліджень

Вібраційні випробування елементів і пристроїв автоматики дозволяють виявити наявність механічних дефектів, визначити динамічні характеристики виробів, що випробуються і провести оцінку конструктивних факторів, перевірити стабільність заданих параметрів виробу при впливі вібрації.

Застосування виробів автоматики в апаратурі, призначеній для авіаційної та космічної техніки, обумовлює підвищені вимоги до надійності цих виробів, оскільки елементи автоматики таких пристроїв, як правило, працюють при комплексі зовнішніх впливів. Співвідношення між ступенем жорсткості цих впливів і рівнем міцності, стійкості, стабільності та іншими характеристиками виробів є одним з факторів, що визначає їх здатність нормально функціонувати, безвідмовно виконувати задані операції протягом певного проміжку часу [120,121,126,128].

Для забезпечення надійної роботи виробів автоматики умови експлуатації повинні бути імітовані при стендових, лабораторних випробуваннях.

Технічні умови вібраційних випробувань, що проводяться в лабораторії, розробляються з таким розрахунком, щоб вони включали і інші експлуатаційні умови, крім вібрації, при яких можуть виявитися елементи або пристрої автоматики під час роботи.

Слід зазначити, що всі технічні умови на проведення вібраційних випробувань ґрунтуються на відтворенні (зі значним запасом) тільки максимальних навантажень, що виникають в умовах експлуатації.

### **3.1.1. Пристрій для дослідження величини розшарування ПКМ.**

Для перевірки міцності матеріалів при тих чи інших умовах створено ряд конструкцій машин. Майже всі вони орієнтовані на встановлення характеристик, які важливі при подальшому використанні деталей з досліджуваного матеріалу у якості конструкційних елементів. Це такі характеристики як міцність матеріалу при зсуві, стисканні, втомі, явище задиру та інші. Дані машини виконують перевірку міцності КМ на розтяг-стиск. При свердлінні шари матеріалу зазнають осьового навантаження, тому ці машини не

підходять для дослідження процесу розшарування. Виходячи з цього, була створена нова конструкція пристрою для дослідження саме цього процесу.

Пристрій був розроблений для дослідження процесу розшарування полімерних композитних матеріалів при свердлінні (Пристрій для дослідження розшарування композиційних матеріалів: пат. на корисну модель 88898 Україна: МПК-2013 G01N/08 B29L9/00 / О.В. Глоба, Д.Ю. Суворов, І.О. Булах. - № у 2013 10299; заявл. 21.08.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. №7/2014) [130].

На даній установці реалізовано спосіб отримання результатів, у якому використовується п'єзоелектричний вібровимірювальний перетворювач, який фіксує виникнення звуку при розшаруванні матеріалу зразка.

Загальна схема установки представлена на рисунку 3.1. Умовно систему можна розділити на три частини:

- Навантажувальний вузол (установка);
- Фіксуючий вузол (датчик, підсилювач, перетворювач, камера);
- Оброблюючий вузол (ЕОМ, програмне забезпечення).

Задачею пристрою є дослідження розшарування полімерних композиційних матеріалів при осьовому навантаженні, такому, що виникає при свердлінні.

Поставлена задача вирішується тим, що на зразку матеріалу закріплений датчик, здатний уловлювати віброакустичні коливання, сигнал з якого надходить до підсилювача та цифрового перетворювача сигналу, а далі до ЕОМ, де він обробляється, а на основі аналізу отриманого вібросигналу – можливість прогнозування процесу свердління при зміні певного параметру процесу. Внаслідок такої конструкції пристрою підвищується ефективність процесу обробки ПКМ та якості і точності отворів.

Пристрій рис. 3.2 містить зразок композиційного матеріалу, на якому закріплюється віброакустичний датчик, підсилювач сигналу, аналоговий цифровий перетворювач, ЕОМ та монітор.

Працює пристрій в такий спосіб.

В процесі свердління поступово збільшується навантаження на зразок

композиційного матеріалу. При досягненні значення критичної сили (критичного навантаження) відбувається відокремлення залишкових шарів матеріалу від основного матеріалу. Це явище супроводжується звуковим віброакустичним ефектом. Він в свою чергу фіксується п'єзодатчиком, що встановлений на зразку матеріалу. З датчика сигнал поступає до підсилювача, після чого він надходить до аналогово цифрового перетворювача, де дані оцифровуються. Тобто вони перетворюються (семплуються) в послідовність двійкових цифрових відліків. В результаті роботи аналогово цифрового перетворювача отримується цифровий образ звуку. Цей оцифрований сигнал далі обробляється на електро обчислювальній машині.

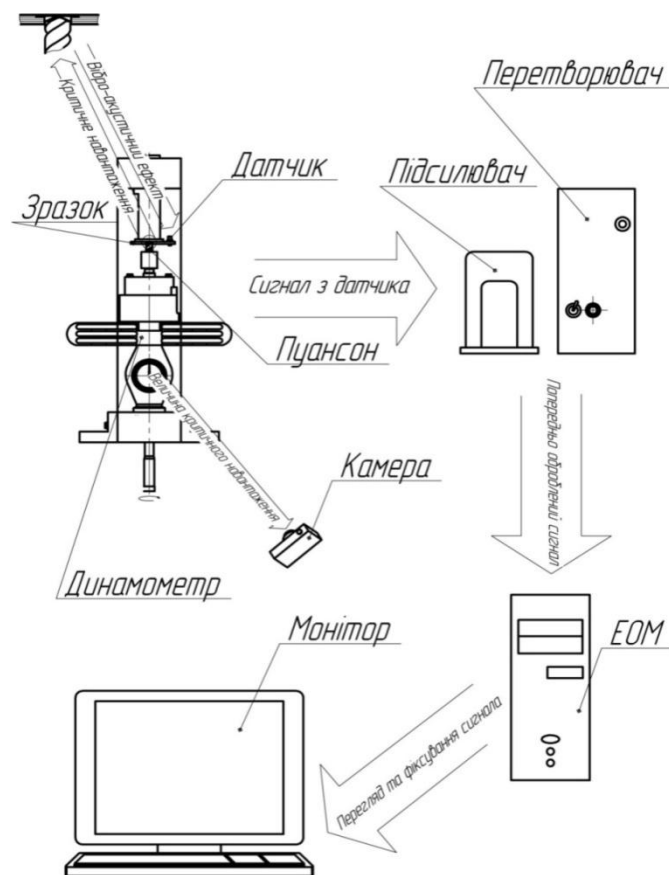


Рис. 3.2. Схема фіксування та обробки вібро-акустичного сигналу

Величина експериментальної критичної осьової сили фіксується камерою (показання динамометра). Момент початку розшарування видно на записі, зробленому камерою, а також на моніторі. На динамометрі, після відриву, спостерігається зменшення навантаження. На графіку виникає стрибок.

Силовим вузлом (установкою) здійснюється прикладання статичного навантаження до зразка, яке саме і визиває ефект розшарування матеріалу. При розшаруванні відбувається, як вище зазначено, деформація поверхні зразка. Також при відриві залишкового шару матеріалу від основного шару, виникають вібрації і акустичний ефект. Виникнення цих явищ лягли в основу методик по визначенню максимальної допустимої осьової сили, при якій розшарування не відбувається.

Загальний вид системи зображений на рисунку 3.3.



Рис. 3.3. Загальний вид системи

Втулка під пуансон виконана змінною. Для використання пуансонів різних діаметрів виконано комплект таких втулок, які різняться діаметром отвору. Набір втулок дає змогу використовувати в дослідах різні діаметри пуансонів:

Таблиця 3.1

Набір втулок під пуансони

№ втулки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	9
Діаметр пуансона, мм	5	6	7	8	9	10	11	12	11	12	13	14

В якості пуансона може виступати як ріжуча частина свердла, так і тіла плоскої та сферичної форми. Варіанти виконання пуансонів запропоновані на рисунку 3.4.

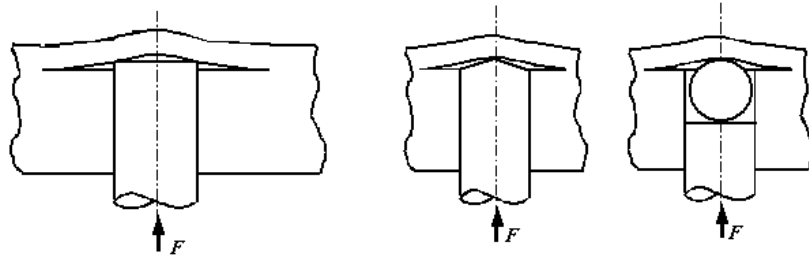


Рис. 3.4. Варіанти виконання пуансонів.

Даний пристрій істотно підвищує ефективність дослідження процесу розшарування композиційних матеріалів при механічній обробці отворів за рахунок можливості точного встановлення моменту розшарування ПКМ, розрахунку критичного осьового навантаження та визначення величини зношування інструменту шляхом порівняння інтенсивності сигналу. Також важливим є те, що пристрій може працювати як в статичному, так і в динамічному режимі з можливістю застосування будь-якої конструкції інструменту.

### **3.1.2. Методика розрахунку величини зношування свердла шляхом обробки вібро-акустичного сигналу.**

За допомогою спеціального програмного забезпечення можливо розрахувати величину зношування інструменту, використовуючи дані, отримані з віброакустичного датчика.

Для обробки даних, отриманих з датчика, була використана програма Cool Edit Pro 2 [51]. Це новітня версія однієї з найбільш популярних програм для роботи зі звуком. Cool Edit Pro 2 дозволяє записувати багатопотокові аудіо-дані з мікрофона або будь якого джерела звукового сигналу (в нашому випадку цим джерелом є датчик); редагувати й обробляти як окремі файли, так і групу файлів; виконувати мастерінг та вести запис. Отриманий сигнал записується у вигляді треку. Мультиактивний режим цієї програми дозволяє вести запис звуку у режимі реального часу. Записаний трек дана програма зберігає у вигляді текстового файлу (рис. 3.5).

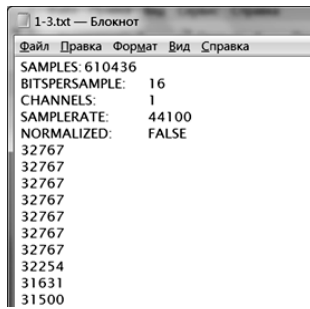


Рис. 3.5. Текстовий файл отриманий після запису віброакустичного сигналу

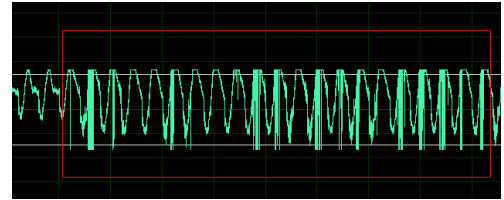


Рис. 3.6. Приклад зображення сталого сигналу.

В мультимедійного режимі звук виводиться у вигляді графіка. Момент розшарування матеріалу зразка на цьому графіку буде виявлятися у вигляді різкого стрибка кривої. Приклад сталого сигналу зображено на рисунку 3.6. Графік можна збільшувати або зменшувати, розтягувати та звужувати.

На отриманий трек були накладені динамічний та науковий фільтри (рис. 3.7), після чого він набув вигляду, показаного на рис. 3.8.

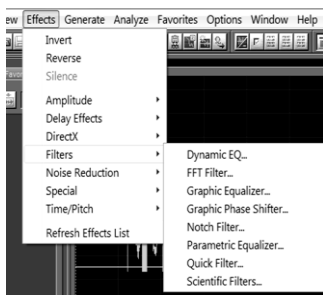


Рис. 3.7. Панель фільтрування треку

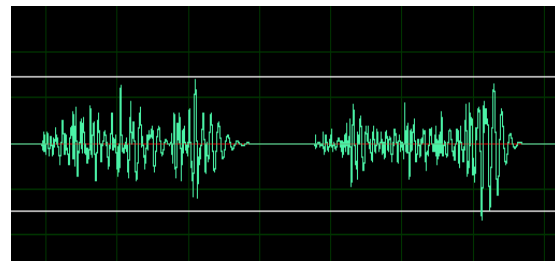
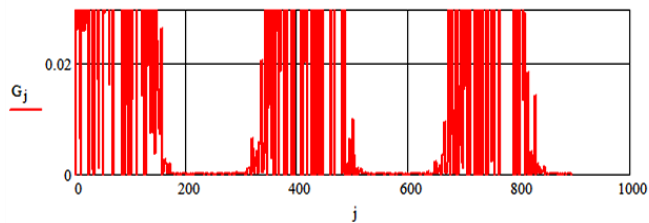


Рис. 3.8. Вигляд треку після накладення фільтрів



$$q_j := U_j - G_j$$

$$B_0 := 0.014 \quad B_k := B_0 + q_{\text{round}\left(\frac{n}{m}, 0\right) - 2} \quad B_k = 0.01399 \quad \text{-износ (мм)}$$

Скорость износа при данных режимах:

$$V_k := \frac{|B_k|}{T_p} \quad V_k = 1.37485 \times 10^{-3} \text{ мм/сек}$$

Рис. 3.9. Частина програми для розрахунку швидкості та величини зношування інструменту

Для розрахунку величини зношування інструменту була використана програма, що описана в дисертаційній роботі Кокаровцева В.В. [102]. Автор застосував цю програму для дослідження процесу металообробки на основі віброакустичного сигналу. В даному дослідженні програма використовується для контролю процесу механічної обробки ПКМ (рис. 3.9) (Додаток 1).

Програма також дозволяє відвільтувати сигнал від збуджуючих параметрів, а потім розрахувати величину та швидкість зношування інструменту.

### **3.2. Методика визначення якості отворів при реверсивному свердлінні.**

Коли говорять про якість отворів, то мають на увазі ряд факторів, зокрема точність отвору, відсутність термодеструкції, сколів, не зрізаних волокон, розшарування, шорсткість, відхилення форми отвору.

Одним з показників якості отворів являється відхилення від круглості. Для вимірювання відхилення отворів від круглості був застосований мікроскоп УІМ-25 а також мікроскоп ММІ-2 (рис. 3.10).



а



б

Рис. 3.10. Обладнання застосоване для вимірювання відхилення від круглості отворів а – УІМ-23, б – ММІ-2

Також для визначення величини відхилення від круглості застосовують кругломір. Але його застосування є не завжди зручним при виконанні вимірювань в деталях, які мають не круглу форму, або мають великі габарити.

При здійсненні замірів у деталях не круглої форми для вимірювання відхилення отворів від круглості спочатку необхідно визначити центр отвору, а потім виконувати заміри. Пошук центру вимагає багато часових затрат. А вимірювання у великогабаритних деталях також викликає великі труднощі.

Для того, щоб виключити труднощі та похибки вимірювань була застосована методика, за якою проводять вимірювання координат точок досліджуваного отвору, а потім застосовують метод найменших квадратів [69,84], що в даному випадку використовується для визначення параметрів  $x_c$ ,  $y_c$  та  $r$  замінюючого кола для всіх точок вихідної кривої.

Запишемо вихідне рівняння кола:

$$f_k = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2$$

Для застосування методу найменших квадратів необхідно прийняти  $f = f_k^2$ :

$$f = ((x - x_c)^2 + (y - y_c)^2)^2 = R^2$$

1. Отримання виразу для радіуса кола.

Перша похідна функції  $f$  по параметру  $R$ :

$$\frac{\partial f}{\partial R} = 4R^3 - 4Rx^2 + 8Rxx_c - 4Rx_c^2 - 4Ry^2 + 8Ryy_c - 4Ry_c^2 = f_R$$

Перетворимо отримане рівняння з врахуванням додавання по всім  $n$  експериментальним точкам:

$$f_R^n = 4nR^3 - 4nRx_c^2 - 4nRy_c^2 + 8Rxx_c \sum_{i=1}^n x_i - 4R \sum_{i=1}^n x_i^2 + 8Ryy_c \sum_{i=1}^n y_i - 4R \sum_{i=1}^n y_i^2$$

Розв'язуємо отримане рівняння відносно параметра  $R$  ( $f_R^n = 0$ ):

$$R = \frac{\sqrt{nx_c^2 + ny_c^2 - 2x_c \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2}}{\sqrt{n}}$$

2. Відшукування координати  $x_c$  центра кола.

Беремо похідну по параметру  $x_c$  вихідного рівняння:

$$\frac{\partial f}{\partial x_c} = 4R^2x - 4x^3 - 4R^2x_c + 12x^2x_c - 12xx_c^2 + 2x_c^3 - 4xy^2 + \\ + 4x_cy^2 + 8xyy_c - 8x_cyy_c - 4xy_c^2 + 4x_cy_c^2 = f_x$$

Перетворюємо отримане рівняння з врахуванням додавання по всім  $n$  експериментальним точкам та з врахуванням отриманого виразу для параметра  $R$ :

$$f_x^n = 4nx_c^3 + 4nx_cy_c^2 - 12x_c^2 \sum_{i=1}^n x_i - 4y_c^2 \sum_{i=1}^n x_i + 12x_c \sum_{i=1}^n x_i^2 - 4 \sum_{i=1}^n x_i^3 - 8x_cy_c \sum_{i=1}^n y_i + \\ + 8y_c \sum_{i=1}^n x_iy_i + 4x_c \sum_{i=1}^n y_i^2 - 4x_c(nx_c^2 + ny_c^2 - 2x_c \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + \\ + \frac{4(\sum_{i=1}^n x_i)(nx_c^2 + ny_c^2 - 2x_c \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2)}{n} - 4 \sum_{i=1}^n x_iy_i^2$$

Прирівнюємо отримане рівняння до нуля та розв'язуємо його відносно параметра  $x_c$ :

$$x_c = \left( -\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i^2 + n \sum_{i=1}^n x_i^3 + 2y_c \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - 2ny_c \sum_{i=1}^n x_iy_i - \right. \\ \left. - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \sum_{i=1}^n y_i^2 + n \sum_{i=1}^n x_iy_i^2 \right) / \left( 2 \left( -\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 + n \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)$$

Перетворимо вираз до більш простого виду:

$$x_c = \frac{-\sum_{i=1}^n x_i \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) + n \left( \sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_iy_i + \sum_{i=1}^n x_iy_i^2 \right)}{-2 \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

3. Знаходження параметра  $y_c$ :

$$\frac{\partial f}{\partial y_c} = 4R^2y - 4x^2y + 8xx_cy - 4x_c^2y - 4y^3 - 4R^2y_c + 4x^2y_c - \\ - 8xx_cy_c + 4x_c^2y_c + 12y^2y_c - 12yy_c^2 + 4y_c^3 = f_y$$

Перетворюємо отримане рівняння з врахуванням додавання по всім  $n$  експериментальним точкам та з врахуванням отриманого виразу для параметрів  $R$  (3.1) та  $x_c$  (3.2):

$$\begin{aligned}
f_y^n = & 4ny_c^3 + 4y_c \sum_{i=1}^n x_i^2 - 4 \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 - 12y_c^2 \sum_{i=1}^n y_i + 12y_c \sum_{i=1}^n y_i^2 - (8y_c \times \\
& \times (\sum_{i=1}^n x_i) (-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \\
& + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2))) / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2) + (8(\sum_{i=1}^n x_i y_i) (-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + \\
& + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2))) / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2) + \\
& + (4ny_c (-\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2))^2 / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 \\
& + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2)^2 - (4(\sum_{i=1}^n y_i) (-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \\
& + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2)))^2 / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2)^2 - 4y_c (ny_c^2 + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \\
& + \sum_{i=1}^n y_i^2 - (2(\sum_{i=1}^n x_i) (-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2)) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \\
& + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2))) / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2) + (n(-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + \\
& + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2)))^2 / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2)^2 + \\
& + \frac{1}{n} (4 \sum_{i=1}^n y_i) (ny_c^2 + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2 - (2(\sum_{i=1}^n x_i) (-\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \\
& - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2))) / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2) + \\
& + (n(-\sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n x_i^2 - 2y_c \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i^2) + n(\sum_{i=1}^n x_i^3 - 2y_c \sum_{i=1}^n x_i y_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2)))^2 / (-2(\sum_{i=1}^n x_i)^2 \\
& + 2n \sum_{i=1}^n x_i^2)^2 - 4 \sum_{i=1}^n y_i^3
\end{aligned}$$

Прирівнюємо отримане рівняння до нуля і розв'язуємо його відносно параметра  $u_c$  (3.3):

$$\begin{aligned}
y_c = & ((\sum_{i=1}^n x_i^2)^2 \sum_{i=1}^n y_i + n(\sum_{i=1}^n x_i y_i) (\sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i) ((\sum_{i=1}^n x_i^3) \sum_{i=1}^n y_i + (\sum_{i=1}^n x_i^2) \sum_{i=1}^n x_i y_i + \\
& + (\sum_{i=1}^n x_i y_i) \sum_{i=1}^n y_i^2 + (\sum_{i=1}^n y_i) \sum_{i=1}^n x_i y_i^2) + (\sum_{i=1}^n x_i)^2 (\sum_{i=1}^n y_i x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^3) - (\sum_{i=1}^n x_i^2) (n \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 - \\
& - (\sum_{i=1}^n y_i) \sum_{i=1}^n y_i^2 + n \sum_{i=1}^n y_i^3)) / (2(-2(\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i) \sum_{i=1}^n x_i y_i + n(\sum_{i=1}^n x_i y_i)^2 + \\
& + (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + (\sum_{i=1}^n x_i^2) ((\sum_{i=1}^n y_i)^2 - n \sum_{i=1}^n y_i^2)))
\end{aligned}$$

Формули 3.1-3.3 є виразами для визначення основних параметрів замінюючого кола.

Числова перевірка розрахунку

Нехай  $n=11$

$x_1$	-3	$y_1$	10	$x_7$	8,5	$y_7$	-6
$x_2$	2	$y_2$	9,8	$x_8$	8,2	$y_8$	-8
$x_3$	4	$y_3$	9	$x_9$	7	$y_9$	-9,1
$x_4$	6	$y_4$	9	$x_{10}$	6	$y_{10}$	-9,7
$x_5$	8,5	$y_5$	6	$x_{11}$	-3,8	$y_{11}$	-10
$x_6$	10,5	$y_6$	0				

Знаходимо параметри замінюючого кола в наступній послідовності:

$$y_c = -0,48614, x_c = 0,161077, R = 10,6338$$

Перевірка суми відхилень радіусів для 11 точок ( $n=11$ ):

$$\sum_{i=1}^n ((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 - R^2) = -6,11067 \cdot 10^{-13}$$

Перевірка суми відхилень радіусів для 3 точок ( $n=3$ ):

$x_1$	1	$y_1$	11	$x_2$	11	$y_2$	1	$x_3$	1	$y_3$	9
-------	---	-------	----	-------	----	-------	---	-------	---	-------	---

$$y_c = 1, x_c = 1, R = 10$$

$$\sum_{i=1}^n ((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 - R^2) = 0$$

Таким чином, після введення масиву координат точок отриманого отвору, було отримане оптимальне замінююче коло (рис. 3.11).

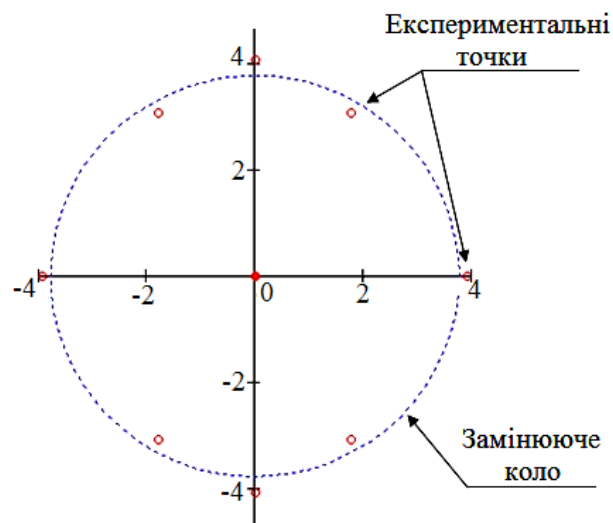


Рис. 3.11. Побудова замінюючого оптимального кола по експериментальним точкам

Наступним етапом є формування масиву радіусів від знайденого центра замінюючого кола до експериментальних точок. Далі відшуковуються 3 точки, найменш віддалені від центра замінюючого кола, по яких будується вписане коло. Для трьох точок, найбільш віддалених від центра замінюючого кола будується описане коло.

Останнім кроком є суміщення оптимального, вписаного та описаного кіл.

### **3.3. Підготовка та особливості виготовлення реверсивного свердла.**

Випробування проводилися на свердлах, виготовлених з попередньо шліфованих по зовнішньому діаметру заготовок зі стружковими канавками зі швидкорізальної сталі HSS (P6M5). Геометричні і конструктивні параметри експериментальних свердел вибиралися за результатами теоретичних досліджень і попередньо проведених випробувань.

Заготовки відрізулися на вертикально-відрізних автоматах моделі МФ-142 з утворенням кута  $110^\circ$  з одного боку і прямого торця - з іншого. Режим обробки :  $v_{\text{різ}} = 9,5-14$  м/хв,  $s=0,10$  мм/об. Конус із кутом  $110^\circ$  на відрізуваній заготовці утворюється за рахунок форми різальних кромки різців. Шорсткість обробленої поверхні у межах  $Rz = 20-10$ . Проводилася термічна обробка робочої частини заготовок свердел: із сталі P6M5 до 59...60HRC. Чистове шліфування проводилося по діаметрам 7,99 та 8,99 на безцентрово-шліфувальному верстаті на автоматах моделі KB-2A в автоматичному циклі. Розмір шліфувального круга на верстаті моделі KB-2A ПП 200x78x76, де  $H=8-10$  мм.

Заточування задньої поверхні свердел проводилося з дотриманням вимог, що поверхні інструменту повинні знаходитися в одній площі що проходить через вісь свердла з точністю 0,01 мм. Характеристика шліфувального круга: типу ЧЦ 150x80x32 24A25-16П СМІ; СМ27 К 1 кл.Б (ГОСТ2424-75). Режим обробки:  $v_{\text{різ}}=24$  м/с,  $S=700$ мм/хв.; охолодження – масло індустріальне 12.

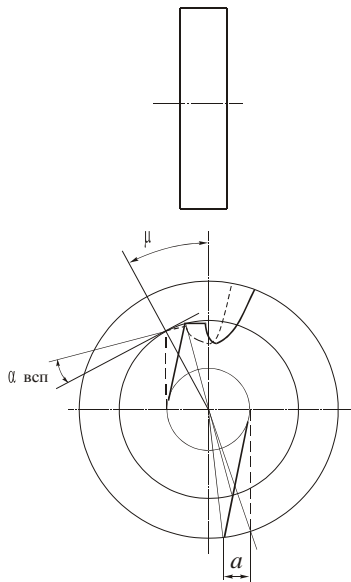


Рис.3.12. Схема установки свердла при заточуванні задньої поверхні та основної різальної кромки



Рис. 3.13. Заточка свердла по задній площині

При розрахунку кутів установки для підточування свердел статичний передній кут  $\gamma$  був прийнятий  $10^\circ$ . Решта геометричних та конструктивних параметрів свердел визначалися силовими і стійкісними випробуваннями.

Ширина пера контролювалась гладким мікрометром 0-25 мм (ГОСТ6507-60), товщина серцевини - мікрометром із вставками від 0 до 25мм (ГОСТ4380-63), довжина робочої частини свердла – лінійкою  $L=150$ мм (ГОСТ427-75), шорсткість за зразком (ГОСТ140-68). Нецентричність серцевини контролювалася інструментальним мікроскопом типу ММІ-2 із призмою.



Рис. 3.14. Заточка головної різальної кромки



Рис. 3.15. Підточка серцевини та передньої поверхні свердел

Контроль кутів і осьового биття проводився на інструментальному мікроскопі типу ММІ-2 в призмі.

Розробляючи реверсивне свердло, враховуючи такі фактори, як трудомісткість, собівартість та інші, в основу була закладена конструкційна особливість - пряма канавка (рис. 3.16). Для прямої канавки профіль її збігається з профілем фрези.

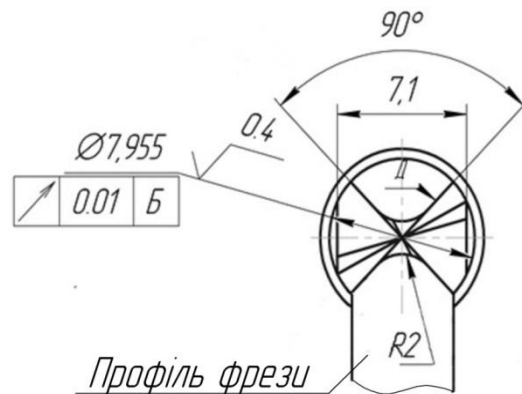


Рис. 3.16. Профіль фрези для прямої канавки реверсивного свердла

При фрезеруванні прямої канавки формування її здійснюється одночасно по всіх точках профілю в перерізі, що проходить через передню поверхню фрези перпендикулярно подачі (при  $Y=0$ ). Отже, всі точки дотику фрези і свердла розташовуються в тій же площині. Ці точки є профілюючими, і лінія контакту (зачеплення) лежить в одній площині. Виконання прямої канавки більш технологічне і дешевше при виготовленні.

#### **3.4. Методика математичного моделювання якості отворів при реверсивному свердлінні.**

Основною метою моделювання середнього відхилення отворів від круглості являється отримання залежностей, що забезпечують обґрунтування застосування реверсивного свердла для свердління вугле- та склопластиків та визначення раціональних геометричних параметрів та режимів різання.

Ця задача зводиться до відшукування функціональної залежності, що пов'язує задавані фактори з вибраними вихідними параметрами процесу, тобто до побудови статистичної моделі.

Розв'язання цієї задачі вимагає вибору методу моделювання та визначення границь зміни контролюємих параметрів.

Перші дослідження в області різання металів були проведені проф. І.А. Тімі. Його можна вважати основоположником науки про різання металів. Проф. П.О. Афанась'єв і проф. К.А. Зворикін провели цікаві дослідження й розвинули основи теорії різання металів. Великий об'єм досліджень провів американський інженер, фахівець в області організації й нормування роботи Ф.У. Тейлор. Вперше в світі він отримав формули (математичні моделі), що показують вплив різних чинників – режимів обробки на швидкість різання. Тейлор багато разів звертає увагу на складності отримання математичних моделей. Подальші дослідники використовували запропонований Тейлором степеневий вид формул й були вимушені розробляти методологію отримання самих моделей, що описують роботу технологічних систем. Моделі Тейлора з часом зазнали безліч змін, були всіляко доповнені й перероблені. Незважаючи на це основа моделей Тейлора залишається колишньою - це показникові функції неперіодичного характеру. Слід зазначити, що періодичні функції у моделюванні процесу різання практично не застосовуються (за винятком випадків врахування геометрії інструменту).

Недосконалість моделей Тейлора, що виявляється в їх обмеженій лінійності, протягом тривалого часу компенсувалося розбиттям інтервалу моделювання на більш дрібні підінтервали (наприклад, за окремими матеріалами та інструментами) і створенням відповідних таблиць коефіцієнтів для цих підінтервали. Різноманіття таких таблиць добре простежується на прикладі роботи [85]. При такому підході до поліпшення якості моделі з часом назріває необхідність у розробці принципово нових методів.

Поява таких методів було пов'язане в основному з появою обчислювальної техніки і можливості аналізу ітераційних процесів, які породжували величезні обсяги даних.

Так як математичні моделі для свого створення вимагають проведення тих чи інших експериментів, часом дорогих, на першому етапі розвитку теорії

моделювання особлива увага приділялася саме питанням планування експерименту. Як відзначається в роботі [83], методи математичної статистики, які застосовуються для подібного планування, дозволяють знизити витрати на проведення експериментів в 3-5 разів.

Надалі теорія планування експерименту зіткнулася із значними труднощами. Так, наприклад, для отримання залежностей в роботах, проаналізованих в [24,51,53,83,91] при використанні раціонального планування експериментів з варіюванням на двох і трьох рівнях кількість необхідних експериментів при 4-х і 5-и факторних планах перевищувало 40. При подальшому ускладненні моделей для підвищення їх адекватності кількість необхідних експериментів стрімко зростає.

Іншим важливим недоліком даного підходу являється те, що при плануванні експерименту кількість проведених дослідів жорстко визначає вид отриманого рівняння. Це призводить до значного зростання ролі евристики при побудові моделі.

Принципово іншим підходом є запропонований українським академіком А. Г. Івахненко [91] метод самоорганізації моделей, що відомий під назвою "Метод Групового Урахування Аргументів" (МГУА).

### **3.4.1. Суть методу групового урахування аргументів.**

В даній роботі використовується метод, викладений в роботі [91] і спеціально орієнтований на моделювання оброблюваності матеріалів.

Для моделювання процесу обробки в даному методі використаний ступеневий поліном Колмогорова-Габора. Особливістю даного методу є його багаторядність (комбінаторність) і ієрархічність структури, що дозволяє організувати самовідбір на кожному рівні рішення елементарних систем нормальних рівнянь із забезпеченням свободи вибору також на кожному етапі, включаючи останній. На додаток до принципу свободи вибору для забезпечення самоорганізації використовується також зовнішнє доповнення. Сутність першого принципу полягає у відборі для участі в

наступних рівнях аналізу не однієї, а групи кращих моделей, що дозволяє забезпечити можливість вибору моделей на наступних етапах і, відповідно, ріст і розвиток процесу [91,96].

Принцип зовнішнього доповнення призначений для визначення положення мінімуму оптимізаційних критеріїв, що дозволяє здійснити ефективний самоотбор. Формування зовнішнього доповнення шляхом розбиття вихідної вибірки на навчальну і перевіірочну послідовності.

Вихідними даними для моделювання є матриця входів моделі  $X (N, M)$  і вектор виходів  $T (N)$ , де  $N$  - кількість дослідів,  $M$  - число незалежних вхідних змінних (відразу ж відзначимо недолік методу - векторність виходу моделі).

На попередньому етапі на підставі матриці  $X (N, M)$  будується матриця вхідних аргументів шуканої моделі:

$$X (K, N), \text{ де } K \geq M.$$

Різниця між  $K$  і  $M$  заповнюється додатковими предикторами, такими як члени лінійного полінома або функції аргументів множини  $M$  (наприклад,  $1/x$ ,  $\ln x$ ,  $\ln (1/x)$  і т.п., в програмному продукті пропонується фіксований набір).

Базисні (вхідні) аргументи використовуються для побудови множини можливих аргументів моделі  $Z_0$  - всіляких комбінацій аргументів множини  $X$ , одержуваних при побудові повного полінома попередньо вибраного ступеня на базі цієї множини. У програмному продукті операції проводяться над числовими значеннями наведених функцій.

Після цього здійснюється процедура власне многорядної селекції: Ряд 1. Так як на першому етапі в якості аргументів використовуються елементи множини  $Z_0$ , то опорна множина аргументів першого ряду  $Z_1 = Z_0$ . Потім оцінюються коефіцієнти всіх моделей виду:

$$Y_1 = a_{01} + a_1 Z_1, \quad (3.4)$$

при цьому загальна кількість моделей становить, відповідно,  $2k - 1$ . По кожній з моделей оцінюється критерій регулярності:

$$\Delta B_i = \frac{\sum_{j \in N_a+1} (\bar{Y}_{ij} - Y_{ij}) \cdot 100\%}{\sum_{j \in N_a+1} (Y_{ij} - \bar{Y}_B)} \quad (3.5)$$

де:

$$i \in (1, 2^k - 1),$$

$N_a$  - довжина навчальної послідовності,

$Y_{ij}, \bar{Y}_{ij}$  - Експериментальні і розрахункові значення виходу моделі на навчальної послідовності,  $\bar{Y}_B$  - Середнє значення виходу на перевірконої послідовності.

З усіх отриманих моделей відбирається  $F < (2k - 1)$  кращих, що і складає свободу вибору. При цьому всі відібрані моделі складають множину  $Z_{п1}$ , що належить множині  $Z_0$ .

Ряд 2. Будується множина моделей-претендентів другого ряду у вигляді прямого добутку:

$$Z_2 = Z_{п1} \times Z_0 \quad (3.6)$$

Множина  $Z_2$  містить  $F_x(2k - 1)$  членів, що визначають множину моделей другого ряду.

З них знову відбирається  $F$  кращих в сенсі мінімуму критерію регулярності, що призводить до появи множини  $Z_{п2}$ , що представляє собою наступне:

$$Z_2 = \{(\alpha_1^{(1)} \cdot Z_{п1}^{(2)}), (\alpha_2^{(1)} \cdot Z_{п1}^{(2)}), \dots, (\alpha_F^{(1)} \cdot Z_{п1}^{(2)})\}, \quad (3.7)$$

де

$\alpha_j^1, i \in (1..F)$  - перепозначені елементи множини  $Z_{п1}$ , причому можливе виконання умови:

$$\alpha_i^{(1)} = \alpha_j^{(1)}, (j \neq i); i, j \in (1..F) . \quad (3.8)$$

Це може статися у зв'язку з тим, що один і той же  $Z_{п1}$  може дати більше одного перспективного рішення для другого ряду при збереженні постійною величини свободи вибору.

Відповідно до формули (4.4) можна записати впорядковані за величиною множини аргументів першого і другого ряду:

$$U_1^{(1)} = \{\alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}, \dots, \alpha_{IF}^{(1)}\} \subset Z_0; \quad (3.9)$$

$$U_2^{(2)} = \{Z_{n1}^{(2)}, Z_{n2}^{(2)}, \dots, Z_{nF}^{(2)}\} \subset Z_0. \quad (3.10)$$

Таким чином, на другому ряду перебирається  $F \times (2k - 1)$  моделей.

Ряд 3. Для третього ряду  $Z_3 = Z_{n2} \times Z_0$

Процедура проведення відбору аналогічна процедурі для другого ряду. Таким чином, можна записати необхідні співвідношення для довільного  $S$ -го ряду (для  $S > 1$ ):

$$Z_s = Z_n^{(s-1)}; \quad (3.11)$$

$$Z_{nS} = \left\{ \left( \alpha_1^{(S-1)}, \beta_1^{(S-1)}, \dots, Z_{n1}^S \right), \left( \alpha_2^{(S-2)}, \beta_2^{(S-2)}, \dots, Z_{n2}^S \right), \dots, \left( \alpha_F^{(S-1)}, \beta_{F-1}^{(S-2)}, \dots, Z_{nF}^S \right) \right\}$$

З наведених співвідношень видно, що множина  $Z_0$  задає максимально можливу структуру моделі, яку можна отримати за кількістю рядів  $S = (2k - 1)$ .

З іншого боку,  $Z_0$  є нерухомою точкою описаного алгоритму, що свідчить про його збіжності за кінцеве число кроків.

Після визначення досягнення комбінованим (паретовським) критерієм "регулярність + незміщеність" мінімуму відбувається зупинка алгоритму, при цьому критерій незміщеності виглядає наступним чином:

$$n_0 = \frac{a_0 - b_0}{\bar{Y}}, \quad (3.12)$$

де:  $a_0$  - значення виходу моделі, розраховані на перевірячій послідовності,  $b_0$  - середні значення всіх моделей-претендентів даного ряду, розраховані також на перевірячій послідовності (використання принципу зовнішнього доповнення).

### 3.4.2. Формування плану проведення експерименту.

Враховуючи те, що алгоритм МГУА може працювати в умовах як активного, так і пасивного експерименту, був складений план з 4-ма змінними. У таблиці 3.2. поданий складений план проведення експерименту.

## Планування експерименту

№ експерименту	План експерименту				Y
	X1	X2	X3	X4	
	$2\varphi, ^\circ$	$n, \text{об/хв}$	$k$	$h, \text{мм} (L, \text{мм})$	$\Delta R, \text{мм}$
	1	2	3	4	5
1	-1	+1	+1	+2	0,03578
2	-1	-2	-1	-1	0,04987
3	+1	+2	+1	+1	0,0447
4	-2	+2	-2	-2	0,0423
5	+2	+2	-2	+2	0,077
6	+1	-2	-1	+1	0,05073
7	+2	+2	-1	+2	0,0697
8	-1	-2	-1	-1	0,04725
9	+2	+1	+2	+2	0,04
10	+1	-1	+2	-2	0,0199
11	-1	-1	+2	-2	0,0161
12	-2	+1	+1	-1	0,0284
13	-2	-1	+1	-1	0,0138
14	+1	+1	-2	-2	0,061
15	-1	-1	+2	+1	0,0188
16	+2	-2	-2	-1	0,063
17	-2	0	0	0	0,04897
18	+2	0	0	0	0,0704
19	0	-2	0	0	0,0518
20	0	+2	0	0	0,054
21	0	0	-2	0	0,072
22	0	0	+2	0	0,0173
23	0	0	0	-2	0,0495
24	0	0	0	+2	0,056

У плані експерименту 1 величина варіювалась на 3-х рівнях ( $2\varphi$ ), 2 величини варіювались на двох рівнях ( $n$  та  $k$ ), інші значення змінних фіксувались по факту та заносилися в матрицю експериментальних даних [53,57].

### **3.5. Висновки.**

1. Вперше обґрунтована та адаптована для ПКМ методика дослідження розшарування та розрахунку величини зношування свердла на основі методу аналізу віброакустичного сигналу.

2. Доведено, що методика дослідження відхилення отворів від круглості на основі методу найменших квадратів дозволяє отримати точні результати для ПКМ, де вимірювання стандартними методами викликає труднощі.

3. При розробці методу математичного моделювання відхилення отворів у ПКМ від круглості доведено, що найбільш ефективним методом моделювання є метод МГУА, що дозволяє по невеликій кількості експериментальних даних отримувати моделі, адекватні процесу свердління. Такий підхід значно скорочує строки розробки нового інструменту, забезпечує економію при постановці дослідів.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ ОРТОТРОПНИХ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ

Проблема розшарування вуглепластиків недостатньо вивчена. Дана проблема є визначальним параметром якості обробленої поверхні при свердлінні отвору. Одним з перших етапів дослідження є визначення критичного навантаження, що призводить до розшарування при свердлінні.

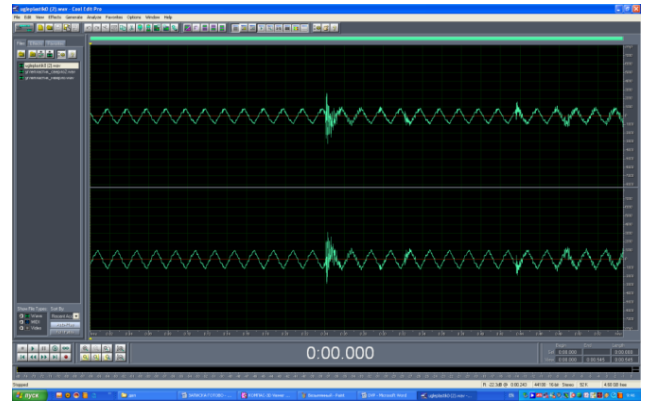
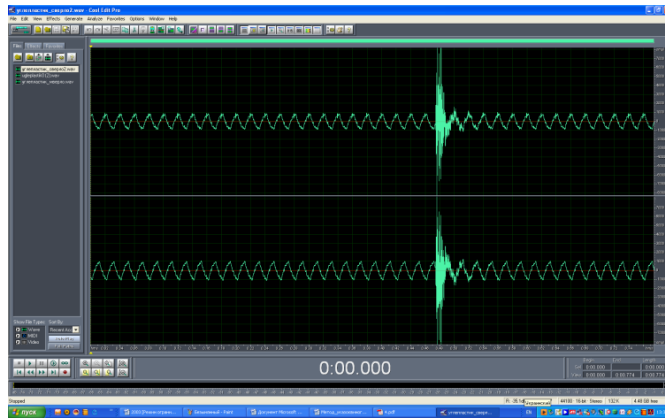
Наступним етапом є аналіз зношування інструменту та його залежність від геометрії інструменту та режимів різання.

Під якістю отворів розуміють ряд параметрів, зокрема точність отвору, наявність сколів, незрізаних волокон, термодеструкція, відхилення форми. У даній роботі був взятий для дослідження параметр відхилення отворів від круглості.

Для економії часу та зменшення кількості експериментів необхідне математичне моделювання процесу свердління. Зокрема, як було показано вище, пріоритетним методом моделювання бів обраний метод МГУА. За допомогою цього методу необхідно отримати математичну модель процесу, перевірити її адекватність та підтвердити експериментально.

#### **4.1. Визначення величини критичного навантаження розшарування вугле- та склопластиків.**

Підвищення осьової сили при свердлінні вище допустимого значення призводить до зношування інструменту, розшарування матеріалу та появи тріщин. Для визначення величини критичного навантаження розшарування було застосоване пристосування, описане в розділі III. Досліди проводились з реверсивними свердлами  $\varnothing 8$  мм з кутами в плані  $\varphi = 110^\circ$  та  $120^\circ$  а також пласким пуансоном. Також дослідження проводились з дво- та триперими і ступінчатими свердлами, для перевірки можливості застосування методики. Отримані сигнали представлені на рисунку 4.1, момент розшарування – на рисунку 4.2.

а) Пуансон – свердло з кутом  $\varphi=110^\circ$ б) Пуансон – свердло з кутом  $\varphi=120^\circ$ 

в) Пуансон – плоска поверхня

Рис. 4.1. Отримані сигнали

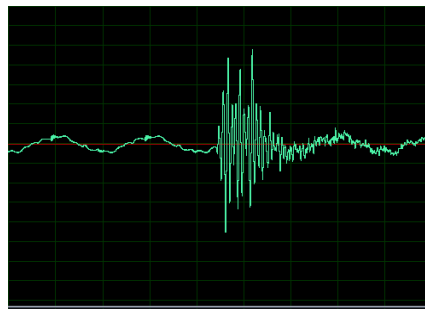


Рис. 4.2. Момент розшарування

Величина критичного зусилля розшарування для різних видів пуансона подана у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Отримані значення критичної сили розшарування

Вид пуансона	Діаметр пуансона, мм	Отримана критична сила, Н
Свердло з кутом $\varphi=110^\circ$	8	700
Свердло з кутом $\varphi=120^\circ$		780
Плоска поверхня		1012,4

Отримані критичні навантаження не перевищують розраховані значення, що дозволяє застосування методу віброакустичного сигналу для дослідження розшарування вугле- та склопластиків.

#### 4.2. Експериментальне підтвердження методу розрахунку зношування свердла на основі вібро-акустичного сигналу.

Проведення розрахунків величини та швидкості зношування свердла за описаною методикою вимагає отримання залежності розрахованих та вимірених значень зношування, виведення поправочних коефіцієнтів тощо.

Тому наступним етапом експерименту було з'ясування можливості застосування комп'ютерних технологій до процесу свердління ПКМ. Тобто були проведені безпосередні вимірювання величини зношування свердел. Для вимірювання використовувався мікроскоп УИМ-23.

На рисунку 4.3 показані величини, взяті для вимірювання. Тут  $l$  – відстань від осі свердла до точки вимірювання вздовж різальної кромки,  $h$  – величина зношування різальної кромки.

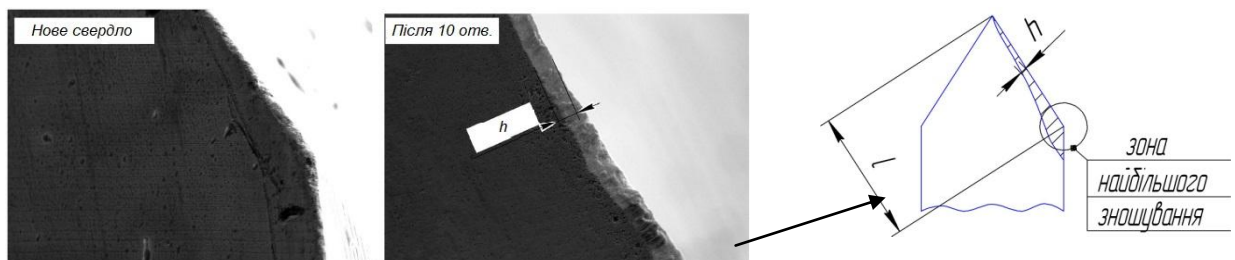


Рис. 4.3. Зображення різальної кромки свердла до і після процесу оброблення ПКМ

Отримані результати для двохступінчатих свердел з подвійними кутами в плані  $2\varphi=110^\circ-140^\circ$  наведені на графіках (рис. 4.4).

Після порівняння результатів вимірювання та розрахунків (рис. 4.5) був отриманий закон залежності  $h_{зам} = f(h_{розр})$ . Дана залежність є актуальною, коли немає можливості безпосереднього вимірювання зношування інструменту при обробленні великої кількості отворів.

$$h_{зам} = 1,4 * h_{розр} + 0,011$$

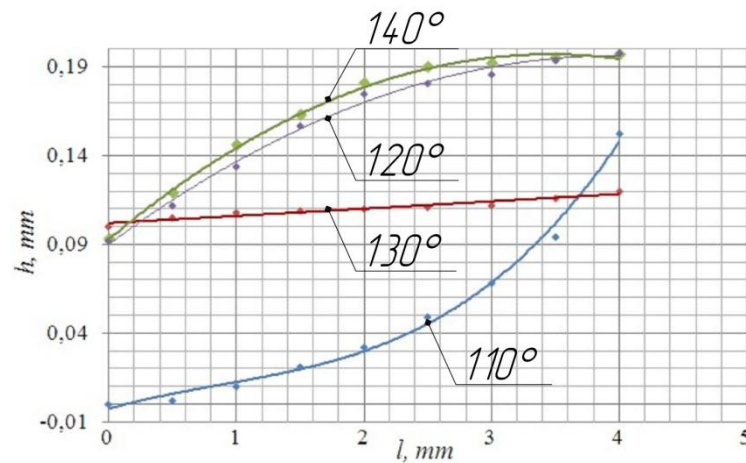


Рис. 4.4. Величина зношування вздовж різальної кромки свердла після 10 отворів

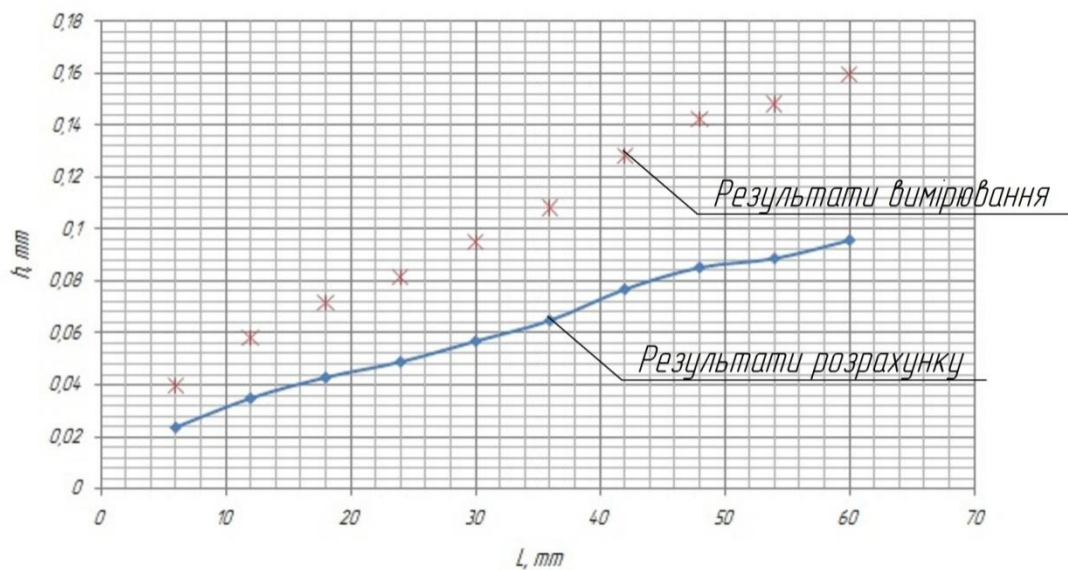


Рис. 4.5. Виміряна та розрахована на основі аналізу віброакустичного сигналу величина зношування свердла

Отже, аналіз можливості застосування вібро-акустичного сигналу до розрахунку величини зношування інструменту показав адекватність цього методу. Застосовуючи отриману залежність можна отримати значення зношування, не проводячи прямі вимірювання.

### 4.3. Порівняльний аналіз зношування свердел різних конструкцій.

Величина зношування інструменту є одним з визначальних факторів, що необхідно враховувати при виконанні задачі забезпечення якості отвору.

На практиці при обробці ПКМ найчастіше, як і при обробці металів, нормується величина фаски зношування по задній поверхні. Її величина

обмежується  $h_3 = 0,15 - 0,2$  мм, що принаймні в 1.5 рази менше, ніж при обробці металів, коли рекомендована величина зношування встановлюється  $h_3 > 0.3$  мм. Одним з критеріїв зношування при обробці ПКМ може служити радіус округлення різальної кромки  $\rho$  [88]. Використання цього критерію для оцінки працездатності інструментів в реальному виробництві утруднене, так як вимагає для його вимірювання спеціальних методик і приладів, наприклад, електронного мікроскопа. Стандартний мікроскоп не забезпечує точних результатів вимірювання.

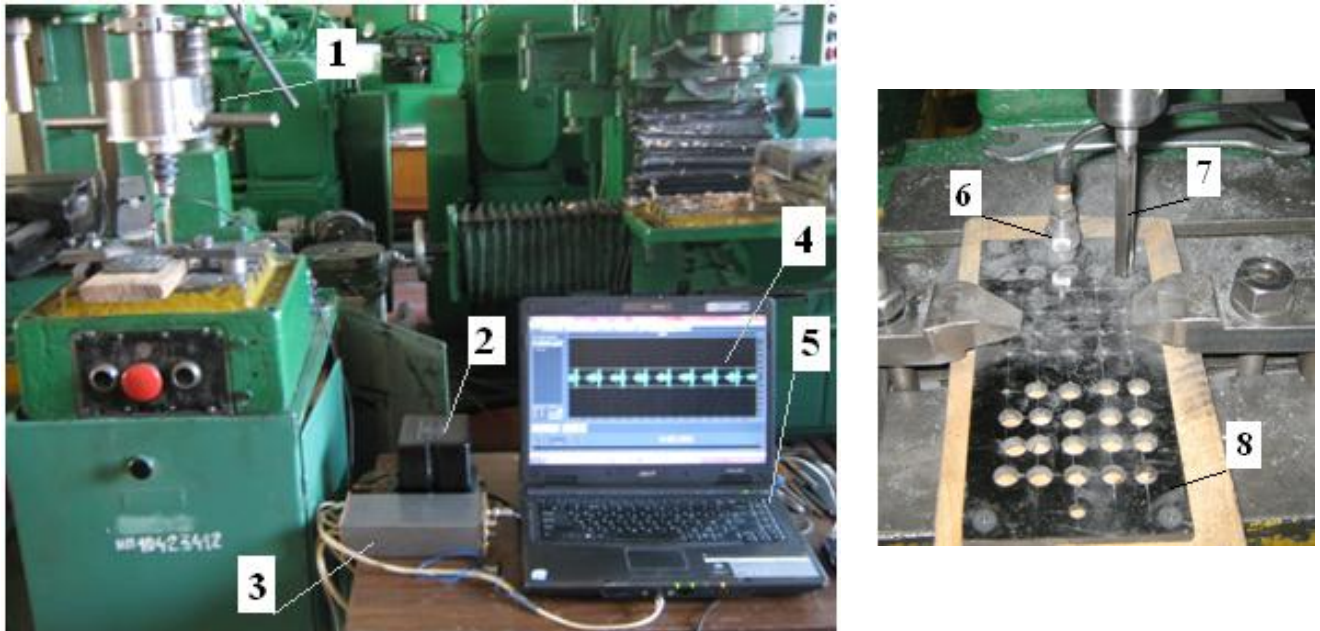
На практиці для оцінки працездатності інструментів часто використовують такі показники як їх ресурс та стійкість. Використання як критерію працездатності інструменту його ресурсу теж не завжди може бути прийнятним. Наприклад, ресурс, виражений кількістю оброблених даними свердлом отворів при заданих умовах обробки, хоч і є економічно інформативною характеристикою інструменту, однак обмежений конкретною операцією, тобто не є універсальним.

Більш універсальною характеристикою, що дозволяє порівнювати різні інструменти і умови обробки, є стійкість. Деякі емпіричні залежності стійкості інструментів від швидкості різання при обробці ПКМ можна знайти, наприклад, в роботі [17]. Стійкість інструменту залежить від геометричних параметрів різального інструменту (передній  $\gamma$  і задній  $\alpha$  кути) і режиму різання (швидкості різання  $v$ , подачі  $S$  і глибини різання  $t$ ).

В даному розділі описані результати проведення експерименту щодо визначення зношування свердла за допомогою віброакустичного датчика [66-68,76]. В процесі свердління змінювалася частота обертання шпинделя верстата (480 об/хв та 880 об/хв), а також застосовувався пристрій для реверсивного свердління, за рахунок чого процес обробки відбувається двонапрявлено, зі зміною частоти обертання відповідно до частоти обертання шпинделя (опис пристрою та розрахунок вихідної частоти обертання свердла подані у розділі 3). Пристрій створює власні коливання, що було враховано при розрахунку

величини зношування інструменту (за рахунок запису та подальшого віднімання холостого ходу установки).

На рис. 4.6 (а, б) показаний вигляд експериментальної установки та її робоча зона.



а

б

Рис. 4.6. а) Вигляд експериментальної установки, б) елемент установки  
 1 - Пристрій для реверсування обертального руху інструменту; 2- Підсилювач; 3- Перетворювач; 4- Вигляд зафіксованого вібросигналу; 5- Комп'ютер; 6- Віброакустичний датчик; 7- Свердло; 8- Експериментальний зразок матеріалу

На графіках (рис. 4.7 та рис. 4.8) показані залежності величини зношування інструменту від шляху, пройденого свердлом. На рис. 4.7 приведені графіки для ступінчатого та трьох зразків реверсивних свердел при зміні режиму оброблення. На рис. 4.8 показана залежність для ступінчатого та 3 зразків реверсивного інструменту при зміні головного подвійного кута в плані. З графіків видно, що для ступінчатого свердла величини зношування перевищує результати для реверсивних свердел, а збільшення кута в плані реверсивного свердла підвищує його зношування. Підвищення частоти обертання шпинделя верстата підвищує зношування свердла через підвищення температури при свердлінні.

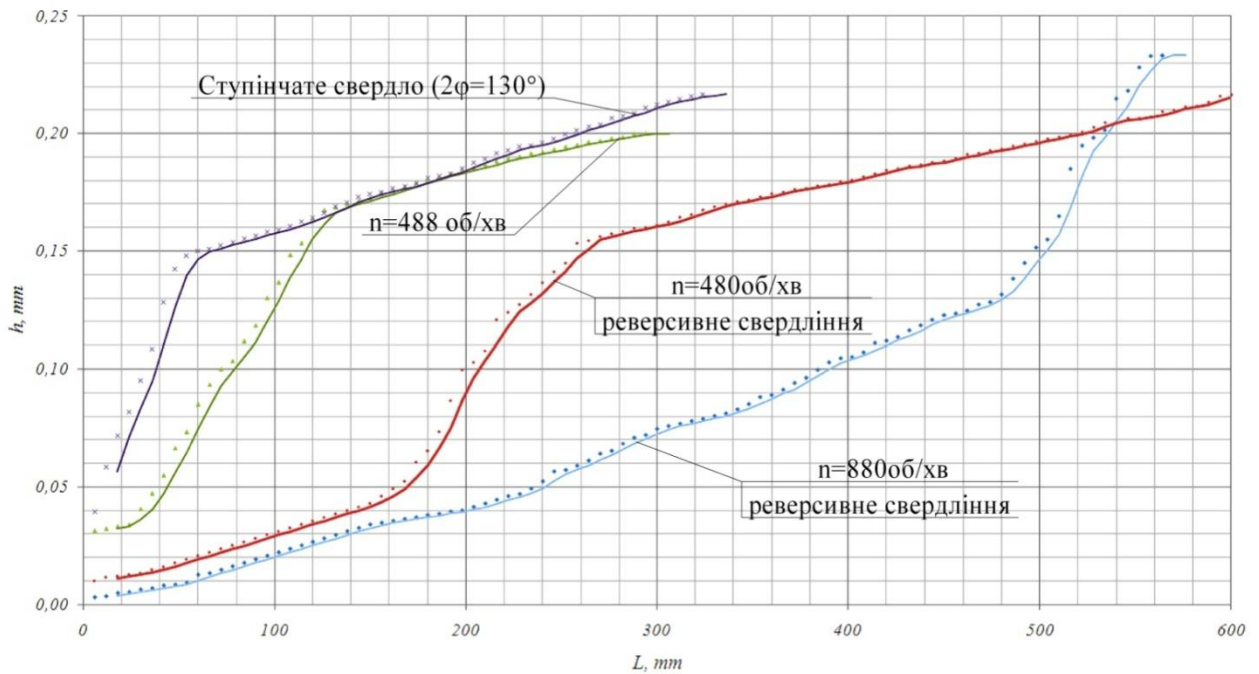


Рис. 4.7. Залежність величини зношування  $h=f(L)$  для ступінчатого свердла трьох зразків реверсивних свердел при зміні режиму оброблення

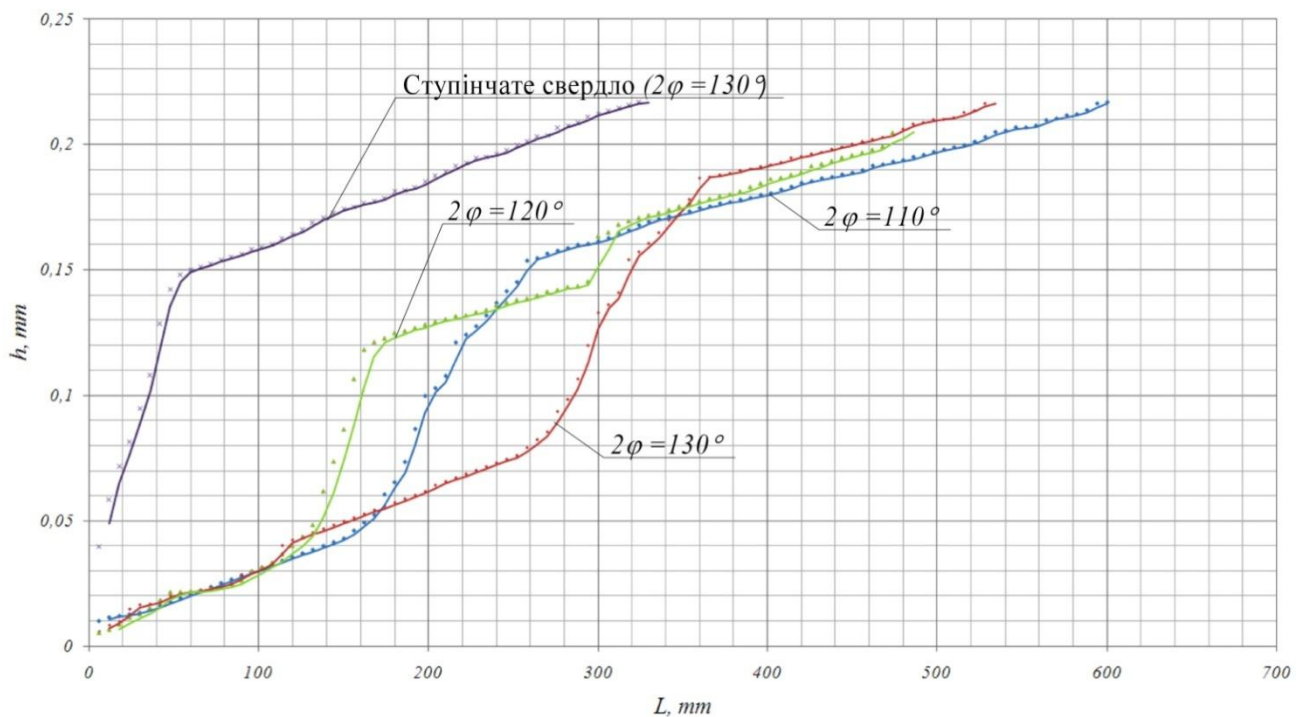


Рис. 4.8. Залежність величини зношування  $h=f(L)$  для ступінчатого свердла та трьох зразків реверсивних свердел при зміні кута  $2\phi$  ( $110^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ )

На рисунках 4.9 та 4.10 показані діаграми величини зношування та часу обробки експериментальними зразками інструменту на різних режимах.

На рисунках 4.9-4.10:

1, 2, 3 – Свердління реверсивним інструментом з різними кутами  $2\phi$  ( $110^\circ - 1, 120^\circ - 2, 130^\circ - 3$ ),  $n=480$  об/хв., однонапрявлене свердління.

1-1, 2-1, 3-1 - Свердління реверсивним інструментом з різними кутами  $2\phi$  ( $110^\circ - 1, 120^\circ - 2, 130^\circ - 3$ ),  $n=480$  об/хв., реверсивне свердління.

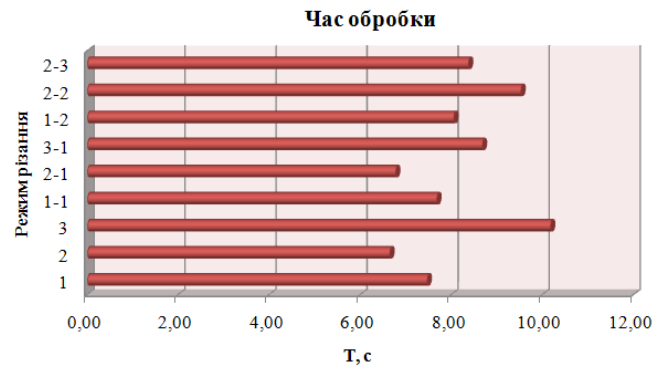
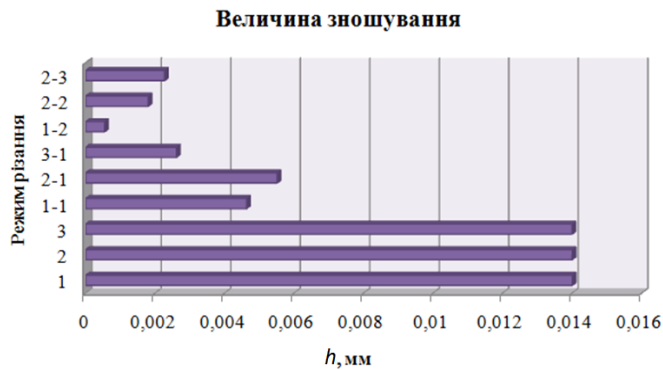


Рис. 4.9. Діаграма по величині зношування інструменту

Рис. 4.10. Діаграма по часу обробки інструментом

1-2, 2-2, 3-2 - Свердління реверсивним інструментом з різними кутами  $2\phi$  ( $110^\circ - 1, 120^\circ - 2, 130^\circ - 3$ ),  $n=880$  об/хв., реверсивне свердління.

Для визначення оптимальної конструкції інструменту було проведено порівняння величини та швидкості зношування для реверсивних, ступінчатих, дво- та триперих свердел.

Для проведення порівняльного дослідження було взято 2 зразки двоперих свердел ( $2\phi=110^\circ, 2\phi=120^\circ$ ), 2 зразки триперих свердел ( $2\phi=110^\circ, 2\phi=120^\circ$ ), чотири зразки ступінчатих свердел (рис. 4.11) з різними головними кутами в плані для другого (широкого) ступеня свердла, а саме  $2\phi_{21}=110^\circ, 2\phi_{22}=120^\circ, 2\phi_{23}=130^\circ, 2\phi_{24}=140^\circ$ . Кут в плані першої ступені свердла у всіх чотирьох зразків був зроблений однаковим, а саме  $2\phi_1=120^\circ$ . Для дослідження реверсивних свердел було взято 4 зразки ( $2\phi=110^\circ, 2\phi=120^\circ, 2\phi=130^\circ$ , сферична заточка різальної частини).

У таблиці 4.2 подані результати вимірювань та розрахунків величини та швидкості зношування для інструментів різної конструкції (кількість отворів 60) [62,63,65].

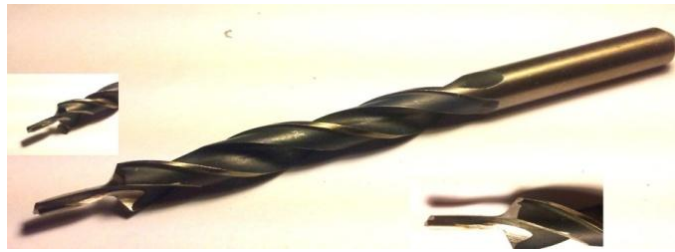


Рис. 4.11 Зображення двохступінчатого свердла для оброблення ПКМ

Таблиця 4.2

Величина та швидкість зношування свердел різної конструкції та геометрії

Свердло	Двопере		Трипере		Ступінчате				Реверсивне		
	110°	120°	110°	120°	110°	120°	130°	140°	110°	120°	130°
h, мм	1,083	1,016	0,25	0,275	0,253	0,23	0,218	0,226	0,157	0,167	0,17
v, мм/сек	0,18	0,21	0,075	0,036	0,07	0,056	0,053	0,055	0,025	0,032	0,042

З таблиці 4.2 видно, що швидкість зношування ріжучих кромки триперих свердел на порядок нижче, ніж для двоперих. Для ступінчатого свердла максимальна величина зношування  $h=0,253$  мм, для двоперого та триперого свердел відповідно  $h=1,083$  мм та  $h=0,275$  мм, тоді як для реверсивного свердла  $h=0,17$  мм.

Для реверсивного свердла максимальне зношування при наявності реверсування обертального руху інструменту спостерігалось  $h=0,17$  мм. Це на 57% менше, ніж для ступінчатого свердла та відповідно на 92% і на 66% , ніж для двоперого та триперого свердел.

По розрахункам були побудовані графіки залежності величини зношування від шляху, пройденого свердлом для ступінчатих свердел (рис. 4.12). При постійних умовах обробки спостерігається 2 зони зношування, а саме зона приработки (відбувається інтенсивне зношування), після якої встановлюється рівноважна шорсткість поверхні, та зона нормального зношування, у якій інтенсивність зношування мінімальна для заданих умов тертя [108].

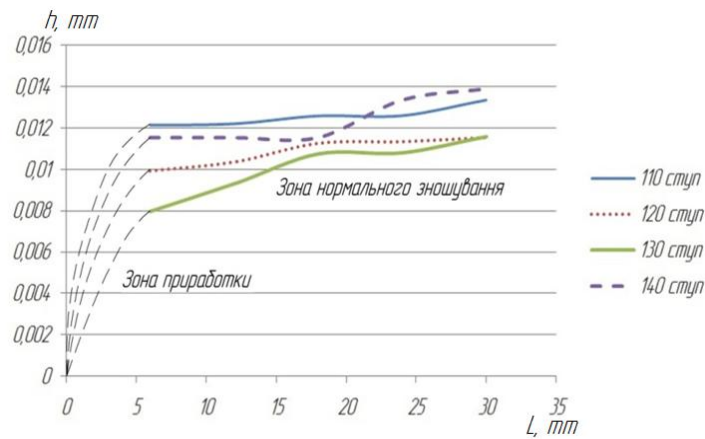


Рис. 4.12. Графік залежності величини зношування від шляху, пройденого свердлом

На діаграмі (рис. 4.13) наведена кількість отворів та вигляд утвореного отвору для обробки отворів у вугле- та склопластиках різними конструкціями інструменту.

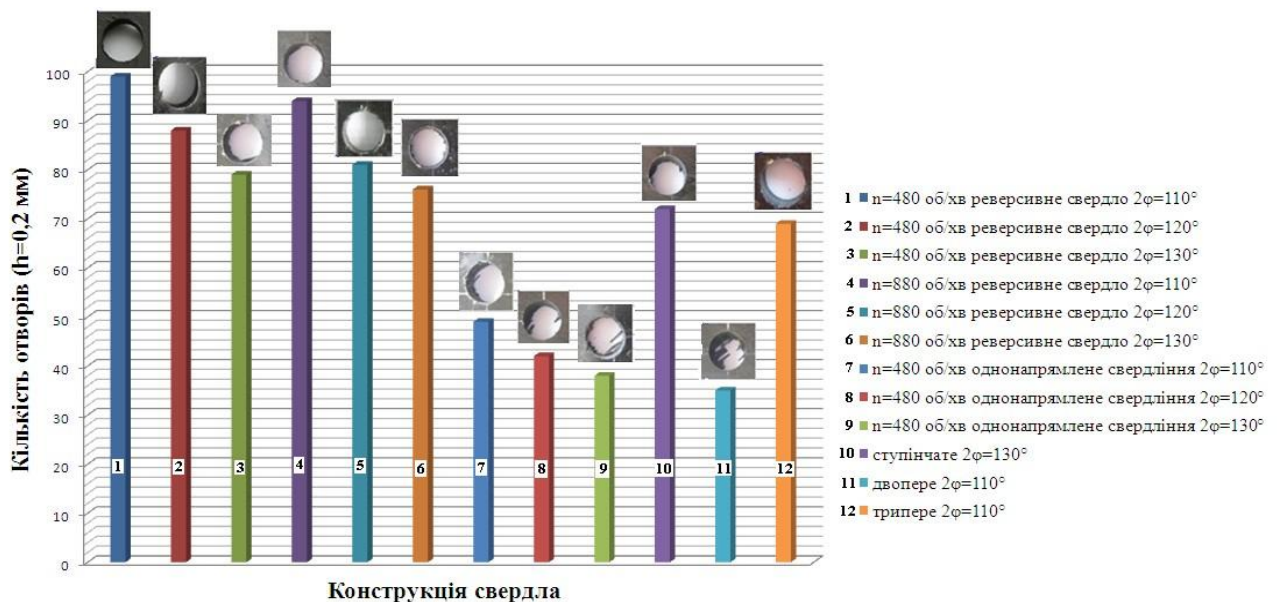


Рис. 4.13 Діаграма кількості отворів та вигляду отриманого отвору

З діаграми видно, що найменшу кількість отворів можливо обробити двоперим свердлом та реверсивними свердлами при стандартному однонапрявленому свердлінні. Найбільшу кількість отворів – реверсивним свердлом з кутом в плані  $110^\circ$  при частоті обертання шпинделя верстата 480 об/хв., при реверсивному свердлінні.

На рисунках 4.14 - 4.17 подані загальні радіальні діаграми для всіх типів досліджуваних свердел. Оптимальна геометрія інструменту обирається

враховуючи мінімальне значення всіх параметрів на діаграмі.

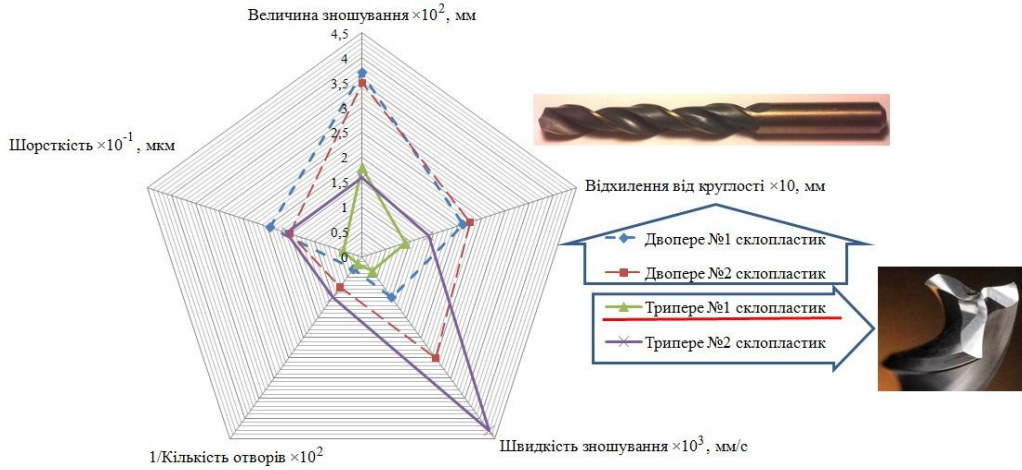


Рис. 4.14. Загальна радіальна діаграма для обробки склопластику двоперими та триперими свердлами.

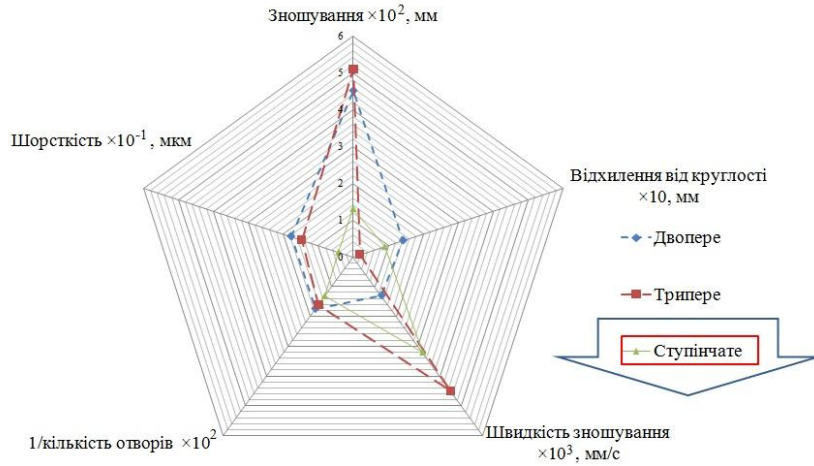


Рис. 4.15. Загальна радіальна діаграма для оброблення вуглепластика двоперими, триперими та ступінчатим свердлом

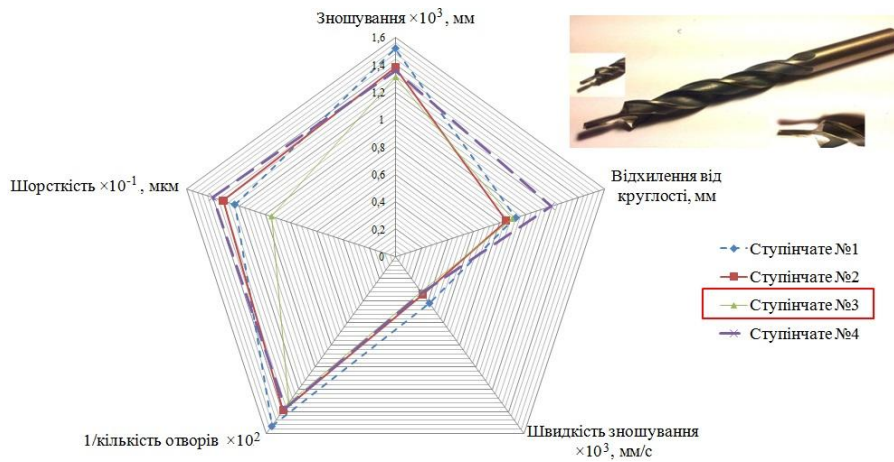


Рис. 4.16. Загальна радіальна діаграма для ступінчатого свердла чотирьох конструкцій

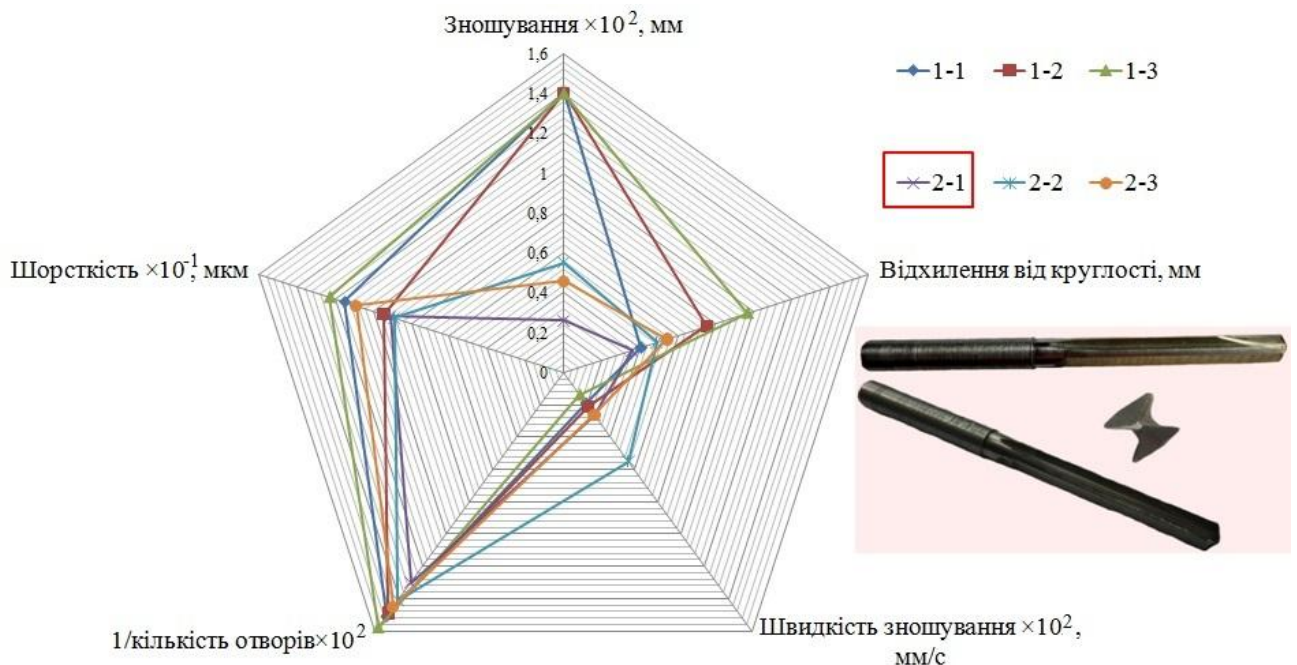


Рис. 4.17. загальна радіальна діаграма для реверсивного свердла

Згідно радіальних діаграм геометрія інструменту обирається враховуючи комбінацію мінімумів значення всіх параметрів.

#### 4.4. Дослідження залежності відхилення від круглості отворів у ПКМ від конструкції реверсивного інструменту та частоти обертання шпинделя верстата.

Найбільш серйозною проблемою при свердлінні отворів у ПКМ є розшарування, що значно знижує міцність та надійність кріплення. При обробці ПКМ застосовується стандартне свердління, яке викликає появу розшарування та розлохмачування волокон матеріалу. Для уникнення появи даних дефектів в роботі застосовувався реверсивний (двонапрямлений) рух інструменту [85-87]. На рисунках 4.18 та 4.19 Зображений вигляд отворів на вході та на виході свердла.

Після вимірювання отворів були побудовані круглограми (рис. 4.20) та розраховано відхилення отворів від круглої форми для кожного з режимів.

Результати розрахунків відхилення утворених отворів від круглої форми відображені на діаграмі (рис. 4.21). З діаграми видно, що при кожному режимі різання найменше відхилення від круглості дає свердло з різною геометрією.

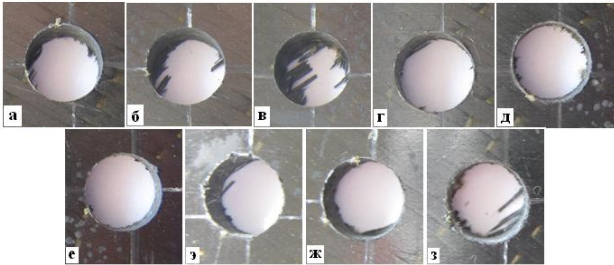


Рис. 4.18. Зображення отворів на вході свердла

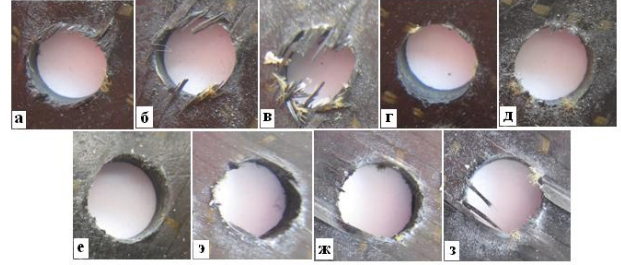
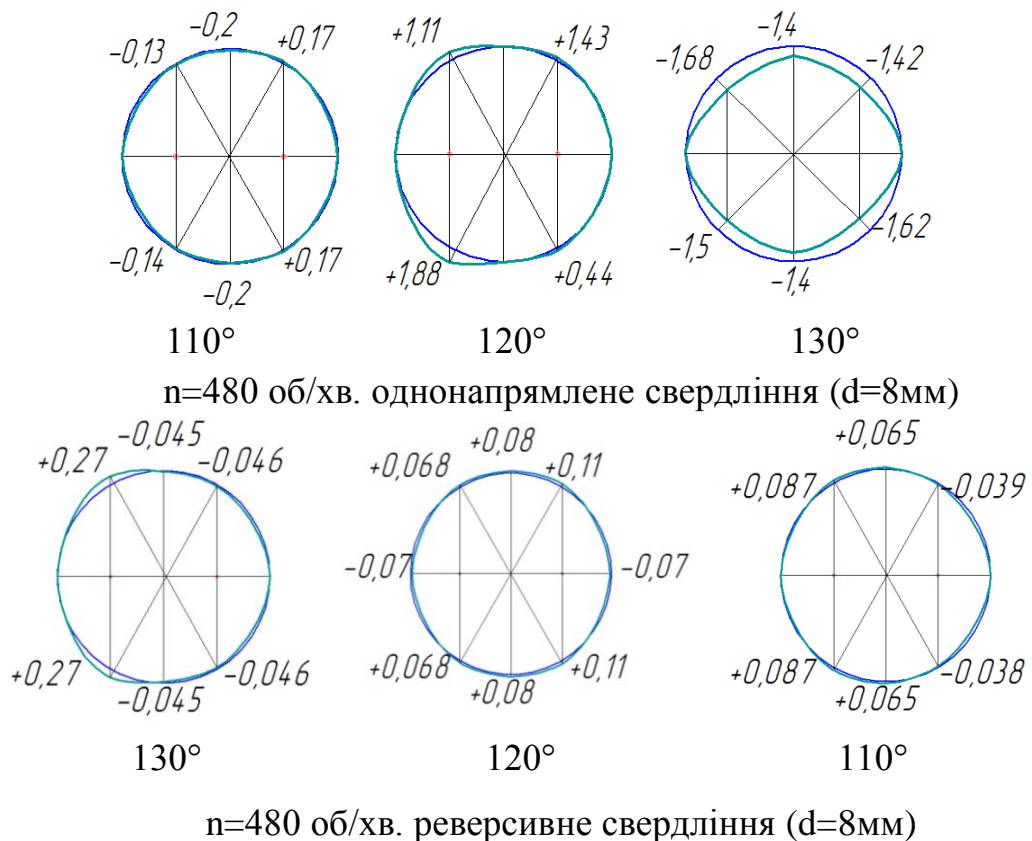
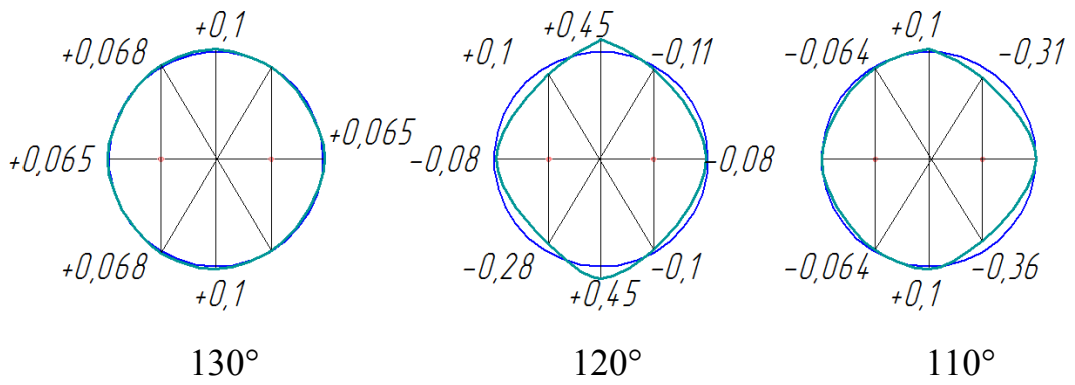


Рис. 4.19. Зображення отворів на виході свердла

а. зразок 1,  $n=480$  об/хв., без пристосування; б. зразок 2,  $n=480$  об/хв., без пристосування; в. зразок 3,  $n=480$  об/хв., без пристосування; г. зразок 1,  $n=480$  об/хв., з пристосуванням; д. зразок 2,  $n=480$  об/хв., з пристосуванням; е. зразок 3,  $n=480$  об/хв., з пристосуванням; є. зразок 1,  $n=880$  об/хв., з пристосуванням; ж. зразок 2,  $n=880$  об/хв., з пристосуванням; з. зразок 3,  $n=880$  об/хв., з пристосуванням;

В той же час найменше середнє відхилення від круглості отримується на режимі 2 ( $n=480$  об/хв з реверсуванням обертального руху інструменту). Це робить перспективним більш точний підбір параметрів різання та геометрії інструменту саме для цього режиму.





$n=880$  об/хв. реверсивне свердління ( $d=8$ мм)

Рис. 4.20. Круглограми отворів після обробки на різних режимах

**Відхилення круглості отворів**

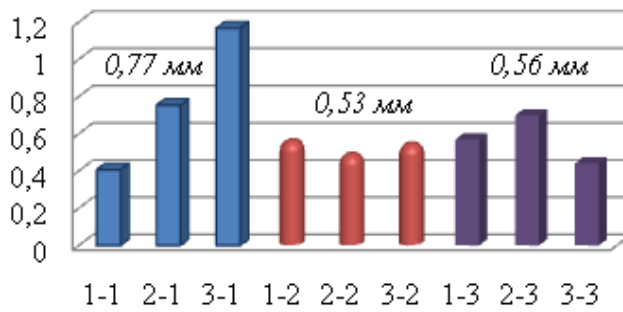
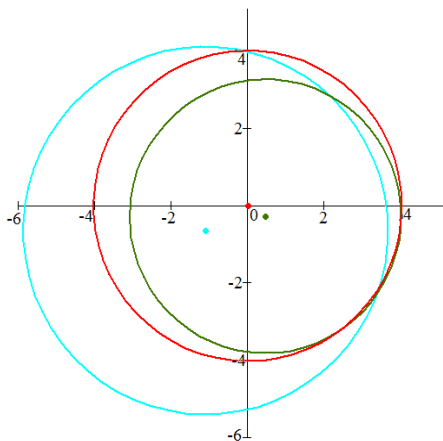


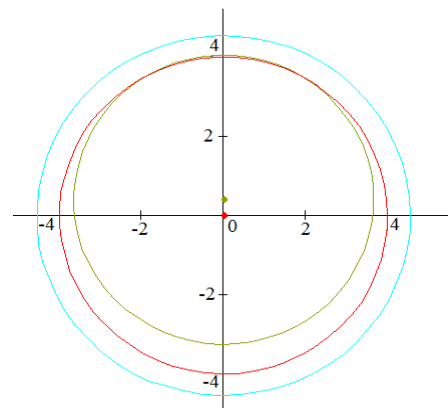
Рис. 4.21. Середнє відхилення отворів від круглої форми

Математична оцінка якості отворів

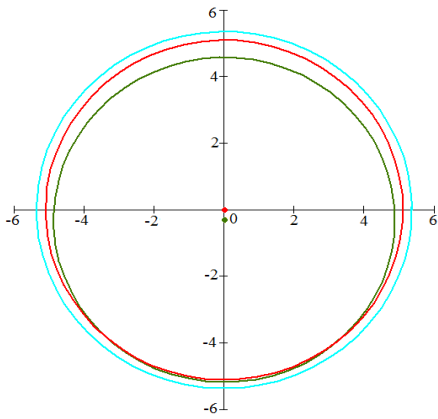
В результаті розрахунків, проведених за методикою, описаною вище (розділ 3) були отримані наступні результати (рис. 4.22).



а. Двопере свердло



б. Реверсивне свердло  $2\phi=110^\circ$   
однонапрявлене свердління



в. Ступінчате свердло

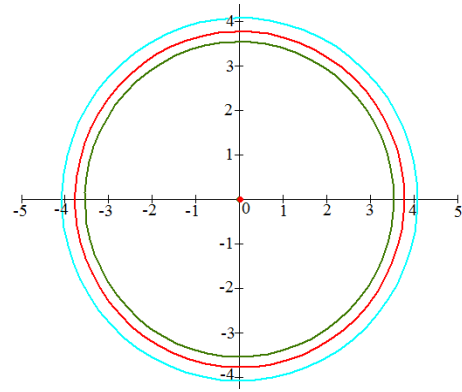
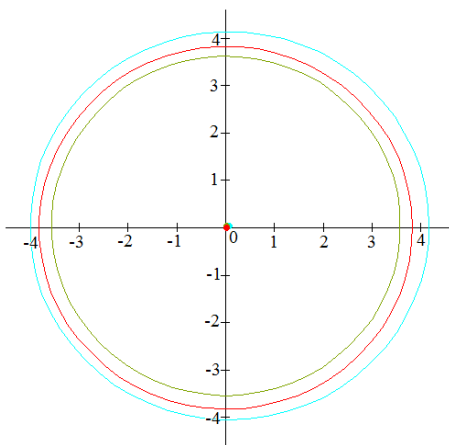
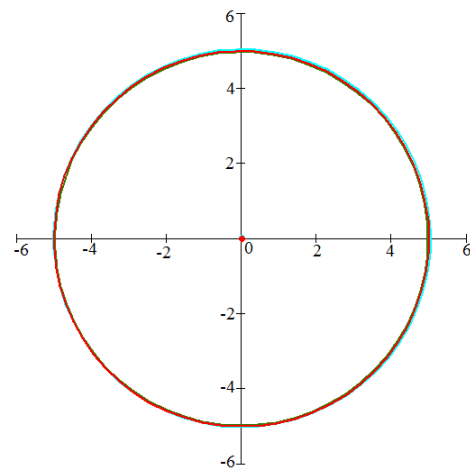
г. Реверсивне свердло  $2\varphi=120^\circ$   
реверсивне свердлінняд.  $2\varphi=130^\circ$  реверсивне свердлінняе.  $2\varphi=110^\circ$  реверсивне свердління

Рис. 4.22. Результати математичної оцінки круглості отворів

Показником точності отвору, виходячи з методики є ступінь співпадіння радіусів та центрів оптимального, а також вписаного та описаного кіл.

З рисунків можна бачити велике відхилення центрів кіл для двоперого свердла, а також наближення центрів кіл до співпадіння при реверсивному свердлінні. Зокрема (рис. 5.6) найбільше відхилення радіусів  $\Delta R=0,95$  мм для реверсивного свердла при частоті 480 об/хв без реверсування обертального руху,  $\Delta R=0,29$  мм для двоперого свердла,  $\Delta R=0,049$  мм для ступінчатого свердла,  $\Delta R=0,011$  мм для реверсивного свердла з  $2\varphi=110^\circ$  при частоті 480 об/хв з реверсуванням обертального руху свердла.

Отже, в результаті застосування методики математичної оцінки відхилення отвору від круглості було отримане співпадіння результатів оцінки

та прямого вимірювання, що доводить адекватність та можливість застосування методики до визначення якості отворів при свердлінні ПКМ.

#### **4.5. Побудова матриці експерименту та отримання математичної моделі середньої величини відхилення отворів від круглості.**

Процес обробки ПКМ свердлінням можливо розглянути як систему, рівні якої залежать від певної кількості факторів. Характер їх взаємодії визначає неоднорідність системи, складність її математичного опису.

Процес свердління, як і будь-який процес механічної обробки, характеризується великою кількістю настільки складних і зумовлених між собою зв'язків, що будь-яка спроба представити їх при моделюванні у всій сукупності виявилася б неможливою. Це однаковою мірою стосується моделювання свердління як стандартним інструментом, так і новими конструкціями.

В якості змінних параметрів для моделювання процесу свердління ПКМ були обрані:

- Подвійний головний кут в плані свердла  $2\varphi, ^\circ$  (X1);
- Частота обертання шпинделя верстата  $n$ , об/хв., (X2);
- Параметр, що вказує на наявність або відсутність реверсування обертального руху свердла  $k$ , (X3)
- Довжина шляху, пройденого свердлом (стійкість)  $L$ , мм. (X4);
- Зношування свердла  $h$ , мм (X5);

Як показник якості отвору було обране середнє відхилення отвору від круглості  $\Delta R$ , мм (Y).

Границі вимірювання параметрів, отримані на основі аналізу літературних джерел [38,46,53,82,113,144], теоретичних та експериментальних досліджень представлені у таблиці 4.3.

Для вибору границь вимірювання у роботі керувалися вимогами до геометричних параметрів інструменту та режимів різання при свердлінні вугле- та склопластиків.

## Границі зміни експериментальних параметрів

Змінна	Границя вимірювання	
	Нижня	Верхня
X1(2φ) °	110	130
X2 (n) об/хв	480	880
X3 (k)	1	2
X4 (L), мм	6	600
X5 (h), мм	0,001	0,2

У таблиці 4.4. подана матриця експериментальних даних, отримана за складеним планом експерименту.

В результаті обробки експериментальних даних був отриманий ряд математичних моделей  $\Delta R=f(2\varphi, n, k, L)$ , та  $\Delta R=f(2\varphi, n, k, h)$ .

Таблиця 4.4.

## Матриця експериментальних даних

№	x1	x2	x3	x4	x5	Y
	2φ°	n об/хв	k (1;2)	L, мм	h, мм	ΔRсер
1	2	3	4	5	6	7
1	110	880	1	60	0,01267	0,03578
2	110	480	2	48	0,0663	0,04987
3	120	880	1	48	0,027	0,0447
4	110	480	2	12	0,0322	0,0423
5	130	880	2	60	0,144	0,077
6	120	480	2	24	0,0633	0,05073
7	130	880	2	24	0,069	0,0697
8	110	480	2	24	0,0338	0,04725
9	130	880	1	60	0,01883	0,04
10	130	480	1	12	0,0065	0,0199
11	110	480	1	24	0,012667	0,0161
12	110	880	1	24	0,008	0,0284
13	110	480	1	12	0,0115	0,0138
14	130	880	2	12	0,0487	0,061
15	110	480	1	48	0,0177	0,0188
16	130	480	2	24	0,065	0,063

Продовження таблиці 4.4.

1	2	3	4	5	6	7
17	110	480	2	36	0,0472	0,04897
18	130	480	2	36	0,092	0,0704
19	120	480	2	36	0,083	0,0518
20	120	880	2	36	0,0865	0,054
21	130	880	2	36	0,0973	0,072
22	110	480	1	36	0,0147	0,0173
23	120	480	2	12	0,048	0,0495
24	120	480	2	60	0,098	0,056

На основі плану експерименту була побудована матриця експериментальних даних, на базі якої побудована математична модель виду  $\ln R = f(2\varphi, n, k, L)$  у просторі  $x, 1/x, \ln x$ . Отримана математична модель має наступний вигляд:

$$\ln R = -0,16807 - 11,78 \cdot (1/n \cdot k) + 5,838 \cdot 10^{-2} \cdot (2\varphi/n) + 2,066 \cdot 10^{-2} \cdot (2\varphi/n \cdot k) + 0,04423 \cdot 10^{-2} \cdot (L \cdot 2\varphi/k)$$

Отримана відносна похибка моделі:  $\delta = 4,92\%$

Як показує аналіз отриманої моделі, найбільший вплив на відхилення від круглості чинить частота обертання шпинделя верстата та кут в плані свердла, а також наявність або відсутність реверсивного руху свердла, меншою мірою впливає шлях, пройдений свердлом, що характеризує критичне зношування та корелюється з величиною зношування свердла. Для проведення аналізу впливу перерахованих факторів на відхилення від круглості необхідно побудувати графічні залежності  $\Delta R$  при зміні одного з факторів при постійних середніх значеннях інших факторів.

На рисунках 4.23 - 4.25 Подані графічні залежності  $\Delta R = f(L)$  при  $2\varphi = 120^\circ$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ ,  $n=680$ об/хв.;  $\Delta R = f(2\varphi)$  при  $L=300$  мм,  $k=1$ ,  $k=2$ ,  $n=680$ об/хв.,  $\Delta R = f(n)$ , при  $L=300$  мм,  $2\varphi = 120^\circ$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ .

З графічних залежностей видно, що при зміні часу роботи свердла коефіцієнт  $k$ , що вказує на відсутність або наявність реверсування обертально руху свердла має значний вплив (майже вдвічі) на  $\Delta R$ . При зміні частоти

обертання шпинделя верстата наявність реверсивного руху зменшує величину відхилення від круглості майже вдвічі, як і при зміні кута в плані.

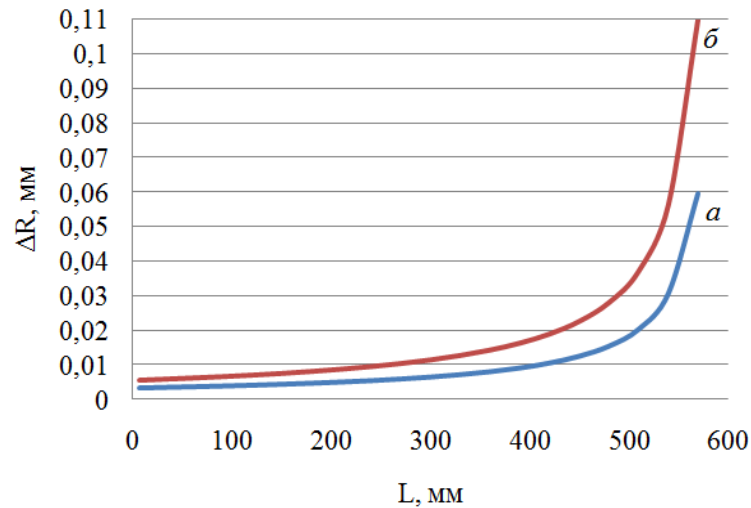


Рис. 4.23 Графічна залежність  $\Delta R=f(L)$  при  $2\varphi=120^\circ$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ ,  $n=680\text{об/хв.}$ ;

а –  $k=1$ ; б –  $k=2$

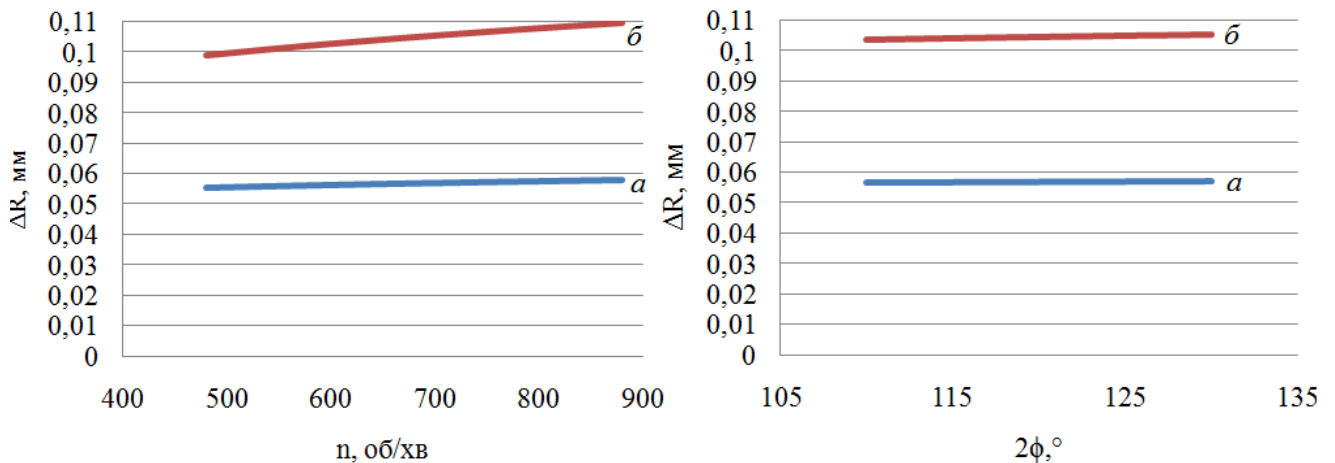


Рис. 4.24 Графічна залежність  $\Delta R=f(n)$

при  $L=300 \text{ мм}$ ,  $2\varphi=120^\circ$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ .

а –  $k=1$ ; б –  $k=2$

Рис. 4.25 Графічна залежність  $\Delta R=f(2\varphi)$  при  $L=300 \text{ мм}$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ ,

$n=680\text{об/хв.}$

а –  $k=1$ ; б –  $k=2$

Зміна часу роботи свердла викликає більш стрімку зміну величини  $\Delta R$  починаючи з 450 мм, що вказує на більший вплив даного фактору, ніж частоти та кута в плані

#### 4.6. Висновки.

1. Вперше застосовано метод віброакустичного сигналу до дослідження розшарування вугле- та склопластиків, та на базі

експериментальних досліджень доведено адекватність визначення за критичним навантаженням розшарування вугле- та склопластиків величини зношування інструменту без виконання безпосередніх вимірювань.

2. Встановлено, що максимальне зношування  $h=0,2$  мм для реверсивного свердла при  $n=480$  об/хв досягається при обробленні 99 отворів, при  $n=880$  об/хв – 89 отворів, при однонапрявленому свердлінні реверсивним свердлом ( $n=480$  об/хв) – 49 отворів, для ступінчатого свердла – 65 отворів. Підвищення кута в плані призводить до підвищення зношування свердла та зниження його стійкості.

3. На основі алгоритму МГУА побудована математична модель у вигляді  $\Delta R=f(\varphi, n, k, L)$ , при чому встановлено, що найбільший вплив на величину  $\Delta R$  має частота обертання шпинделя верстата та кут в плані сверла. Встановлено, що оптимальна частота  $n=480$  об/хв., оптимальний кут в плані  $\varphi=110^\circ$ .

## РОЗДІЛ 5

### ЛАБОРАТОРНО-ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 5.1. Порівняльний аналіз величини відхилення отворів від круглості для інструменту різної конструкції.

У таблиці 5.1 подані результати дослідження відхилення отворів від круглості при свердлінні ПКМ двоперими, триперими, ступінчатими та реверсивними свердлами.

Таблиця 5.1

Результати вимірювань відхилення від круглості для двоперого, триперого, ступінчатого та реверсивного свердел

Відхилення від круглості, мм						
Матеріал заготовки	Свердло					
	двопере		трипере		Ступінчатє	Реверсивне
	Конструкція					
	1	2	1	2	3	1
	2φ=110°	2φ=120°	2φ=110°	2φ=120°	2φ=130°	2φ=110°
Склопластик	0,93	0,926	0,61	0,64	0,53	0,38
Вуглепластик	1,11	1,42	0,71	0,69	0,57	0,49

Як видно з таблиці 5.1, відхилення від круглості оброблених отворів для реверсивного свердла на 56% менше, ніж для двоперого, на 31% - ніж для триперого та на 14% менше, ніж для ступінчатого свердла.

Відхилення від круглості отворів оброблених ступінчатим свердлом.

Свердління ПКМ відбувалося з однаковим зусиллям різання, тобто  $P_0 = const$ . В результаті проведення експерименту були виявлені відмінності в якості утворених отворів, а також в самому процесі свердління. На рисунках 5.1 та 5.2 представлений вигляд отриманих отворів на вході та виході відповідно (рисунки г, д, е, є) порівняно з отворами, що були отримані при обробці спіральним двохперим та спіральним трьохперим свердлами (б, в) а також ступінчастим свердлом матеріалу Twintex (а).

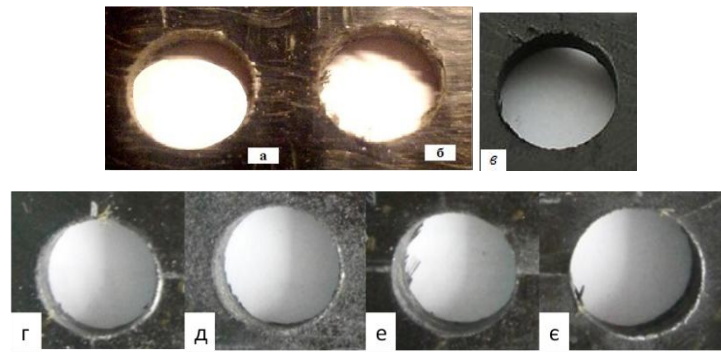


Рис. 5.1. Зображення отвору на вході після обробки

а - ступінчастим спіральним свердлом, б - спіральним двохперим свердлом, в - спіральним трьохперим свердлом, г - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=110^\circ$  (вуглепластик), д - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=120^\circ$  (вуглепластик), е - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=130^\circ$  (вуглепластик), є - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=140^\circ$  (вуглепластик)

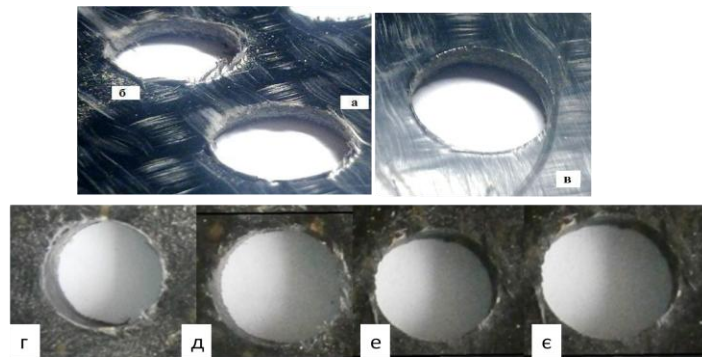


Рис. 5.2. Зображення отвору на виході після обробки

а - ступінчастим спіральним свердлом, б - спіральним двохперим свердлом, в - спіральним трьохперим свердлом, г - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=110^\circ$  (вуглепластик), д - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=120^\circ$  (вуглепластик), е - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=130^\circ$  (вуглепластик), є - ступінчастим свердлом з  $2\varphi_2=140^\circ$  (вуглепластик)

Відхилення отворів від круглої форми. Після проведення вимірювання відхилення отворів від круглої форми в зразку ПКМ були отримані результати, зображені на рисунках 5.3.

Залежність середнього відхилення отворів у ПКМ від круглості від геометричних параметрів ступінчатого свердла показана на діаграмі (рис. 5.4).

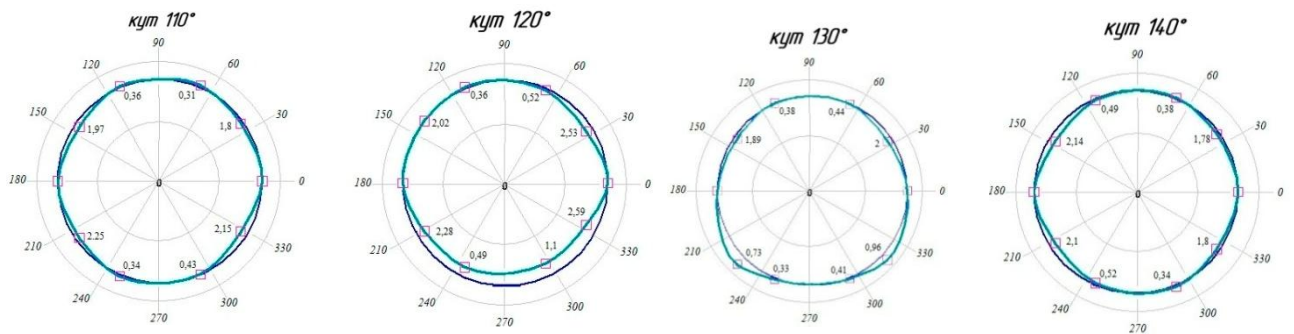


Рис. 5.3. Схема відхилення отворів від круглої форми для 4 зразків інструменту

Можна зробити висновок, що зразок свердла з кутом в плані  $120^\circ$  дає найбільше відхилення отворів і найгіршу якість як на вході, так і на виході інструменту. І сам процес свердління цим зразком важчий, ніж трьома іншими. Найменше відхилення отворів згідно вимірювань та розрахунків дає свердло з подвійним кутом в плані  $130^\circ$ .



Рис. 5.4. Діаграма залежності середнього відхилення отворів у ПКМ від круглої форми від геометрії інструменту

За методикою, описаною у розділі 4 була проведена оцінка відхилення отворів у ПКМ від круглості. На діаграмі (рис. 5.5) показані результати проведеної оцінки відхилення центрів і радіусів експериментального та розрахованих кіл.

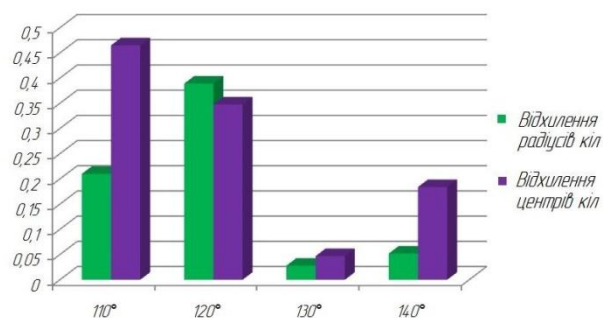


Рис. 5.5. відхилення центрів та радіусів кіл для ступінчатого свердла

Діаграма відхилення отворів від круглості для свердел різної конструкції представлена на рисунку 5.6.

З діаграми видно, що найбільше середнє відхилення у двохперого свердла, а також у зразків реверсивного свердла 1 та 2 при однонапрявленому свердлінні.

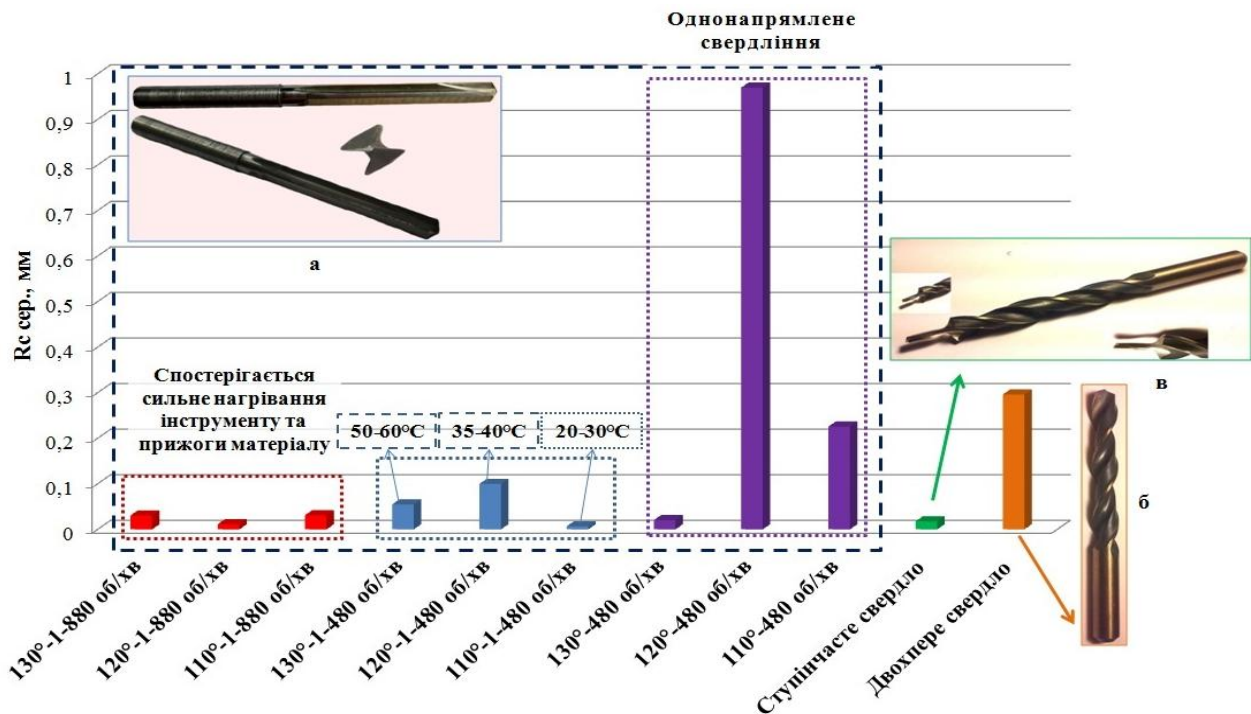


Рис. 5.6. Діаграма відхилення від круглості отворів для свердел різної геометрії

При частоті обертання шпинделя верстата 880 об/хв. відбувається сильне нагрівання інструменту, а також прижоги матеріалу навколо отворів, що значно знижують якість. Тобто оптимальною геометрією реверсивного інструмента є головний подвійний кут в плані 110° при частоті 480 об/хв. Для однонапрявленого свердління мале відхилення отворів від круглості дає двохступінчасте свердло з  $2\phi=130^\circ$ .

## 5.2. Експериментальне дослідження температури в зоні різання.

Підвищення температури, що виникає при різанні ПКМ, вище допустимого значення призводить не тільки до більш стрімкого зношування інструменту, але і до погіршення якості обробленої поверхні. Теплові процеси при різанні ПКМ ще недостатньо вивчені, що обумовлено: неоднорідністю

ПКМ, специфічними умовами деформування і руйнування зрізаного шару (утруднене стружкоутворення); а також наявністю в ПКМ неструмопровідних елементів. Підвищення температури в процесі свердління підвищує імовірність розшарування через розплавлення матриці та порушення цілісності структури матеріалу.

В даний час створення методики для вимірювання температури в зоні різання при обробці ПКМ переважно зводиться до адаптації вже існуючих підходів, що використовуються для дослідження температури різання при обробці металів. До найбільш поширених відноситься метод термопари, що ґрунтується на ефекті Зеебека, який може бути реалізований кількома шляхами. Виділяють [45,60,88] методи: природної, штучної і напівштучної термопар.

Застосування методів штучної та напівштучної термопар у разі свердління ПКМ обмежується неможливістю свердління технологічних отворів великої глибини і малого діаметра, тобто цей метод для вимірювання температури різання при обробці ПКМ в традиційній постановці може бути малоефективним. Традиційно застосовується при обробці металів спосіб природної термопари, що складається з двох електродів «інструмент - заготовка», що ґрунтується на вимірюванні термо- ЕРС між місцем контакту матеріалів різця і заготовки (зона різання) і струмовідводячими елементами.

В ході проведенні дослідження застосовувалося вимірювання температури з застосуванням природної термопари за схемою, зображеною на рисунках 5.7 та 5.8.

На виробництві та при проведенні експериментальних досліджень широко застосовується спосіб вимірювання температури пірометрами шляхом реєстрації інфрачервоного випромінювання нагрітої поверхні. Основною особливістю даного методу є безконтактна передача інформації.

Теоретичною основою цього методу є залежність Планка і закон Віна, зміст яких зводиться до встановлення залежності між температурою, довгої хвилі і енергетичною світимістю [1]. Дане питання розглядали зокрема Song W.L., Xiaotian Z., Valavan U. та інші. Були виконані порівняння цього способу із

застосуванням оптоволоконна для отримання інфрачервоного випромінювання безпосередньо із зони різання зі способом виміру температури методом штучної термопари при свердлінні ПКМ. Більш точні вимірювання були отримані за допомогою пірометра. Тобто даний метод дозволяє отримати точну температурну залежність при свердлінні.

У роботі застосовані 2 методи, а саме метод природної термопари та метод вимірювання температури за допомогою лазерного пірометра (рис. 5.9) для порівняння методів, визначення більш точного з них, а також отримання тарировочної характеристики термопари.

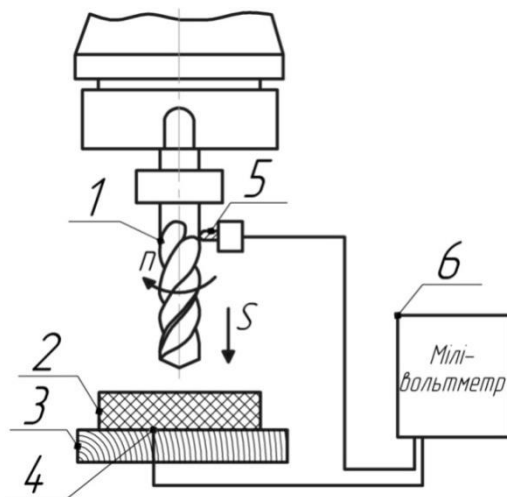


Рис. 5.7. Схема вимірювання температури інструменту



Рис. 5.8. Зображення пристосування для вимірювання температури інструменту

На рисунку 5.7 1 – інструмент, 2 – зразок вуглепластика, 3 – підложка, 4 – місце введення одного з контактів мілівольтметра, 5 – щітка, до якої прикріплений другий контакт вольтметра та яка перебуває в безпосередньому контакті з інструментом, 6 – мілівольтметр для вимірювання термо-ЕРС.

Температурна залежність для реверсивного інструменту показана на рисунку 5.11. Температура по головній різальній кромці майже вдвічі перевищує температуру на периферії свердла.

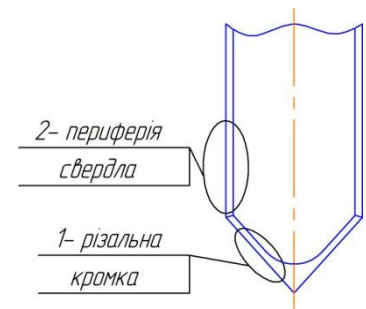


Рис. 5.9. Зображення лазерного пірометра, що був застосований для дослідження

Рис. 5.10. Схема вимірювання температури пірометром

Порівняння температури інструменту було проведене для 4 зразків ступінчатого свердла ( $2\phi=110^\circ, 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ$ ) та трьох зразків реверсивного ( $2\phi=110^\circ, 120^\circ, 130^\circ$ ). Дослідження проводилося з постійною подачею зі зміною частоти обертання шпинделя верстата (480 об/хв - 880 об/хв).

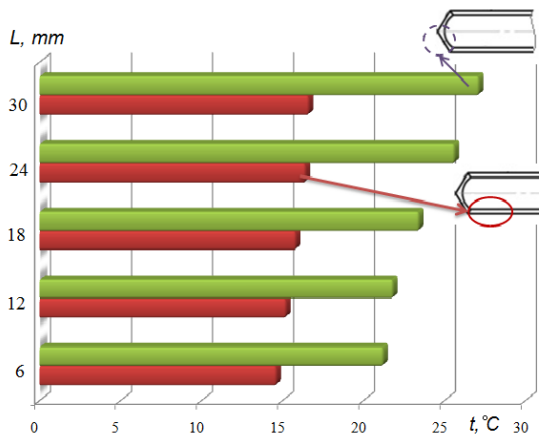


Рис. 5.11. Температура в зоні різання при реверсивному свердлінні

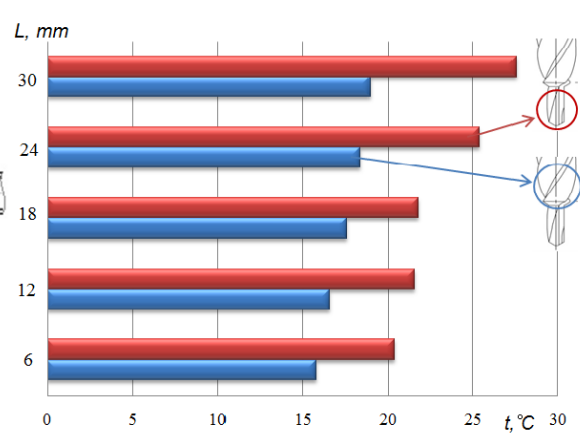


Рис. 5.12. Температура в зоні різання для свердління ступінчатим сверлом

На рисунку 5.12 Показана залежність температури ступінчатого свердла від шляху, пройденого інструментом, а також в залежності від місця вимірювання температури. Видно, що температура першого ступеня свердла майже вдвічі перевищує температуру другого ступеня.

На графіках показано, що температура реверсивного свердла на 16% приблизно менша, ніж температура ступінчатого. Це відбувається через зменшення часу контакту різальних кромки свердла і матеріалу, а також через полегшення подрібнення та відведення стружки. На графіках (рис. 5.13 а, б)

показана залежність температури свердла від шляху, пройденого свердлом  $L$ . Для порівняння з реверсивним подані графіки для ступінчатого свердла.

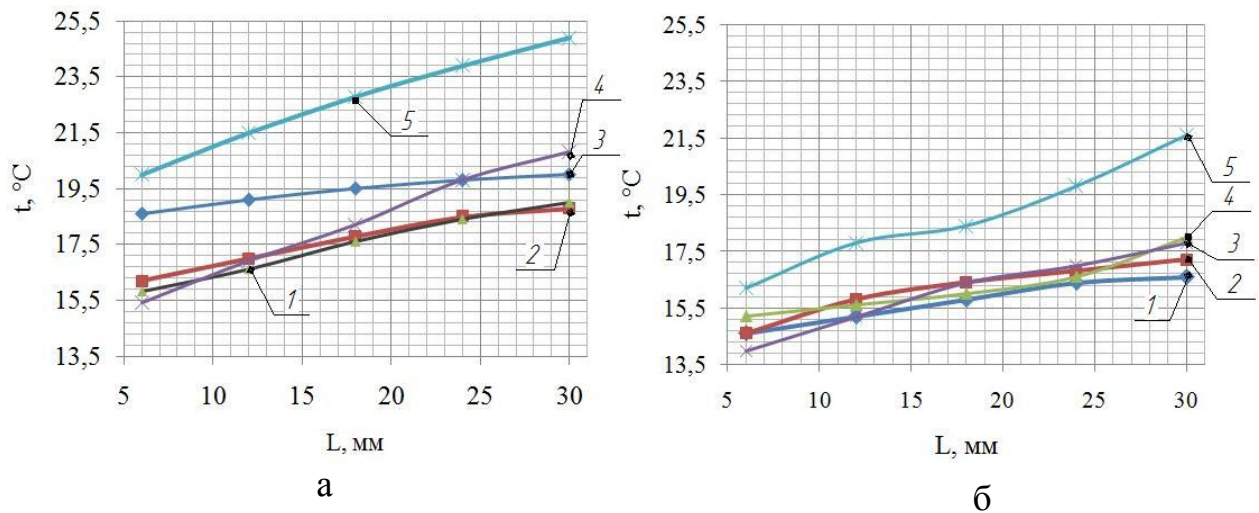


Рис. 5.13. а. Графічна залежність  $t=f(L)$  для ступінчатого свердла  
1-  $2\varphi=130^\circ$ , 2-  $2\varphi=110^\circ$ , 3-  $2\varphi=120^\circ$ , 4-  $2\varphi=140^\circ$ , 5-  $2\varphi=130^\circ$  ( $n=880$  об/хв)

б. Графічна залежність  $t=f(L)$  для реверсивного свердла  
1-  $2\varphi=110^\circ$ , 2-  $2\varphi=120^\circ$ , 3-  $2\varphi=130^\circ$ , 4- сферична заточка, 5-  $2\varphi=110^\circ$  ( $n=880$  об/хв)

В результаті дослідження була отримана тарировочна характеристика для термопар:

$$T = 5,094U + 6,084$$

Де  $T$  – температура зони різання,  $U$  – величина термо-ЕРС, mV.

На рисунку 5.14 подана діаграма температури зони різання для інструментів різної конструкції.

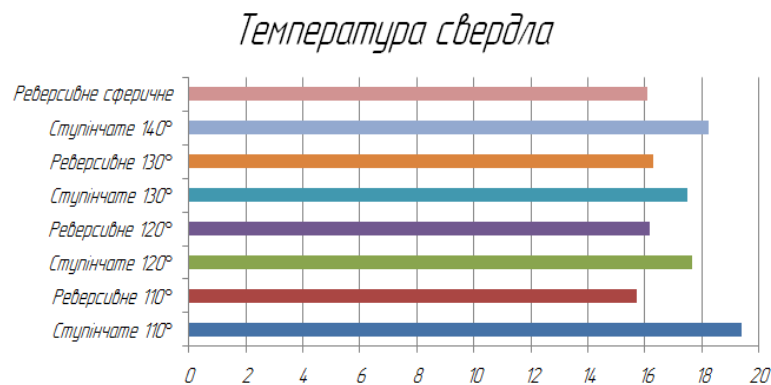


Рис. 5.14. Діаграма температури зони різання для інструментів різної конструкції

На графіках та діаграмах показано, що серед ступінчатих свердел найменше нагрівання спостерігається у інструменту з  $2\varphi=130^\circ$ , для реверсивного свердла -  $2\varphi=110^\circ$ .

Отже, застосування реверсивного свердла дозволяє знизити температуру на 16-18%.

### **5.3. Оброблення нахилених поверхонь ПКМ с застосуванням реверсивного свердління.**

Спосіб та інструмент для реверсивного свердління були перевірені при обробленні нахилених поверхонь. Дане питання є актуальним, коли необхідно отримати високу якість отвору непрямолінійної (сферичної) поверхні, який не застосовується для кріплення панелей або деталей (зокрема вентиляційні отвори тощо).

На рисунку 5.15 (а,б) зображене пристосування для кріплення зразка ПКМ таким чином, щоб поверхня була нахилена під деяким кутом до горизонталі з можливістю зміни кута нахилу.

Кути нахилу площини зразка ПКМ змінювався від  $5^\circ$  до  $45^\circ$ . Для обробки були обрані три зразки реверсивних: свердло зі сферичною заточкою [68], свердло з подвійним головним кутом в плані  $110^\circ$ , оптимальне виходячи з попередніх досліджень, а також свердло з  $2\varphi=130^\circ$ .



а



б

Рис. 5.15. Пристосування для обробки ПКМ під кутом до горизонтальної площини з можливістю зміни кута нахилу

Були проведені випробування різної конструкції інструменту та обробки при зміні кута нахилу поверхні зразка ПКМ. Виявилось, що зі збільшенням подвійного головного кута в плані  $2\phi$ , якість отвору значно зменшується. На рисунку 5.16 показаний вигляд отвору при нахилі площини ПКМ  $45^\circ$  для свердел з  $2\phi=110^\circ$  (а) та  $2\phi=130^\circ$  (б), а також вигляд отвору на виході інструменту для свердла  $2\phi=110^\circ$  (г).

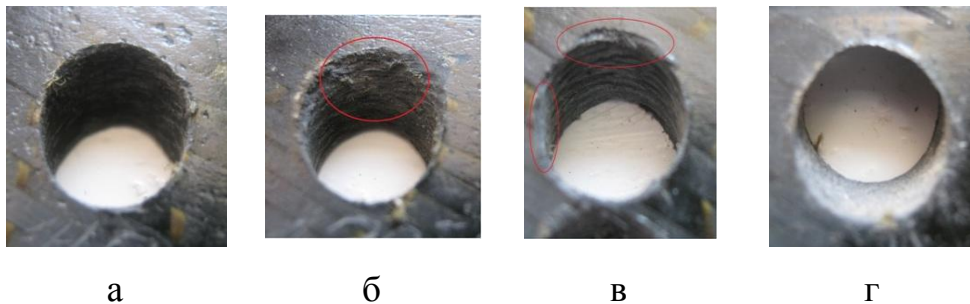


Рис. 5.16. Вигляд отвору в ПКМ для реверсивного свердла з  $2\phi=110^\circ$  (а), та з  $2\phi=130^\circ$  (б). Кут нахилу площини ПКМ  $\alpha=45^\circ$ ; в - вигляд отвору обробленого інструментом зі сферичною заточкою ( $\alpha=15^\circ$ ); г - зображення отвору на виході інструменту ( $2\phi=110^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ )

На рисунку показано, що при обробці ПКМ свердлом з  $2\phi=130^\circ$  відбувається відхилення інструменту від осі, що робить утворений отвір непридатним. Тоді як при обробці свердлом з  $2\phi=110^\circ$ , якість отвору значно вища, спостерігається незначне розлохмачування волокон на вході інструменту.

На рисунку 5.16 (в) показаний вигляд отвору для реверсивного свердла зі сферичною заточкою, для кута нахилу поверхні ПКМ  $\alpha=15^\circ$ . Спостерігаються сколи на вході та виході інструменту з матеріалу. Тобто дане свердло дає можливість отримати високу якість отвору лише при обробці ПКМ в перпендикулярному напрямі.

#### **5.4. Розробка рекомендацій по підвищенню якості отворів у вугле- та склопластиках.**

В основу проектування ріжучої частини реверсивного свердла покладені рекомендації по проектуванню свердел для оброблення композиційних

матеріалів, тобто вибір геометричних параметрів та конструктивних елементів основних різальних кромок.

При проектуванні реверсивного свердла по результатам дослідження їх працездатності рекомендуються наступні значення геометричних параметрів та особливості конструкції інструменту:

- В силу реверсування обертального руху свердла, протилежні різальні кромки мають бути виконані дзеркальними через те, що передня різальна кромка при зміні напрямку обертання свердла виконує роботу задньої різальної кромки;
- Стружкова канавка виконується прямолінійною, гвинтова канавка відсутня;
- Передній та задній кути обираються однаковими з співвідношення  $\alpha=\gamma=10\pm 2^\circ$ ;
- Подвійний головний кут в плані обирається зі співвідношення  $2\phi=110\pm 5^\circ$ ;
- Матеріал свердла у роботі було обрано Р6М5 для скорочення кількості експериментів, можливе застосування твердих сплавів.

Виточуються свердла з заготовок при режимах обробки  $v_{\text{різ}}=9,5-14$  м/хв,  $s=0,10$  мм/об. Шорсткість обробленої поверхні у межах  $Rz=20-10$ .

Обовязкова термічна обробка робочої частини заготовок свердел: із сталі Р6М5 до 59...60HRC .

Чистову обробку проводити з охолодженням при тиску 8 кгс/см, маслом індустріальним 12 з додаванням 15-20% масла марки НГ-203В. Шорсткість обробленої поверхні в межах  $Ra=1.25-0,63$ .

Вишліфовування розміру 7,1 мм та канавок проводити на шліфувальних автоматах. Заточування задньої поверхні свердел з дотриманням вимог, що поверхні Д і Е повинні знаходитися в одній площі що проходить через вісь свердла з точністю 0,01 мм. Кути і осьове биття контролюють на інструментальному мікроскопі типу ММІ-2 в призмі.

Як показали лабораторні випробування для підвищення продуктивності обробки, необхідно обирати режими реверсивного свердління з постійним

осьовим навантаженням. Допустима швидкість реверсивного свердління 2,7 м/с, кутова швидкість  $\omega=6227 \text{ с}^{-1}$ .

Для уникнення розшарування критичне осьове навантаження не повинне перевищувати 700 Н. Для уникнення термодеструкції шарів вуглепластика частота обертання шпинделя верстата 480-680 об/хв..

### **5.5. Впровадження результатів роботи.**

Випробування пристрою для реверсивного свердління, а також реверсивних свердел для оброблення полімерних композиційних матеріалів були проведені на заводі ПАО «ЧЕЗАРА» у червні-липні 2014 року.

Пристрій та свердла використовувались для оброблення отворів у заготовках з фольгованого текстоліту марок ПТ та ПТК, ГОСТ 5-78 та склотекстоліту марок СТ, СТК, ГОСТ 12652-74 на настільному вертикальному свердлильному верстаті ГС 2112 (найбільший хід шпинделя 100 мм, розмір конуса шпинделя зовнішній по ГОСТ 9953-82 В18, число швидкостей 5, число оборотів шпинделя 450 - 4500 об/хв, подача ручна). Досліджувалися три зразки свердел.

Матеріал свердла: швидкорізальна сталь Р6М5

Конструктивні та геометричні параметри свердла:

Зовнішній діаметр свердла - 8 мм;

Подвійний кут в плані  $2\phi$  - 110°, 120°, 130°;

Передній кут  $\gamma$  - 10°;

Задній кут  $\alpha$  - 10°;

Товщина оброблюваного матеріалу 3-6 мм.

Режими оброблення:

Швидкість різання  $V=0,87$  м/с, подача приблизно  $S=0,25$  мм/об, частота обертання шпинделя 450 об/хв., 800 об/хв., 1400 об/хв.

Результати випробувань:

1. Стійкість свердла нової конструкції при обробленні текстоліту та склотекстоліту перевищила стійкість стандартного свердла в 1,5 раз,

застосування реверсивного руху для свердла нової конструкції підвищило його стійкість в 2 рази порівняно зі свердлінням без реверсування обертального руху інструменту.

2. Ступінь точності отвору відповідає вимогам, що висуваються до отворів у ПКМ (отримано точність 11 квалітету, шорсткість  $R_z=20$ ).

3. Поломок свердел та сколів різальних кромки не спостерігалось. Дефектів оброблювального матеріалу типу тріщини, розшарування та прижоги не спостерігалось при частоті обертання шпинделя до 450 об/хв.

4. При частоті обертання шпинделя верстата 800 об/хв та 1400 об/хв спостерігається прижог матеріалу навколо отвору для текстоліту. Для склотекстоліту прижогу не спостерігається.

5. В результаті вимірювання температури свердла показано, що порівняно зі стандартним, температура реверсивного свердла нижча на 20%.

6. Серед трьох зразків реверсивного свердла найкраща якість отвору та найбільша стійкість спостерігається у свердла з подвійним кутом в плані  $2\varphi=110^\circ$ .

7. Застосування свердла нової конструкції та пристрою для реверсивного свердління дозволяє підвищити стійкість інструменту за рахунок зниження часу контакту різальних кромки з матеріалом та забезпечити високу якість обробленого отвору.

Також були проведені випробування пристрою для реверсивного свердління, а також реверсивних свердел для оброблення ПКМ на дослідному заводі АО «Хімтекстильмаш» у червні 2014 року.

Пристрій та свердла використовувались для оброблення отворів у заготовках зі склопластика, текстоліту марок А, Б, ГОСТ 2910-74, склотекстоліту конструкційного, ГОСТ 10292-74, фольгованого склотекстоліту, ГОСТ 10316-78, гетинаксу, ГОСТ 2718-74 на настільному вертикальному свердлильному верстаті 2М 112 (розмір конуса шпинделя зовнішній по ГОСТ 9953-82 В18, число швидкостей 5, число оборотів шпинделя 450 - 4500 об/хв, подача ручна).

Параметри свердел:

Матеріал свердла: швидкорізальна сталь Р6М5

Зовнішній діаметр свердла - 8 мм;

Подвійний кут в плані 2φ (досліджено 3 зразки реверсивного свердла) - 110°, 120°, 130°;

Передній кут  $\gamma$  - 10°;

Задній кут  $\alpha$  - 10°;

Товщина оброблюваного матеріалу 6-10 мм.

Режими оброблення:

Швидкість різання  $V=0,87$  м/с, подача приблизно  $S=0,25$  мм/об, частота обертання шпинделя 450 об/хв., 850 об/хв., 1200 об/хв.

Результати випробувань:

1. Стійкість свердла нової конструкції при обробленні склотекстоліту та склопластика перевищила стійкість стандартного свердла в 1,6 раз.
2. Ступінь точності отвору відповідає вимогам, що висуваються до отворів у оброблюваних матеріалах (отримана якість отворів 11-12 квалітетів, шорсткість  $R_z=20$ ).
3. Поломок свердел та сколів різальних кромek не спостерігалось. Дефектів оброблювального матеріалу не спостерігалось.
4. Застосування свердла нової конструкції та пристрою для реверсивного свердління дозволяє підвищити стійкість інструменту та забезпечити високу якість обробленого отвору, підвищити виробничу спроможність різання за рахунок покращення стружковідведення та зрівноваження сил різання.
5. Реверсивна обробка матеріалів дає можливість подрібнення стружки та покращення її видалення з отвору, особливо при обробці в'язких та пластичних матеріалів. Направляючі стрічки з обох сторін кожного пера, що вдвічі більше, ніж у стандартного свердла, підвищують демпфуючу здатність (здатність матеріалу поглинати вібрацію за рахунок внутрішнього тертя, перетворення механічної енергії в тепло) реверсивного свердла та точність обробки.

## 5.6. Висновки.

1. В результаті лабораторно-виробничих випробувань підтвержені результати математичного моделювання процесу свердління. Встановлено, що найменше відхилення від круглості спостерігається при обробленні отвору реверсивним свердлом з  $\varphi=110^\circ$  при,  $n=480$  об/хв.

2. Встановлено, що застосування реверсивного свердління знижує температуру в зоні різання на на  $2-3^\circ\text{C}$  порівняно зі ступінчатим свердлом. Встановлено, що при реверсивному свердлінні збільшення кута в плані призводить до підвищення температури в зоні різання.

3. Експериментально доведено, що при обробленні нахилених поверхонь реверсивним свердлом слід рекомендувати інструмент з  $\varphi=110^\circ$ .

4. Результати роботи були впроваджені на заводі ПАО «Чезара» у м. Чернігові, а також на науково-дослідному підприємстві АО «Хімтекстильмаш». На основі виробничих випробувань та впровадження підтвержені теоретико-лабораторні результати. Рекомендоване реверсивне свердло відповідає вимогам щодо точності та відхилення від круглості отворів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконаних досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача, яка полягає у підвищенні якості оброблених отворів у тонкостінних виробх з ортотропних вуглепластиків за рахунок застосування способу реверсивного свердління, та розробки свердла для його реалізації, що дозволяє уникнути розшарування матеріалу, зменшити ворсистість та вириви волокон, знизити температуру в зоні різання, підвищити стійкість інструменту.

1. Вперше запропонована схема реверсивного свердління вугле- та склопластиків з урахуванням характерних особливостей матеріалів. Визначені режими різання та геометричні параметри інструменту для реверсивного свердління. Вперше обґрунтовано можливість застосування реверсивного свердління для ПКМ та створено конструкцію реверсивного інструменту, що дозволяє підвищити стійкість та знизити імовірність появи дефектів.

2. Вперше для реалізації реверсивного свердління розроблене та створене реверсивне свердло, що відрізняється тим, що різальні кромки виконані дзеркально, відсутня зворотна конусність інструменту, а також пристрій, що забезпечує реверсування обертального руху свердла.

3. Вперше розроблений спосіб для визначення критичного осьового навантаження на основі віброакустичного сигналу. Доведено можливість застосування даної методики для розрахунку величини зношування свердла та встановлено значення критичного зношування свердла.

4. На основі алгоритму використання алгоритму МГУА побудована математична модель у вигляді  $\Delta R = f(\varphi, n, k, L)$ , при чому встановлено, що найбільший вплив на величину  $\Delta R$  має частота обертання шпинделя верстата та кут в плані сверла. Встановлено, що рекомендований кут в плані  $2\varphi = 110^\circ$ . Крім того, найменше відхилення від круглості спостерігається при  $n = 480$  об/хв.

5. Зважаючи на вимоги щодо точності отворів, рекомендовано реверсивне свердло з кутом в плані  $2\varphi = 110^\circ$ .

6. В ході лабораторних випробувань зношування свердел різної геометрії встановлено, що максимальне зношування  $h = 0,2$  мм для реверсивного

свердла при  $n=480$  об/хв досягається при обробленні 99 отворів, при  $n=880$  об/хв – 89 отворів, при однонапрямленому свердлінні реверсивним свердлом ( $n=480$  об/хв) – 49 отворів, для ступінчатого свердла – 65 отворів. Експериментально доведено, що підвищення кута в плані призводить до підвищення зношування свердла та зниження його стійкості.

7. Встановлено, що застосування реверсивного свердління знижує відхилення оброблених отворів від круглості. Зокрема найбільше відхилення радіусів  $\Delta R=0,95$  мм для реверсивного свердла при частоті 480 об/хв без реверсування обертального руху,  $\Delta R=0,29$  мм для двоперого свердла,  $\Delta R=0,049$  мм для ступінчатого свердла,  $\Delta R=0,011$  мм для реверсивного свердла з  $2\varphi=110^\circ$  при частоті 480 об/хв з реверсуванням обертального руху свердла.

8. На основі лабораторно-промислових випробувань розробленого пристрою та свердла для реверсивного свердління ПКМ, доведено доцільність його застосування для забезпечення високої якості отворів, за рахунок запобігання розшарування ПКМ. (патент на винахід №106463). Експериментально підтверджено отриману математичну модель, та встановлено що оптимальна частота  $n=480$  об/хв., оптимальний кут в плані  $\varphi=110^\circ$ .

9. Встановлено, що застосування реверсивного свердління реверсивного свердління знижує температуру в зоні різання на  $2-3^\circ\text{C}$  порівняно зі ступінчатим свердлом. Встановлено, що при реверсивному свердлінні збільшення кута в плані призводить до підвищення температури в зоні різання на  $1-2,5^\circ\text{C}$ .

10. Проведені випробування створеного пристрою та інструменту на заводах ПАО «ЧЕЗАР» та АО «Хімтекстильмаш» показали, що результати роботи можуть бути впроваджені у виробництво. Результати роботи впроваджені в навчальний процес і використовуються в курсах «Теорія різання», «Композиційні матеріали», що викладаються для студентів спеціальності «Інструментальне виробництво» НТУУ «КПІ», а також при виконанні магістерських робіт та дипломних проектів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Agapiou J.S. Analytical and experimental studies of drill temperatures / Agapiou J.S., Stephenson D.A. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 1994. - №1. - Т. 116. - P. 54- 60.
2. Ansys Release 5.3. - Swanson Analysis Systems Inc. - Houston, TX, 1996.
3. Astrom B.T. Manufacturing of Polymer Composites [Text].- Chapman & Hall, 1997.- 178 p.
4. Bavaglia S. Application of a non-local failure criterion to a crack in heterogeneous media/ Bavaglia S., Mikhailov S.E.// Damage and Fracture Mechanics: Computer aided assessment and control. - Computational Mechanics Publ. - 1998. - P.155-164.
5. Beckwith S.W. Drilling, cutting, machining composite materials and structures [Text] / S.W. Beckwith // BTDC composites Inc., Sampe journal. - 2009. - Vol. 45(2). - P. 49-52.
6. Campbell F.C. Manufacturing Processes For Advanced Composites [Text] / F.C. Campbell; Published by Elsevier Advanced Technology, USA, 2004. - 533 p.
7. Chu Y.C. Comparative analysis of through-transmission ultrasonic bulk wave methods for phase velocity measurements in anisotropic materials [Text] / Y.C. Chu, S.I. Rokhlin // J. Acoust. Soc. Am. - 1994. - № 95(6). - P. 3204.
8. Chu Y.C. On determination of orthotropic material moduli from ultrasonic velocity data in nonsymmetry planes [Text] / Y.C. Chu, A.D. Degtyar, S.I. Rokhlin // J. Acoust. Soc. Am. - 1994. - № 95(6). - P. 3191.
9. Cong W.L. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber reinforced plastic composites: An experimental study on cutting temperature [Text] / W.L. Cong, Z. Xiatian, T.W. Deines // Journal of reinforced plastics and composites. - 2012. - №22. - Т. 31. - P. 1516- 1525.
10. Degtyar A.D. Absolute stress determination in orthotropic materials from angular dependencies of ultrasonic velocities [Text] / A.D. Degtyar, S.I. Rokhlin // J. Appl. Phys. - 1995. - Vol.78(3) - P. 1547.

11. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates / A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. M. Tavares // 16th international conference on composite materials. – Porto, 2007. – P. 1–10.
12. Dvorak G.J. Size effect in fracture of unidirectional composite plates [Text] / G.J. Dvorak, A.P. Suvorov // Int. Journal of Fracture. - 1999. - Vol. 95. - P.89-101. Engineering, 2008. – 230 c.
13. Faraz A. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2009. – № 49. – P. 1185–1196.
14. Fitting D.W. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation [Text] / D.W. Fitting, L. Adler; N.-Y.: Plenum Press, 1981. - 354 p.
15. Globa A. The research of the polymer composite materials drilling [Text] / A. Globa, I. Bulakh // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry, Year VII, Issue 9/2013 ISSN 1313-0226, Scientific Technical union of mechanical engineering. - 2013. - P. 41-44.
16. Harris B. Engineering composite materials [Text]. - The institute of materials, - London, 1999. - 194 p.
17. Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates [Text] / H. Hocheng, C.N.K. Dharan // J. of engineering for industry, 1995. - №112. - P. 236-239.
18. Hosten B. Inhomogeneous wave generation and propagation in lossy anisotropic solids. Application to the characterisation of viscoelastic composite materials [Text] / B. Hosten, M. Deschamps // J. Acoust. Soc. Am. - 1987. - Vol.82(5). - P. 1763.
19. Hosten B. Reflection and transmission of acoustic plane waves on an immersed orthotropic and viscoelastic solid layer [Text] / B. Hosten // J. Acoust. Soc. Am. - 1991. - Vol.89(6). - P. 2745.

20. Hsu D.K. Evaluation of porosity in graphite-epoxy composite by frequency dependence of ultrasonic attenuation [Text] / D.K. Hsu, S.M. Nair // Rev. of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. - 1987. - Vol.6b. - P. 1185.
21. Karabutov A.A. Nondestructive material characterization by laser-excited longitudinal and shear acoustic waves [Text] / A.A. Karabutov, N.B. Podymova // Proc. SPIE. - 1996. - Vol.2713. - P. 423.
22. Kriz R.D. Elastic moduli of transversely isotropic graphite fibers and their composites [Text] / R.D. Kriz, W.W. Stinchomb // Exp. Mech. - 1979. - Vol.19(1). - P.41.
23. Martin R. Reducing cost in aircrafts: The metals affordability initiative consortium [Text] / R. Martin, D. Evans // Journal of operations management. - 2000. - T. 52. - P. 24□ 28.
24. Raju S.D. Processing of composites [Text] / S.D. Raju, A.C. Loos, with contributions from F. Abrams Distributed in the USA and in Canada by Hanser. - Gardner Publications Inc., 2000. - 501 p.
25. Rokhlin S.I. Critical angle measurement of elastic constants in composite material [Text] / S.I. Rokhlin, W. Wang // J. Acoust. Soc. Am. - 1989. - Vol.86(5). - P. 1876.
26. Scott W.R. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive testing of layered composite materials [Text] / W.R. Scott, P.F. Gordon // J. Acoust. Soc. Am. - 1984. - Vol.62(1). - P.108.
27. Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites / Berlin: Springer, 2009. - 321 p.
28. Spearing S.M. Towards a Predictive Design Methodology Based on the Physical Modelling of the Fracture of Fiber Composites [Text] / S.M. Spearing, P.W. Beaumont // Applied Composite Materials. - 1998. - № 5. - P. 69-94.
29. Strong A.B. Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications [Text] / Strong A.B. - SME, 1989,- 234 p.
30. Teti R. Machining of Composite Materials [Text] / R. Teti. - University of Naples Federico II, Italy, 2004. - 24 p.

31. Tsao C.C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits [Text] / C.C. Tsao, H. Hocheng // Journal of Materials Processing Technology. - 2003. - №140. - P. 335-339.
32. Tsao C.C. Influence of Geometry in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics / Tsao C.C. // Advanced in machining and Manufacturing Technology IX, - Switzerland. - 2008. - P. 236-240.
33. Valavan U. Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites [Text]: Diss. Master of Science: 05.03.01 / U. Valavan. - Wichita, 2007. - 120 p.
34. Vary A. Ultrasonic measurements of material properties [Text] / A. Vary // Resonans techniques in nondestructive testing. - 1980. - Vol.4. - P. 160.
35. А.с. RU 2095199 С1. Сверло для обработки полимерных композиционных материалов типа углепластиков и стеклопластиков/Балла О.МЛО.11.1997.
36. А.с. RU 2197361 С2. Способ вибрационного сверления / К.А. Иноземцев, А.И. Барботько / 27.01.2003.
37. Авиационные материалы: Справочник / Том 7, часть 1. Полимерные композиционные материалы. М.: ОНТИ, 1976. - 391 с.
38. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. - М.: Металлургия, 1968. - 155 с.
39. Алексеев Г.А. Конструирование инструмента / Г.А. Алексеев и др. - М.: Машиностроение, 1979. - 384 с.
40. Алфутов Н.А. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов /Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
41. Арзамасов Б.Н. Новые материалы в машиностроении [Текст]: Учеб. пособие / Б.Н. Арзамасов. - М.: Машиностроение, 1983. - 32 с.
42. Армарего И. Дж. А. Обработка металлов резанием. / И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун, Пер. с англ. В.А. Пастунова. - М.: Машиностроение, 1977. - 325 с.

43. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. - М.: Машиностроение, 1967. - 500 с.
44. Баранчиков В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении [Текст]: Справочник / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов. - М.: Машиностроение, 2002. - 264 с.
45. Баскаков И.Г. Метод заземлённой термопары для измерения температуры резания. - Тр. Харьков. Политехн.инст., 1959 т. 19, вып. 5, с. 28-31.
46. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. - М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.
47. Буланов И.М. Технология аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст]: Учеб. Для вузов / И.М. Буланов, В.В. Воробей. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. - 526 с.
48. Булах І.О. Аналіз методів неруйнуючої дефектоскопії виробів з композиційних матеріалів // І.О. Булах, О.В. Глоба / Вісник ЧДПУ. - Чернігів, 2013. - С. 36-42.
49. Булах І.О. (Милокост) Дефекти в композиційних матеріалах при їх виготовленні, експлуатації та механічній обробці [Текст] / І.О. Булах, О.В. Глоба // Вісник Черкаського ДТУ, секція Машинобудування. - 2013. - №1 - С. 60-63.
50. Булах І.О. (Милокост) Дефекти типу відшарувань і їх вплив на несучу здатність конструкцій з композиційних матеріалів [Текст] / І.О. Булах, О.В. Глоба // Збірник наукових праць Вісник ЖДТУ. - Житомир, 2013. - №1 (64). - С. 3-8.
51. Булах І.О. (Милокост) Механічна обробка композиційних матеріалів [Текст] / І.О. Булах, О.В. Глоба // Вісник ЧДТУ, серія Технічні науки. - Чернігів, 2012. - №2 (57). - С. 18-24
52. Буловский П.И. Механическая обработка стеклопластиков [Текст] / П.И. Буловский, Н.А. Петрова. - Л.: Машиностроение, 1969. - 152 с.

53. Буров А.Е. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов [Текст] / А.Е. Буров, И.И. Кокшаров, В.В. Москвичев. - Новосибирск, Наука, 2003. - 176 с.
54. Внуков Ю. Н. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів /Ю. Н. Внуков, В. А. Залого. – Сумы : СумГУ, 2010. – 245 с.
55. Вerezуб Н. В. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании / Н. В. Вerezуб, Г. Л. Хавин, А. П. Тарасюк // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. / Нац. техн. ун-т «ХПИ». - Харьков, 2001. - Вып. 59. - С. 28-34.
56. Виноградов А.А. Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых металлов твердосплавными сверлами / А.А. Виноградов. - Киев: Наук, думка, 1985. - 264 с.
57. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. - М.: Статистика, 1974 – 116 с.
58. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. - Новосибирск: Наука, 2005. - 190 с.
59. Вульф А.М. Обработка металлов резанием / А.М. Вульф. - М.: ОНТИ, 1936. - 441 с.
60. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения [Текст] / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. - К.: Наукова думка, 1965. - 304 с.
61. Глоба А. В. Метод комплексной оптимизации процесса концевой фрезерования [Текст]: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.03.01 / Глоба Александр Васильевич. - Киев, 1984. - 274 с.
62. Глоба О.В. Аналітичний розрахунок критичного зусилля розшарування при обробці композиційних матеріалів ступінчатими сверлами та визначення оптимальної величини ступені / О.В. Глоба, О.В. Кухановський // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем» - Краматорськ, 2011. - вип. №28. - С. 51-54.

63. Глоба О.В. Вплив геометрії свердла на його стійкість і точність виконання отворів при свердлінні композиційних матеріалів [Текст] / О.В. Глоба, І.О. Булах (Милокост), С.М. Милокост // Журнал «Технологічні системи» УкрНДІАТ. - Київ, 2013. - №2 (63). - С. 48-56.

64. Глоба О.В. Дослідження процесу свердління авіаційних матеріалів триперими свердлами з метою удосконалення геометрії різальної частини [Текст] / О.В. Глоба, Є.В. Олійник, К.А. Сенкевич // Вісник НТУУ КПІ. - Київ, 2009. - Випуск № 7. - С. 21-27.

65. Глоба О.В. Дослідження свердління високоміцних полімерних композиційних матеріалів триперими свердлами [Текст] / О.В. Глоба, Є.В. Олійник // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». - Краматорськ, 2009. - №24. - С. 97-101.

66. Глоба О.В. Дослідження якості отворів при обробці вуглепластика різними конструкціями різального інструменту [Текст] / О.В. Глоба, І.О. Булах (Милокост) // Збірник наукових праць Вісник СевНТУ. - Севастополь, 2013. - №140. - С. 21-26.

67. Глоба О.В. Дослідження якості процесу свердління ПКМ з застосуванням осцилюючого руху інструменту [Текст] / О.В. Глоба, І.О. Булах (Милокост), С.М. Милокост // Збірник наукових праць Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. - Краматорськ, ДГМА, 2013. - №32. - С. 56-62.

68. Глоба О.В. Оцінка якості обробленої поверхні при свердлінні високоміцних полімерних композиційних матеріалів [Текст] / О.В. Глоба, Ю.І. Адаменко // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». - Краматорськ, 2008. - №23. - С. 220-224.

69. Глоба О.В. Оцінка якості отворів при обробці ПКМ з застосуванням реверсивного руху свердла / О.В. Глоба, В.І. Солодкий, І.О. Булах (Милокост) // Журнал «Технологічні системи», УкрНДІАТ. - Київ, 2014. - С. 38-44.

70. Глоба А.В. Анализ процесса сверления ПКМ типа обшивки / А.В. Глоба, Б.И. Мишунин. - Вестник НГУУ "КПИ" Машиностроение №33, 1998. С. 149 – 157.
71. Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
72. Грубый С.В. Разработка методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основы повышения эффективности лезвийной обработки. Автореферат диссерт. докт. техн. наук. Москва: МГТУ, 2004. - 34 с.
73. Гусев В.Э. Лазерная оптоакустика [Текст] / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. - М.: Наука, 1991., - 304 с.
74. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс / В. И. Дрожжин: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1982. - 388 с.
75. Дрожжин В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ, д-ра техн. наук. - Харьков: ХПИ, 1982. - 32 с.
76. Дударев А.С. Вибрационное сверление отверстий в изделиях из полимерных композиционных материалов // А.С. Дударев, В.И. Свирщёв/ Международная научно-техническая конференция, посвященная 50-летию Механико-технологического факультета ПГТУ «Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве», Сборник тезисов. - Пермь: ПГТУ. - 2005. - С. 47-49.
77. Дударев А.С. Вопросы получения отверстий в элементах звукопоглощающих панелей авиационных двигателей из композиционных материалов // А.С. Дударев / VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии», Сборник тезисов. - Пермь: ПГТУ. - 2005. - С. 45.
78. Дударев А.С. Некоторые аспекты необходимости применения охлаждения при механической обработке отверстий в изделиях из полимерных

композиционных материалов // А.С. Дударев, В.И. Ломаев, Б.А. Щенев / Международная научно-техническая конференция «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив - 2005» Сборник статей. - Волжский: ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. - «Югполиграфиздат», 2005. - С. 189-192.

79. Дударев А.С. Низкотемпературное охлаждение и наложение вынужденных колебаний на инструмент, как пути улучшения качества изготовления отверстий при сверлении элементов звукопоглощающих панелей авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. «Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике» // А.С. Дударев и др. / Тезисы докладов. - Королёв: Изд-во НОУ «ИПК Машприбор». - 2006. - С. 22-28.

80. Дударев А.С. О деструкции при резании полимерных композиционных материалов // А.С. Дударев / IV Всероссийская научно-техническая конференция «Современные промышленные технологии». Материалы конференции. - Нижний Новгород. - 2005. - С. 8.

81. Дударев А.С. О необходимости применения вибраций при механической обработке отверстий в изделиях из полимерных композиционных материалов // А.С. Дударев / Научно-технический журнал. «СТИН». - 2006. - №9. - С. 31-32.

82. Дударев А.С. Перспективы механической обработки отверстий при производстве изделий из волокнистых композиционных материалов гражданской авиатехники // А.С. Дударев, В.И. Ломаев / Научно-технический журнал. «Технология машиностроения». - 2006. - №7. - С. 18-22.

83. Дударев А.С. Предпосылки к построению расчётной модели резания отверстий в изделиях из полимерных композиционных материалов // А.С. Дударев, В.И. Свирщёв / XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. - Екатеринбург: Уро РАН, - 2006. - С. 32-33.

84. Дударев А.С. Перспективы механической обработки отверстий при производстве изделий из волокнистых композиционных материалов

гражданской авиатехники [Текст] / А.С. Дударев, В.И. Ломаев // Научно-технический журнал. «Технология машиностроения». - 2006. - №7. - С. 18-22.

85. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием / Ю.М. Ермаков - М.: Машиностроение, 2005. - 272 с.

86. Ермаков Ю.М. Перспективы применения способов реверсивного резания / Ю.М. Ермаков - М.: ВНИИТЭМР, 1988. - 52 с.

87. Ермаков Ю.М. Современные тенденции в развитии лезвийной обработки / Ю.М. Ермаков - М.: НИИмаш, 1983. - 68 с

88. Залого В.А. Измерение температуры при сверлении волокнистых полимерных композиционных материалов [Текст] / В.А. Залого, Д. В. Криворучко, В.А. Колесник, А.А. Нешта, И.О. Осадчий // Ж. Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – Вып. 83. – С. 138-145.

89. Зорев Н.Н. Исследования процесса резания металлов в США / Н.Н. Зорев. - Выпуск 1. Механика процесса резания. М.: НИИМАШ, 1965. - 166 с.

90. Иванов О.А. Повышение эффективности лезвийной обработки композиционных углепластиков на основе учёта их физико-механических характеристик. Диссертация. канд. техн. наук. С.-Петербург: ГОУ С.-Петер. Институт машиностроения, 2006. - 130 с.

91. Ивахненко А. Г. Принятие решений на основе самоорганизации [Текст] / А. Г. Ивахненко. - М.: Советское радио, 1976. - 280 с.

92. Карабутов А.А. Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука / А.А. Карабутов, М.П. Матросов, Н.Б. Подымова, В.А. Пыж // Акуст. журн. - 1991. - Т. 37 (2). - С.311-321.

93. Карабутов А.А. Исследование упругих свойств однонаправленных графито-эпоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом / А.А. Карабутов, И.М. Керштейн, И.М. Пеливанов, Н.Б. Подымова // Ж. Механика композитных материалов. - 1998. - Т. 34 (6). - С. 811.

94. Карабутов А.А. Неразрушающий контроль усталостных изменений структуры композитов лазерным ультразвуковым методом / А.А. Карабутов,

Н.Б. Подымова // Ж. Механика композит. материалов. - 1995. - Т. 31(3). - С.405-412.

95. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. - Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Машиностроение, 1974. - 231 с.

96. Кикоть В.С. Оптимизация схем перебора в алгоритмах МГУА на базе синтеза модели переменными коэффициентами [Текст] / В.С. Кикоть // Автоматика. - 1983. - №2. - С. 18-21.

97. Кирилин А.Н. Высокооборотное сверление отверстий под болтовые соединения конструкций, содержащих углепластик / А.Н. Кирилин, Б.Н. Простодушев и др. // Авиационная промышленность. - 1984. - №7. - С. 10-14.

98. Кириллов К.Н. Сверление отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов / К.Н. Кириллов. - М.: Машиностроение, 1965. - 87 с.

99. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием [Текст] / А. Кобаяши. - М.: Вища школа, 1993. - 320 с.

100. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. (Сокращ. перев. с англ. П.А. Кунина) / А. Кобаяши. - М.: Машиностроение, 1974. - 192 с.

101. Ковалева Л.И., Родин Р.П., Пливак А.А. Исследование геометрических параметров спиральных сверл с заостренной поперечной кромкой и обратным углом наклона поперечной кромки. / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №28, 2011. стр. 86-91.

102. Кокаровцев В.В. Методы контроля и управления процессом металлообработки на основе виброакустического сигнала: дисс. канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 21.03.1994 / Кокаровцев Валерий Васильевич. - Киев, 1994. - 139 с.

103. Композиционные материалы [Текст]: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Болотин и др.; под общ. ред. В. Тарнапольского. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с.

104. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. - Киев: Наук, думка, 1985. - 592 с.
105. Копьёв И.М. Разрушение металлов, армированных волокнами / И.М. Копьёв. - М.: Наука, 1977. - 240 с.
106. Кравченко Л.С. Исследование процесса сверления слоистых пластмасс. Дис. . канд. техн. наук. Харьков: ХПИ, 1973. - 76 с.
107. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.03.01 /Д. В. Криворучко. – Харків : СумГУ. – 2010. – 40 с.
108. Криштопа Н.А. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах / Н.А. Криштопа и др. - К.: Техника, 1980. - 126 с.
109. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с япон. С.Л. Масленникова/ Д. Кумабэ, под ред. И.И. Портнова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
110. Курис И.М. Алмазное сверление стеклопластиков / И.М. Курис, В.А. Сидоренко, А.А. Лобай // Синтетические алмазы. - 1977. - вып. 2. - С. 43-45.
111. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин - 1983. - 360 с.
112. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения) / Е.М. Левинсон. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. - 152 с.
113. Лупкин Б. В. Механическая обработка композиционных материалов /Б. В. Лупкин, О. В. Мамлюк // Труды Международной ежегодной научно-практической конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Славполикком). – Ялта, 2001. – С. 70–79.
114. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В.Л. Доброскок та ін. - Львів: Новий світ - 2000, 2010. - 422 с.
115. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.
116. Мамлюк О. В. Формообразование режущей части сверл с подрезающими режущими кромками для обработки композиционных материалов / О. В.Мамлюк, Р. П. Родин, О. М. Кошкина Открытые // Ж.

Информационные и компьютерные интегрированные технологии. - 2010. - № 48. - С. 71-79.

117. Маркин В.Б. Строительная механика композиционных конструкций [Текст]: Учеб. Пособие / В.Б. Маркин. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. - 183 с.

118. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н. В. Вerezуб, А. П. Хавин, А. А. Гетманов, А. П. Тарасюк. - Харьков: ХНАДУ (ХАДИ), 2001. - 180 с.

119. Мигранов М.Ш. Пути повышения эффективности механической обработки резанием / М.Ш. Мигранов // Технология машиностроения, - 2004, - №5, - С. 19-22.

120. Неразрушающие методы и средства контроля качества изделий и конструкций из неметаллов. - Л.: ЛДНТП, 1982. - 87 с.

121. Неразрушающие методы контроля изделий из полимерных материалов. - М.: МДНТП, 1980. - 206 с.

122. Остафьев В.А. Исследование скоростного сверления отверстий в высокопрочных чугунах. Канд. дис. - К.: КПИ, 1962.

123. Остафьев В.А., Пономаренко А.И. Обработка точных отверстий в приборостроении. - Киев: "Техніка" 1972.

124. Пат. 104710 Российская Федерация, МПК51 G01K13/00 Устройство для измерения температуры в зоне резания при точении методом естественной термопары [Текст] /Федонин О. Н., Петрашев С.Н., Аверкина Н. Е.; заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. высш. проф. образ. "Брянск. гос. техн. ун-т".- № 2010154243/28; заявл. 29.12.10; опубл. 20.05.11; Бюл. № 14 - 4 с.: ил.

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

126. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. - М.: Высшая школа, 1974. - 587 с.

127. Потапов А.И. Неразрушающий контроль качества изделий из стеклопластиков / А.И. Потапов, Г.Л. Баранов. - Л.: ЛДНТП, 1970. - 46 с.

128. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1978. - 449 с.

129. Прикладная механика композитов/ под ред. Ю.М. Тарнопольского. - Сб. статей. М. - 1989. - 358 с.

130. Пристрій для дослідження розшарування композиційних матеріалів: пат. на корисну модель 88898 Україна: МПК-2013 G01N/08 B29L9/00 / О.В. Глоба, Д.Ю. Суворов, І.О. Булах. - № и 2013 10299; заявл. 21.08.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. №7/2014.3.

131. Пристрій для осцилюючого свердління композиційних матеріалів: заявка на винахід 106463 Україна: МПК-2013 G01L 3/18 B23B 41/16 B29L 9/00 / О.В. Глоба, І.О. Булах, - № а 2014 00844 заявл. 30.01.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. №16/2014.

132. Разрушение армированных пластиков / Х.Т. Кортен. - М.: Химия, 1967. - 160 с.

133. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов / Н.Е. Резник. - М.: Машиностроение, 1975. - 311 с.

134. Родин П.Р. Геометрия режущей части спирального сверла. - К.: Техника, 1971 - 136 с.

135. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. - Киев: Вища школа, 1979 - 431 с.

136. Родин П.Р. Рациональные способы заточки сверл/ П.Р. Родин, С.Н. Филоненко, В.Г. Змиевец. – Научные записки ОПИ, Одесса: ОПИ, 1960.

137. Родин П.Р. Геометрические параметры режущей части при двухплоскостной заточке сверл с прерывистыми кромками / П.Р. Родин, Ю.И. Бесарабец. – Вестник НТУУ "КПИ" №32, Машиностроение, 1997. - С. 79-83.

138. Розенберг А. М. Элементы теории процесса резания металлов / А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. - М.: Машгиз, 1956. - 319 с.

139. Руднев А.В. Обработка резанием стеклопластиков / А.В. Руднев, А.А. Королев. - М.: Машиностроение, 1969. - 119 с.

140. Свердло для осцилюючої обробки полімерних композиційних матеріалів: пат. на корисну модель 90542 Україна: МПК-2013 G01L 3/18 B23B 41/16 B29L 9/00 / О.В. Глоба, І.О. Булах, - № и 2014 00845 заявл. 30.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. №10/2014.

141. Семко М. Ф. Изучение стойкости режущих инструментов исследованием тепловых явлений//Резание металлов : сб. материалов к Всеукр. конф. По резанию металлов. -Х.: Український робітник, 1935. -Вып. 1. -С. 45-54.

142. Семко М. Ф. Теплоота різання і стійкість інструменту. -Харків: ДНТВУ, 1937. -145 с.

143. Солодкий В.И. Профилирование инструмента для изготовления свёрл, обрабатывающих композиционные материалы [Текст] / В.И. Солодкий, А.В. Глоба, И.А. Булах // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». – Донецк, 2014. – №2 (48). – С. 99-108.

144. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. - Л: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987. - 176 с.

145. Суслов А.Г. Технология машиностроения / А.Г. Суслов. - М.: Машиностроение, 2004. - 420 с.

146. Тарасюк А. П. Проблемы исследования поверхностного слоя детали из волокнистых полимерных композитов, обработанных резанием / А. П. Тарасюк // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». -Х., 2001. - №1 - С. 259-262.

147. Тарасюк А. П. Расширение функциональных возможностей волокнистых полимерных композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки / А. П. Тарасюк: дис. ... доктора техн. наук. - Харьков, 2011. - 567 с.

148. Технология производства изделий ракетно-космической техники из композиционных материалов: Монография / В.И. Ломаев. - М.: «Сатурн-С», 2004. - 150 с.

149. Тихомиров Р.А. Механическая обработка пластмасс / Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1975. - 208 с.

150. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако. - М.: Мир. 1982. - 200 с.

151. Хенкок Дж. Р. Усталость композитов с металлической матрицей // Дж. Р. Хенкок / Композиционные материалы. - Т. 5. - Разрушение и усталость. - М.: Мир. - 1978. - С. 395-439.

152. Цыплаков О. Г. Конструирование изделий из композиционно-волокнистых материалов / О.Г. Цыплаков. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. - 140 с.

153. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов / Г.П. Черепанов. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. - 296 с.

154. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс: Справочник / Б.П. Штучный. - М: Машиностроение, 1987. - 152 с.

155. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын и др. - М.: Выш. шк., 1990. - 512 с.

**Додаток А**

### Програма для обробки віброакустичного сигналу

Матеріал	Номер отвору	$n, \text{хв}^{-1}$	Свердло	$2\varphi$
вуглепластик	3	480	реверсивне	$110^\circ$

$a := \text{READPRN } "E:\text{експеримент 24.02.14}\text{фільтр обрезака}\backslash 110-480-2.tx$

$i := 4..a_0 + 4 \quad i := 0..a_0 - 1 \quad u_i := a_{i+4}$

	0
0	$2.28058 \cdot 10^5$
1	16
2	1
3	$4.41 \cdot 10^4$

-кадров;

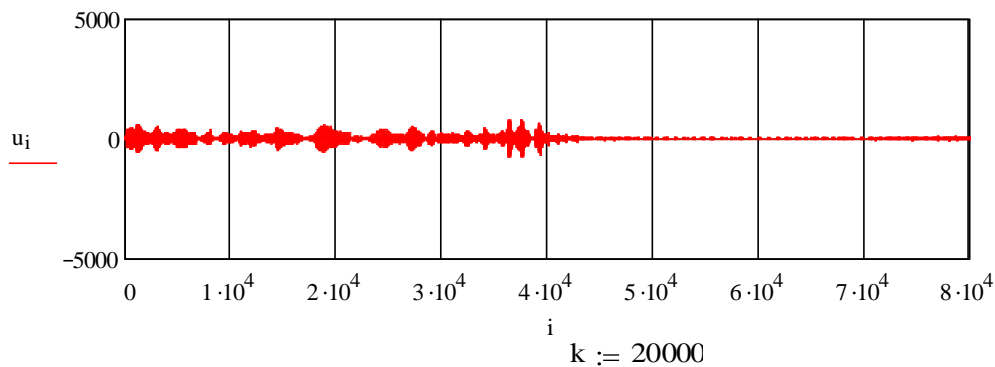
-разрядность потока, бит;

-каналов;

-частота, Гц;

$$T_p := \frac{a_0}{a_3}$$

$T_p = 5.17138$  сек - время выборки



$\Delta t := 0.01$  сек - время дискретизации

-чувствительность датчика мВ/м сек.кВ.

$\tau := 0.5$  сек - постоянная детектирования  $\rho := 0.15$

-коэффициент усиления сигнала с датчика

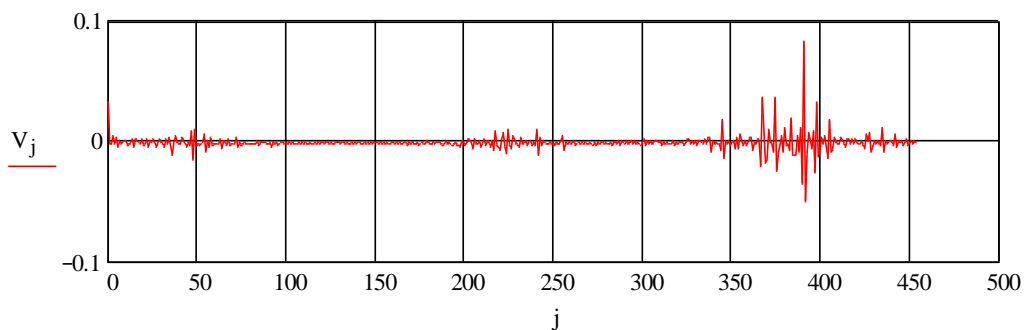
$$G_k := \frac{a_i}{\rho \cdot k} \quad G_k - \text{значения виброускорений}$$

$m := 500$  -каждое m-ное среднее значение из выборки

$n := a_0$  -всего значений в выборке

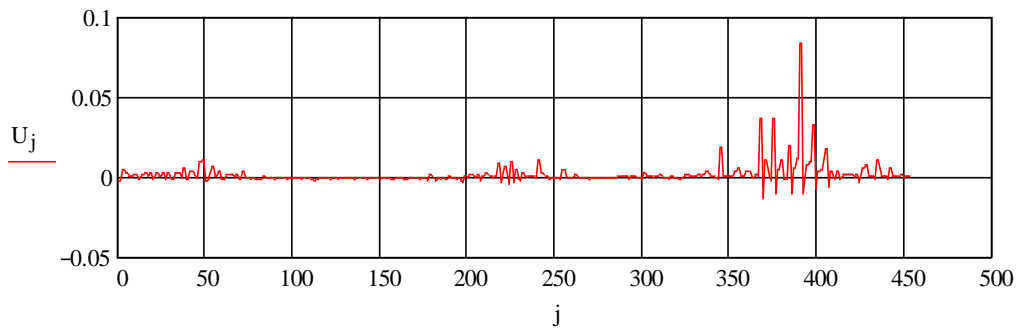
$$j := 0..round\left(\frac{n}{m}, 0\right) - 2$$

$$V_j := \frac{\sum_{k=1}^m G_{k \cdot m + j}}{m + 1}$$

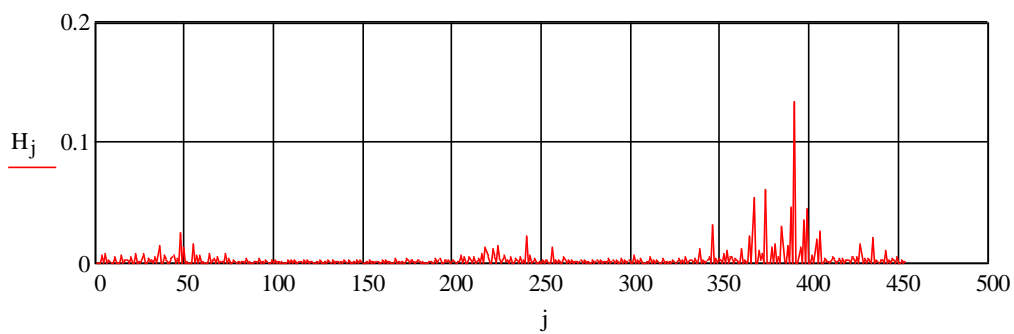


$$j := 1..round\left(\frac{n}{m}, 0\right) - 2$$

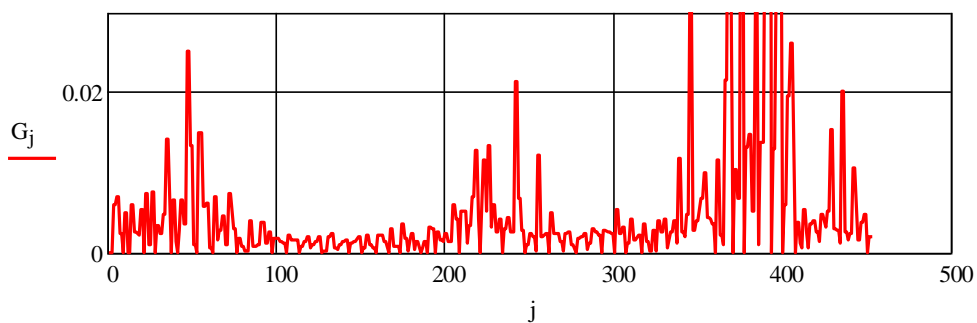
$$U_j := \begin{cases} V_{j-1} & \text{if } V_{j-1} > V_j \\ V_j & \text{if } V_{j-1} \leq V_j \\ V_1 & \text{if } j = 1 \end{cases}$$



$$H_j := U_j - V_j$$



$$G_j := \begin{cases} H_{j-1} & \text{if } H_{j-1} > H_j \\ H_j & \text{if } H_{j-1} \leq H_j \\ H_1 & \text{if } j = 1 \end{cases}$$



$$q_j := U_j - G_j$$

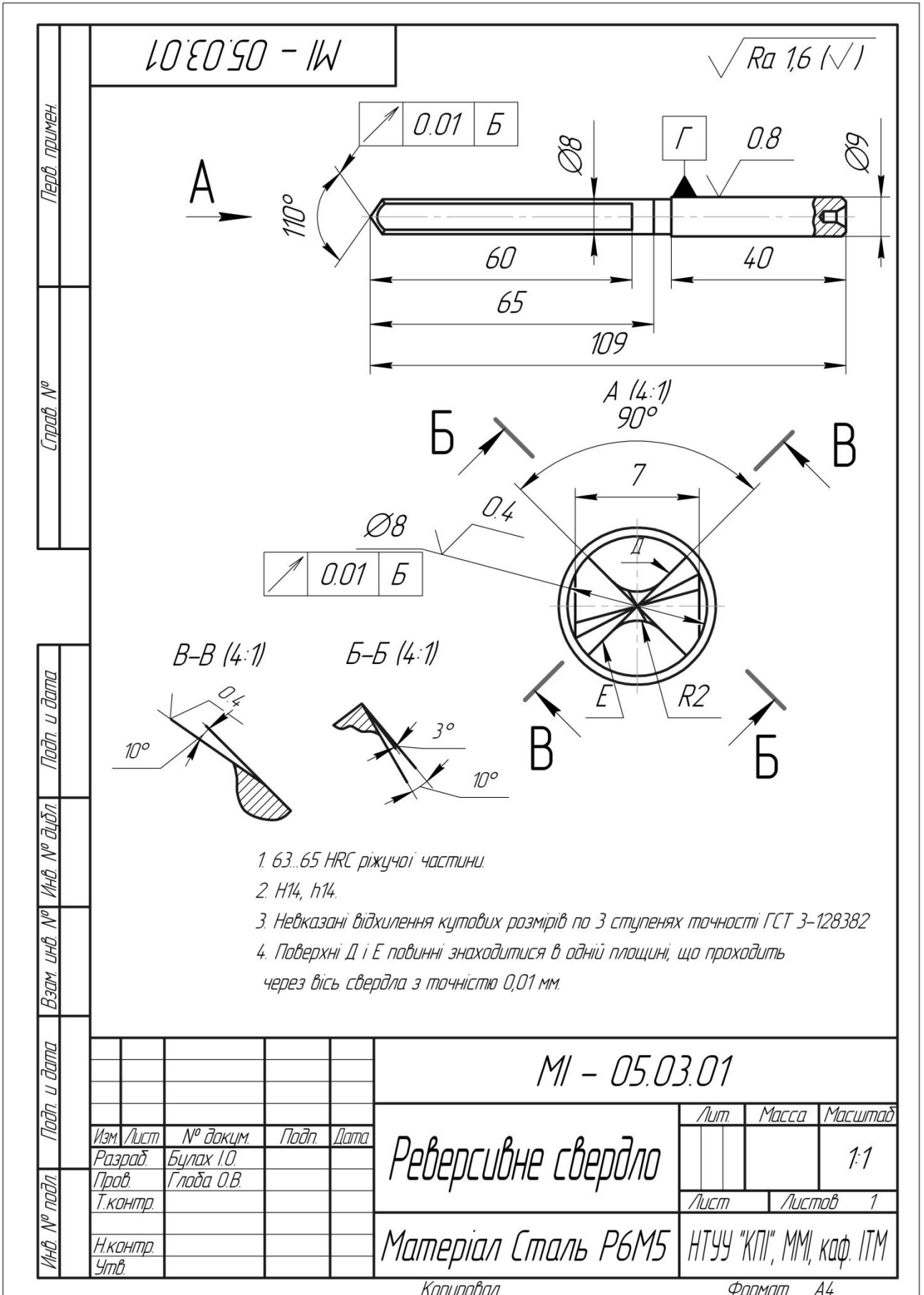
$$B_0 := 0.014$$

$$B_k := B_0 + q \cdot \text{round}\left(\frac{n}{m}, 0\right) - 2 \quad B_k = 0.01221 \quad \text{—износ (мм)}$$

Скорость износа при данных режимах:

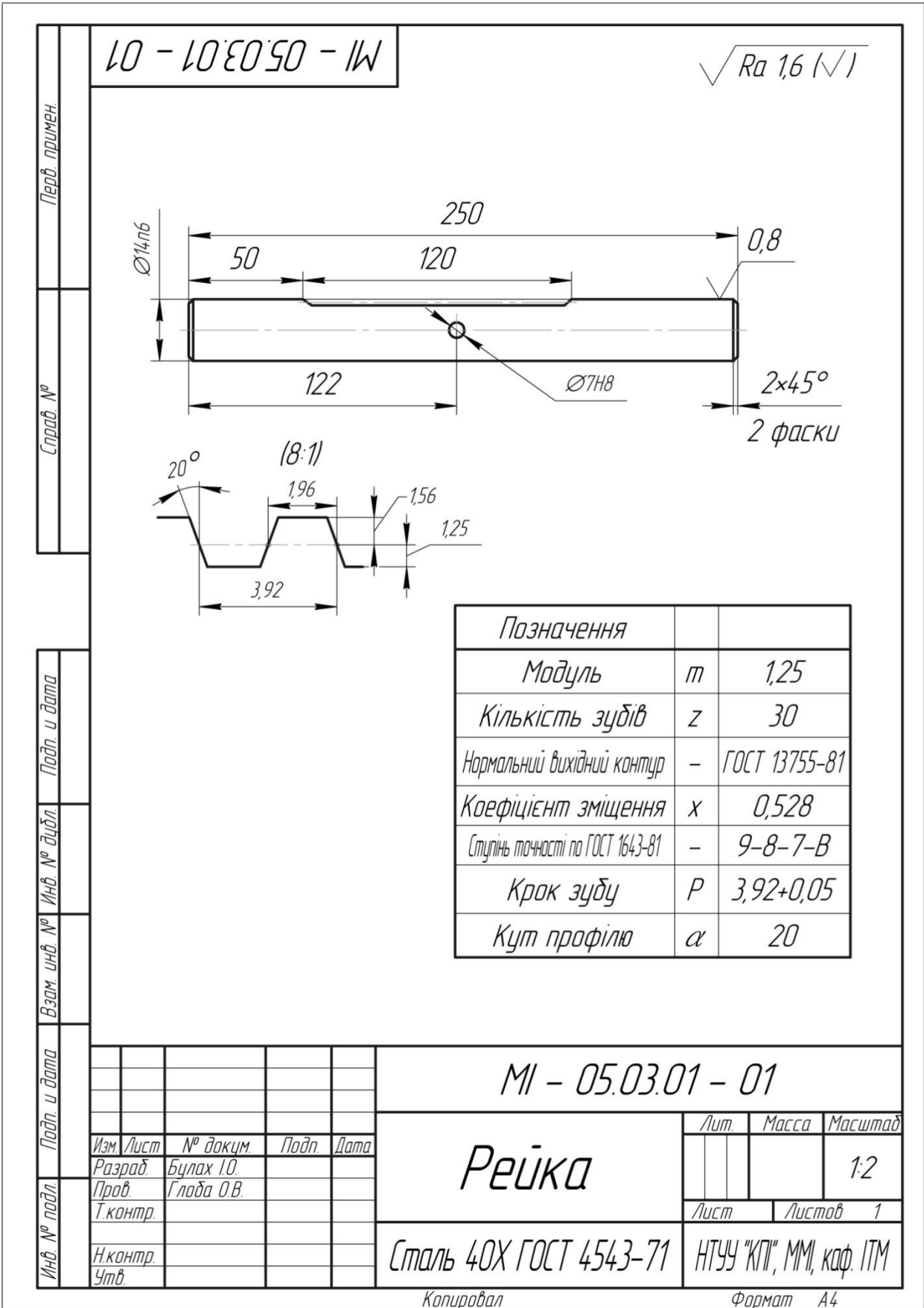
$$V_k := \frac{|B_k|}{T_p} \quad V_k = 2.36073 \times 10^{-3} \text{ мм /сек}$$

**Додаток Б**



**Додаток В**













MI - 05.03.01 - 06

$\sqrt{Ra\ 1,6\ (\checkmark)}$

Перв. примен.

Справ. №

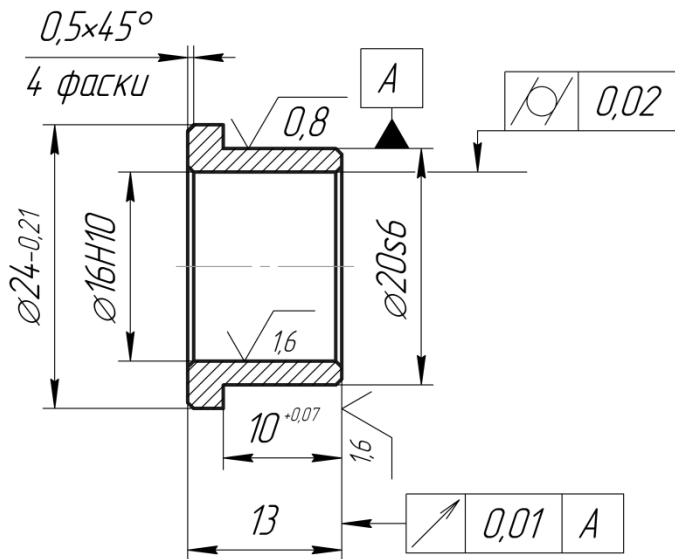
Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



1. H14, h14,  $\pm IT\ 14/2$ .
2. Гострі кромки притупити фаскою  $0,1 \times 45^\circ$ .

MI - 05.03.01 - 06

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Бцлах І.О.		
Проб.		Глоба О.В.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Втулка

Пруток БрОФ 6,5-0,15 ГОСТ 10025-78

Копировал

Лит.	Масса	Масштаб
		2:1
Лист	Листов	1

НТУУ "КПІ", ММІ, каф. ІТМ

Формат А4

**Додаток Г**

### Розрахунок собівартості виготовлення пристрою.

Розрахунок собівартості виготовлення пристрою для свердління з реверсивним рухом інструменту

№ п/п	Позначення	Найменування	К-ть, шт.	Ціна, грн. за матеріал	Ціна, грн. за од	Сума грн. з ПДВ
1	МІ-05.03.01-01	Рейка	1	Ст40х Ø16х255 вага=0,4 кг 4,35	32,00	36,36
2	МІ-05.03.01-02	Вінець	1	Ст45 Ø125х15 вага=1,44 кг 17,98	58,50	76,48
3	МІ-05.03.01-03	Хомут	1	Ст20 Ø105х20 вага=1,35 кг 14,71	17,00	31,71
4	МІ-05.03.01-04	Зубчасте колесо	1	Ст40х Ø60х20 вага=1,44 кг 5,49	42,30	47,79
5	МІ-05.03.01-05	Шпindelь	1	Ст40х Ø30х80 вага=0,44 кг 4,78	32,32	37,10
6	МІ-05.03.01-06	Втулка	2	Броф Ø30х80 вага=0,17 кг 14,62	15,00	29,62
7	МІ-05.03.01-07	Корпус	1	Ст45 Ø150х170 вага=23,42 кг 112,80	81,25	194,05
8	МІ-05.03.01-08	Важіль	1	Ст45 Ø70х60 вага=1,8 кг 22,40	24,21	46,61
9	МІ-05.03.01-09	Маховик	1	Ст45 Ø100х80 вага=4,9 кг 31,20	42,50	73,70
10	МІ-05.03.01-	Вісь	1	Броф	11,20	17,02

	10			Ø15x40 вага=0,06 кг 5,82		
11	МІ-05.03.01-11	Кришка	1	Д16Т Ø150x40 вага=1,9 кг 63,70	41,84	105,54
12	МІ-05.03.01-12	Кожух	2	Ст20 Ø50x240 вага=0,59 кг 6,40	28,50	34,90
13	№108	Підшипник	2	5,40		10,80
14	№6202	Підшипник	2	3,00		6,00
15	№6201	Підшипник	2	3,00		6,00
Разом						753,68

**Додаток Д**

**ПАТ «Хімтекстильмаш»**

14001, м. Чернігів, вул. Щорса, 110 тел. 672-034  
р/р 26003301830341 в ПБ м. Чернігова МФО 353456 код 14314311

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Голова правління ПАТ

«Хімтекстильмаш»

Пахманов М. Р.

« 9 » червня 2014 р.

**АКТ ПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ**

Ми, що нижче підписалися, представники ПАТ «Хімтекстильмаш» головний інженер Шумний Ю.Д., начальник виробництва Сиренко О. М., та представники ММІ НТУУ «КПІ», доцент кафедри ІТМ Глоба О.В., та аспірант кафедри ІТМ Булах І.О., підписали цей акт в тому, що представниками ММІ НТУУ «КПІ» передані, представниками ПАТ «Хімтекстильмаш» прийняті для впровадження на підприємстві рекомендації по забезпеченню високої якості отворів у полімерних композиційних матеріалах, що полягають у застосуванні пристрою для реверсивного свердління та реверсивних свердел нової конструкції.

Попередні випробування показали, що застосування свердла нової конструкції та пристрою для реверсивного свердління дозволяє підвищити стійкість інструменту за рахунок зниження часу контакту різальних кромки з матеріалом та забезпечити високу якість обробленого отвору.

Головний інженер  
Шумний Ю.Д.

Доц. каф. ІТМ, ММІ НТУУ «КПІ»  
Глоба О.В.

Начальник виробництва  
Сиренко О. М.

Асп. каф. ІТМ, ММІ НТУУ «КПІ»  
Булах І.О.

**ПАТ «Хімтекстильмаш»**

14001, м. Чернігів, вул. Щорса, 110 тел. 672-034  
р/р 26003301830341 в ПІБ м. Чернігова МФО 353456 код 14314311

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Голова правління ПАТ

«Хімтекстильмаш»

Пахманов М. Р.

« 26 » серпня 2014 р.

**АКТ**

Промислових випробувань пристрою для реверсивного свердління та реверсивних свердел для оброблення полімерних композиційних матеріалів

На дослідному заводі ПАТ «Хімтекстильмаш» у червні 2014 року були проведені випробування пристрою для реверсивного свердління, а також реверсивних свердел для оброблення ПКМ, розроблених Булах І.О.

Пристрій та свердла використовувались для оброблення отворів у заготовках зі склопластика, текстоліту марок А, Б, ГОСТ 2910-74, склотекстоліту конструкційного, ГОСТ 10292-74, фольгованого склотекстоліту, ГОСТ 10316-78, гетинаксу, ГОСТ 2718-74 на настільному вертикальному свердильному верстаті 2М 112 (розмір конуса шпинделя зовнішній по ГОСТ 9953-82 В18, число швидкостей 5, число оборотів шпинделя 450 – 4500 об/хв, подача ручна).

Параметри свердел:

Матеріал свердла: швидкорізальна сталь Р18

Зовнішній діаметр свердла – 8 мм;

Подвійний кут в плані 2φ (досліджено 3 зразки реверсивного свердла) – 110°, 120°, 130°;

Передній кут  $\gamma$  – 10°;

Задній кут  $\alpha$  – 10°;

Товщина оброблюваного матеріалу 6-10 мм.

Режими оброблення:

Швидкість різання  $V=0,87$  м/с, подача приблизно  $S=0,6$  мм/об, частота обертання шпинделя 450 об/хв., 850 об/хв., 1200 об/хв.

Результати випробувань:

1. Стійкість свердла нової конструкції при обробленні склотекстоліту та склопластика перевищила стійкість стандартного свердла в 1,6 раз.

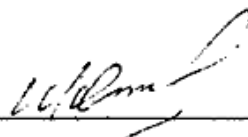
2. Ступінь точності отвору відповідає вимогам, що висуваються до отворів у оброблюваних матеріалах (отримана якість отворів 11-12 квалітетів, шорсткість  $R_z=20$ ).

3. Поломок свердел та сколів різальних кромek не спостерігалось. Дефектів оброблювального матеріалу не спостерігалось.

4. Застосування свердла нової конструкції та пристрою для реверсивного свердління дозволяє підвищити стійкість інструменту та забезпечити високу якість обробленого отвору, підвищити виробничу спроможність різання за рахунок покращення стружковідведення та зрівноваження сил різання.


5. Реверсивна обробка матеріалів дає можливість подрібнення стружки та покращення її видалення з отвору, особливо при обробці в'язких та пластичних матеріалів. Направляючі стрічки з обох сторін кожного пера, що вдвічі більше, ніж у стандартного свердла, підвищують демпфуючу здатність (здатність матеріалу поглинати вібрацію за рахунок внутрішнього тертя, перетворення механічної енергії в тепло) реверсивного свердла та точність обробки.

Головний інженер



Шумний Ю.Д.

Начальник виробництва



Сиренко О. М.

Надруковано на двох аркушах



ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Генеральний директор ПАТ  
 «Чернігівський завод  
 радіоприладів»  
 Л.О. Свиріденко  
 « 27 » серпня 2014 р.



### АКТ

#### Промислових випробувань пристрою для реверсивного свердління та реверсивних свердел

На заводі ПАТ «ЧЕЗРА» у серпні 2014 року були проведені випробування пристрою для реверсивного свердління, а також реверсивних свердел для оброблення полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), розроблених асистантом кафедри ПМ ММІ ННУУ «КІП» Булах І.С.

Пристрій та свердла використовувались для оброблення отворів у заготовках з фольгованого текстоліту марок ПТ та ППК, ГОСТ 5-78 та склотекстоліту марок СТ, СТК, ГОСТ 12652-74 на настільному вертикальному свердильному верстаті 2М 112 (найбільший хід шпинделя 100 мм, розмір конуса шпинделя зовнішній по ГОСТ 9953-82 В18, число швидкостей 5, число оборотів шпинделя 450 - 4500 об/хв, подача ручна). Досліджувалися три зразки свердел.

Матеріал свердла: швидкорізальна сталь Р18

Конструктивні та геометричні параметри свердла:

Зовнішній діаметр свердла - 8 мм;

Подвійний кут в плані  $2\phi$  - 110°, 120°, 130°;

Передній кут  $\gamma$  - 10°;

Задній кут  $\alpha$  - 10°;

Товщина оброблюваного матеріалу 3-6 мм.

Режими оброблення:

Швидкість різання  $V=0,87$  м/с, подача приблизно  $S=0,56$  мм/об. частота обертання шпинделя 450 об/хв., 800 об/хв., 1400 об/хв.

Результати випробувань:

1. Стійкість свердла нової конструкції при обробленні текстоліту та склотекстоліту перевищила стійкість стандартного свердла в 1,5 рази, застосування реверсивного руху для свердла нової конструкції підвищило його стійкість в 2 рази порівняно зі свердлінням без реверсування обертального руху інструменту.

2. Ступінь точності отвору відповідає вимогам, що висуваються до отворів у ІШМ (отримано якість 11 квалітету, шорсткість  $R_a=20$ ).

3. Поломок свердел та сколів різальних кромek не спостерігалось. Дефектів оброблювального матеріалу типу тріщини, розшарування та прижоги не спостерігались при частоті обертання шпинделя до 450 об/хв.

4. При частоті обертання шпинделя верстата 800 об/хв та 1400 об/хв спостерігається прижог матеріалу навколо отвору для текстоліту. Для склотекстоліту прижогу не спостерігалося.

5. В результаті вимірювання температури свердла показано, що порівняно зі стандартним, температура реверсивного свердла нижча на 20%.

6. Серед трьох зразків реверсивного свердла пайкраєця якості отвору та найбільша стійкість спостерігається у свердла з подвійним кутом в плані  $2\phi=110^\circ$ .

7. Застосування свердла нової конструкції та пристрою для реверсивного свердління дозволяє підвищити стійкість інструменту за рахунок зниження часу контакту різальних кромek з матеріалом та забезпечити високу якість обробленого отвору.

Заступник технічного директора

ПАТ «ЧЕЗАР»



Медвідь С.М.

Заступник технічного директора

ПАТ «ЧЕЗАР»



Литвиненко А.Д.

Затверджую

Директор ММІНТУУ «КПІ»

М.І. Бобир

2016 р.

## АКТ

Впровадження результатів наукової роботи І.О. Милокост «Підвищення якості отворів при свердлінні тонкостінних виробів з ортотропних вуглепластиків» представленої на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук у навчальний процес

Ми, що нижче підписались: зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування, проф. В.А. Пасічник, заступник завідувача кафедри інтегрованих технологій машинобудування з методичної роботи доц. В.І. Солодкий склали цей акт в тому, що за період з 15.11.2011 р. по 14.11.2014 р. результати зазначеної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування, а саме:

для курсу «Теорія різання», створено новий розділ «Особливості обробки композиційних матеріалів»; для курсу «Композиційні матеріали та методи їх обробки» створено розділ «Свердлення композиційних матеріалів»; для курсу «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва» доповнена тема №2 «Свердла»; для курсу «Спеціальний інструмент» в розділі «Механічна обробка КГМ» створено підрозділ «Отримання отворів в КГМ», а також результати роботи використовувались при виконанні курсових, дипломних, магістерських робіт та в науково-дослідній роботі студентів.

Зав. кафедри інтегрованих  
технологій машинобудування

В.А. Пасічник

Заступник завідувача кафедри  
інтегрованих технологій  
машинобудування з методичної  
роботи

В.І. Солодкий

**Додаток Е**

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 106463

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОСЦИЛЮЮЧОГО СВЕРДЛІННЯ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи  
26.08.2014.

Голова Державної служби  
інтелектуальної власності України

  
М.В. Ковіня

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 88898

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗШАРУВАННЯ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.04.2014**.

Голова Державної служби  
інтелектуальної власності України



М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

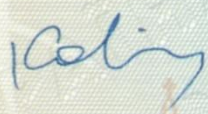
№ 90542

СВЕРДЛО ДЛЯ ОСЦИЛЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи  
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні  
моделі **26.05.2014**.

Голова Державної служби  
інтелектуальної власності України



М.В. Ковіня

