

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Степанов Д.М.

Гончар Н.В.

Кондратюк Е.В.

Тришин П.Р.

**ОСОБЛИВОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ  
СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ І ТОНКОСТІННИХ  
АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ЩІТКОВИМИ  
ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ**

*Монографія*

УДК 621.922.023.002

О-72

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного університету «Запорізька політехніка»  
(протокол № 3 від 28.11.2022 р.)*

Рецензенти:

**Віталій ІВАНОВ**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» Сумського державного університету

**Юрій БСЛОКОНЬ**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри металургійних технологій, екології, та техногенної безпеки ІННІ ім. Ю. М. Потєбні Запорізького національного університету

О-72 **Особливості фінішної обробки складнопрофільних і тонкостінних авіаційних деталей щітковими полімерно-абразивними інструментами** : монографія / Степанов Д.М., Гончар Н.В., Кондратюк Е.В., Тришин П.Р. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 200 с.

ISBN 978-617-529-355-3

У монографії розглянуто проблеми технологічного забезпечення підвищення якості оброблених поверхонь складнопрофільних і тонкостінних деталей, що привалюють в авіадвигунобудівній, медичній, приладобудівній та інших галузях, а також підвищення продуктивності фінішного етапу технологічного процесу їх виготовлення за допомогою щіткових полімерно-абразивних інструментів.

Визначено раціональні режими різання, умови обробки та рекомендації щодо використання полімерно-абразивних щіток для:

- різних матеріалів – сталей, алюмінію і сплавів на його основі, жароміцних нікелевих і титанових сплавів;
- тонкостінних і складнопрофільних деталей авіаційних двигунів з вищеназваних матеріалів;
- ремонтного виробництва – зняття нагару, видалення задирок із складнопрофільних поверхонь і крайок, а також зняття окисних плівок, травленого шару тонкостінних деталей складних просторових форм.

ISBN 978-617-529-355-3

УДК 621.922.023.002

© Степанов Д.М., Гончар Н.В.,  
Кондратюк Е.В., Тришин П.Р., 2022  
© Національний університет  
«Запорізька політехніка», 2022

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....	6
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ФІНІШНО-ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ТОНКОСТІННИХ І СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ....	9
1.1 Основні вимоги до фінішно-оздоблювальних методів обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей.....	9
1.2 Аналіз і порівняння методів і інструментів фінішної обробки .....	10
1.3 Основні параметри дискових полімерно-абразивних щіток .....	20
1.4 Особливості експлуатації ПАЩ .....	23
1.5 Особливості вибору полімерно-абразивних інструментів .....	29
1.6 Мета і завдання дослідження. ....	32
1.7 Висновки.....	33
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ І УМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1 Зразки для експериментальних досліджень.....	34
2.2 Методики дослідження якості поверхні і поверхневого шару.....	36
2.2.1 Методика дослідження шорсткості .....	36
2.2.2 Методика визначення якості скруглення гострих кромek після видалення задирок .....	37
2.2.3 Методика визначення величини поверхневого наклепу .....	38
2.2.4 Методика дослідження розподілу залишкових напружень.....	39
2.2.5 Методика визначення рівня шаржування абразивом обробленої поверхні.....	40
2.3 Загальні умови проведення експериментальних досліджень процесу оброблення.....	40
2.3.1 Устаткування .....	40
2.3.2 Особливості зношування і відновлення волокон полімерно-абразивних щіток .....	41
2.3.3 Оброблювані матеріали .....	42

2.3.4 Інструмент – полімерно-абразивні щітки .....	44
2.3.4.1 Порівняння зон обробки при закріпленні абразивних зерен на жорсткому диску і пружному полімерному волокні .....	45
2.3.5 Віртуальне моделювання контакту «волокно-зразок».....	49
2.4 Висновки .....	54
<b>РОЗДІЛ 3 ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ.....</b>	
3.1 Дослідження шорсткості оброблюваної поверхні залежно від режимів обробки і параметрів ПАЩ .....	55
3.2 Вплив умов обробки ПАЩ на величину поверхневого наклепу.....	63
3.3 Оцінка рівня залишкових напружень після обробки ПАЩ .....	67
3.4 Статистична обробка результатів експериментів .....	71
3.5 Оцінка рівня шаржування обробленої поверхні .....	77
3.6 Оцінка якості видалення задирок і заокруглення гострих крайок ....	79
3.7 Висновки.....	86
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПАЩ .....</b>	
4.1 Дослідження теплових процесів під час обробки полімерно-абразивними щітками .....	88
4.1.1 Розробка методики і дослідження впливу температури на розм'якшення одиничних полімерно-абразивних волокон .....	89
4.1.2 Розробка методики дослідження контактної температури в зоні обробки полімерно-абразивними щітками .....	96
4.2 Дослідження силової дії полімерно-абразивних щіток на оброблювану поверхню .....	116
4.2.1 Силова дія одиничного полімерно-абразивного волокна .....	116
4.2.2 Методика вимірювання сил при обробці ПАЩ .....	124
4.2.3 Експериментальні дослідження .....	127
4.3 Висновки.....	136

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПАЩ НА ФІНІШНОМУ ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ І РЕМОНТУ ТОНКОСТІННИХ І СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА...	137
5.1 Загальні принципи вибору ПАЩ для обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей .....	137
5.2 Диски газотурбінних двигунів.....	139
5.3 Лопатки газотурбінних двигунів .....	145
5.3.1 Перо лопатки .....	146
5.3.2 Хвостовики лопаток .....	151
5.4 Конічні шестерні .....	158
5.5 Оздоблювальна і слюсарна обробка алюмінієвих деталей.....	159
5.6 Особливості застосування ПАЩ в ремонтних технологіях відновлення деталей, що були в експлуатації.....	162
5.7 Висновки.....	164
Загальні висновки.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
Додаток А. Результати дослідження характеру контактування і НДС системи «зразок-волокно».....	182
Додаток Б. Технологічні рекомендації щодо фінішної обробки лопатевих дисків ГТД полімерно-абразивними щітками.....	185
Додаток В. Протоколи вимірів. Перо лопатки 1 ступеня КВД дв. Д-36....	187
Додаток Г. Технологічні рекомендації щодо фінішної обробки пера середньогабаритних лопаток ГТД полімерно-абразивними щітками...	190
Додаток Д. Технологічні рекомендації слюсарної обробки зняття задирок на хвостовиках лопаток ГТД за допомогою полімерно- абразивних щіток.....	192
Додаток Е. Техніко-економічний розрахунок варіантів виконання слюсарної обробки крайок «ялинкових» хвостовиків лопаток.....	193
Додаток Ж. Технологічні рекомендації щодо видалення задирок і заокруглення гострих крайок за допомогою полімерно-абразивних щіток на деталях з алюмінію і сплавів на його основі.....	199

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ**

АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
ГТД	Газотурбінний двигун
ЕУ	Енергетична установка
ЗОТС	Змащувально-охолоджувальне технологічне середовище
КВТ	Компресор високого тиску
СЕ	Скінченний елемент
ПА	Полімерно-абразивний
ПАЩ	Полімерно-абразивна щітка
ПАІ	Полімерно-абразивний інструмент
ПК	Персональний комп'ютер
ППД	Пластична поверхнева деформація
ПФ	Повний факторний експеримент
ЧПК	Числове програмне керування
ШК	Шліфувальний круг

## ВСТУП

Нині важливими питаннями на машинобудівних підприємствах є питання підвищення якості оброблюваних поверхонь деталей, а також продуктивності фінішного етапу технологічного процесу їх виготовлення. Особливі труднощі при забезпеченні високої якості фінішної обробки і її механізації викликають складнопрофільні деталі, що вимагають точного позиціонування інструменту по відношенню до оброблюваної поверхні, зокрема при наявності важкодоступних для обробки місць. Великої уваги також вимагають тонкостінні деталі, які не можна піддавати високим силовим навантаженням під час обробки. В авіадвигунобудуванні, де упор робиться на мінімізацію маси деталей без втрати міцності, переважають тонкостінні деталі складних просторових форм. Фінішна обробка таких деталей вимагає великих витрат для конструювання і виробництва спеціального технологічного оснащення і устаткування або застосування ручної праці різного ступеня важкості і складності, яка до того ж є тривалою та монотонною і вимагає високої кваліфікації слюсаря. Такі ж проблеми доводиться вирішувати при розробці технології фінішних етапів обробки тонкостінних складнопрофільних деталей в приладобудуванні, медичній промисловості (інструменти, протези) і в інших машинобудівних галузях. Слід зазначити, що у вищеназваних галузях промисловості для виготовлення деталей використовують у тому числі і важкооброблювані (корозійностійкі, жароміцні) сталі і сплави, обробка яких є ще більш трудомісткою і вимагає особливих технологічних умов і режимів.

Застосування відносно нового щіткового інструменту обертальної дії на основі полімерно-абразивних волокон для фінішно-оздоблювальної обробки дає можливість долати більшість вищеперелічених труднощів, при цьому досягати високої якості оброблених поверхонь, видаляти задирки і округляти гострі кромки, а також знімати нагар, покриття і фарбу в ремонтному виробництві.

У зв'язку з тим, що полімерно-абразивні щітки (ПАЩ) відносно нещодавно з'явилися на інструментальному ринку України, на сьогодні недостатньо науково обгрунтованої інформації і експериментально апробованих технологічних рекомендацій щодо їх раціонального використання для фінішної обробки таких деталей і матеріалів.

Тому визначення взаємозв'язку якості і продуктивності фінішної обробки з режимами різання і параметрами полімерно-абразивних щіток, зі збереженням їх працездатного стану, розширення сфер ефективного застосування ПАЩ, можливості механізації операцій і розробка технологічних рекомендацій по застосуванню цього виду інструментів на оздоблювальному етапі виготовлення тонкостінних і складнопрофільних деталей з різних матеріалів, є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ФІНІШНО-ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ТОНКОСТІННИХ І СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

#### 1.1 Основні вимоги до фінішно-оздоблювальних методів обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей

Фінішно-оздоблювальна обробка деталей застосовується в усіх галузях промисловості. Її мета – розмірна і декоративна обробка поверхонь, зняття задирок, очищення, підвищення механічних властивостей деталей [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Методи фінішного етапу технологічного процесу виготовлення мають важливе значення в забезпеченні якості поверхні деталей, що виготовляються. Внаслідок того, що на фінішних операціях через зіткнення деталей між собою і з робочим елементом (тілом, речовиною, середовищем) інструменту відбувається деяке зміцнення (іноді – роззміцнення) їх поверхневого шару і перерозподіл в ньому внутрішніх напружень, ці методи у складі повного технологічного циклу обробки деталей слід розглядати також з позицій технологічної спадковості як методи формування і управління якістю поверхневого шару деталей. Це дозволяє досягти необхідних експлуатаційних характеристик деталей [1], [2].

Операції оздоблювально-зачисної та зміцнюючої обробки складають 10-20% загальної трудомісткості виготовлення деталей, оскільки на багатьох підприємствах ці операції виконують вручну або із застосуванням засобів малої механізації.

У деяких галузях машинобудування, таких як авіаційно-космічна, де через вимоги до мінімізації маси виробів практично усі деталі є тонкостінними і складнопрофільними або у приладобудуванні і медицині (виготовлення протезів, медичних інструментів тощо) часто виникає необхідність оздоблювальної обробки поверхонь і кромek складної конфігурації. У загальному машинобудуванні доля таких деталей менша, але вони також часто

є відповідальними і складнонавантаженими в експлуатації, що викликає необхідність забезпечення високої якості робочих поверхонь. Їх фінішна обробка є трудомістким процесом; відсоток ручної праці, монотонної, відповідальної, яка вимагає невинної уваги робітника є значним. При цьому слід враховувати, що матеріали, з яких вони виготовляються, – від широковикористовуваних сталей і алюмінієвих сплавів до важкооброблюваних корозійностійких і жароміцних сталей і сплавів на основі титану і нікелю – мають різну оброблюваність.

Додаткові особливості, які необхідно враховувати при фінішній обробці таких деталей, наступні:

- наявність важкодоступних місць, виступів, пазів і інших елементів конструкції деталей складного профілю;
- забезпечення рівномірності обробки поверхонь різних рівнів і місць розташування;
- наведення сприятливих властивостей поверхневого шару для відповідальних і особлиовідповідальних деталей;
- мінімізація силового тиску на оброблювані поверхні;
- відсутність прижогів і мінімізація теплової дії.

Рішення цих завдань багато в чому залежить від вибраного методу фінішної обробки і, відповідно, інструментів, які при цьому застосовуються [8], [9].

## **1.2 Аналіз і порівняння методів і інструментів фінішної обробки**

При виконанні фінішних операцій обробки складнопрофільних виробів розрізняють три підходи до використання інструментів:

- жорсткий інструмент: або профіль інструменту, або його траєкторія руху повинна точно повторювати (копіювати) форму оброблюваної поверхні;

- нежорсткий пружний інструмент: вимоги вищезгаданих умов різко знижуються або відміняються;

- відсутність інструменту – наявність робочого середовища різного наповнення (повітря, рідина, абразивний пісок, крихта абразивних кругів, галька, кульки, граніт, деревина, гума тощо).

При аналізі методів і інструментів, їх підборі для фінішних операцій має бути комплексний підхід до оцінки вживаного устаткування і оснащення, характеристик інструменту і його можливостей, результатів обробки і умов праці робітників при її виконанні.

З точки зору вживаного устаткування прагнуть до використання універсальних верстатів, верстаків, пристроїв, стандартного допоміжного інструменту і іншого оснащення. При застосуванні спеціального устаткування, по можливості, збільшують його універсальність, тобто номенклатуру оброблюваних на ньому деталей і їх типорозмірів, з метою мінімізувати витрати. Враховують витрати на додаткову електроенергію (наприклад, для електрохімічних, електроконтактних, електроіскрових і деяких інших методів) на додаткові пристрої і прилади, спеціальні ЗОТС, пасти, які йдуть понад звичайні витрати.

Вимоги до інструменту (робочого середовища) включають: низьку вартість його виготовлення, ремонту, відновлення і утилізації, високу зносостійкість при його експлуатації.

Обробка має бути високопродуктивною або за рахунок можливостей методу і інструменту, або за рахунок великої кількості одночасно оброблюваних деталей. Оцінюють також якість оброблених поверхонь, у тому числі і наведення сприятливих властивостей поверхневого шару.

Звертають також увагу на погіршення умов праці робітників при виконанні деяких фінішних операцій: підвищений рівень шуму, ультразвук, запилення робочого місця, наявність пари їдких рідин, лугів, кислот і інші небезпеки для здоров'я людини, і, відповідно, витрати на додаткову вентиляцію, засоби захисту, герметизацію тощо.

Автори роботи [2] Кулаков Ю.М. і Хрульков В.А. запропонували класифікацію методів фінішної обробки, розділивши їх на 5 груп (рис. 1.1).

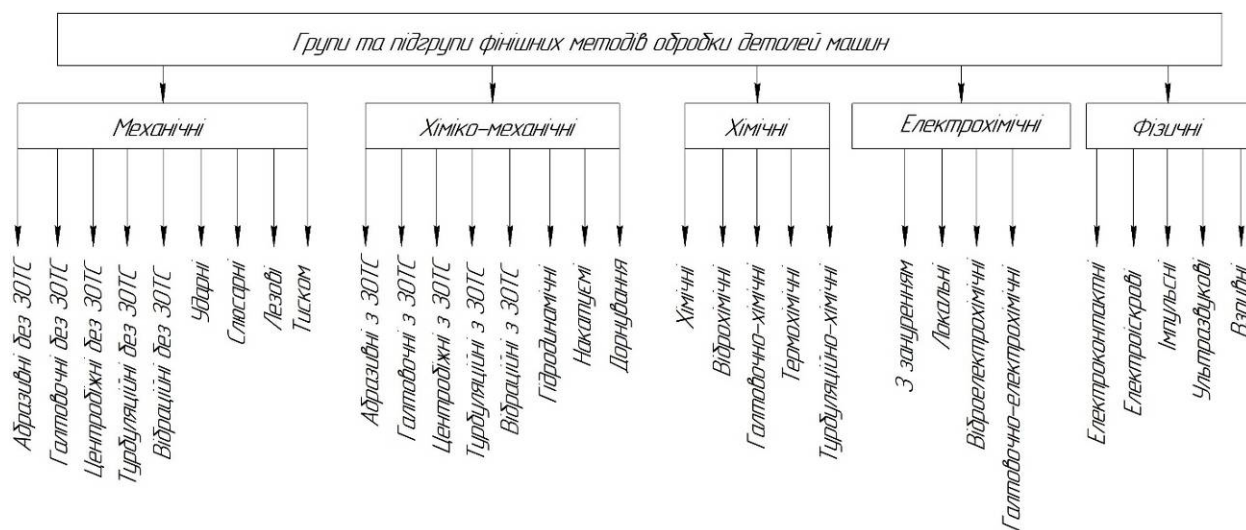


Рис. 1.1. Класифікація методів фінішної обробки

Ці методи були розглянуті [8], [9] з точки зору можливості обробки складнопрофільних поверхонь, важкодоступних місць (виступів, пазів, отворів тощо), тонкостінних конструктивних елементів, видалення задирок і заокруглення гострих крайок криволінійної форми.

Відразу були відкинуті методи, що використовують так звані жорсткі інструменти, – шліфувальні круги (у тому числі і на гумовій і полімерній зв'язці), притири і інші, що не завжди дають можливість обробляти навіть прості фасонні поверхні, без обробки важкодоступних елементів, до того ж вони мають досить велику силову дію на оброблювану поверхню, що робить небажаним їх застосування для тонкостінних деталей, і вірогідність наведення прижогів. До цього типу було віднесено також інструменти лезових (різцевий, дисковий, фрезерний, свердловальний, протяжний) методів і методів тиску (вальцювання тощо), які є допоміжними і використовуються для попередньої зачистки, видалення задирок, облоя; деталі після них потребують додаткового доопрацювання іншими фінішними методами [1], [2], [10], [11].

Методи хімічної і електрохімічної груп, що використовують як інструмент робоче середовище – електроліт, відрізняються тим, що з їх

допомогою можна обробляти тонкостінні і складнопрофільні деталі з важкодоступними ділянками, знімати задирки, проте вони мають декілька загальних серйозних недоліків, один з яких – корозійна дія і зміна хімічного складу тонкого поверхневого шару – є причиною того, що методи цих груп не застосовують для більшості деталей авіаційної і медичної промисловості і для відповідальних деталей машин загального машинобудування, особливо тих, що працюють із змінними навантаженнями.

Методи, що використовують вільний, незв'язаний абразивний наповнювач, при обробці мають високий рівень шуму і запиленості. Методи галтувальної і вібраційної підгруп [2], [5], [6], [12] використовують для фінішної обробки складнопрофільних зовнішніх поверхонь дрібних деталей, внутрішні поверхні і важкодоступні місця обробляються з набагато меншою інтенсивністю. Гідро- і пневмоструменеві, турбоабразивні, магнітоабразивні методи [7], [11], [13], [14], де напрям і інтенсивність робочого абразивного середовища (струменя або потоків) можна регулювати, у тому числі і спецметоди, такі як обробка в псевдозрідженому шарі абразиву в установках, що конструюються під окремі групи деталей, ультразвукова абразивна обробка, вимагають спеціального устаткування, компресорів, нагнітаючих гідростанцій, герметичних камер і додаткових методів захисту. Ці методи також характеризуються різної міри шаржуванням абразивними частками, що є неприпустимим для відповідальних поверхонь деталей; іноді їх застосовують локально, якщо це можливо, або закривають певні поверхні деталей захисними екранами, тарілками, дисками, кільцями, кожухами.

Найбільшого поширення при фінішній обробці складнопрофільних тонкостінних деталей набули методи абразивної і ударної підгруп, що використовують нежорсткі, гнучкі або пружні інструменти, такі як абразивні еластичні круги, абразивні стрічки, пелюсткові круги, інструменти на основі металевих і неметалевих волокон [2], [15], [16], [17], [18], [19], [20].

Ці інструменти мають свої характеристики, переваги і недоліки і широко застосовуються для обробки тонкостінних деталей з простими

фасонними поверхнями. Еластичні полірувальні круги (з фетру, войлоку, текстилю, кіперної тканини, матер'яні, паперові та інші) схильні до сильного зношення, мають малу продуктивність обробки [17]. При обробці абразивною шкіркою якість обробки нерівномірна, трудомісткість операцій висока. Стрічкове полірування відрізняється вищою продуктивністю і кращою якістю обробленої поверхні, але вимагає спеціального устаткування, ЗОТС, і до того ж абразивна стрічка, як і шкірка, інтенсивно зношується [14], [18]. Пелюсткові круги забезпечують велику продуктивність, проте при обробці необхідно враховувати поступовий знос абразивних пелюсток [19]. Пелюсткові і еластичні круги можна профілювати, абразивні стрічки підтискають фасонними роликками для обробки відносно простих фасонних поверхонь, проте якісно і рівномірно обробити важкодоступні місця і конструктивні елементи складнопрофільних деталей неможливо.

Одним з представників цієї групи інструментів є так звана механічна щітка – інструмент обертальної дії на основі металевих і неметалевих волокон [1], [20]. Металеві щітки широко застосовуються для розмірного (переважно – голкофрези) і безрозмірного полірування, очищення, зачистки, плакірування, зміцнення поверхневого шару деталей машин та іншого [1], [2], [11], [20], [21], [22], [23], [24]. Щітки з металевим волокном (іноді їх називають щіткі-крацовки) відрізняються по типах, розмірах і матеріалом робочої частини і завдяки пружним волокнам забезпечують невисокий силовий рівень дії і обробку важкодоступних місць, що дає можливість застосовувати їх для тонкостінних деталей складного профілю. При обробці дисковими і циліндричними металевими щітками в результаті множинної ударної дії відбувається зміцнення поверхневого шару – він наклепується [2], наводиться стискуючі залишкові напруження величиною 400...1200 МПа залежно від твердості деталі, що мають максимум на поверхні [1].

Автори роботи [20] стверджують, що залежно від режимів товщина поверхневого зміцненого шару досягає 0,05–0,1 мм, мікротвердість підвищується на 20–50 %.

Одінцов Л.Г. [10] досліджував обробку деталей із сталей різних марок довговорсними металевими дисковими щітками  $L = 60 \dots 100$  мм мікротвердість підвищувалася в  $1,5 \dots 3,5$  рази на глибину поверхневого шару не більше  $0,1$  мм.

Для того, щоб посилити ударний ефект дрiт роблять гофрованим або оснащують щітки ударними елементами: шайбами, зірочками, пластинами тощо [1], [10], [20].

В результаті досліджень металографічного і структурного аналізів поверхневого шару автори роботи [25] зробили висновки, що його фізико-механічні властивості значно відрізняються від властивостей металу, деформованого іншими видами механічної дії. При обробці поверхонь металів щітками, що обертаються, з дротяним ворсом утворюваний тонкий ( $0,05 \dots 0,1$  мм) поверхневий шар складається з твердої окисної плівки і суміші оксидів з деформованим металом. В усіх досліджених випадках твердість поверхневого шару, що утворюється, більше твердості основного металу, причому навіть відпал не дає зниження твердості шару до твердості металу, що відпалюється.

Серебренницький П.П. в роботі [20] припустив, що близькість значень мікротвердості поверхонь, оброблених щітками, до твердості оксидів відповідних металів дає можливість зробити висновок про те, що при механічній обробці поверхонь дротяними щітками, що обертаються, разом з пластичною деформацією металу величезну роль у формуванні фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні грають окислювальні процеси. Результати виміру мікротвердості поверхневого шару у різних металів, оброблених дротяними щітками, що обертаються, показали, що максимальні значення, що набувають при цьому, у декілька разів перевищують твердість, що досягається при зміцненні іншими методами пластичної деформації.

Зміна структури тонкого поверхневого шару позитивно впливає на деякі експлуатаційні властивості деталей із сталей і сплавів, насичення поверхневого шару яких оксидами підвищує поверхневу твердість.

Наприклад, в роботі [24] встановлено, що висока твердість і наявність тонких окисних плівок забезпечує підвищену зносостійкість поверхонь, оброблених щітками.

Проте цей ефект може діяти двояко [26], [27]. При взаємодії сталевих щіток з оброблюваною поверхнею залишається мікрошар вуглецевого металу ворсу, здатного окислюватися і утворювати на поверхні неметалічних виробів іржу, наприклад, на полірованому граніті.

Спостерігалися випадки, коли після фінішної обробки металевими щітками і збереження на складі титанових авіаційних лопаток, їх робочі поверхні «іржавіли». Оскільки сторонні оксиди на особливі відповідальних деталях з жароміцних сталей і сплавів не допускаються, і до того ж після термообробки за ремонтною технологією на ЛЮМА-контролі спостерігалось світіння, щітки з металевим ворсом на цих операціях застосовують неохоче, незважаючи на їх переваги для обробки складнопрофільних деталей, до яких і відносяться лопатки.

Це явище можна пояснити тим, що при обробці металевими щітками спостерігаються високі миттєві температури в зоні контакту (300...1200 °C залежно від оброблюваного матеріалу) [28]; вони «сприяють пластичній течії металу і формуванню іншої структури поверхневого шару» [25]; на оброблюваній поверхні мають місце складні фізико-механічні і хімічні процеси, ковзання ворсу, мікроудари окремих ворсинок, мікрорізання і мікросхоплювання металу ворсу на поверхні [10].

Цей ефект перенесення матеріалу волокон на/в поверхневий шар деталі в деяких випадках використовують безпосередньо для отримання покриттів різного хімічного складу, а іноді волокна використовують, в якості носіїв переносимої речовини. Таким чином обробка деталей металевими щітками забезпечує можливість формування не лише звичайних, але і полікомпозиційних покриттів, що містять в металевій матриці компоненти неметалічного походження [28], [29].

Але частіше волокна щіткового інструменту використовували як носіїв абразивних шліфуючих і полірувальних паст [20]. Для цих цілей застосовували металеві щітки з тонким ворсом; паралельно з ними широко увійшли до виробництва неметалеві щіткові інструменти обертальної дії. Матеріал волокон застосовували різний: натуральна свиняча щетина, натуральний волос (кінський, великої і дрібної рогатої худоби, верблюжий, соболинний, борсуковий, білячий, скунсовий, хорьковий тощо), бавовняна пряжа, рослинні волокна (манільське і сизалево прядиво, мексиканська трава, драцена, сорго) та інші [20], [30], [31], [32]. Кожен з них має свою міру м'якості, еластичності і область використання. Недоліком є дороговизна і невисока стійкість таких щіткових інструментів.

Альтернативою натуральним матеріалам став штучний замінник, так звана синтетична щетина. На початковому етапі розвитку полімерних матеріалів це були капрон, нейлон, перлон, дедерон. Ці волокна зберігають свою міцність в сухому і вологому стані, здатні забарвлюватися, мають блиск, еластичність, стійкістю до лугів і кислот, дії високих і низьких температур, витримують дію гарячої води. Недоліком синтетичної щетини є гірша (в порівнянні з натуральною) властивість утримування на торцях щетин абразивних матеріалів. Тому для виготовлення щіткових виробів синтетичні волокна застосовуються в чистому вигляді і упереміш з натуральною щетиною або волосом. Проте синтетична щетина незамінна у разі застосування щіток в умовах сильнодіючих хімічних розчинів і поліруючих засобів.

Необхідно відрізнити термін «полімерні щітки», що застосовується у фізиці полімерів в напрямі, який займається наноструктурами. Тут «полімерні щітки» є «моношаром полімерних ланцюгів, пов'язаних з деякою непроникною поверхнею кінцевими групами». Їх вивчення дає можливість подальшого розвитку цього напрямку і практичного застосування полімерів з різноманітними особливостями поведінки [33].

Щоб зберегти переваги синтетичних волокон і зменшити їх недолік, який полягає в слабкому утриманні абразиву, на наступному етапі розвитку

стали інструменти на основі полімерно-абразивних (ПА) волокон. На етапі розплавленого полімеру в нього додавали абразив певної зернистості, ретельно перемішували, проводили екструдкування волокон, в яких абразивні зерна були рівномірно розподілені за об'ємом полімеру. При цьому відпала необхідність використовувати шліфуючі і поліруючі абразивні пасти. Цей винахід дав несподівано відмінний результат і був засекречений. Дослідження по складу волокноутворюючих полімерів, об'ємному змісту абразиву, співвідношенню «зернистість – діаметр волокна» довгий час не публікувалися. Перші полімерно-абразивні щітки (ПАЩ), що з'явилися на інструментальному зарубіжному ринку, були виготовлені фірмами «Hans Wehler», «Kullen&Mez», «Osborn», «Lippert», «Festo», які використовували для щіткових інструментів полімерно-абразивні волокна фірм «Nybrad» і «Dupon». Технологія виготовлення ПА волокон є комерційною таємницею. При цьому розвиток хімічного виробництва у напрямі вивчення і отримання нових видів полімерів, що забезпечують одночасно міцність і пружність триває [34], [35], [36], [37]. На рубежі 2000-х з'явилась вітчизняна фірма виготовлення дискових ПА інструментів «Піранья». Поступово ці інструменти почали просуватися на ринку і все частіше їх стали використовувати в різних сферах і галузях, відкриваючи нові можливості їх застосування.

ПАЩ випускаються різної форми і конструктивного виконання (рис. 1.2). Застосування тієї або іншої конфігурації обумовлюється формою і кривизною оброблюваної поверхні, а також властивостями поверхневого шару, які необхідно забезпечити. Па волокна випускають прямими і гофрованими.

Волокно ПАЩ (рис. 1.2) складається з двох компонентів:

- поліамід (нейлон) – міцний і високоеластичний полімерний матеріал, що виступає з'єднувальним елементом;
- абразивні зерна, що безпосередньо беруть участь в процесі різання.

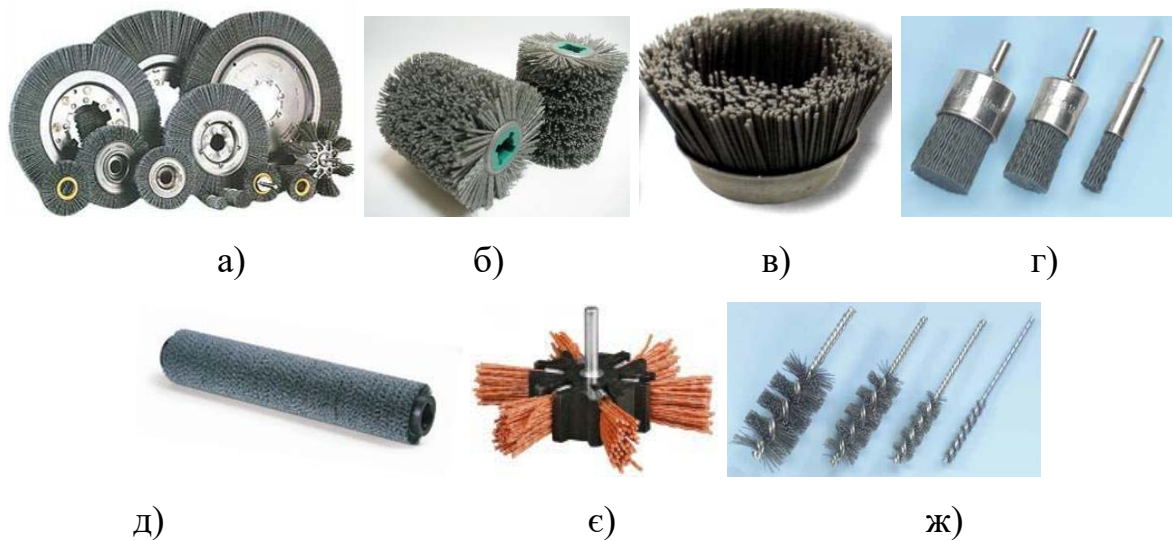


Рис. 1.2. Види полімерно-абразивних щіток: а – дискові; б – циліндричні; в – торцева; г – кінцеві; д – роликів; є – дискова пелюсткова; ж – йоршикові (виробництво фірми «Osborn»)

Оптимальний об'єм матеріалу волокна складає близько 25–35 %. В інших випадках, як показали дослідження [38], погіршуються втомно-міцнісні характеристики волокна або його різальна здатність.



Рис. 1.3. Волокна полімерно-абразивних щіток ( $\times 10$ ): а – ПА волокно (0,6 мм); б – гофроване ПА волокно (1,2 мм)

Завдяки широкому ряду варіантів налаштування ПАЩ шляхом поєднання певних параметрів і режимів обробки можливе забезпечення високої продуктивності і якості при виконанні фінішних операцій.

Полімерно-абразивна щітка є надійною альтернативою для обробки багатьох специфічних тонкостінних деталей складних просторових форм з самих різних матеріалів.

### 1.3 Основні параметри дискових полімерно-абразивних щіток

Існуючі дискові ПАЩ мають наступні параметри (рис. 1.4) :

- діаметр інструменту  $D$  – знаходиться в межах 6...350 мм;
- ширина робочої частини інструменту  $B$  – залежить від конструктивного виконання інструменту;
- довжина вільної частини (виліт) волокна  $L$  – до 60 мм;
- діаметр волокна  $d_s$  – найбільш поширений 0,6...1,5 мм;
- матеріал абразивних зерен – електрокорунд нормальний 14А або карбід кремнію 63С;
- зернистість абразиву – найбільш поширена F90 - F320.

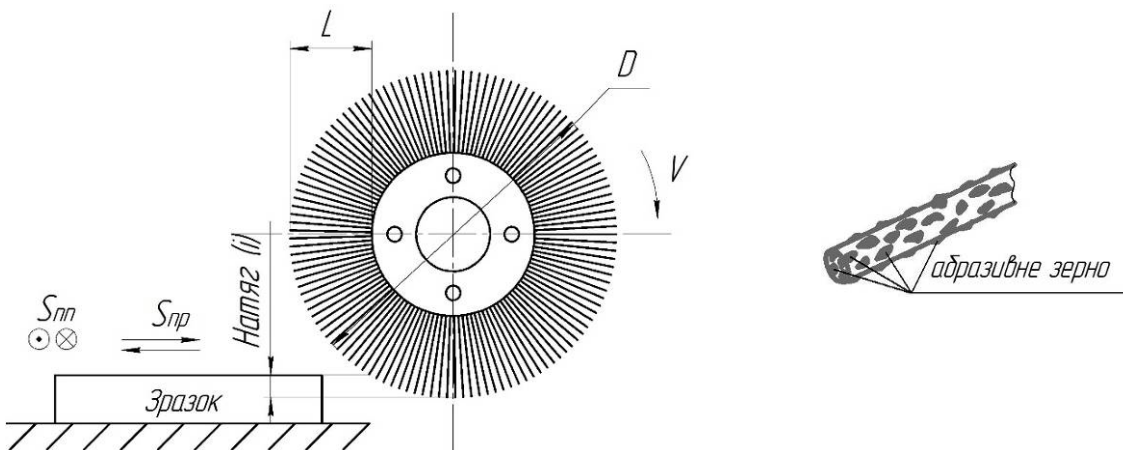


Рис. 1.4. Параметри і кінематика рухів дискової ПАЩ

Режими обробки вибираються залежно від виду і параметрів ПАЩ, від мети, умов проведення обробки і матеріалу деталі:

- швидкість різання  $V$ , м/с;
- подача інструменту (подовжня подача  $S_{пр}$ , м/хв, поперечна подача на хід або подвійний хід  $S_{пп}$ , мм/подв.х.);
- кількість подвійних ходів  $N$ , подв.х.;
- натяг  $i$ , мм – величина, на яку геометричний контур інструменту перекриває геометричний контур поверхні виробу, характеризує міру притиснення інструменту до оброблюваної поверхні.

За результатами аналізу літературних джерел [8], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49] найбільш перспективними областями використання щіткових полімерно-абразивних інструментів є:

- автомобільна промисловість, машинобудування (видалення задирок з шестерень, зубчастих коліс насосів і приводів, циліндричних голівок, картерів і інших ущільнюючих поверхонь; видалення легкої іржі кузова, чорнове шліфування ґрунтовки для отримання рівномірної шорсткості перед фарбуванням, полірування поверхонь перед нанесенням покриттів);

- електроніка (видалення задирок і тонке шліфування пластин, друкованих плат і схем);

- авіадвигунобудування і літакобудування (видалення задирок з лопатей турбін, коліс приводного механізму і елементів розпорів);

- виробництво інструменту (видалення слідів корозії, формування фасок);

- обробка заготовок (видалення задирок з крайок);

- хімпром, синтетичні матеріали (надання шорсткості і матування);

- деревообробна і меблева промисловість (шліфування дерева і фанери; шліфування дерев'яних меблів і панелей, зняття ворсинок, що піднялися після нанесення першого шару лаку, особливо на рельєфних поверхнях);

- гірничо-промисловість (обробка гранітних плит після їх розпилювання);

- нафтогазова промисловість (очищення труб від іржі і бруду перед нанесенням на них гідроізоляції).

Проте, через нестачу детальної інформації частіше усіх ПАЩ використовують для простих обробних і очисних робіт.

Відмінними властивостями ПАЩ, що грають на їх користь їх, вважаються:

- рівномірний шліфувальний ефект, оскільки при зношенні полімерного матеріалу волокон постійно відкриваються нові абразивні зерна;

- висока пружність і гнучкість інструменту без небезпеки його руйнування;

- відсутність засалювання інструменту робочими відходами;

- можливість застосування для вологих робіт, оскільки полімер не абсорбує значних кількостей речовин;

- стійкість до дії слабких кислот і лугів;

- великий термін служби при оптимальних режимах;

- висока якість обробленої поверхні;

- невелике притискне зусилля;

- незначне виділення теплоти.

До того ж волокниста структура ПАЩ, що повторює контур оброблюваної поверхні, чинить невисокий силовий тиск в контактній зоні і забезпечує успішну фінішну обробку тонкостінних і складнопрофільних деталей.

Полімерно-абразивні щітки також мають істотну перевагу гнучких інструментів – зниження вимог до точності взаємного розташування деталі і інструменту. У зв'язку з цим зменшується складність руху інструменту, що робить автоматизацію і механізацію таких операцій технічно і економічно прийнятною, оскільки знижується вартість автоматичних пристроїв і їх програмування, а також вартість технічного обслуговування.

Завдяки цій перевазі при обробці поверхонь і кромek складного профілю щітковими ПА інструментами є реальна можливість механізації і автоматизації фінішних операцій без необхідності застосування спеціального і дорогого устаткування, що дозволяє істотно підвищити продуктивність обробки і виключити ручну працю або значно понизити її долю.

## 1.4 Особливості експлуатації ПАЩ

На рубежі 2000-х з'явилися науково-дослідні публікації по вивченню ПАЩ. У одній з перших вітчизняних публікацій автори роботи [38] надали початкову технологію виготовлення ПА волокон, результати попередніх досліджень продуктивності дискових щіток з абразивом різної зернистості; показали, що ресурс щіток з великим зерном значно перевищує ресурс «дрібноабразивних» щіток при рівній ваговій кількості абразиву, що міститься в них, через наявність більшого повітряного прошарку між полімером волокна і оброблюваною поверхнею. Дослідним шляхом було встановлено, що оптимальне співвідношення величини абразивних зерен до діаметру волокна складає 1:8 (рекомендоване зарубіжними джерелами 1:6). У роботі [50] автор рекомендує вибирати розмір абразивних часток в ширшому діапазоні  $(0,01 \dots 0,45)d_e$ .

У роботі [42] Ю.Д. Абрашкевич на прикладі абразивних армованих кругів показав особливість впливу температурного чинника на зносостійкість таких інструментів. У зоні мікрорізання локальна температура досягає 1000 °С, а зв'язка нетеплостійка і руйнується при температурі 250 °С, проте, вона здатна утримати абразивні зерна. Оскільки круг обертається з високою швидкістю, час перебування в зоні високих температур дуже малий, і після виходу з контакту відбувається інтенсивне охолодження повітрям. Крім того, слід враховувати, що плавлення зв'язки, як і будь-який хімічний процес, протікає не миттєво, а впродовж певного часу. Тому процеси в абразивному інструменті обертальної дії характеризує не миттєва, а усереднена температура по періоду його обертання.

Зв'язка (поліамід) пересічної ПАЩ має в порівнянні з вищезгаданою, істотно меншу температуру руйнування  $\approx 120$  °С [38]. Теплові обмеження ПАЩ можна дотримувати, варіюючи технологічними чинниками. Наприклад, із зростанням окружної швидкості [42] температури ростуть, але збільшується ефективність тепловіддачі в довкілля і скорочується час перебування в зоні

високих температур, що уповільнює очікуване зростання температур. Зношення абразивного інструменту може бути зменшено завдяки мінімізації відношення між довжинами дуги контакту і дуги, що знаходиться поза контактом. Такий ефект може бути досягнутий у разі застосування максимально можливого діаметру абразивного інструменту, що не зменшує майданчик контакту, а, отже, і продуктивність обробки.

Із зменшенням натягу на порядки зростає стійкість щітки [51], але при низькому його значенні ( $<0,5$  мм) значно падає інтенсивність обробки. При зменшенні подовжньої подачі ( $\ll 1,2$  м/хв) спостерігається передчасне термомеханічне руйнування полімеру на торцях волокон із-за накопичення тепла в зоні контакту. У таких випадках спостерігаються сліди полімеру на оброблюваній поверхні. У цій же роботі було встановлено, що при перевищенні певних значень натягу тривала робота щітки на високих швидкостях призводила до відриву волокон біля їх закріплення. Було висунуте припущення, що це обумовлено термомеханічним руйнуванням волокна при перевищенні в точці його затиску критичної температури ( $93$  °С для орієнтованого поліаміду ПА-6).

Автори робіт [40], [41], [44] також підтверджують, що інтенсивність теплових процесів чинить визначальну дію на працездатність, період стійкості і різальні властивості полімерно-абразивного інструменту, формування якості поверхневого шару деталей, а також є основним чинником, що обмежує продуктивність обробки. За допомогою аналітичного розрахунку теплових процесів, які супроводжують полірування тіл обертання і плоских поверхонь дисковою полімерно-абразивною щіткою було визначено вплив параметрів обробки, теплофізичних і геометричних характеристик ПАЩ і деталі на зміну її теплового стану. Також встановлено, що температурна складова обробки сталі 45 при розглянутих режимах не чинить істотного впливу на зміну структури і фізико-механічних властивостей приповерхневого шару [44]. Отримані дані свідчать про незначний вплив теплонапруженості процесу полімерно-абразивного шліфування при вказаних режимах на зміну

мікротвердості, глибини залягання технологічних залишкових напружень і можливість протікання структурних і фазових перетворень в приповерхневому шарі, причинами яких при традиційному шліфуванні кругами на керамічній зв'язці є високі температури [41]. Розрахунковим шляхом встановлено зростання контактної температури із збільшенням швидкості різання, із зменшенням подачі (як подовжньої, так і поперечної) особливо при обробці матеріалів з низькою теплопровідністю. Для виключення неспівпадань отримані теоретичні дані необхідно перевірити експериментально.

У роботі [52] приведено результати експериментального визначення витрат потужності, необхідної для здійснення процесу обробки дисковими ПАЩ циліндричних деталей. Виявлено, що на зміну потужності обробки істотний вплив має збільшення швидкості різання, зернистості абразивного порошку, натягу (ефективна потужність зростає), вид оброблюваного матеріалу і застосування ЗОТС. Зменшення потужності, що витрачається, в порівнянні з обробкою без ЗОТС (насухо) пояснюється зниженням сил граничного тертя між робочою поверхнею інструменту і оброблюваною поверхнею, полегшенням процесів деформації і руйнування металу поверхні, видаленням продуктів взаємодії внаслідок дії ЗОТС. Змащуюча дія ЗОТС проявляється в зменшенні роботи тертя, запобіганні затуплення і зносу абразивних зерен, захисті робочих поверхонь волокон від адгезії і зниженні прояву дифузії. Поверхнево-активна дія ЗОТС змінює механізм стружкоутворення, чинить передруйнівну дію на оброблювану поверхню, адсорбуючись на стінках мікротріщин, що зменшує роботу на диспергування і пластичну деформацію оброблюваної поверхні хімічних плівок. Завдяки миючій дії ЗОТС знижується взаємодія продуктів обробки з робочою поверхнею інструменту, їх налипання і забивання шпарин шламом, що забезпечує збереження працездатності інструменту.

Критична температура плавлення полімерного з'єднувача прийнята 220 °С [52] без визначення матеріалу полімеру. У роботі [53] ці ж автори приймають температуру плавлення поліаміду ПА-6 240...250 °С.

У роботі [54] автор встановив, що рівномірний знос інструментів на основі алмазно-полімерних і абразивно-полімерних волокон залежить не лише від режимів обробки, але і від умов виготовлення волокон, таких як відсутність конгломератів абразивних зерен і їх рівномірність розподілу в полімерній матриці, а також від постійності діаметру волокон в інструменті.

Практично усі вищеперелічені чинники (параметри ПАЩ, технологічні режими, умови обробки), що впливають на зносостійкість і працездатний стан інструменту, так або інакше впливають на якість оброблюваних поверхонь, ефективність і продуктивність фінішної обробки.

Автори робіт [39], [50], [51], [52], [55] зв'язують продуктивність з сумарною енергією ударів зерен, що знаходяться одночасно в роботі, а значить від площі зони контакту, яка у свою чергу залежить від величини початкової деформації волокон, що визначається зусиллям притиснення полімерно-абразивних волокон до поверхні, тобто від натягу і жорсткості волокна.

Збільшити статичну жорсткість ПА волокна можна збільшенням його діаметру, але при цьому зменшується еластичність щітки і істотно – втомна міцність [51]. Також можна зменшити виліт волокон, але при великому натязі і високих швидкостях можливе руйнування волокон.

Для збільшення площі плями контакту автори робіт [50], [56] пропонують поворот ПАЩ на кут  $\varphi$  до 36° до напрямку подачі (рекомендований кут 15°...18°). У відмінності від традиційного, зустрічного або попутного, шліфування периферією круга, використання розвороту інструменту відносно напрямку подачі деталі призводить до зміни кінематичних і динамічних умов взаємодії між ним і оброблюваною поверхнею, зменшенню радіальної складової сили різання, зміні характеру і орієнтації поверхневих залишкових напружень [57]. Збільшення кута  $\varphi$  від 0 до 36° супроводжується зменшенням параметра  $Ra$  для усіх досліджуваних значень зернистості абразиву [56].

Процеси абразивної дії, пружної і пластичної деформації поверхні, формування рисок здійснюються під деяким кутом до напрямку подачі, що обумовлено зміною напрямку вектору силової дії.

Інтенсивність обробки підвищується із збільшенням окружної швидкості. Обмеженням служить тепловий чинник; критичні швидкості за різними джерелами складають 25...35 м/с.

Збільшення натягу  $i$  спочатку покращує якість і підвищує продуктивність. Проте, при значеннях  $i > 2$  мм підвищується доля роботи бічними поверхнями волокон, у зв'язку з чим продуктивність поступово зменшується, а поліпшення якості поверхні йде не так інтенсивно.

Так само впливає і тривалість обробки. Перші ходи (подв. ходи) видаляють велику частину висоти мікронерівностей, потім інтенсивність поступово падає і при  $N=6...10$  ходів значення  $Ra$  стає постійним, і подальша обробка викликає перевитрату абразивного матеріалу [56].

При зниженні повздовжньої подачі шорсткість поверхні покращується. Це пояснюється зростанням кількості формотворних взаємодій абразивних зерен і полімерної матриці з поверхнею в одиницю часу, що супроводжується інтенсифікацією пластичної деформації і переважанням вигладжування в зоні обробки і свідчать про перевагу зниження повздовжньої подачі з метою мінімізації параметрів мікрорельєфу поверхні [56].

Автор роботи [46] згоден, що продуктивність ПАЩ збільшується із зростанням частоти обертання і натягу, але стверджують, що вона не залежить від швидкості подачі, пояснюючи це тим, що в досліджуваному діапазоні  $V_{кол} \gg V_{под}$ . В той же час, швидкість подачі має бути відмінною від нуля, оскільки інакше, внаслідок нагріву оброблюваної поверхні, відбувається термічний знос полімерних волокон.

В цілому, можна стверджувати, що за рахунок зміни параметрів інструменту ( $D_{ПАЩ}$ ,  $d_e$ ,  $L$ , зернистість) і режимів ( $V$ ,  $i$ ,  $S$ ,  $N$ ) можна забезпечити високу продуктивність і необхідну величину шорсткості.

Так само, змінюючи ці чинники, можна наводити в поверхневому шарі сприятливі властивості. ПАЩ подібна до механічних щіток з металевим ворсом, при зменшенні вильоту – іглофрезам; при зовсім маленькому вильоті – шліфувальним кругам з полімерною зв'язкою (автори роботи [26] порівнюють ПАЩ з великим вильотом волокон при обробці на маленькому натязі з піскоструменевою обробкою). Усі ці інструменти при обробці міняють властивості поверхні і поверхневого шару, такі як наклеп, залишкові напруження, іноді відбуваються фазові і структурні перетворення. Дослідження цих явищ для давно відомих методів і інструментів проведено досить детально [1], [2], [18], [19], [20], [21]. З цієї точки зору дослідження ПАЩ недостатні. Автори роботи [52] відмічають, що при обробці ПАЩ відбувається пружна і пластична деформація оброблюваної поверхні. У роботі [53] був зроблений висновок, що термічної і силової дії ПАЩ недостатньо для фазових і структурних перетворень в підповерхневому шарі. Практично усі роботи, присвячені ПАЩ, відмічають інтенсивну ударну дію в зоні першого контакту ПА волокон з оброблюваною поверхнею, що ймовірно визначає можливість локального зміцнення поверхневого шару деталі. Цей момент вимагає детальнішого вивчення.

Практично усі вищезгадані дослідники ПАЩ відмітили можливість обробляти з її допомогою поверхні і крайки деталей складних просторових форм.

До того ж, за твердженням автора роботи [56], обробка ПАЩ характеризується низькими температурами (37...157 °С) і питомим тиском (0,2...1,2·10<sup>5</sup> МПа), що теоретично дає можливість обробки тонкостінних деталей.

В цілому за наявності нечисленних протиріч і деякої нестачі інформації, можна підсумовувати висновок по застосуванню полімерно-абразивних щіткових інструментів. ПАЩ є ефективним, універсальним, екологічно чистим і безпечним інструментом [51], який дозволяє обробляти

складнопрофільні, та з високою ймовірністю і тонкостінні деталі з різних матеріалів.

### **1.5 Особливості вибору полімерно-абразивних інструментів**

Різноманіття конструкцій ПАЩ (рис. 1.2) дозволяє виробникові розвивати виробництво і розширювати ринки збуту, але ускладнює завдання споживачеві при його виборі, особливо для відповідальних тонкостінних деталей складного профілю, з підвищеними вимогами до якості поверхневого шару, що виготовляються з важкооброблюваних матеріалів.

Для цього була запропонована наступна методика [58]. На прикладі аналізу технологічних процесів виготовлення складнопрофільних деталей газотурбінних двигунів (ГТД), їх фінішної обробки, були визначені вузькі місця і складені наступні вимоги:

- обробка важкооброблюваних сталей і сплавів;
- обробка тонкостінних складнопрофільних поверхонь;
- забезпечення заданої шорсткості;
- відсутність слідів полімеру на поверхні;
- мінімальна силова дія на поверхневий шар;
- регулювання жорсткості волокон, можливість регулювання вильоту волокна;
- можливість правки ПАЩ.

Великий перелік вимог затрудняє вибір через те, що кожен напрям вимагає індивідуального розгляду і витрат часу.

У зв'язку з цим будуються діаграми зв'язку і спільності [59–60]. За допомогою діаграми зв'язків виконують ранжування (визначають вагомість) перерахованих вимог (рис. 1.5). Для звуження (не скорочення, оскільки кожному вимогу бажано реалізувати) кількості вимог будують діаграму спільності (рис. 1.6). При цьому усі перераховані вимоги до ПАЩ ідентифікуються за

загальною природою походження і забезпечують отримання узагальненого результату. Ранг узагальненого результату дорівнює сумі рангів вимог, які в нього входять. Узагальненими вимогами, за якими вибиратиметься ПАЩ, є його технічні характеристики (ранг 0,6) і технологічні можливості (ранг 0,4).

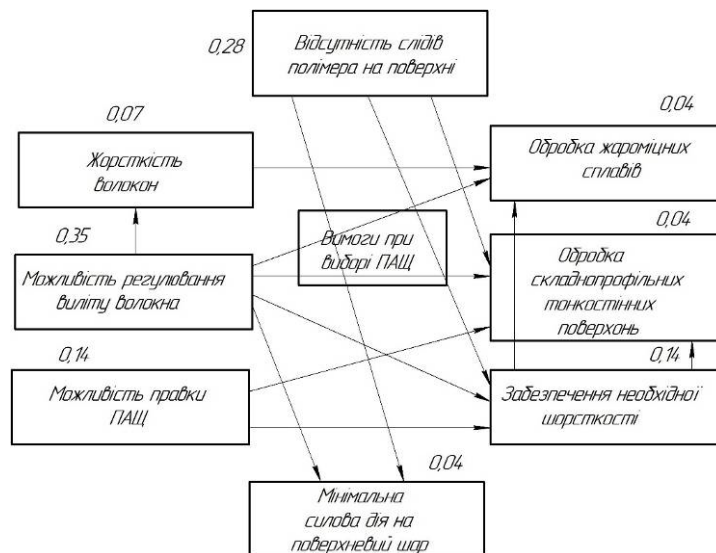


Рис. 1.5. Діаграма зв'язку між вимогами до інструменту

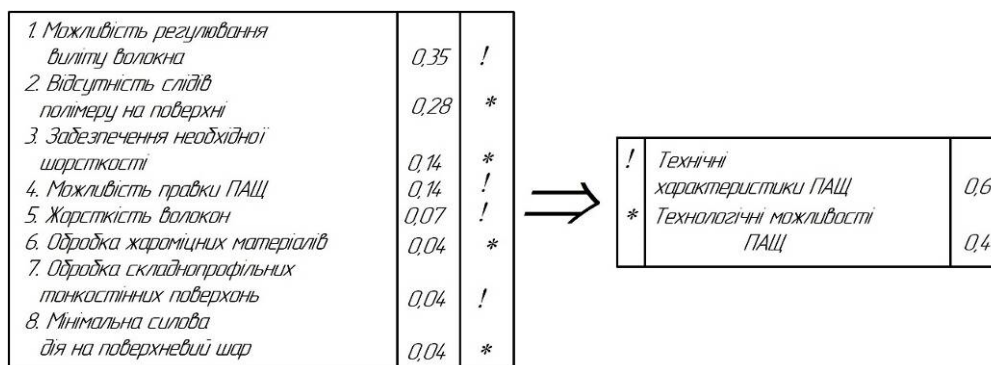


Рис. 1.6. Діаграма спільності

До технічних характеристик ПАЩ відносяться: тип інструменту, матеріал, діаметр і виліт полімерного волокна, матеріал абразивного зерна, зернистість. До технологічних можливостей відносяться: режими різання, матеріал деталі, форма оброблюваної поверхні або крайок.

Технічні характеристики ПАЩ забезпечуються при її виробництві, а технологічні – реалізуються в технологічному процесі, тобто виробники ПАЩ повинні знати, які технічні характеристики інструментів найбільш значущо

впливають на їх технологічні можливості. З цією метою будується матрична діаграма (рис. 1.7).

Аналіз взаємозв'язків між параметрами технічних характеристик і технологічних можливостей дозволив визначити, що найбільш вагомими технологічними можливостями є: результативна обробка заданої форми оброблюваної поверхні (ранг 0,38), отримання необхідної шорсткості (ранг 0,31), можливість обробки певного матеріалу (ранг 0,31). При цьому ПАЩ слід вибирати переважно звертаючи увагу на тип інструменту (ранг 0,23), зернистість (ранг 0,23), виліт волокна (ранг 0,23), матеріал абразивного зерна (ранг 0,23).

Технічні характеристики Технологічні можливості	Матеріал волокна	Матеріал абразивного зерна	Зернистість	Діаметр волокна	Виліт волокна	Тип інструмента	Вагомість	Ранг
Натяг	-	1	1	1	1	1	-	-
Подача	-	1	1	-	1	1	-	-
Швидкість різання	-	1	1	-	1	1	-	-
Оброблюємії матеріал	-	1	1	-	1	1	4	0,31
Форма оброблюваної поверхні	-	1	1	1	1	1	5	0,38
Якість поверхонь	-	1	1	-	1	1	4	0,31
Вагомість	-	3	3	1	3	3	13	1
Ранг	-	0,23	0,23	0,08	0,23	0,23	1	

Рис. 1.7. Матрична діаграма взаємозв'язку параметрів інструменту і його технологічних можливостей

## 1.6 Мета і завдання дослідження

З проведеного аналізу інформаційних джерел можна сказати, що інформації про фінішну обробку тонкостінних і складнопрофільних деталей з

різних, особливо важкооброблюваних, матеріалів полімерно-абразивними щітковими інструментами недостатньо.

Тому завдання визначення взаємозв'язку якості і продуктивності фінішної обробки з режимами і параметрами ПАЩ, можливості механізації процесу, сфери застосування, рівня силової і теплової дії і розробки технологічних рекомендацій по застосуванню цього виду інструментів для фінішної обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей з різних матеріалів, при збереженні високої працездатності інструменту, є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування.

На підставі вищесказаного для досягнення мети – підвищення якості обробки деталей з різних матеріалів за допомогою ПАЩ – були поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз фінішно-оздоблювальних методів обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей, що дозволяють зменшити долю ручної праці.

2. Встановити основні закономірності у формуванні параметрів якості, властивостей обробленої поверхні і поверхневого шару (шорсткість  $Ra$ , ступінь поверхневого наклепу  $S_H$ , залишкові напруження  $\sigma_r$ ) залежно від режимів різання (швидкість  $V$ , натяг  $i$ , подача  $S$ ) і параметрів щіткового полімерно-абразивного інструменту (виліт  $L$  і діаметр  $d$  волокон, матеріал абразиву і його зернистість  $F$ ) для деталей з різних матеріалів.

3. Дослідити технологічні особливості обробки і вплив параметрів ПАЩ і режимів різання на геометричну величину і форму радіусів скруглення гострих кромek при видаленні задирок.

4. Розробити спеціальні методики і пристрої для проведення теплових досліджень ПАЩ. Визначити діапазон температур в зоні контакту і встановити обмеження режимів різання ПАЩ для різних оброблюваних матеріалів.

5. Запропонувати методику і спроектувати пристрій для вивчення силової дії ПАЩ на оброблювану поверхню деталі. Дослідити вплив

технологічних параметрів процесу на рівень сил і оцінити можливість обробки ПАЩ тонкостінних деталей.

6. Розробити технологічні рекомендації щодо застосування ПАЩ в промисловому виробництві при обробці тонкостінних і складнопрофільних деталей з різних матеріалів.

## **1.7 Висновки**

1. Провівши аналіз відомих на даний момент методів і інструментів фінішної обробки для тонкостінних і складнопрофільних деталей було встановлено, що гідною альтернативою є застосування щіткових інструментів обертальної дії на основі полімерно-абразивних волокон.

2. За результатами аналізу наукової літератури, присвяченої дослідженню впливу різних чинників на ефективність, продуктивність, працездатність ПАЩ, на якість оброблених за їх допомогою поверхонь деталей, встановлено, що через те, що ПАЩ відносно нещодавно з'явилися на ринку інструментів, інформація щодо них загальна, іноді суперечлива, деякі теоретичні викладення не отримали необхідного експериментального підтвердження, детальних рекомендацій застосування ПАЩ для обробки тонкостінних деталей або певних важкооброблюваних матеріалів немає, як і досліджень властивостей поверхневого шару деталей після обробки ПАЩ.

3. У зв'язку з недостатністю технічної і технологічної інформації є необхідним проведення подальшого вивчення ПАЩ з точки зору обробки тонкостінних виробів складного профілю, виконаних у тому числі з важкооброблюваних матеріалів, для чого були сформульовані основні завдання дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКИ І УМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вивчення впливу технологічних чинників і умов обробки ПАЩ проводили із застосуванням загальновідомих, а також оригінальних методик, що враховують специфіку інструменту і його дію на оброблювану деталь. Нижче розглянуті розроблені раніше методи дослідження і умови, в яких проводили експерименти. Оригінальні методики дослідження, розроблені автором, приведені у відповідних розділах. При рішенні ряду завдань додатково застосовували методичне забезпечення, використовуване на підприємствах АТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», КП НПК «Іскра» (Запоріжжя).

#### 2.1 Зразки для експериментальних досліджень

Для дослідження впливу різних технологічних факторів на якість обробленої поверхні застосовували зразки, виготовлені з різних матеріалів, розміри яких приведені на рис. 2.1.

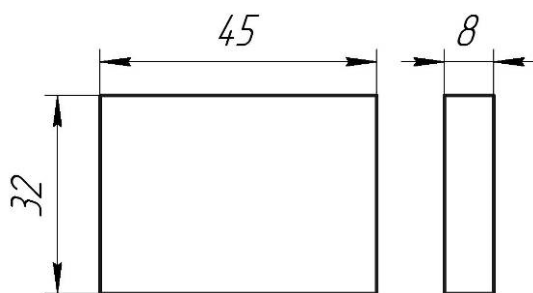


Рис. 2.1. Ескіз зразка для проведення основних досліджень

Зразки запропонованої форми і розмірів дозволяють швидко встановлювати і перевстановлювати їх в пристосуваннях для обробки і при проведенні вимірів параметра шорсткості  $Ra$ , мікротвердості, форми і розмірів

радіусу скруглення, а також робити на кожній стороні зразка декілька експериментів для отримання достовірних результатів.

Для забезпечення початкової шорсткості для різних експериментів перед їх проведенням зразки піддавали наступній механічній обробці: для отримання шорсткості в діапазоні  $Ra_{3,2...10}$  мкм зразки фрезерували;  $Ra_{1,6...3,2}$  мкм – шліфували.

При необхідності на гострих краяхках зразків фрезеруванням або шліфуванням формували задирки різної величини.

Для визначення залишкових напружень використовували плоскі зразки (рис. 2.2), отримані за допомогою електроерозійного різання для мінімальної силової і температурної дії на матеріал. Після виготовлення, перед фінішною обробкою ПАЩ, їх піддавали високотемпературному вакуумному відпалу для зняття внутрішніх напружень.

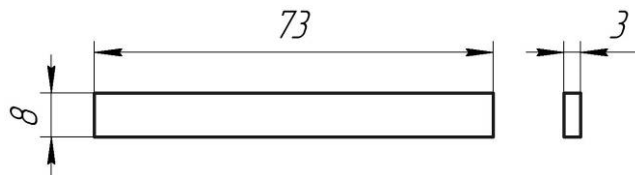


Рис. 2.2. Ескіз зразка для дослідження залишкових напружень

Форма і розміри цих зразків дозволяли після обробки ПАЩ визначати розподіл залишкових напружень по глибині поверхневого шару і величину поверхневого наклепу.

Для закріплення термопари при визначенні контактної температури в зоні обробки ПАЩ, зразки  $42 \times 32 \times 3$  (рис. 2.3) розрізали на дві рівні частини.

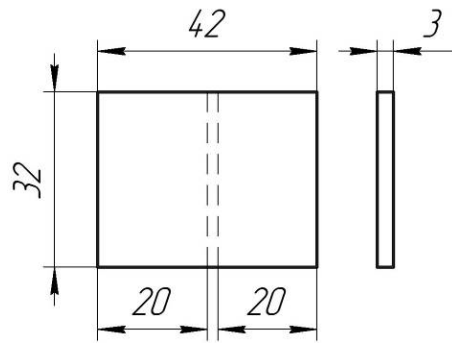


Рис. 2.3. Ескіз зразка для теплових досліджень

Окрім лабораторних зразків для експериментальних досліджень використовували натурні деталі або їх конструктивні елементи:

- а) хвостовики лопаток різних ступенів компресорів і турбін ГТД;
- б) перо лопаток різних ступенів компресорів і турбін ГТД;
- в) ділянки ободної частини дисків ГТД;
- г) радіатори і їх елементи для силової електроніки;
- д) зубчасті колеса.

## 2.2 Методики дослідження якості поверхні і поверхневого шару

### 2.2.1 Методика дослідження шорсткості

В якості контрольного параметру було прийнято параметр шорсткості поверхні  $Ra$ , вимірюваний на профілографі 171621. Шорсткість вимірювали на базі 5,6 мм в напрямі, перпендикулярному основним рискам, до і після обробки ПАЩ. Середнє значення шорсткості знаходили за 5 результатами вимірів.

Початкова шорсткість відповідала вимогам експерименту і складала  $Ra = 1,6 \dots 10$  мкм.

При налипанні полімерного матеріалу волокон на оброблювану поверхню шорсткість не вимірювали, а режими обробки, при яких відбувалося

це явище, вважали неприпустимими.

Контроль геометричних розмірів поверхонь натурних деталей (лопаток) до і після обробки ПА інструментами проводили на координатно-вимірвальній машині АТ «Мотор Січ».

### 2.2.2 Методика визначення якості заокруглення гострих крайок після видалення задирок

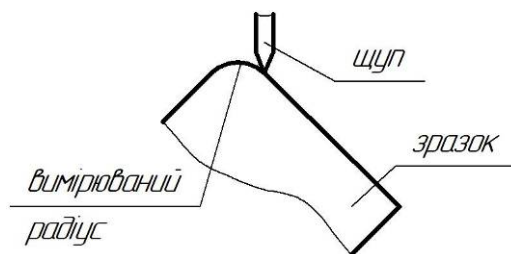
Радіуси заокруглення вимірювали за допомогою профілографа-профілометра моделі 170311 (рис. 2.4, а), підключеного до персонального комп'ютера (ПК) через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Е-140 фірми «L-Card». В цілому система працює як контуромір. Масштаб графіку по осях Х і Y – однаковий. Тарировку здійснювали за допомогою плоскопаралельних кінцевих мір довжини.

Зразок встановлювали під кутом  $45^\circ$  до площини плити (рис. 2.4, б). В цьому випадку прилад вимірював контур радіусу скруглення в нормальному перерізі у встановленому масштабі.

Так само вимірювали радіуси скруглення на хвостовиках натурних лопаток: в 6-ти перерізах з чотирьох боків (рис. 2.5).



а)



б)

Рис. 2.4. Оснащення і устаткування для виміру радіусу заокруглення

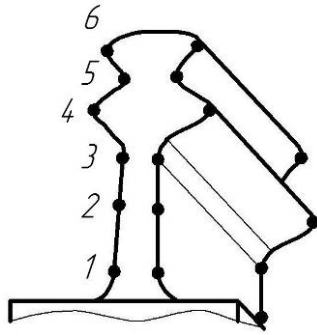


Рис. 2.5. Схема місць вимірів радіусів заокруглення на крайках хвостовика лопатки

Отримані значення порівнювали з вимогами, вказаними на кресленні лопатки.

Додатково за допомогою контуроміра «НОММЕЛ Т-8000» проводили виміри шорсткості, запис профілограм і дослідження форми поверхонь скруглення кромки натурних зразків і деталей на АТ «Мотор Січ».

### 2.2.3 Методика визначення величини поверхневого наклепу

Величину наклепу визначали вимірюванням мікротвердості на приладі ПМТ-3 з облаштуванням для автоматичного відліку часу індентування і контролю якості відбитків, при навантаженні 50 Г і 100 Г і розраховували за формулою

$$u = \frac{H\mu_{\max} - H\mu_{\text{вих}}}{H\mu_{\text{вих}}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де  $H\mu_{\max}$  – мікротвердість поверхні досліджуваного зразка, після обробки ПАЩ, МПа;

$H\mu_{\text{вих}}$  – мікротвердість серцевини, МПа.

Значення  $H\mu$  визначали за таблицями і графіками [61] після визначення

середньоарифметичної величини діагоналі відбитку індентора за 15-ма вимірами в різних місцях обробленої поверхні.

#### 2.2.4 Методика дослідження розподілу залишкових напружень

Для дослідження залишкових напружень після обробки ПАЩ використовували методику Н.Н. Давиденкова [62]. Вимір проводили пошаровим електролітичним травленням в середовищі електролітів, підібраних для кожного досліджуваного сплаву, на приладі ПІОН-2 при консольній схемі закріплення зразка.

В якості електроліту для сплавів ЭП718, ЭИ698-ВД застосовували суміш, що складається з  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (50%),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (30%),  $\text{H}_2\text{O}$  (20%), при дії струму 120 мА. Для сплаву ВТ8-М – суміш з  $\text{CrO}_3$  (45%),  $\text{HF}$  (10%),  $\text{H}_2\text{O}$  (45%) при дії струму 80 мА. Температура електроліту 20...30 °С. Швидкість з якою травиться – близько 2 мкм/хв.

Вагу зтравленого шару визначали зважуванням на аналітичних вагах (зразки зважувалися до і після травлення). Глибину знятого шару вимірювали на спеціальному глибиномірі. За видаленою вагою визначали об'єм знятого шару. Загальна глибина травлення на зразках складала 100...150 мкм.

В процесі послідовного розчинення поверхневого шару робили безперервний вимір прогину зразка за допомогою індуктивного датчика.

Залишкові напруження  $\sigma_r$  по глибині  $h$  визначали за формулою [62]

$$\sigma_r = \frac{4E}{3l^2} \left[ (h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a) \cdot f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right]. \quad (2.2)$$

За результатами розрахунків були побудовані епюри залишкових напружень по глибині зразка. Значення залишкових напружень розраховували, як середнє арифметичне значень трьох зразків кожної партії.

## **2.2.5 Методика визначення рівня шаржування обробленої поверхні абразивними частками**

Лабораторні і натурні зразки, оброблені ПАЩ, вимивали і знежирювали в мийній машині за технологією мийної операції. Оцінку змісту і розподілу включень часток абразиву на поверхнях, оброблених ПАЩ, робили згідно інструкції [63] по методу «П». Визначення кількості і розмірів абразивних часток проводили в поляризованому світлі на приладі МИМ-8 при збільшенні  $\times 150 \dots \times 200$  (ціна поділки шкали складала 10 мкм). До мікроскопа МИМ-8 приєднували WEB- камеру і ПК. Електронний варіант фотографій поверхонь обробляли за допомогою комп'ютера.

Визначали кількість включень на площі об'єкту  $25 \text{ мм}^2$  по 10-ти полях зору ( $1,5 \times 1,75 \text{ мм}$ ); розмір включення визначали, як середню величину при вимірах частки у взаємоперпендикулярних напрямках.

## **2.3 Загальні умови проведення експериментальних досліджень процесу оброблення**

### **2.3.1 Устаткування**

Ці експерименти проводили на плоскошліфувальному верстаті 3Г71, до асинхронного електродвигуна якого було приєднано частотний перетворювач ТПТР 10-230-3200, що дозволяє плавно змінювати частоту обертання щіткових інструментів.

Таким чином на верстаті можна було проводити дослідження в широкому діапазоні зміни режимів обробки:

- частота обертання шпинделя  $n=0-2740 \text{ хв}^{-1}$ ;
- повздовжня подача  $S_{np}=0-20 \text{ м/хв}$ ;
- поперечна подача  $S_m=0-4,2 \text{ мм/подв. хід}$ ;

- вертикальна подача ПАЩ на величину натягу  $i$  з точністю до 0,01 мм (визначали по індикатору годинного типу).

У разі потреби експерименти проводили з поданням ЗОТС в зону обробки.

### 2.3.2 Особливості зношування і відновлення волокон полімерно-абразивних щіток

ПАЩ відноситься до самозагострювальних інструментів, і в умовах експлуатації поступове зношування полімерної основи волокна на його торці розкриває нові абразивні зерна. На рис. 2.6 показані види зношення робочих кінців полімерно-абразивних волокон після різних умов їх експлуатації.

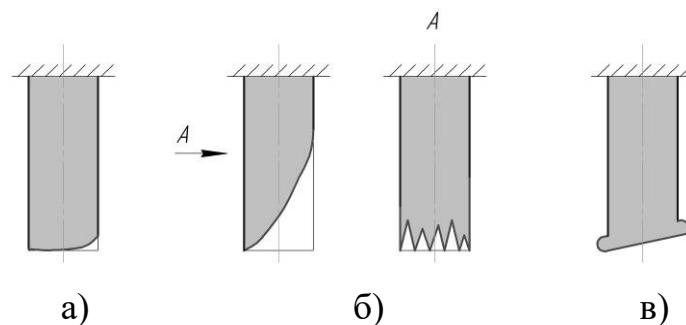


Рис. 2.6. Види зношення робочих кінців ПА волокон: оптимальні умови експлуатації (а); величина натягу  $i$  більше раціонального значення (б); при перевищенні робочих температур вище за температуру розм'якшення і плавлення полімерної основи (в)

Проте якщо величина натягу  $i$  перевищує рекомендовану раціональну величину (рис. 2.6, б), то волокно починає інтенсивно зношуватися по бічній поверхні, а на його торці залишається тонка «розкуйовджена» ділянка, яка не дозволяє цьому волокну продовжувати ефективну обробку.

В умовах обробки, коли контактна температура перевищує температуру розм'якшення і плавлення полімерного волокна, спостерігається

намазування матеріалу на оброблювану поверхню, призводячи до його швидкого зношення, а на кінці волокна з'являється затверділе потовщення (рис. 2.6, в). Зміна форми волокна на його робочій (торцевій) поверхні погіршує подальшу експлуатацію ПАЩ.

Технологія виготовлення і практика експлуатації ПАЩ показала, що найбільш простим і ефективним методом формування розмірів ПАЩ і відновлення зношеного торця волокна є обкатка ПАЩ на невисоких обертах ( $n=100 \text{ хв}^{-1}$ ) відносно спеціального нагрівального елемента, з подальшим очищенням оплавлених кінців крупнозернистим абразивним бруском (рис. 2.7).

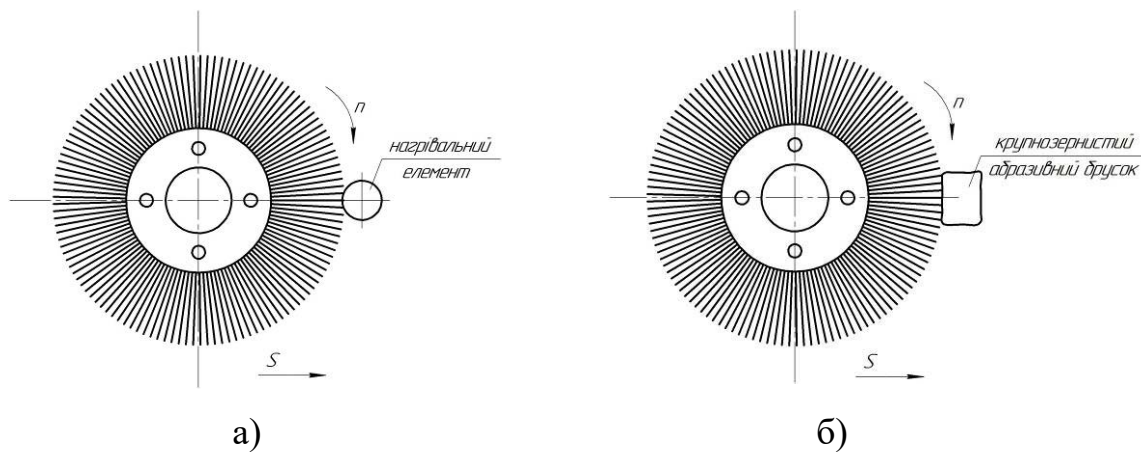


Рис. 2.7. Схема проведення правки ПАЩ: оплавлення кінців волокон нагрівальним елементом (а), видалення розплавлених кінців крупнозернистим абразивним бруском (б)

### 2.3.3 Оброблювані матеріали

У роботі досліджували цілий ряд матеріалів (табл. 2.1-2.8), масова доля елементів вказана у відсотках (%).

Таблица 2.1 –

#### Сталь 3

C	Mn	Si	P	S
0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15	<0,05	<0,05

Таблиця 2.2 –

**Жароміцний сплав на нікелевій основі ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ-ВД)**

Ni	Al	C	Cr	Fe	Mn	Mo	Nb	P	S	Si	Ti
Основа	1,3- 1,7	≤0,08	13,0- 16,0	≤2,0	≤0,40	2,8- 3,2	1,8- 2,2	≤0,015	≤0,007	≤0,60	2,35- 2,75

Таблиця 2.3 –

**Жароміцний сплав на нікелевій основі ЭИ437Б-ВД (ХН77ТЮР-ВД)**

Ni	Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ce	Ti	Al	B	Pb
70,076- 77,4	до 1	до 0,07	до 0,6	до 0,4	до 0,007	до 0,015	19- 22	до 0,02	2,4- 2,8	0,6- 1	до 0,01	до 0,001

Таблиця 2.4 –

**Жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі ЭП718  
(ХН45МВТЮБР)**

C	Si	P	S	Cr	Al	Fe	Co	W	La	Ni
0,01- 0,10	< 0,8	< 0,013	< 0,013	20,0- 23,0	0,3- 0,7	<3, 0	26,0- 30,0	13,0- 16,0	<0,1	решта

Таблиця 2.5 –

**Жароміцний титановий сплав ВТЗ**

Ti	Fe	C	Si	Cr	Mo	N	Al	Zr	O	H
85,95- 91,05	0,2- 0,7	до 0,1	0,15- 0,4	0,8-2	2-3	до 0,05	5,5 - 7	до 0,5	до 0,15	до 0,015

Таблиця 2.6 –

**Жароміцний титановий сплав ВТ8-М1**

Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Si
≤89	≤5,4	≤1	≤1	< 4	< 0,15

Таблиця 2.7 –

**Алюмінієвий сплав АК7Ч**

Al	Fe	Si	Mn	Cu	Pb	Be	Mg	Zn	Sn	-
89,6- 93,8	до1,5	6-8	до 0,5	до 0,2	до 0,05	до 0,1	0,2- 0,4	до 0,3	до 0,01	Ti+Zr< 0,15

**Алюмінієвий сплав АК12**

Al	Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Zr	Mg	Zn
84,3-90	до 1,5	10 - 13	до 0,5	до 0,1	до 0,6	до 0,1	до 0,1	до 0,3

Це обумовлено тим, що технологію застосування ПАЩ для фінішної обробки розробляли для певних машинобудівних підприємств: авіаційної промисловості (жароміцні сплави на основі нікелю і на основі титану), загального машинобудування (сталі і алюмінієві сплави). Сплави на основі титану також застосовуються для виготовлення медичних протезів.

**2.3.4 Інструмент – полімерно-абразивні щітки**

Основні дослідження проводили на дискових ПАЩ діаметром  $\varnothing 75 \dots 150$  мм. При впровадженні технології застосування ПАЩ у виробничих умовах використали і інші форми щіток: циліндричні, чашкові і кистьові. Діаметр волокна  $d_e = 0,6$  мм, 1,0 мм, 1,2 мм; матеріал абразивного наповнювача – електрокорунд нормальний 14А і карбід кремнію 63С, розмір абразивних зерен від 30 мкм (F320) до 200 мкм (F80).

Зміну величини виліту полімерно-абразивного волокна у дискових щіток  $L$  отримували шляхом застосування бічних накладок (рис. 2.8).

У експериментах величину виліту змінювали від 8 до 32 мм. Зміною величини вильоту полімерних волокон  $L$  можна принциповим чином змінювати жорсткість волокон ПАЩ від дуже податливих умов деформації до дуже жорстких, в яких абразивне зерно поводить себе як жорстко закріплене в звичайному шліфувальному крузі, що впливає на продуктивність фінішної обробки, а також умови формування якості обробленої поверхні, силове і теплове навантаження.

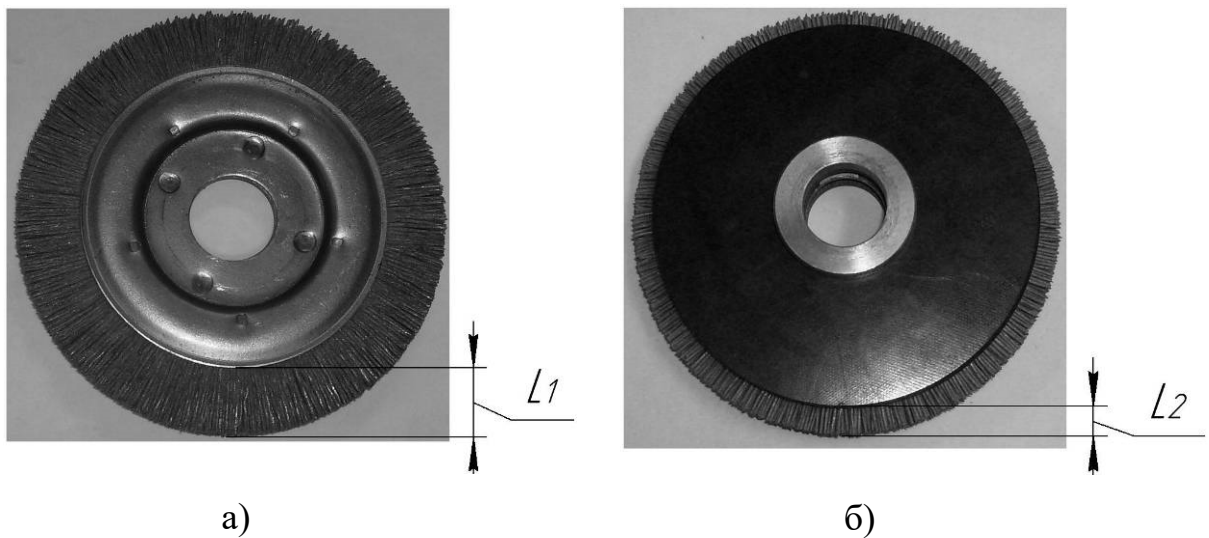


Рис. 2.8. Загальний вигляд дискових ПАЩ: без накладок (а), з накладками (б)

#### 2.3.4.1 Порівняння зон обробки при закріпленні абразивних зерен на жорсткому диску і пружному полімерному волокні

Різальним елементом полімерно-абразивної щітки (ПАЩ), також як і шліфувального круга (ШК), є абразивні зерна, але умови їх закріплення в цих видах інструментів абсолютно різні. Якщо в ШК зерна жорстко закріплені між собою зв'язкою, то в ПАЩ зерна, що входять до складу полімерного волокна, в процесі контактування з оброблюваною поверхнею відхиляються від кругової траєкторії руху інструменту із-за пружної деформації (вигину) волокна.

У зв'язку з такою відмінністю умов закріплення абразивних зерен вони по-різному контактують з оброблюваною поверхнею, визначаючи тим самим відмінності в температурно-силових характеристиках контакту, в механізмах видалення припуску, а також формування поверхні і поверхневих шарів оброблюваної деталі. На рис. 2.9 показані умови контактування з оброблюваною поверхнею ШК і ПАЩ при поперечній подачі зразка  $S_{nn}$ . ШК зрізує з оброблюваної поверхні об'єм матеріалу з перерізом у вигляді сегменту

завдовжки  $l$  і глибиною  $t$ , представленого на рис. 2.9, а. При обробці ПАЩ (рис. 2.9, б) зони контакту мають іншу форму. На обробленій поверхні можна бачити дві чіткі зони  $AB$  і  $BC$ . Причому в зоні  $AB$  спостерігається інтенсивніше видалення об'ємів матеріалу деталі, чим в зоні  $BC$ . Вид поверхні в зоні  $AB$  так само відрізняється від поверхні в зоні  $BC$ . Якщо в зоні  $AB$  видно множинні кратероподібні сліди, то в зоні  $BC$  переважають сліди контактування абразивних зерен у вигляді довгих рисок.

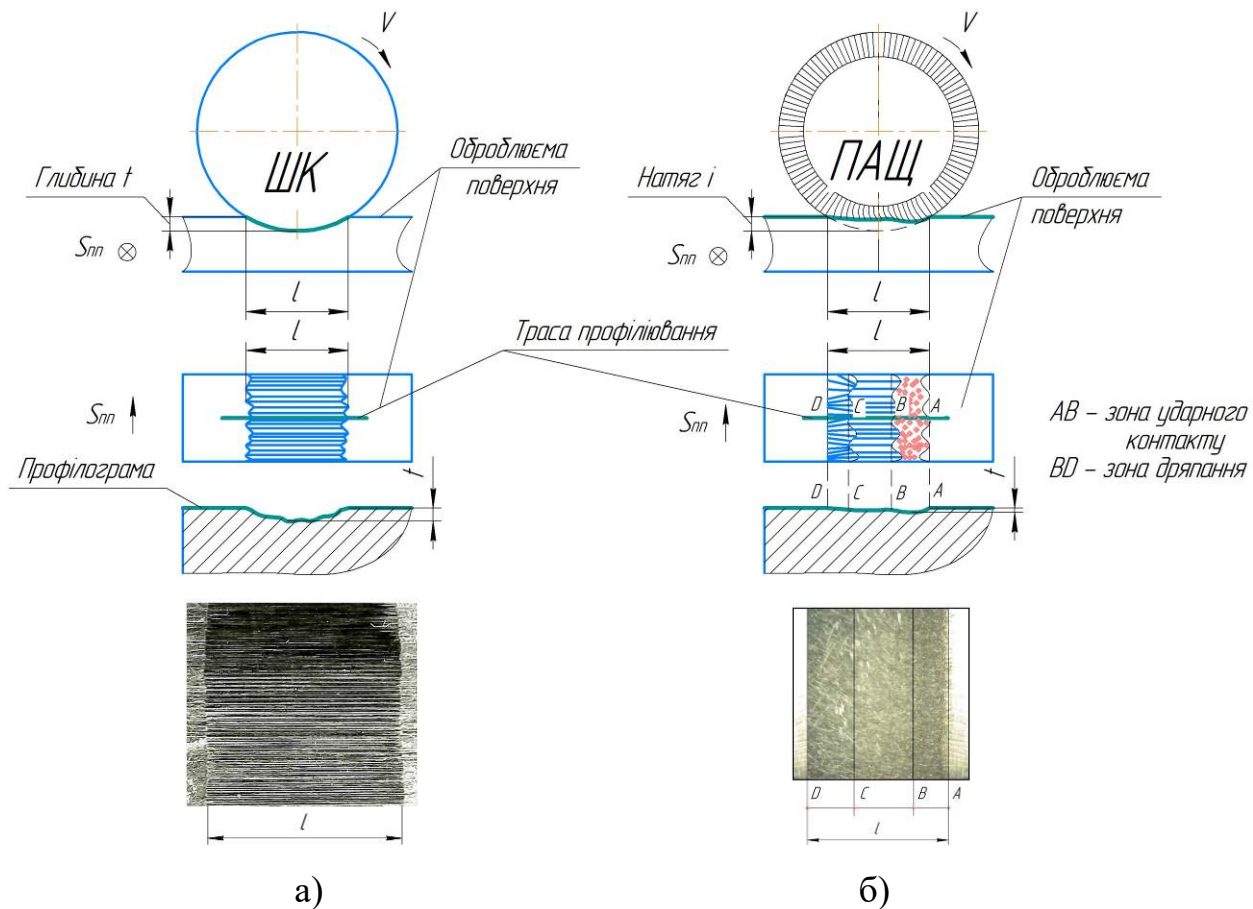


Рис. 2.9. Схеми фотографії контактних поверхонь деталі: а) при обробці шліфувальним кругом (ШК); б) при обробці полімерно-абразивною щіткою (ПАЩ)

Зона  $CD$  з'являється у разі нераціональної експлуатації ПАЩ, нерівномірного зношення і наявності волокон різної довжини. На виході з контакту із зразком довші ПА волокна, які в цей час вже нічим не обмежені з боків вилітають із зони обробки в різних напрямках в результаті дії абразивних зерен, що виступають, і відцентрових сил. Тому зона  $CD$  характеризується

різноспрямованими рисками в результаті руху волокон. За правильних умов і режимів обробки зона  $CD$  відсутня.

Причину такої відмінності у формуванні зон контакту  $AB$  і  $BC$  даних інструментів з оброблюваною поверхнею можна встановити, якщо розглянути умови контактування одного абразивного зерна, яке жорстко пов'язане з інструментом, і абразивного зерна, закріпленого на пружному волокні.

На рис. 2.10 показано результати контактної взаємодії при різанні одиничним зерном при його жорсткому закріпленні на диску, що обертається, і зерном, що входить до складу пружного волокна, яке також закріплене на диску, що обертається. Видно риси від зрізуваного оброблюваного матеріалу жорстко закріпленим абразивом (рис. 2.10, а).

На рис. 2.10, б показано, що абразив, закріплений на пружному волокні, може кілька разів контактувати з оброблюваною поверхнею в період проходження зони контакту, час від часу відскакуючи від поверхні. Природно припустити, що кількість точкових контактів збільшуватиметься зі збільшенням жорсткості (зменшення довжини  $L$  і збільшення діаметру  $d_0$ ) волокна. У граничному випадку, якщо довжина волокна, що виступає, прагнуче до нуля, то ПАЩ перетворюється на ШК, в якому абразивні зерна знаходяться в полімерній зв'язці.

Таким чином, збільшення жорсткості волокна, що несе абразивні зерна, призводить до того, що кількість точкових контактів, пов'язаних з коливаннями волокна, збільшується, і в граничному випадку (при жорсткому закріпленні зерна) усі точки зливаються в один безперервний зріз в зоні контакту.

Збільшення кількості точкових контактів пов'язане з тим, що при збільшенні жорсткості волокна, що несе абразивне зерно, збільшується частота його власних коливань і зменшується амплітуда відхилення від положення рівноваги волокна, відносно радіальної осі його закріплення в ПАЩ.

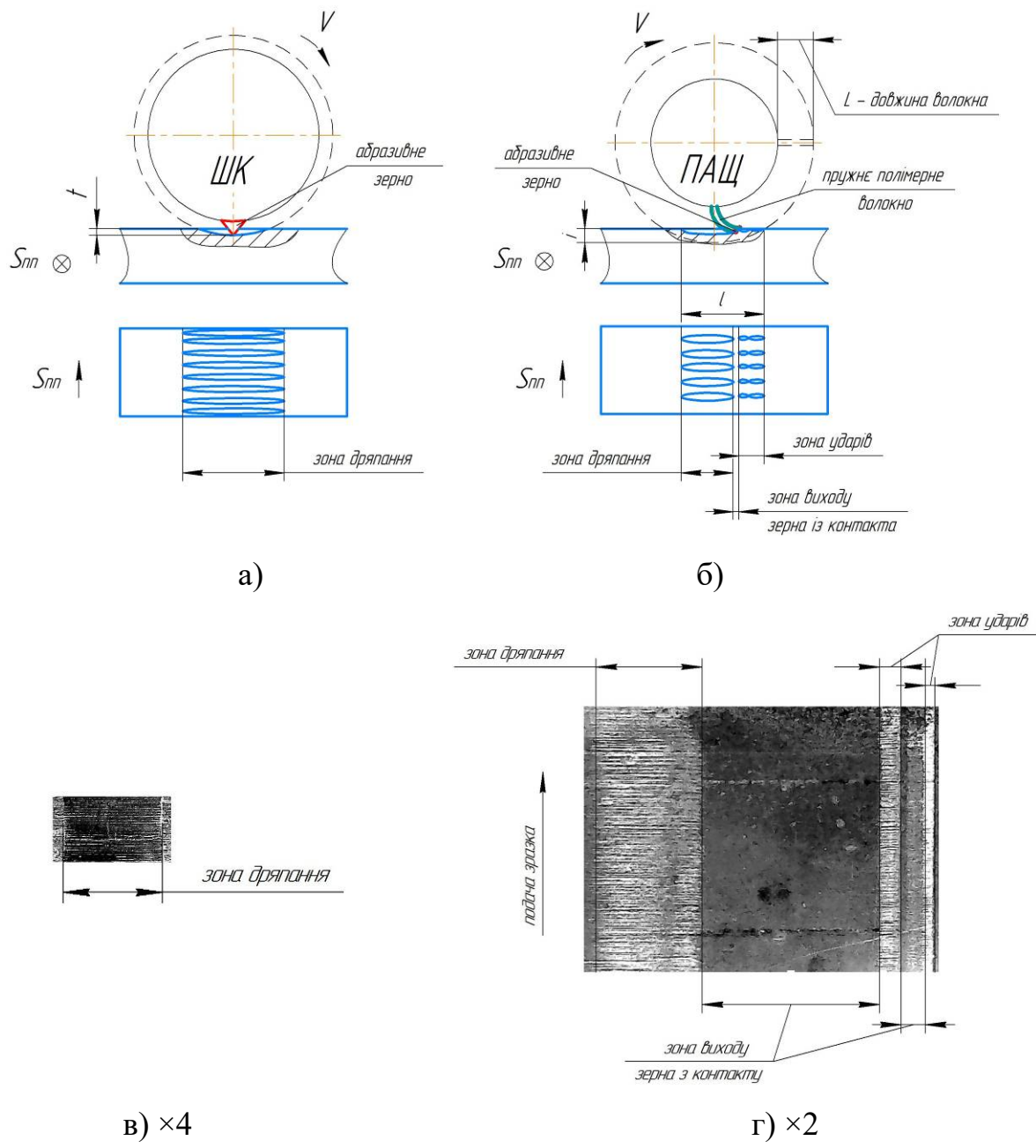


Рис. 2.10. Схеми і фотографії контактних поверхонь оброблюваної деталі при різанні одним абразивним зерном: а, в – жорстко закріпленім; б, г – закріпленім на пружному волокні

Дуже важливими чинниками в цьому випадку є також швидкість обертання волокна, оскільки вона визначає час, енергію удару і відскоку волокна при першому його контакті, а також величина натягу  $i$ , що визначає загальну довжину контакту з оброблюваною поверхнею  $l$  і величину деформації волокна при проходженні зони контакту.

Описаний механізм розглядає умови контактування з оброблюваною поверхнею як одного волокна, що несе абразивне зерно, так і повною ПАЩ, що складається з безлічі волокон, які в процесі обробки, деформуючись, взаємодіють один з одним і з оброблюваною поверхнею.

Для визначення інтенсивності дії волокон на оброблювану поверхню з точки зору одного або декількох торкань по довжині плями контакту було застосовано віртуальне моделювання.

### **2.3.5 Віртуальне моделювання контакту «волокно-зразок»**

Моделювання процесу обробки ПАЩ робили методом кінцевих елементів, при якому замкнуті об'єми інструменту і зразка діляться на кінцеві елементи, кожен з яких має властивості заданого матеріалу [64]. Для вирішення поставленого завдання використали програмний пакет ANSYS, що включає до свого складу модуль LS\_DYNA, призначений для моделювання процесів, що протікають в часі [65], [66], [67], [68].

Запропоновану методику детально описано в монографії [69].

Для вивчення напружено-деформованого стану зразка були прийняті спрощення в моделі волокна. Матеріал волокна з хаотично розподіленими абразивними зернами (у вказаному відсотковому вмісті 40%) в полімерній основі був прийнятий як рівномірна суміш двох речовин з певними концентраціями. А також замість циліндричної форми волокна створювали восьмигранну призму. Така форма волокон раціональніша, оскільки забезпечує рівномірне розбиття моделі волокна на кінцеві елементи, що мають правильну форму і розмір, які дозволяють досягти високу точність і продуктивність розрахунків; підвищення продуктивності розрахунків із-за зменшення кількості скінченних елементів (СЕ) в порівнянні з циліндричною формою волокна. Діапазони значень параметрів ПАЩ (табл. 3.1) узяті по каталогу [70].

Базовим етапом є створення геометричних об'ємних моделей оброблюваного зразка і щітки [71]. У роботі застосовували програмний пакет Delcam PowerShape [72]. Модель зразка представлена у формі прямокутного паралелепіпеда, який формується при створенні розрахункового завдання засобами програмного пакету ANSYS.

При виконанні динамічних розрахунків за допомогою модуля LS-DYNA число ітерацій (відповідно інтервал часу  $\Delta t$ ) не можна вказати явно - воно обчислюється автоматично за мінімальним геометричним розміром скінченного елемента сітки. Чим менше розміру елемента, тим менше інтервалу часу  $\Delta t$ , відповідно, тим більше ітерацій обчислень, що проводяться, більше часу витрачається на моделювання. Тому етап розбиття моделей на сітку кінцевих елементів є визначальний для швидкості і продуктивності розрахунків.

Для усіх видів досліджень, що проводяться в цій роботі, встановлювали тип аналізу «Structural»(структурний) з опцією Discipline «LS-DYNA Explicit».

В якості типу кінцевих елементів, на які розбиваються побудовані моделі, використали динамічний тип «3D Solid 164», призначений для твердотілої тривимірної геометрії; також вказували властивості матеріалів, що відповідають кожному елементу системи (табл. 2.9):  $E$ ,  $E'$  – модулі пружності білінійної моделі матеріалів, Па;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_T$  – межа плинності, Па.

У зв'язку з великим об'ємом і переліком виконуваних дій методика виконання обчислень програмою LS-DYNA, особливості завдання умов моделювання, закріплення елементів моделі і навантаження, що прикладаються, методика закладення необхідних параметрів при режимах, що відповідають реальному устаткуванню, визначення особливостей контактної задачі і обробка результатів покроково приведено в монографії [69].

**Параметри матеріалів моделей**

Елемент моделі	Марка матеріалу	Модель поведінки матеріалу	$E$ , Па	$\mu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_T$ , Па	$E'$ , Па
Обод маточини	Сталь 45	Білінійна	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,31	7800	$5 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
Волокна ПАЩ	Поліамід+ абразив	Білінійна	$1,1 \cdot 10^9$	0,33	1140	$8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^8$
Центр маточини	Сталь 45	Rigid*	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,31	7800	-	-
Зразок	ВТ8-М	Білінійна	$1,12 \cdot 10^{11}$	0,32	4505	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
	Сталь 3	Лінійна	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,31	7850	$2 \cdot 10^8$	-
	ЭИ698-ВД	Лінійна	$2,0 \cdot 10^{11}$	0,3	8320	$3,1 \cdot 10^8$	-
	АК7Ч	Лінійна	$7,0 \cdot 10^{10}$	0,34	2700	$1,2 \cdot 10^8$	-

Примітка: \* – модель матеріалу центру маточини Rigid означає, що матеріал є абсолютно жорстким.

Результати комбінації динамічного аналізу і контактної задачі, отримані в програмі ANSYS у вигляді анімації контакту і зразка в часі, а також зовнішній вигляд збільшеного профілю обробленої поверхні зразка (рис. 2.9 б, 2.10 б, г) дозволяють пояснити наявність декількох контактних зон при обробці ПАЩ.

При обробці одиничними волокнами (рис. 2.10 б, в) отримали декілька рисок різної довжини. За допомогою анімації, отриманої при моделюванні даного випадку, встановлено, що волокно у вільному обертанні після першого удару з утворенням короткої риски відразу підскакує, потім знову контактує із зразком, залишаючи наступну риску, відбувається мікрорізання, дряпання. Це пояснюється пружними властивостями полімеру і відсутністю сусідніх волокон, які б стримували вільне переміщення досліджуваного волокна і притискали його до поверхні. Після 2-3 контактів різної тривалості відбувається вихід волокна із зони обробки.

Кількість ударів одиничного волокна, кількість рисок і їх довжина, що характеризують час контактування волокна з поверхнею зразка, і, відповідно, інтенсивність обробки (мікрорізання), залежить від параметрів волокон ПАЩ і режимів, і, у свою чергу впливає на якість і продуктивність обробки. Тому

представляє інтерес вплив технологічних чинників на долю першого ударного контакту і подальшого мікрорізання (дряпання). У таблицях А.1 і А.2 додатку А зведено результати обробки 36 файлів анімації поведінки одиничного волокна з варіюванням жорсткості завданням діаметру волокна ( $d_0=1; 1,5$  мм), його виліту ( $L=8$  і  $32$  мм), а також режимів: натягу ( $i=0,5; 1,5; 3,0$  мм) і швидкості ( $V=4; 6; 23$  м/с); постійні чинники ( $D=150$  мм,  $S=1$  м/хв).

Аналізуючи результати (табл. А1, рис. А.1) можна сказати, що контактування тільки у вигляді короточасних ударів характерно для виліту  $L=32$  мм; посилення волокна зменшенням його довжини з  $32$  до  $8$  мм забезпечує обов'язкову наявність зони мікрорізання (дряпання) і зменшення кількості попередніх ударів. Так само впливає збільшення діаметру волокна (табл. А.2). Високі швидкості збільшують кількість короточасних торкань, скорочуючи зону дряпання. Тобто, варіюванням режимами і параметрами можна пояснити різну інтенсивність обробки ПАЩ.

При аналізі анімації контакту сектора ПАЩ і плоскої поверхні можна пояснити наявність зони  $AB$  (рис. 2.9, б), де після першого локального удару завдяки пружній основі вони кілька разів відскакують, залишаючи після себе невеликі кратери. При цьому в тонкому поверхневому шарі наводиться стискувачі залишкові напруження і підвищується мікротвердість (пп. 3.2, 3.3) – відбувається локальне зміцнення поверхні. Потім, притиснуті рядами волокон, що йдуть за ними, до поверхні, вони просковзують, залишаючи довгі сліди, риси від абразивних зерен – зона  $BC$  (мікрорізання, дряпання). Така поведінка волокон повністю підтверджується результатами віртуального моделювання з даними режимами обробки і картиною змінення напружено-деформованого стану (НДС) зразка (рис. 2.11).

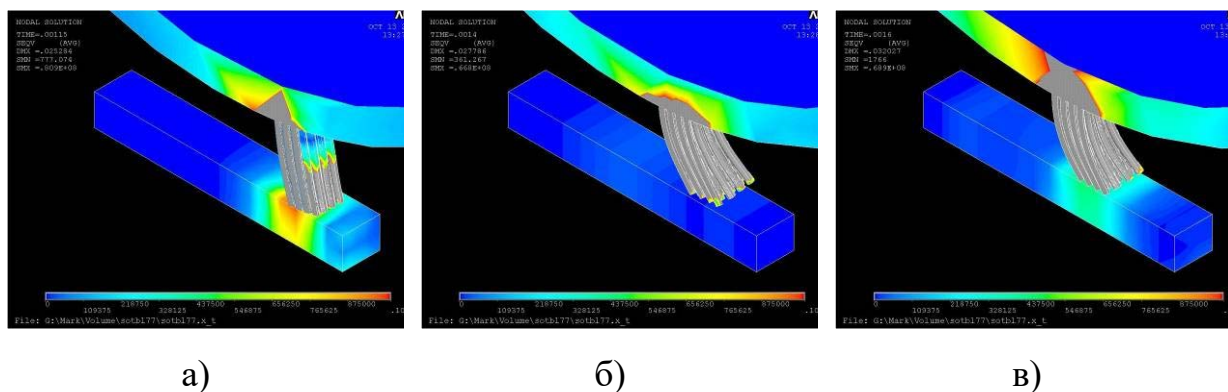


Рис. 2.11. НДС зразка: а – перший удар (зона *AB*); б – зона відсутності контакту через відбиття волокон; в – зона мікрорізання (зона *BC*)

Наявність зон *AB* (точковий малюнок мікрорельєфу) і *BC* (лінійний малюнок мікрорельєфу) відмітили Абрашкевич Ю.Д. і Оглобинский А.В. [46], [51]. Враховуючи, що збільшуючи натяг, ми подовжуємо пляму контакту, аналіз віртуальної анімації підтвердив ствердження вищезазначених авторів, що зі збільшенням натягу зона *BC* пропорційно збільшується, а протяжність зони *AB* практично не змінюється.

Віртуальна анімація дала можливість простежити картину зміни напружено-деформованого стану і визначити місце розташування в плямі контакту максимальних напружень  $\sigma_{max}$  в зразку – в місцях перших ударів або першого контакту волокон з поверхнею (рис. 2.11).

Програма дозволяла відстежувати значення максимальних напружень  $\sigma_{max}$  в зразку. Для дослідженого діапазону режимів для одиничного волокна  $\sigma_{max}$  зразка складає 1,2...10,5 МПа (табл. А.1, А.2). Менші значення  $\sigma_{max}$  наводить в зразку волокно з вилітом  $L=32$  мм, більші –  $L=8$  мм, – за рахунок більшої жорсткості.

Збільшення швидкості  $V$  з 4 до 23 м/с дає підвищення  $\sigma_{max}$  зразка за рахунок більшої динамічної складової в 1,5...3 рази.

На підставі отриманих результатів комп'ютерної візуалізації можна зробити висновок, що максимальна силова дія волокон щітки на поверхню зразка відбувається в місцях перших ударів на початку плями контакту. Встановлено, що змінюючи технологічні чинники (режими різання і параметри інструменту), відповідно, динамічну дію і жорсткість інструменту,

можна впливати на ефективність обробки ПАЩ.

Використовуючи цю методику, було також визначено рівень сил в місцях першого контакту волокна із зразком (п. 4.2).

## 2.4 Висновки

1. Описано основні методичні прийоми вивчення якісних параметрів якості поверхні і властивостей поверхневого шару після фінішно-оздоблювальної обробки ПАЩ.

2. Приведено ескізи зразків для випробувань, а також основні умови проведення експериментів, устаткування, оброблювані матеріали і різноманітні ПАЩ, використовувані в роботі.

3. Описано спосіб відновлення різальних властивостей ПАЩ.

4. Проведено порівняння взаємодії абразивних зерен, закріплених жорстко і пружно, а також картину обробленої поверхні на поперечній подачі. Проаналізовані відмінності отриманих зон постконтактних поверхонь на зразках.

5. Розроблено методику взаємодії «ПАЩ-зразок» в динамічному модулі ANSYS LS-DYNA.

6. Проведено аналіз впливу параметрів ПАЩ і режимів обробки на напружено-деформований стан зразка, отриманий за допомогою нелінійного аналізу програми ANSYS (модуль LS-DYNA) :

- підтверджена і пояснена наявність декількох зон з різним малюнком мікрорельєфу на обробленій поверхні;

- встановлено, що варіюванням чинників, що задаються, можна міняти тривалість і характер контактування волокон з поверхнею зразка (доля ударної дії і мікрорізання);

- у досліджених діапазонах режимів обробки і параметрів ПАЩ максимальні напруження спостерігались в початковій ударній зоні плями контакту, що, ймовірно є причиною появи зміцнюючого ефекту при обробці ПАЩ.

## РОЗДІЛ 3

### ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ

Виходячи з важливості вирішуваних завдань і зацікавленості машинобудівних підприємств, зокрема авіадвигунобудівної галузі, в удосконаленні технології фінішної обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей, які переважно виготовляються з жароміцних сталей і сплавів, основні експерименти по формуванню властивостей поверхневого шару проводили на сплавах на основі нікелю і титану, інформація щодо обробки яких таким типом інструментів в літературних джерелах була відсутня, і на сталі 3, як представнику вуглецевих конструкційних сталей. Після визначення для них раціональних режимів обробки ПА щітками, що забезпечують високу якість, продуктивність і сприятливі властивості поверхневого шару, були проведені експерименти для алюмінієвих сплавів АК12 і АК7ч, які з невеликими відхиленнями повторили результати, отримані на зразках із сталі. Також для розширення переліку матеріалів, були досліджені додатково ще декілька сплавів на основі нікелю, титану і алюмінію на можливість обробки їх ПАЩ.

#### **3.1 Дослідження шорсткості оброблюваної поверхні залежно від режимів обробки і параметрів ПАЩ**

Дослідження параметрів шорсткості переслідувало декілька цілей: визначити раціональні режими обробки і параметри ПАЩ; оцінити якість обробленої ПАЩ поверхні після різної попередньої механічної обробки, що залишає різну залишкову шорсткість, а також після комплексної обробки полімерно-абразивними щітками з різними параметрами.

Необхідно відмітити, що початкова шорсткість зразків різна. Велика частина досліджених матеріалів (жароміцні сплави на основі нікелю ЭИ698-ВД, ЭП718 і титана ВТ8, ВТ8-М, ВТ3) відносяться до «стратегічних», і були в наявності в обмеженій кількості. Тому після проведення серії експериментів та досліджень шорсткості, шаржування і наклепування, шар метала з цієї поверхні видаляли грубим шліфуванням або фрезеруванням одним зубом для отримання різної якості поверхні для наступної серії експериментів зі збереженням площинності і паралельності базової і оброблюваних поверхонь. Також поступали із сталевими і алюмінієвими зразками. В результаті повторної обробки кожного разу досліджувана поверхня зразка мала свою початкову шорсткість.

Товщина зразка поступово зменшувалася до моменту неможливості закріплення його на верстаті. До того ж більшість вищеназваних матеріалів не магнітна, і закріплювати їх необхідно за бічні грані, залишаючи вільною робочу площину.

*Вплив подачі і числа подвійних ходів на шорсткість отриманої поверхні.*

Найкраща якість поверхні з дослідженого діапазону подач ( $S=0,5\dots 6$  м/хв) дає найменше значення подачі  $S=0,5$  м/хв (рис. 3.1, а). Чим менша подача, тим більша кількість контактуючих ПА волокон доводиться на одиницю площі оброблюваної поверхні, проте, для обробки з подачею  $S=0,5$  м/хв необхідне інтенсивне подання ЗОТС, інакше ПАЩ залишає тонку плівку полімерної основи на обробленій поверхні (інформацію щодо теплових обмежень наведено в п. 4.1). Тому раціональною вибрано подачу  $S=1$  м/хв, при якій для більшості досліджених матеріалів ЗОТС не вимагається. Обробка на подачах більше  $S=6$  м/хв має дуже низьку ефективність.

Комплексна обробка (рис. 3.1, б) послідовно «жорсткою» ПАЩ з вилітом волокон  $L=8$  мм (лінія 1), потім «м'якою» ПАЩ з  $L=21$  мм (лінія 2) дає можливість спочатку більше продуктивно видалити глибокі риси і мікронерівності, а потім якісно заполірувати. Залежність  $Ra$  від подачі

аналогічна, і подачу  $S=1$  м/хв можна вважати раціональною [77].

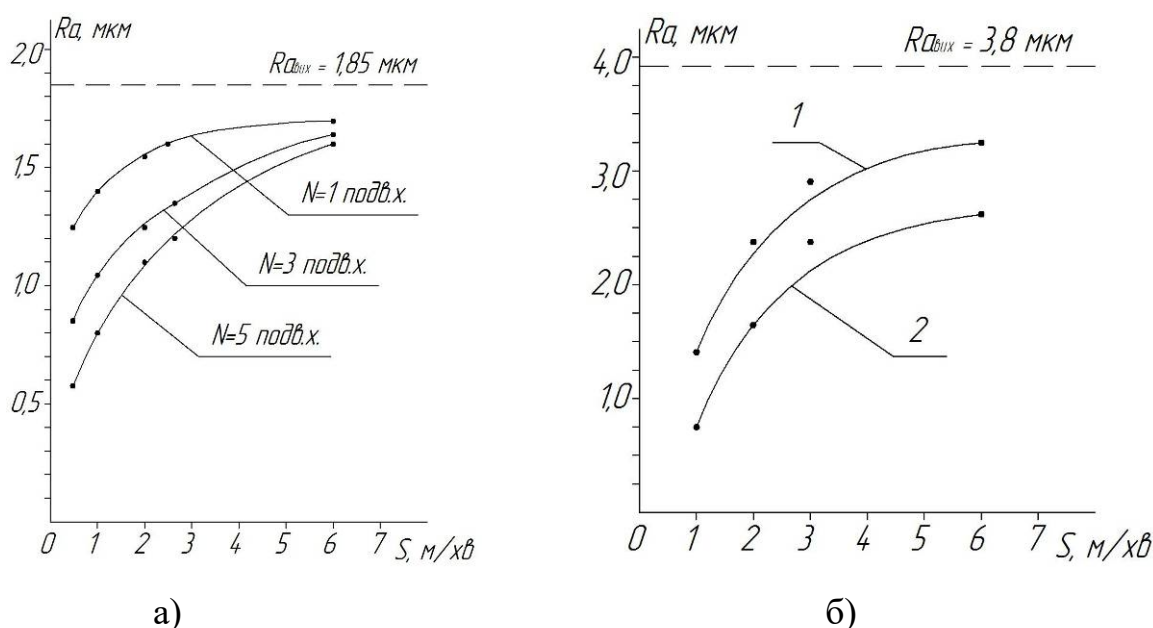


Рис. 3.1. Вплив подачі  $S$  на величину  $Ra$ : сталь 3 (а) і VT8-M (б)

Для інтенсивнішої обробки рисок і рівномірного зношення волокон інструменту, розташованих в середині і з краю, враховуючи його «розпушування», рекомендується встановити кут  $\alpha=15\dots30^\circ$  між вектором подачі оброблюваної поверхні і площиною обертання дискової (циліндричної) ПАЩ [56]. Це дає додаткову якість (в 1,1...1,15 разів) і збільшує термін служби ПАЩ – вона практично не потребує правки.

З точки зору продуктивності обробки (рис. 3.1, а і 3.2) можна сказати, що за 1 подв. хід ПАЩ видаляє значну частину мікронерівностей по висоті, потім з кожним подальшим подвійним ходом, знятий шар зменшується, поки після 5...7-го подв. ходу інструмент починає наводити свою шорсткість, і її значення далі не міняється. Встановлювати  $N$  більше 10 подв. ходів – нераціонально.

На рис. 3.2 показано результат обробки зразка з VT8-M з відносно «грубою» початковою шорсткістю ( $Ra=8,2$  мкм). Видно, що для якісної обробки необхідно призначити на 2...3 подв. ходів більше, ніж при вихідній шорсткості  $Ra=3,2$  мкм.

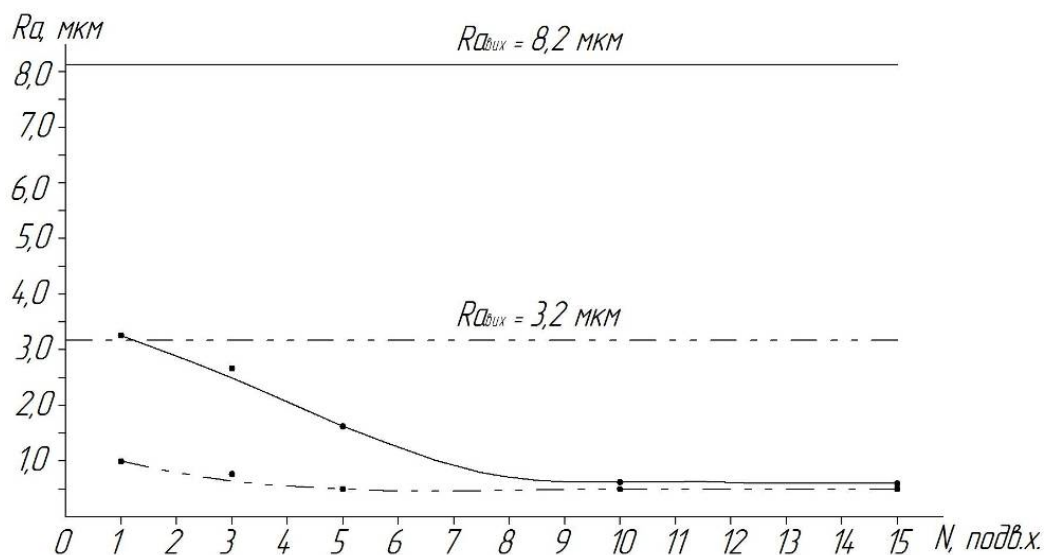


Рис. 3.2. Залежність шорсткості від кількості подвійних ходів

В деяких випадках кількість подвійних ходів замінюють призначенням поперечної подачі, яка забезпечує необхідну кількість перекриттів смуги контакту ПАЩ і поверхні оброблюваної деталі.

При обробці великих площ, наприклад, полірування довгих пластин, панелей, листів для збільшення продуктивності можна використати декілька однакових ПАЩ, що йдуть один за одним, а також набирати їх на одне оправляння у вигляді довгих циліндричних ПА щіток.

#### *Вплив матеріалу абразивного зерна на шорсткість.*

Досліджували ПАЩ із зернами з карбиду кремнію 63С і електрокорунда нормального 14А (рис. 3.3). При будь-яких варіаціях режимів різання полімерно-абразивні щітки з матеріалом абразиву 14А показують гірший результат значень параметра шорсткості на 15...20%, ніж ПАЩ з матеріалом абразивних зерен 63С.

Тому подальші дослідження проводилися з використанням ПАЩ з абразивом 63С. При необхідності обробки деталей полімерно-абразивними щітками з матеріалом абразивного зерна 14А необхідно враховувати деяке зниження продуктивності обробки.

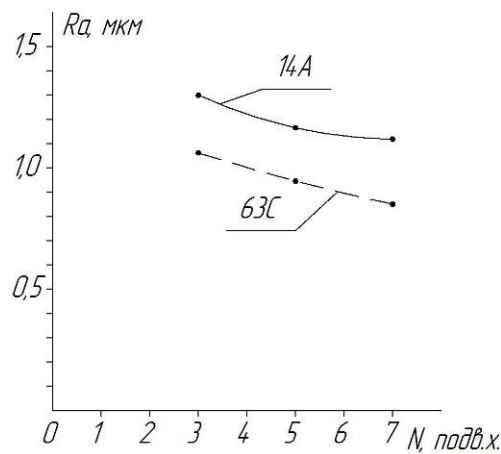


Рис. 3.3. Залежність параметра  $Ra$  від матеріалу абразиву ПАЩ (сталь 3)

*Вплив діаметру волокон і величини абразивного зерна на шорсткість.*

Як відомо, інтенсивність енергії мікроударів абразивними зернами зростає зі збільшенням зернистості і концентрації абразивних зерен у волокні [49]; проте при перевищенні концентрації  $>35\%$  знижується міцність полімерних волокон [38], [46]. Відношення розмірів зерна до діаметру волокон складає за різними джерелами 1:6, 1:8; дослідницька робота по збільшенню зернистості без втрати втомно-міцностних властивостей волокон триває (п.1). Отже, чим більше абразивні зерна, тим більшим має бути діаметр волокна, а це у свою чергу підвищує жорсткість волокна.

Порівнювали ПАЩ з абразивними зернами з карбиду кремнію 63С зернистістю F80 (діаметр волокон 1,2 мм) і F320 (діаметр волокон 0,6 мм).

Кращі різальні властивості (рис. 3.4) показали ПАЩ із зернистістю F80 (відповідно,  $d_s=1,2$  мм), великі ризики, що повністю видаляються з більшою продуктивністю, залишились від попередньої механічної обробки (точіння, фрезерування). За відсутності такої технологічної спадковості, у разі, коли необхідно просто поліпшити якість поверхні тонким поліруванням, раціональнішим є застосування ПАЩ з абразивом зернистістю F320 (діаметр волокна  $d_s=0,6$  мм), що має явно виражений полірувальний ефект. В цьому випадку можна забезпечити шорсткість до  $Ra=0,2$  мкм і менше. Їх можна застосовувати в якості другої щітки при комплексній обробці після «жорсткіших» і продуктивних ПАЩ.

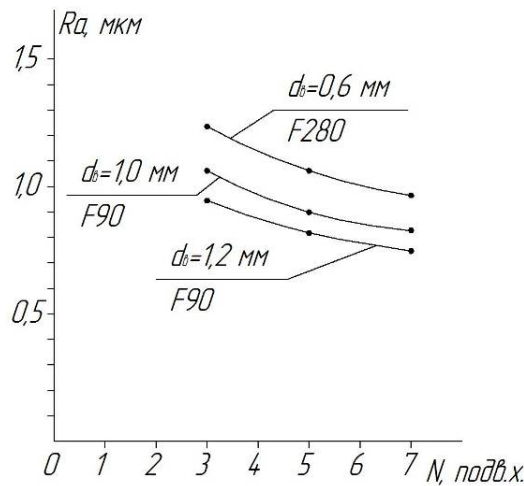


Рис. 3.4. Вплив зернистості абразиву і діаметру ПА волокна на шорсткість (сталь 3)

Шорсткість після обробки щіткою з  $d_f=1,2$  мм і зернистістю F80 практично однакова з обробкою ПАЩ з  $d_f=1,0$  мм і такою ж зернистістю. Дещо кращий результат можна пояснити більшою жорсткістю волокон і більшою кількістю абразивних зерен в робочому перерізі волокна.

*Вплив швидкості різання на шорсткість.*

Усі досліджувані матеріали (у тому числі і титанові сплави) показали аналогічні результати – зі збільшенням швидкості якість поверхні покращується (рис. 3.5, лінія 1 і 2), проте підвищення швидкості більше 25 м/с викликало налипання полімерної основи волокон на оброблювану поверхню (через температурні обмеження п. 4.1). Рациональна швидкість обробки лежить в діапазоні 15...25 м/с.

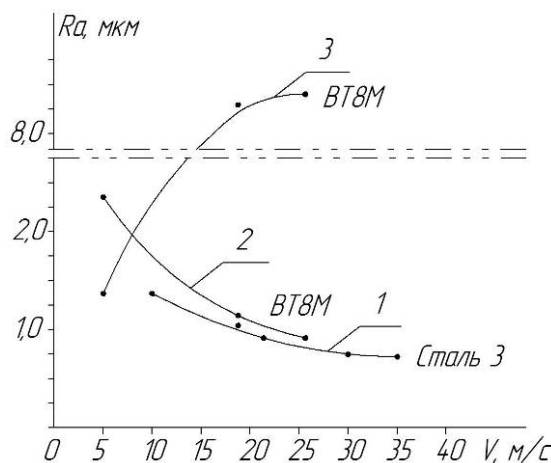


Рис. 3.5. Вплив швидкості обробки на параметр  $R_a$

Виключенням є титанові сплави (BT8, BT3) у разі, якщо на початковій поверхні є хвилястість, навіть невелика по висоті, але з великим кроком 0,1...0,3 мм. Титанові сплави мають підвищену в'язкість і наявність широких регулярних гребінців і борозенок на початковій поверхні вимагає значного зменшення швидкості різання до 5...6 м/с для їх повного видалення, оскільки при швидкостях вище 10 м/с гребінці не зрізуються, а наволочуються на поверхню, і це різко погіршує шорсткість (рис. 3.5, лінія 3).

Таке явище описувалось в роботі [20] при крацовці сталевих зразків металевими щітками: необґрунтоване завищення швидкостей обробки «понад певну величину призводить до утворення напливів і, в результаті, до погіршення якості поверхні».

*Вплив натягу і наявності ЗОТС на шорсткість.*

Зі збільшенням натягу, за рахунок деякого підвищення силової складової, шорсткість обробленої поверхні покращується. До того ж, спостерігається деяке поліпшення результату обробки ПАЩ з використанням ЗОТС (Ra менше на 7...12%) в порівнянні з обробкою без ЗОТС при натязі до 2 мм (рис. 3.6). При натязі більше 2 мм, доля роботи бічними поверхнями волокон збільшується, зменшуючи складову силової дії на поверхню і кількість робочих абразивних зерен, через що інтенсивність обробки поступово падає. Подальше збільшення натягу (4 мм і більше) при обробці без ЗОТС призводить до налипання полімеру на оброблювану поверхню. Застосування ЗОТС при натязі більше 2 мм, сприяє прослизанню зігнутих волокон по поверхні зразка з різким зниженням ефективності обробки. У зв'язку з цим раціональна величина натягу складає 1,5...2 мм.

При застосуванні бічних накладок на ПАЩ для зменшення виліту волокон до  $L=8$  мм (рис. 3.6, в) самоохолодження волокон ускладнене, інструмент працює досить «жорстко», волокна не встигають охолоджуватись і застосування ЗОТС обов'язково. При цьому, збільшення натягу понад 3 мм навіть з ЗОТС приводить до перегрівання інструменту і до можливого безповоротного спікання волокон (особливо, при обробці титанових сплавів).

З точки зору зношення інструменту (п. 2.3.2) – його стійкість зменшується зі збільшенням натягу, особливо без застосування ЗОТС. Тому, через те, що в переважній більшості випадків при натягу в діапазоні 1,5...3 мм величина  $Ra$  відрізняється незначно, раціональним значенням натягу приймаємо 1,5...2 мм.

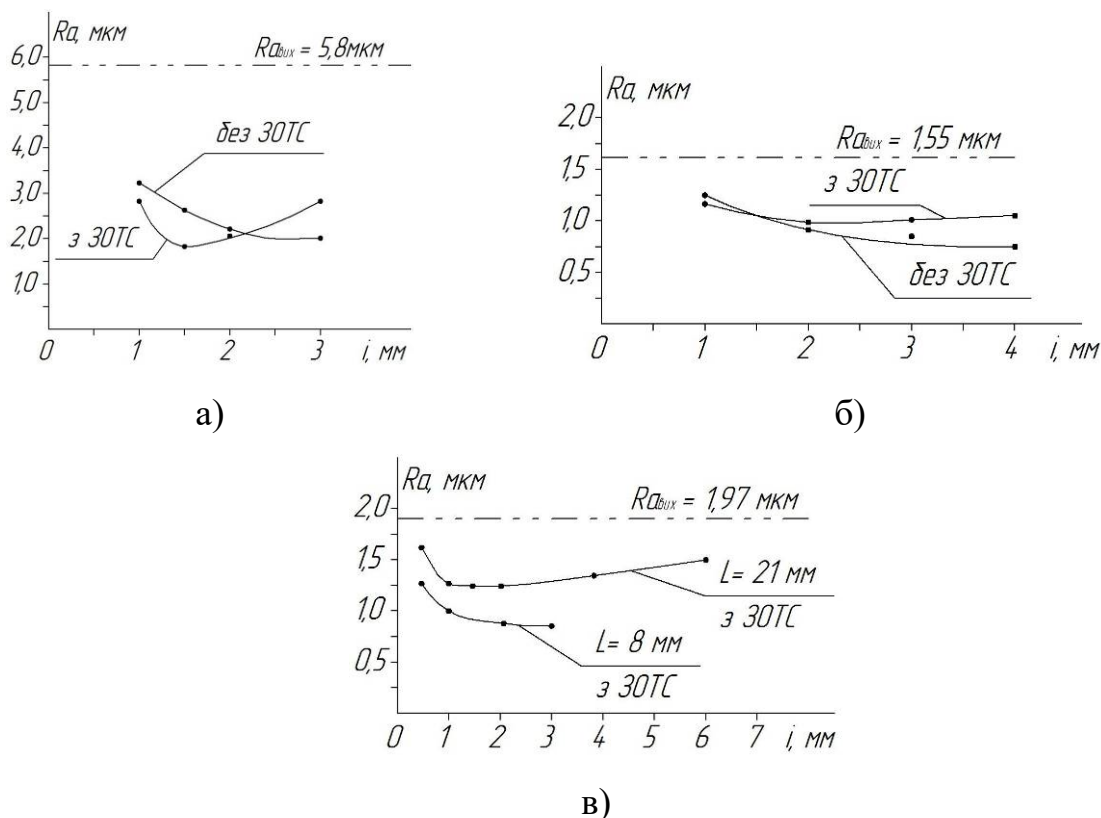


Рис. 3.6. Вплив натягу  $i$  на параметр  $Ra$ : ВТ8М (а), ЭП718 (б), сталь 3 (в)

#### *Вплив виліту волокон на жорсткість.*

Зміною виліту волокон ПАЩ за допомогою накладок (рис 2.8) регулюється її жорсткість з незмінними іншими параметрами щітки. На рис. 3.7 показано порівняльні результати обробки однією і тією ж ПАЩ з вилітом волокон  $L=32$  мм без накладок,  $L=8$  мм з накладками, а також комплексної обробки – частина зразка, оброблена ПАЩ з  $L=8$  мм, була потім оброблена тією ж ПАЩ без накладок,  $L=32$  мм.

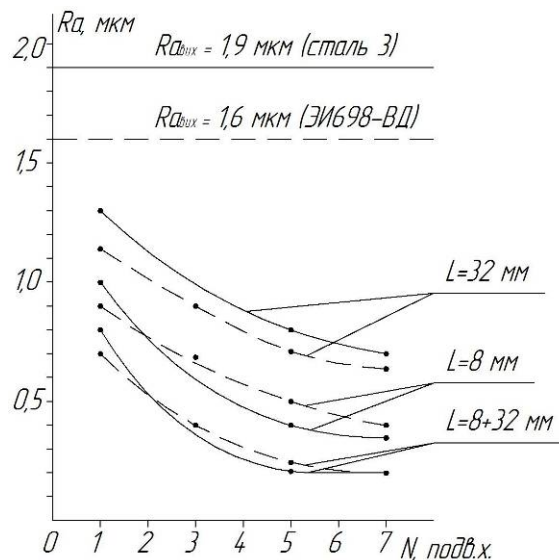


Рис. 3.7. Залежність шорсткості від кількості подвійних ходів при обробці «м'якою» і «жорсткою» ПАЩ

Велику продуктивність (співвідношення якості – час обробки) показав «жорсткіший» інструмент з вилітом волокон  $L=8$  мм. Застосування після нього «м'якої» ПАЩ з  $L=32$  мм покращує параметр  $Ra$  на 20...50%.

Встановлені раціональні режими, умови обробки і параметри ПАЩ забезпечують виконання теплових обмежень (п. 4.1.2), невисоку силову дію (п. 4.2.2) і високу працездатність щітки.

### 3.2 Вплив умов обробки ПАЩ на величину поверхневого наклепу

Окрім різальної дії абразивних зерен, що містяться у волокнах, щіткові інструменти характеризуються ударною дією волокон, визначеною швидкістю обертання щітки, вилітом, жорсткістю і характером закріплення волокна [20]. Миттєва сила тиску ворсинок на оброблювану поверхню при високих швидкостях досягає величини, при якій відбувається пластична поверхнева деформація (ППД) тонкого поверхневого шару. Основними характеристиками ППД є величина поверхневого наклепу  $S_H$  і залишкові напруження  $\sigma_r$ .

Результати вивчення впливу режимів обробки і параметрів дискових

ПА щіток на величину поверхневого наклепу показали, що їх варіації в дослідженому діапазоні забезпечують величину поверхневого наклепу 3...22% для сталевих і алюмінієвих зразків, 8...18% для титанових сплавів, 7...20% для нікелевих сплавів, проте зі збереженням основних закономірностей зміни  $S_H$  при зміні параметрів або режимів.

Так, збільшення подачі знижує величину поверхневого наклепу  $S_H$  (рис. 3.8, а) через зменшення кількості мікроударів на одиницю площі оброблюваної поверхні.

Збільшення швидкості сприяє підвищеній динамічній дії і, отже, інтенсивнішому наклепуванню поверхневого шару (рис. 3.8, б).

Неоднозначно впливає на наклеп збільшення натягу. Спочатку величина  $S_H$  дещо збільшується (рис. 3.9, а), проте при натязі, більшому 2...2,5 мм, кількість вільних ударів кінчиків волокон зменшується через збільшення вигину попередніх волокон, «пом'якшуючих» ударну дію волокон в зоні  $AB$  (рис. 2.9 б), тому значення  $S_H$  зменшується.

З підвищенням кількості подвійних ходів до  $N=5...6$  подв.х. росте величина поверхневого наклепу, після чого вона не змінюється (рис. 3.9, б), оскільки досягає максимального значення, яке наводиться в поверхневому шарі цим інструментом при даному режимі обробки.

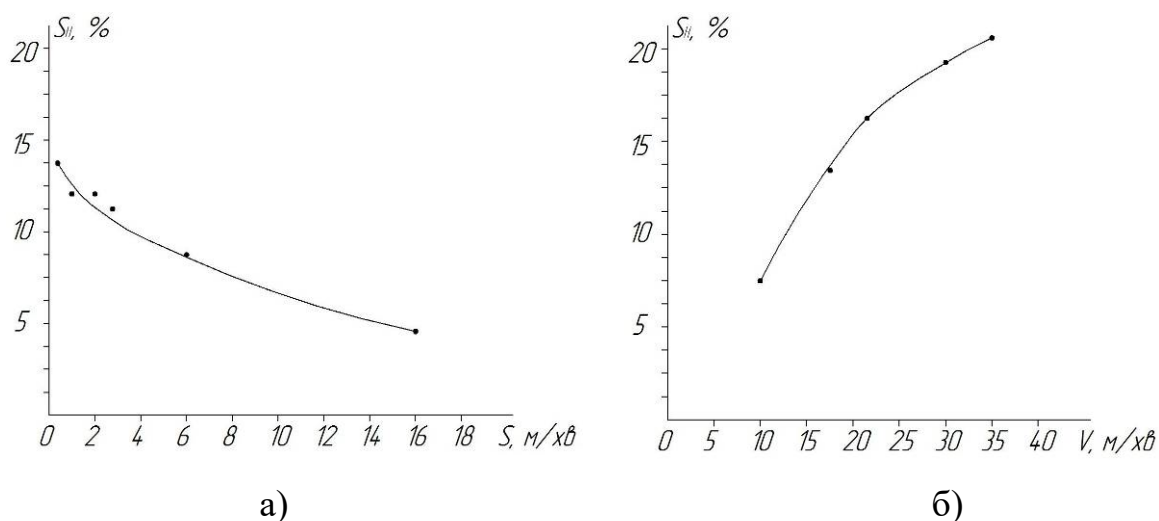
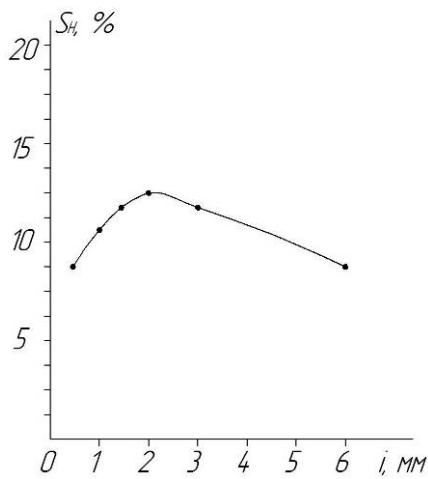
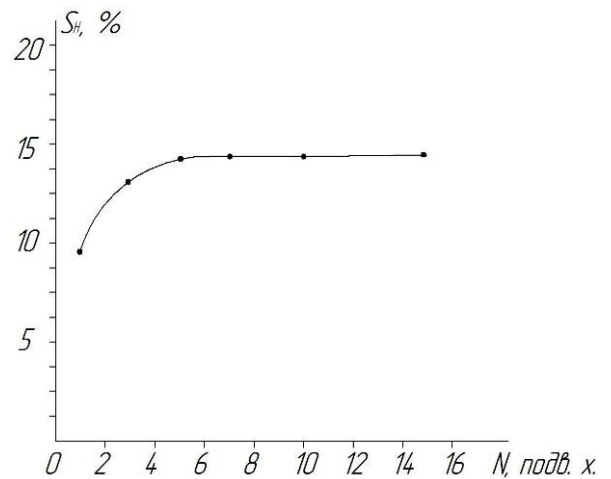


Рис. 3.8. Залежність величини поверхневого наклепу  $S_H$  від подачі  $S$  (а) і від швидкості різання  $V$  (б)



а)



б)

Рис. 3.9. Залежність величини наклепу  $S_H$  від натягу  $i$  (а) і від кількості подвійних ходів  $N$  (б)

Як було відмічено раніше, на інтенсивність локальної дії на оброблювану поверхню з боку ПАЩ впливає їх жорсткість, яка у свою чергу залежить від довжини виліту волокна і його діаметру. Окрім цього їх збільшення підвищує масу рухомого елемента (волокна) у момент удару; до того ж збільшення діаметру волокна  $d_6$  підвищує не лише його жорсткість, але і кількість абразивних зерен (або їх величину) в його робочому перерізі, що беруть участь в ударі. При зміні довжини волокон від 8 до 32 мм (рис. 3.10, а) і діаметру волокон від 0,6 мм до 1,2 мм (рис. 3.10, б) величина поверхневого наклепу збільшується вдвічі (лінія 1 і 2).

Наявність ударної дії волокон дискових щіткових інструментів також підтверджується в роботах [46], [20].

Практично нічим не відрізняється величина наклепу після обробки на однакових режимах ідентичними щітковими ПА інструментами, з різним матеріалом абразиву 14А і 63С (рис. 3.10, б – лінії 2 і 3).

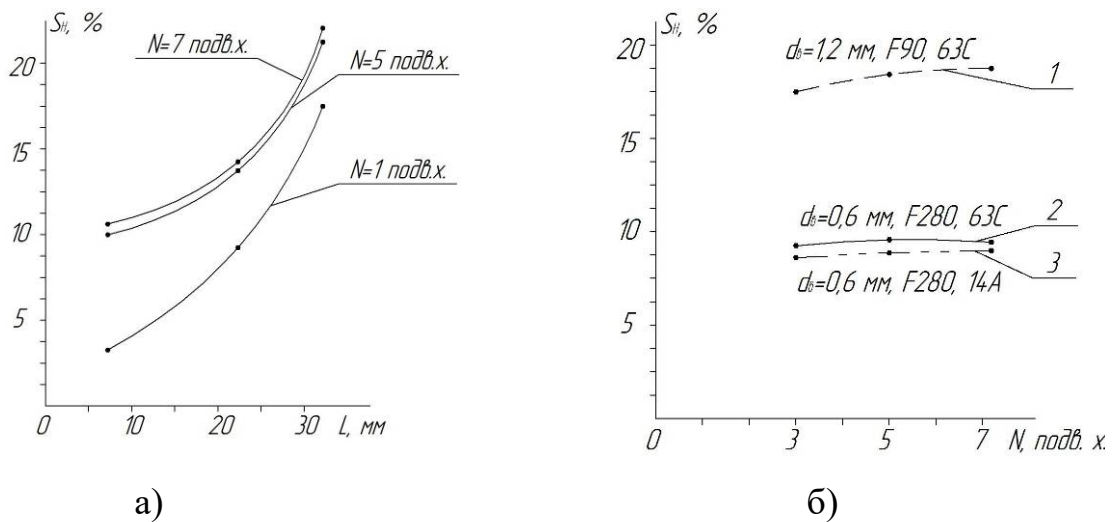


Рис. 3.10. Залежність величини наклепу  $S_H$  від довжини волокна  $L$ (а), від діаметру волокон  $d_s$  і матеріалу абразиву (б)

Таким чином, в результаті дослідження поверхневого наклепу можна зробити висновок про позитивну зміцнюючу дію дискових ПАЩ на оброблювану поверхню. В порівнянні із спеціальними зміцнюючими методами (пневно- або гідродробеструменева обробка, зміцнення кульками в ультразвуковому полі і інші методи ППД), ПАЩ за рахунок пружних волокон і їх «м'якої» дії на раціональних режимах наклепують поверхню в середньому на 10...15%. А вищеназвані методи зміцнення можуть допустити так званий перенаклеп (перезміцнення), коли в тонкому поверхневому шарі різко зростають характеристики твердості і падають характеристики пластичності [3], [78], що надалі навіть при невеликому вантаженні в експлуатації викликає сітку мікротріщин, і руйнування починається з перезміцненої крихкої поверхні. При обробці ПАЩ досягти порогу «перенаклепу» гарантовано неможливо.

Оскільки для тонкостінних деталей (особливо важкоавантажених) досягнення сприятливих властивостей з мінімальною силовою дією поверхневого шару по важливості стоїть відразу ж після забезпечення точності і шорсткості, то отримання зміцненої поверхні на обробній операції можна віднести до переваг обробки ПАЩ.

### 3.3 Оцінка рівня залишкових напружень після обробки ПАЩ

При обробці дисковими ПАЩ наводиться сприятливі стискуючі залишкові напруження величиною  $-175\dots-40$  МПа (рис. 3.11-3.13) на невеликій глибині поверхневого шару. Причому їх величина приблизно однакова, а глибина залягання в сталевих зразках більша ( $50\dots60$  мкм), ніж в титанових і нікелевих сплавах ( $\sim 20$  мкм). На більшій глибині вплив цієї обробки незначний.

Як відомо, деякі види оздоблювальної обробки наводять розтягуючі залишкові напруження, наприклад, полірування, шліфування тощо [3], [79], [80]. ПАЩ за рахунок більшої нормальної силової складової, ніж дотичної, в зоні хаотичних ударів волокнами при вході в зону різання, і меншого тертя і теплового впливу наводять залишкові напруження стиснення. Як видно з рис. 3.12 розтягуючі залишкові напруження невеликого рівня, що залишилися після полірування титанових зразків і не повністю були зняті відпалом, нейтралізуються при обробці щітками, і на глибині до 20 мкм змінюються на стискуючі залишкові напруження.

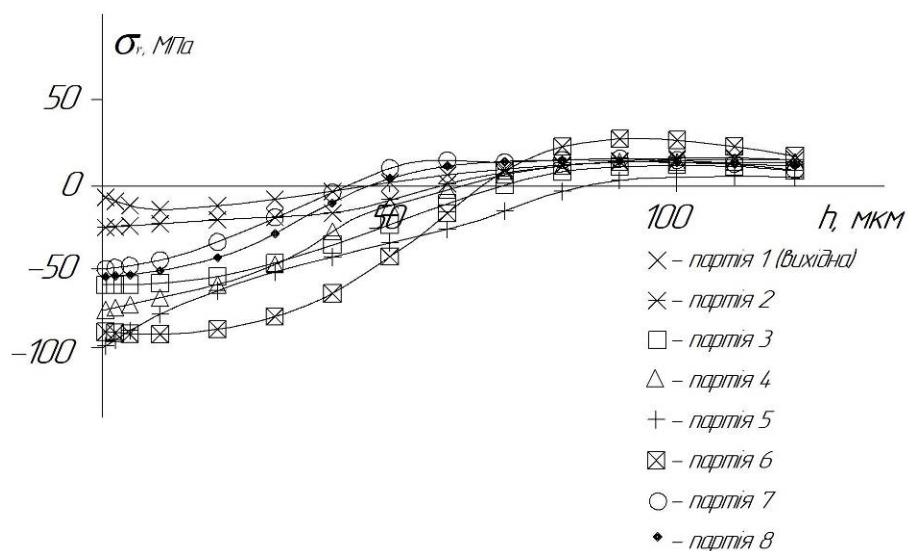


Рис. 3.11. Епюри залишкових напружень зразків з сталі 3

## Залишкові напруження партій зразків із сталі 3.

№ партії	Режими обробки				Параметри ПАЇ				$\sigma_r$ , МПа
	$V$ , м/с	$S$ , м/хв	$i$ , мм	$N$ , подв. х	$dв$ , мм	$L$ , мм	зернистість	матеріал абразиву	
1	Контрольна партія, після відпалу (вихідна)								-3
2	17	3	1,5	1	1	21	F80	63С	-24
3	17	1	1,5	5	1	21	F80	63С	-59
4	21	1	1,5	5	1,2	22	F80	63С	-80
5	17	1	1,5	5	1,0	32	F80	63С	-101
6	35	1	1,5	5	1,2	22	F80	63С	-93
7	17	1	3	5	1	21	F80	63С	-49
8	17	1	1	1	1	8	F80	63С	-55

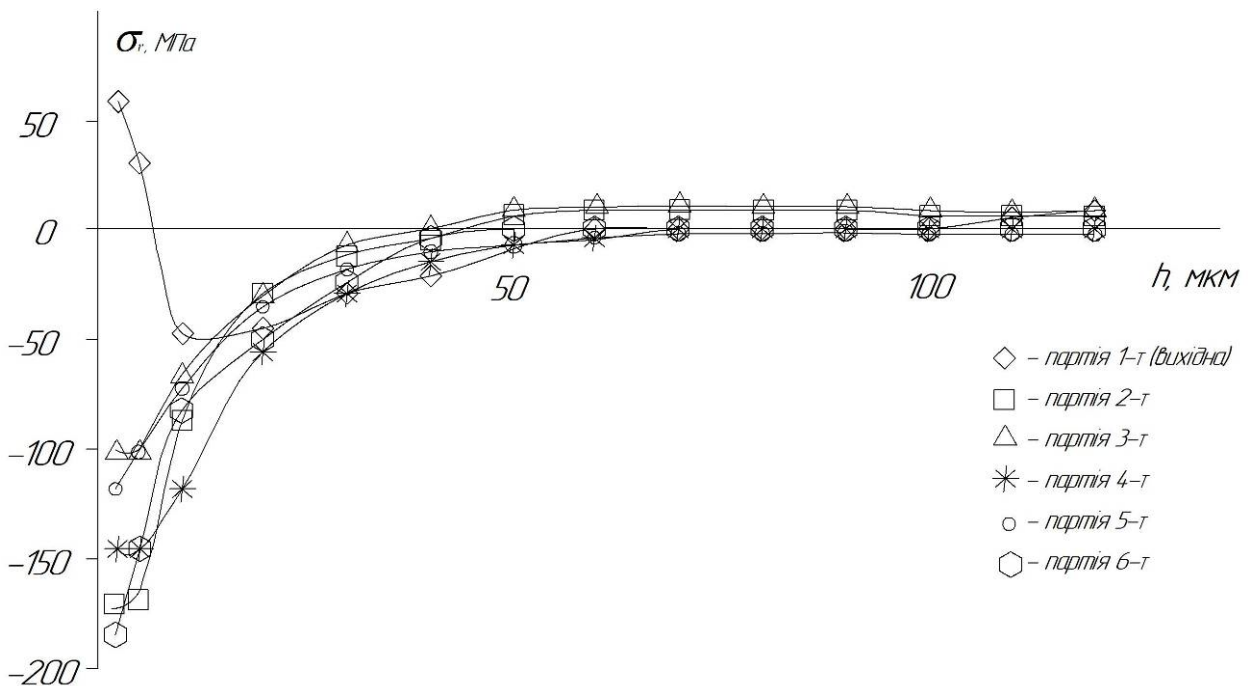


Рис. 3.12. Епюри залишкових напружень зразків з титанового сплаву ВТ8-М

**Залишкові напруження партій зразків з титанового сплаву ВТ8-М**

№ партії	Режими обробки				Характеристики інструменту				$\sigma_r$ , МПа
	$V$ , м/с	$S$ , м/хв	$i$ , мм	$N$ , подв. х	$dв$ , мм	$L$ , мм	зернистість	матеріал абразиву	
1-т	Контрольна партія, після відпалу (вихідна)								+57
2-т*	17	1	1,5	5	1	8+21	F80	63С	-170
3-т	17	1	1,5	5	1	8	F80	63С	-98
4-т	17	1	1,5	5	1	21	F80	63С	-146
5-т	17	3	1,5	5	1	21	F80	63С	-125
6-т	35	1	1,5	5	1	21	F80	63С	-182

Примітка: \* (зразок піддавали подальшій полімерно-абразивній обробці «м'якою» ПАЩ (з режимами  $V=18$  м/с;  $i=1,5$  мм;  $S=1$  м/хв;  $N=3$  подв.х.;  $L=21$  мм; ЗОТС).

Частину нікелевих зразків було виготовлено з полотна серійного диска компресора після точіння і полірування на полірувальній установці фетровим полірувальником з абразивною пастою за серійною технологією. Розтягуючі напруження, що залишились після цього, як прояв негативної технологічної спадковості, вдалося значно зменшити відпалом, проте повністю обнулити її не вдалося. Після обробки ПАЩ (рис. 3.13), тільки на глибині до 20 мкм зафіксували напруження стиснення, наведені ПА щітками, на глибині більше 40...100 мкм, вони залишились незмінними.

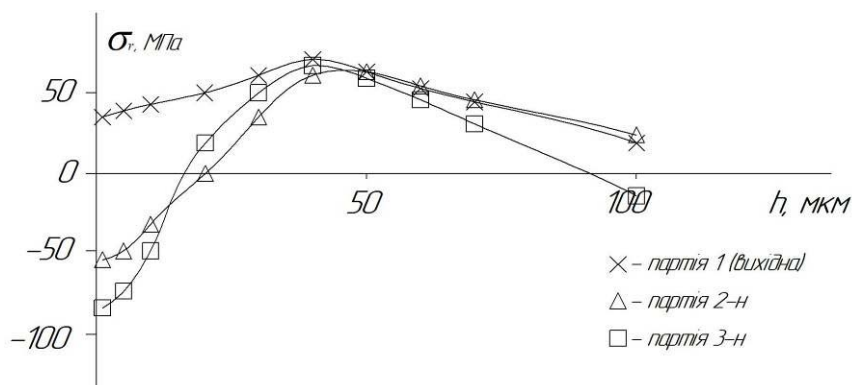


Рис. 3.13. Епюри залишкових напружень зразків з нікелевого сплаву  
ЭИ698-ВД

Таблиця 3.3 –

**Залишкові напруження партій зразків з нікелевого сплаву  
ЭИ698-ВД**

№ партії	Режими обробки				Характеристики інструменту				$\sigma_r$ , МПа
	$V$ , м/с	$S$ , м/хв	$i$ , мм	$N$ , подв. х	$d_{в}$ , мм	$L$ , мм	зернистість	матеріал абразиву	
1-н	Контрольна партія, після відпалу (вихідна)								+38
2-н	17	1	1,5	5	1	21	F80	63С	-55
3-н	17	1	1,5	5	0,6	32	F180	63С	-76

Слід зазначити, що невелика силова дія ПАЩ при обробці дає можливість покращувати шорсткість раніше зміцнених поверхонь без значної зміни вже досягнутого за допомогою ППД напружено-деформованого стану поверхневого шару [78]. Досліджували розподіл залишкових напружень (рис. 3.14) двох партій зразків з нікелевого сплаву ЭИ698-ВД, оброблених ультразвуковим зміцненням (УЗУ сталевими кульками  $\varnothing 0,68$  мм) для отримання значних стискуючих залишкових напружень на відносно великій глибині. Одна партія була залишена в якості контрольної, друга була оброблена ПАЩ на раціональних режимах:

- партія 1 (контрольна): обробка УЗУ;

- партія 2: обробка УЗУ + ПАЩ.

Результати дослідження показали, що після обробки ПАЩ поверхонь, які заздалегідь піддавалися УЗУ, відбувається незначна зміна рівня залишкових напружень. При обробці полімерно-абразивними щітками знімається тонкий шар з нестабільним напружено-деформованим станом – піками або різкими перепадами залишкових напружень. Після обробки ПАЩ (рис. 3.14) розподіл стискуючих залишкових напружень в поверхневому шарі стає більш рівномірним, без перепадів, що сприятливо позначається на експлуатаційних властивостях поверхневого шару [81].

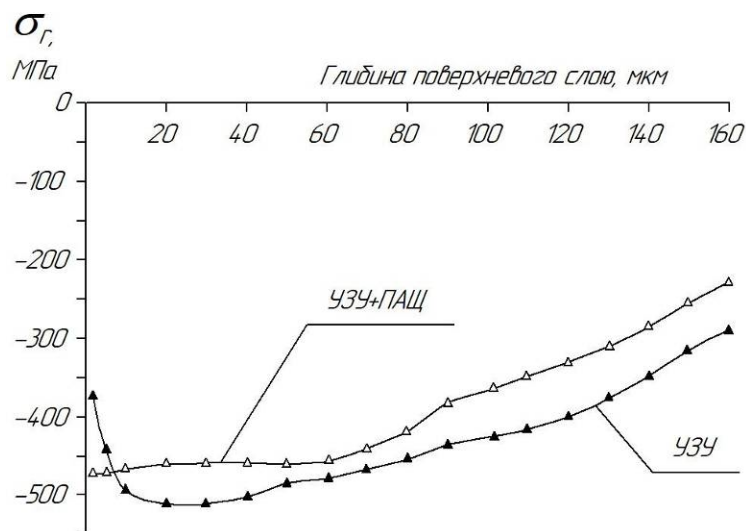


Рис. 3.14. Епюри залишкових напружень зміцнених зразків

В цілому встановлено, що фінішна обробка дисковими полімерно-абразивними щітками не розміцнює поверхневий шар обробленої деталі, а наводить в ньому сприятливі властивості.

### 3.4 Статистична обробка результатів експериментів

Чинники, що впливають на якість поверхні при обробці полімерно-абразивними інструментами, можна об'єднати в дві групи:

I група: параметри інструменту (діаметр волокон  $d_s$ , виліт волокон  $L$ , зернистість абразиву  $F$ );

II група: режими (подача  $S$ , швидкість різання  $V$ , натяг  $i$ , кількість подвійних ходів  $N$ , наявність ЗОТС).

Статистичний розрахунок був виконаний за допомогою розрахункового пакету «Statistica».

Діапазони варійованих чинників для зразків із сталі 3:

- діаметр полімерного волокна  $d_s=0,6\dots1,2$  мм;
- довжина виліту волокна  $L=8\dots32$  мм;
- зернистість абразиву  $F=90\dots320$ ;
- швидкість різання  $V=10\dots35$  м/с;
- подача  $S=0,5\dots16$  м/хв;
- натяг  $i=1\dots6$  мм;
- кількість подвійних ходів  $N=1\dots15$  подв.х.;
- ЗОТС – Амініл СР 2%.

Досліджені параметри якості поверхні:

- величина «уточнення» шорсткості  $\varepsilon_{Ra}$  – відношення початкового значення  $Ra$  шорсткості зразка до значення, отриманого після обробки (показує величину поліпшення шорсткості поверхні; введений через різні значення початкової шорсткості зразків).

- ступінь наклепу  $S_H$  (%) – величина локального зміцнення поверхневого шару.

Кількість експериментальних даних щодо залишкових напружень  $\sigma_r$  поверхні було недостатньо для проведення повноцінної статистичної обробки.

*Величина «уточнення» шорсткості  $\varepsilon_{Ra}$  поверхневого шару.*

Аналіз статистичних даних I групи [82], [83] показує, що величина виліту волокна  $L$  не корелює з іншими параметрами ПАЩ (діаметром волокна  $d_s$  і зернистістю), вона – незалежна. Спостерігається лінійний зв'язок між діаметром волокна  $d_s$  і величиною зерна  $F$  – вони залежні; це пояснюється

умовами виготовлення полімерно-абразивних волокон – чим менше діаметр волокон, тим дрібніше абразивне зерно (знак «мінус» в даному випадку (таб. 3.4) з'явився у зв'язку з особливістю позначення зернистості абразиву – чим менше величини зерна, тим більше числове позначення зернистості).

Математична обробка чинників II групи показала, що статистично вагомими є швидкість  $V$  і кількість подвійних ходів  $N$ . Інші чинники впливають з різною мірою значущості. Між собою чинники II групи не корелюють (табл. 3.4). Негативне значення коефіцієнта вказує на зниження «поліпшення»  $\varepsilon_{Ra}$  зі збільшенням значення чинника.

Попередні експерименти показали нелінійний вид залежностей  $\varepsilon_{Ra}$  від натягу  $i$  і подачі  $S$ . Тому коефіцієнти кореляції їх невисокі. Для знаходження оптимуму застосували центральний композиційний план, як варіант повного факторного експерименту  $2^k$  для двох чинників. Кількість дослідів складає  $2^2=4$ , 5 реплік в центральній точці і 4 «зоряних» точки за межами  $[-1; +1]$ ; всього 13 дослідів (табл. 3.5).

Отримані при дисперсному аналізі коефіцієнти регресії створеної моделі (рис. 3.15) показують, що лінійна складова  $i$  і квадратична складова  $S$  мають невисокий вплив на відгук системи. Проте при виключенні їх з моделі точка максимуму зміщується, тому модель було залишено в повному вигляді ( $R=0,92$ )

$$\varepsilon_{Ra}=3,372+0,5\cdot i-0,215\cdot i^2-0,417\cdot S+0,017\cdot S^2+0,036\cdot i\cdot S. \quad (3.1)$$

Таблиця 3.4 –

**Коефіцієнти парної кореляції між досліджуваними чинниками**

	<i>S</i>	<i>V</i>	<i>i</i>	<i>N</i>	<i>ЗОТС</i>	<i>dв</i>	<i>F</i>	<i>L</i>	$\varepsilon_{Ra}$
<i>S</i>	1,00	-0,06	-0,13	-0,23	-0,11	0,05	-0,10	-0,09	-0,35
<i>V</i>		1,00	-0,11	0,09	-0,12	0,33	-0,12	-0,02	<b>0,58</b>
<i>i</i>			1,00	-0,09	0,48	-0,04	0,01	0,01	-0,15
<i>N</i>				1,00	-0,19	-0,07	0,14	0,07	<b>0,58</b>
<i>ЗОТС</i>					1,00	0,09	-0,18	0,36	0,07
<i>dв</i>						1,00	<b>-0,92</b>	0,07	0,39
<i>F</i>							1,00	-0,10	-0,25
<i>L</i>								1,00	0,30
$\varepsilon_{Ra}$									1,00

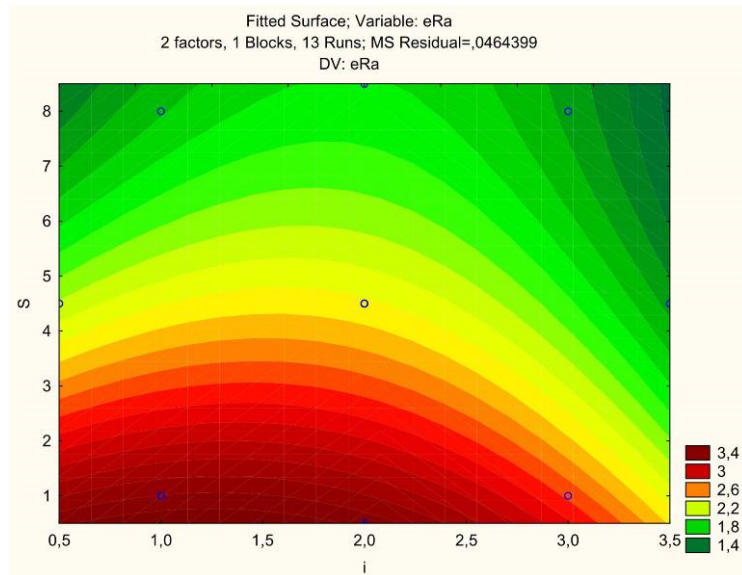
Таблиця 3.5 –

**Результати вимірів і розрахунку  $\varepsilon_{Ra}$** 

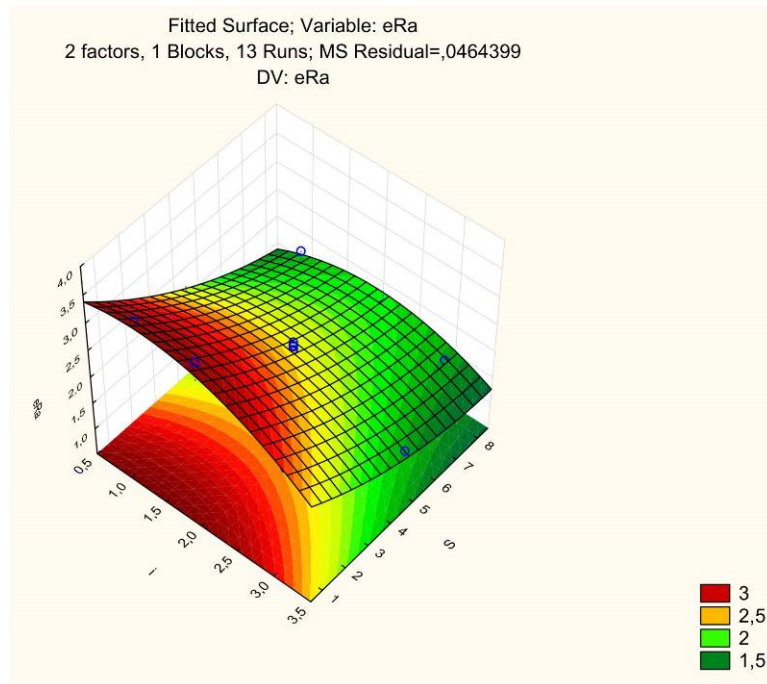
№ дослідю	Натяг <i>i</i> , мм	Подача <i>S</i> , м/хв	$\varepsilon_{Ra}$
1	1/-1	1/-1	3,28
2	1/-1	8/+1	1,94
3	3/+1	1/-1	2,41
4	3/+1	8/+1	1,58
5	2	4,5	2,27
6	2	4,5	2,33
7	2	4,5	2,35
8	2	4,5	2,24
9	2	4,5	2,41
10	0,5	4,5	1,96
11	3,5	4,5	1,73
12	2	0,5	3,62
13	2	8,5	1,58

Regr. Coefficients; Var.:eRa; R-sqr=,92507; Adj:,87156 (Ok_ish Ra.sta) 2 factors, 1 Blocks, 13 Runs; MS Residual=,0464399 DV: eRa						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(7)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	<b>3,372847</b>	<b>0,439404</b>	<b>7,67597</b>	<b>0,000119</b>	<b>2,333822</b>	<b>4,411871</b>
(1)i(L)	0,510212	0,334137	1,52696	0,170610	-0,279896	1,300320
i(Q)	<b>-0,214859</b>	<b>0,073736</b>	<b>-2,91389</b>	<b>0,022535</b>	<b>-0,389217</b>	<b>-0,040501</b>
(2)S(L)	<b>-0,417238</b>	<b>0,102832</b>	<b>-4,05746</b>	<b>0,004825</b>	<b>-0,660397</b>	<b>-0,174078</b>
S(Q)	0,016653	0,008756	1,90185	0,098936	-0,004052	0,037357
1L by 2L	0,036429	0,030786	1,18330	0,275315	-0,036368	0,109225

a)



б)



в)

Рис. 3.15. Коefіцієнти регресії моделі і її візуалізація

Також «Statistica» дає можливість визначити критичні значення (локальний максимум):  $i=1,27$  мм,  $S=0,5$  м/хв ( $\varepsilon_{Ra}=3,32$ ). Через те, що на подачі  $S=0,5$  м/хв можливе перегрівання щітки, тому раціональним значенням приймаємо найближче до нього значення  $S=1$  м/хв. Раціональну величину  $i$  задаємо діапазоном 1...1,5 мм (рис. 3.15).

*Величина поверхневого наклепу  $S_H$ .*

Первинний аналіз статистичних даних чинників I групи і величини їх впливу на  $S_H$  також показує, що величина виліту волокна  $L$  не корелює з величинами діаметру волокна  $d_\varepsilon$  і зернистістю  $F$ , вона – незалежна, і має великий вплив на  $S_H$  (табл. 3.6). Також статистично вагомою є швидкість  $V$ . Менш значимою виявилася кількість подвійних ходів  $N$ . Спостерігається чіткий зв'язок між діаметром волокна  $d_\varepsilon$  і значенням зернистості  $F$  – вони взаємно залежні за умовою виготовлення полімерно-абразивних волокон. Ці параметри незначно впливають на  $S_H$ .

Таблиця 3.6 –

### Коефіцієнти парної кореляції

	$S$	$V$	$i$	$N$	$30TC$	$d_\varepsilon$	$F$	$L$	$S_H$
$S$	1,00	-0,06	-0,13	-0,21	-0,11	0,04	-0,09	-0,01	-0,27
$V$		1,00	-0,11	0,11	-0,17	0,32	-0,09	0,10	0,51
$i$			1,00	-0,09	<b>0,35</b>	-0,04	0,01	-0,03	-0,07
$N$				1,00	-0,30	-0,09	0,17	0,25	<b>0,45</b>
$30TC$					1,00	0,13	-0,25	<b>-0,45</b>	-0,22
$d_\varepsilon$						1,00	<b>-0,92</b>	-0,05	<b>0,35</b>
$F$							1,00	0,12	-0,21
$L$								1,00	<b>0,71</b>
$S_H$									1,00

Таким чином можна зробити висновок, що за ступенем впливу на якість поверхні і поверхневого шару режими і параметри ПАЩ розташовуються таким чином:  $L$  – виліт волокон, характеризує жорсткість інструменту;  $V$  – швидкість обробки, регулює динамічну складову і кількість активних волокон в одиницю часу на одиницю площі поверхні зразка;  $N$  – кількість подвійних ходів – тривалість обробки;  $d_s$  – діаметр волокна, з однією сторони жорсткість інструменту, з іншої – величина і кількість абразивних зерен в роботі;  $S$  – подача, характеризує тривалість контакту одиничної площі поверхні з інструментом;  $i$  – натяг – величина притиснення ПАЩ до оброблюваної поверхні; наявність ЗОТС побічно впливає на показники шорсткості і наклепу.

В результаті проведених експериментів для досліджених матеріалів були встановлені раціональні режими, умови обробки і параметри ПАЩ, які були використані для розробки технологічних рекомендацій.

### **3.5 Оцінка рівня шаржування обробленої поверхні**

Як відомо, при застосуванні абразивних методів обробки відбувається таке явище, як шаржування – вдавлювання абразивних зерен або їх частин інструменту в оброблювану поверхню деталей. Особливо інтенсивно це відбувається при великих контактних зусиллях – при шліфуванні, поліруванні твердими полірувальниками, піскоструминному методі обробки, в псевдозрідженому шарі абразиву тощо. Наявність в поверхневому шарі деталі значної кількості вдавлених часток може змінювати його фізичний стан і стабільність його властивостей через зони підвищеної локальної деформації на межі розділу «включення-матриця» [84]. Вдавлені в поверхню гострі абразивні частинки сприяють збільшенню мікродеформацій на локальних ділянках і підвищенню місцевої концентрації напружень, яка може зростати до критично небезпечного рівня при дії навантажень, що циклічно змінюються, і ініціювати зародження мікротріщин. При підвищених

навантаженнях в експлуатації можливе розтріскування поверхні в зонах концентрації напружень, втомне багатоциклове або малоциклове руйнування з очагами в цих зонах [85], що неприпустимо для особливовідповідальних і складнонавантажених деталей.

Оскільки обробка полімерно-абразивними щітками є остаточною, то представляє інтерес ступінь шаржування поверхні частками абразиву.

Зернистість ПАЩ, що досліджували, – F320...F80, тобто величина абразиву не перевищує 200 мкм. Режими обробки змінювали в раніше вказаних діапазонах. Матеріал зразків – нікелевий сплав ЭИ698-ВД.

Стандартна перевірна процедура, проведена за допомогою люмінісцентного контролю (на установці ЛЮМА-1ОВ) показала відсутність шаржування великими частками абразиву після обробки ПА щітками.

Подальше дослідження на оптичному мікроскопі при великому збільшенні (п. 2.2.5) підтвердило, що вловлювання великих часток величиною 0,1...0,2 мм не відбувається зовсім. Розмір виявлених вдавлених часток і їх слідів складала 5...30 мкм (рис. 3.16). Їх розподіл по поверхні був відносно рідкісним 1-2 частки на 2 поля зору.



Рис. 3.16. Впроваджені абразивні частки ( $\times 185$ )

Відносна площа, яку займають включення, дуже мала, вона складала 0,002...0,01% (для порівняння при турбоабразивній обробці, що називається також ПСА – обробка в псевдозрідженому шарі абразиву) – 0,51% для цього ж матеріалу [86].

Невисокої силової і температурної дії пружної основи полімерних волокон і абразивних часток на поверхню зразка недостатньо для глибокого втискування часток в поверхню.

### **3.6 Оцінка якості видалення задирок і заокруглення гострих крайок**

Одним із складних технологічних завдань фінішної обробки є її слюсарна складова – видалення задирок і скруглення гострих кромок, особливо, якщо кромки мають складну геометричну форму. Розроблено безліч методів [8], які з різним ступенем точності і якості виконують поставлені завдання. Проте все ще є високим відсоток ручної праці, задіяної при виконанні цієї роботи, яка часто вимагає ювелірної точності, неослабної уваги, є монотонною і викликає швидке стомлення робітника. Тому актуальним залишається питання вивчення інструментів, подібних ПАЩ, здатних полегшити виконання таких слюсарних операцій, зменшити частку ручної праці або повністю її виключити.

Завдяки пружним волокнам ПА щіток забезпечується обробка важкодоступних кромок, рівномірна обробка частин, що виступають, без додаткового зносу інструменту і без утворення нових вторинних задирок. У великих масштабах виробництва ПАЩ можна профілювати – заздалегідь надати їй форму профілю оброблюваної поверхні. Для цього нагрівальний елемент (п. 2.3.2) повинен мати профіль фасонної поверхні деталі. В цьому випадку досить провести профілізацію один раз, далі збереження цього профілю забезпечується рівномірним зносом ПАЩ.

Можна використовувати ПАЩ в ручних машинках, на універсальних верстатах типу плоскошліфувальних, на заточних верстатах або на багато координатних верстатах з ЧПК.

За ступенем складності виконання і поставленої мети задачу можна розділити на дві:

- швидке видалення задирок. При цьому обумовлюється тільки розмір отриманої на країці фаски або радіуса заокруглення. Мета – відсутність задирки; форма остаточної фаски або радіуса заокруглення не має значення;

- видалення задирок, заокруглення гострих крайок тільки радіусом певної форми і розміру. Мета – отримання правильного радіусу заокруглення заданого розміру.

Для досліджень на плоских зразках наводили задирки різного розміру – фрезеруванням 0,5...0,8 мм, шліфуванням 0,1...0,2 мм. Потім обробляли дисковими ПАЩ на плоскошліфувальному верстаті, затискаючи зразки в лещатах [87].

Зразок (рис. 2.1) встановлювали горизонтально (рис. 3.17) поверхню обробки паралельно столу верстата, тобто кут  $\alpha=0$ , а поверхня із задиркою – під  $90^\circ$  до напрямку подачі. На поверхні з одного боку зразка проводили два досліді.

При такій установці зразка один прохід ПА щітки включав обробку задирки (чи гострої крайки) на вході, потім плоскої поверхні і гострої крайки на виході.

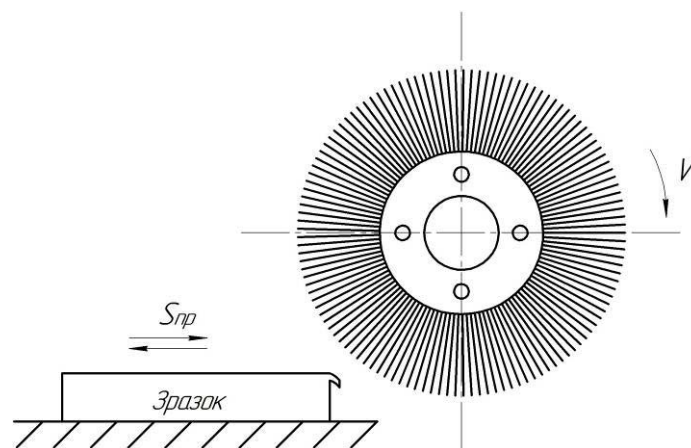


Рис. 3.17. Схема обробки зразка, встановленого паралельно площини столу верстата ( $\alpha=0$ )

Проводили однофакторні експерименти зміни технологічних чинників (рис. 3.18-3.19) в діапазонах: подача  $S=0,5...3$  м/хв, натяг  $i=0,5...4$  мм,

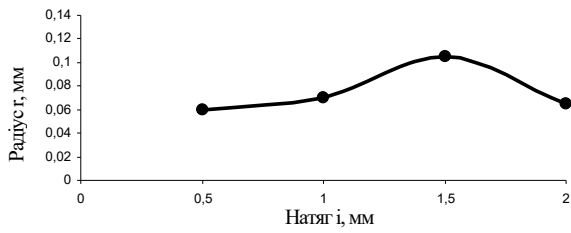
кількість подвійних ходів  $N=1...10$  подв.х. і виліт полімерно-абразивних волокон – «жорсткий» інструмент з вилітом  $L=12$  мм і «м'який» – з вилітом  $L=32$  мм. Окружна швидкість 17 м/с, ЗОТС не використовували. Контроль отриманих радіусів заокруглення проводили згідно з методикою п.2.2.2.

Обробка «жорсткою» ПАЩ ( $L=12$  мм) показала високу продуктивність видалення задирок і наведення радіуса заокруглення величиною не більше 0,12 мм (рис. 3.18 а, б, в), а «м'якою» ПАЩ не більше 0,3 мм (рис. 3.18 г, д, е). Однак всі експерименти при варіюванні різними режимами обробки показали, що радіус заокруглення був «завалений» – у вигляді подвійної округленої фаски, в бік колишньої задирки (рис. 3.19).

Слід зазначити, що при такій установці зразка обробляється вся по-поверхня і прилеглі кромки, тому ПАЩ в двох експериментах (при  $S=0,5$  м/хв і  $N=10$  подв.х.) перегрівалася і залишає плівку полімеру на зразку, тому ці режими було виключено.

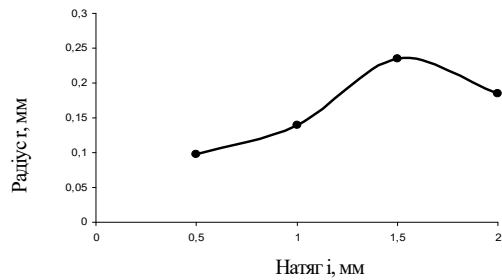
Отже, в разі, коли не важлива форма радіуса заокруглення, а необхідно швидко позбутися задирок і трохи заокруглити гострі крайки після фрезування або протягування, то годі й витрачати час і кошти на виставлення деталі на певний кут. Достатньо обробити її з наступними, встановленими вище режимами ( $\alpha=0$ ): виліт волокон  $L=30...35$  мм, натяг  $i=1,5$  мм, подача  $S=1$  м/хв,  $N=1...5$  подв.х.

Продовживши пошук такого положення крайок з задиркою, яке забезпечувало б правильну форму радіуса заокруглення, що наводиться після зняття задирок, попередньо досліджували форму радіуса заокруглення при отриманих вище режимах: натяг  $i=1,5$  мм, подача  $S=1$  м/хв,  $N=5$  подв.х. на зразках, встановлених під різними кутами  $\alpha$  до площини столу верстата. Найбільш правильну форму радіусу забезпечувала установка з  $\alpha=10^{+3^\circ}$  (рис. 3.20). Площина задирки розташовується під кутом  $77...80^\circ$  до напрямку подачі інструменту.



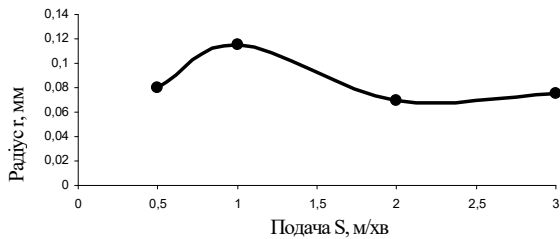
$S=1$  м/хв;  $N=5$  подв.х.;  $L=12$  мм

а)



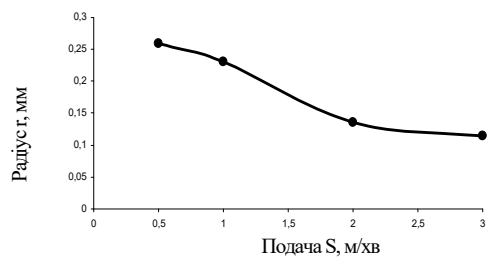
$S=1$  м/хв;  $N=5$  подв.х.;  $L=32$  мм

г)



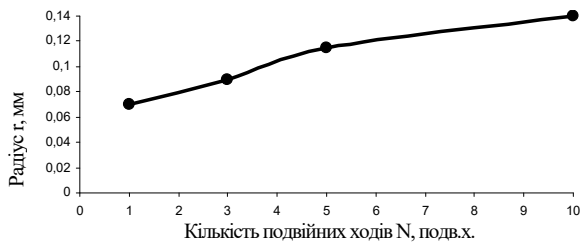
$i=1,5$  мм;  $N=5$  подв.х.;  $L=12$  мм

б)



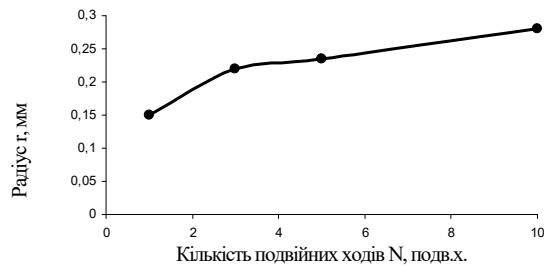
$i=1,5$  мм;  $N=2$  подв.х.;  $L=32$  мм

д)



$i=1,5$  мм;  $S=1$  м/хв;  $L=12$  мм

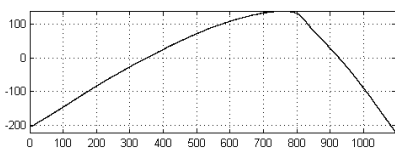
в)



$i=1,5$  мм;  $S=1$  м/хв;  $L=32$  мм

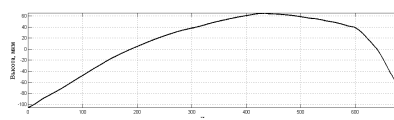
є)

Рис. 3.18. Залежність радіуса заокруглення від натяга (а, г), подачі (б, д) та кількості подвійних ходів (в, є) при встановленні зразка з  $\alpha=0$



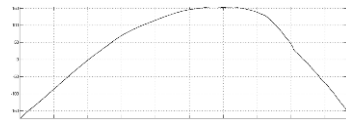
$i=1,5$  мм;  $S=1$  м/хв;  
 $N=1$  подв.х.;  $L=12$  мм

а)



$i=3$  мм;  $S=1$  м/хв,  
 $N=5$  подв.х.;  $L=12$  мм

б)



$i=1,5$  мм;  $S=1$  м/хв,  
 $N=5$  подв.х.;  $L=32$  мм

в)

Рис. 3.19. Профіль – форма радіуса заокруглення після обробки ПАЩ ( $\alpha=0$ )

Після визначення раціонального кутового положення крайки було проведено весь комплекс однофакторних експериментів (зміна  $i$ ,  $S$ ,  $N$ ,  $L$ ) з метою уточнення параметрів і умови обробки.

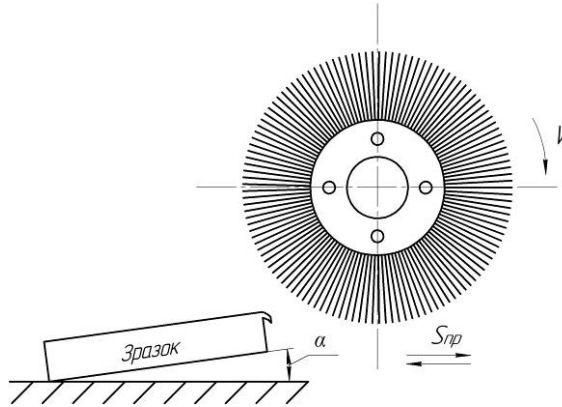


Рис. 3.20. Схема обробки зразка, встановленого під кутом  $\alpha=10^\circ$  до поверхні столу верстата

Обробка «жорсткою» ПАЩ при всіх досліджених і найбільш сприятливих режимах ( $i=1,5$  мм,  $S=1$  м/хв,  $N=5$  подв.х.) забезпечує величину радіуса заокруглення не більше 0,18 мм практично правильної форми (рис. 3.21, 3.22).

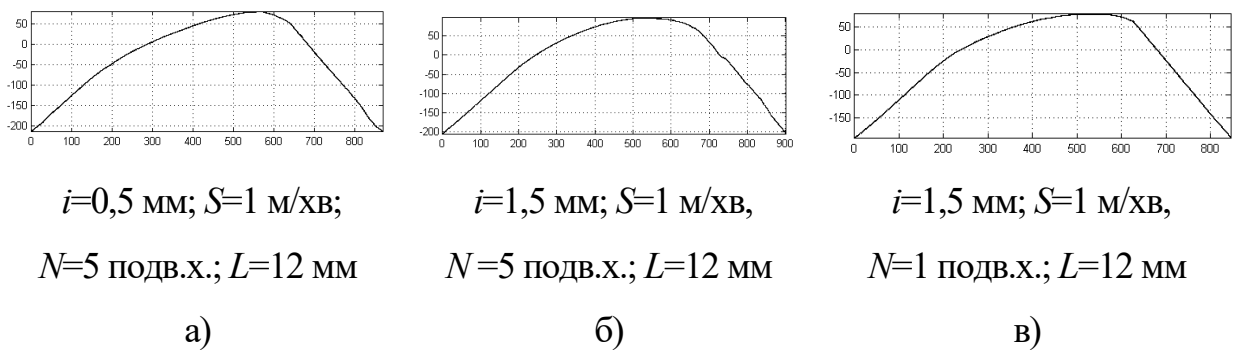


Рис. 3.21. Профіль заокруглення після обробки «жорсткою» ПАЩ ( $\alpha=10^\circ$ )

«М'яка» ПАЩ при установці зразка під кутом  $\alpha=10^\circ$  показала найкращі результати (рис. 3.23, 3.24).

При натязі 0,5 і 1 мм задирок видалявся повністю, радіус заокруглення мав неправильну форму, і становив 0,15...0,19 мм (рис. 3.23, а); при  $i=1,5...2$  мм отримали радіус 0,4...0,45 мм практично правильної форми (рис. 3.23, б). Натяг більше 2,5 мм

не призводить до збільшення радіуса, тому що зростає відсоток ковзання бічними поверхнями волокон, тому якість обробки нестабільна. Натяг 1,5...2 мм вважаємо раціональним.

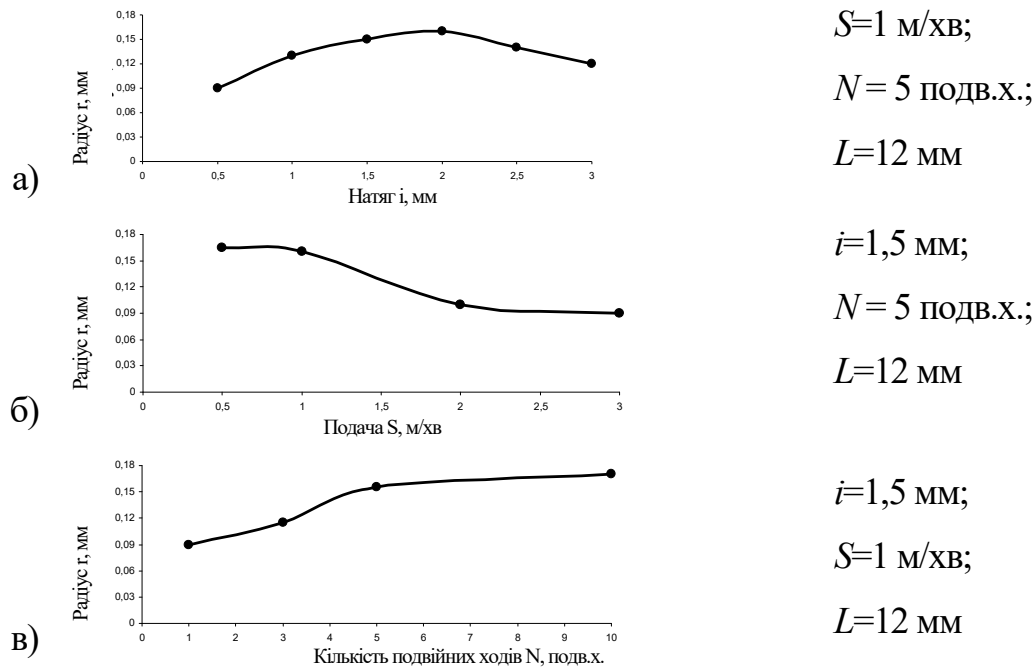


Рис. 3.22. Залежність радіусу заокруглення від натягу  $i$  (а), подачі  $S$  (б) і кількості подвійних ходів  $N$  (в) при обробці «жорсткою» ПАЩ та встановлення зразка під кутом  $\alpha=10^\circ$

Подача менше 1 мм супроводжується перегріванням волокон. Подача  $S=1$  мм забезпечує видалення задирок і зняття гострих кромки радіусом заокруглення 0,4...0,44 мм правильної форми; при  $S=2$  мм –  $R$  0,2...0,25 мм досить правильної форми; при  $S=3$  мм –  $R$  0,16...0,28 мм, величина радіусу нестабільна. Подачу  $S=1$  мм вважаємо раціональною.

За 1 подвійний хід ПАЩ видаляє весь задирок і формує радіус заокруглення величиною 0,12...0,15 мм. Форма радіуса – злегка завалена (рис. 3.23, в). П'ять подвійних ходів забезпечують зняття радіусу заокруглення  $R$  0,4...0,43 мм правильної форми. Після 10 подвійних ходів радіус заокруглення досягає 0,45 мм і форма його правильна.

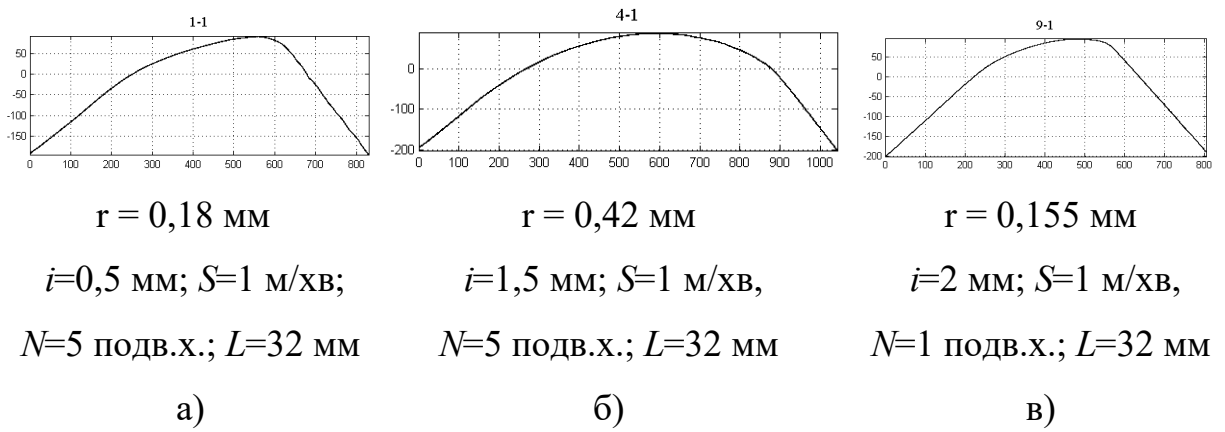


Рис. 3.23. Профіль заокруглення після обробки «м'якою» ПАЦ ( $\alpha=10^\circ$ )

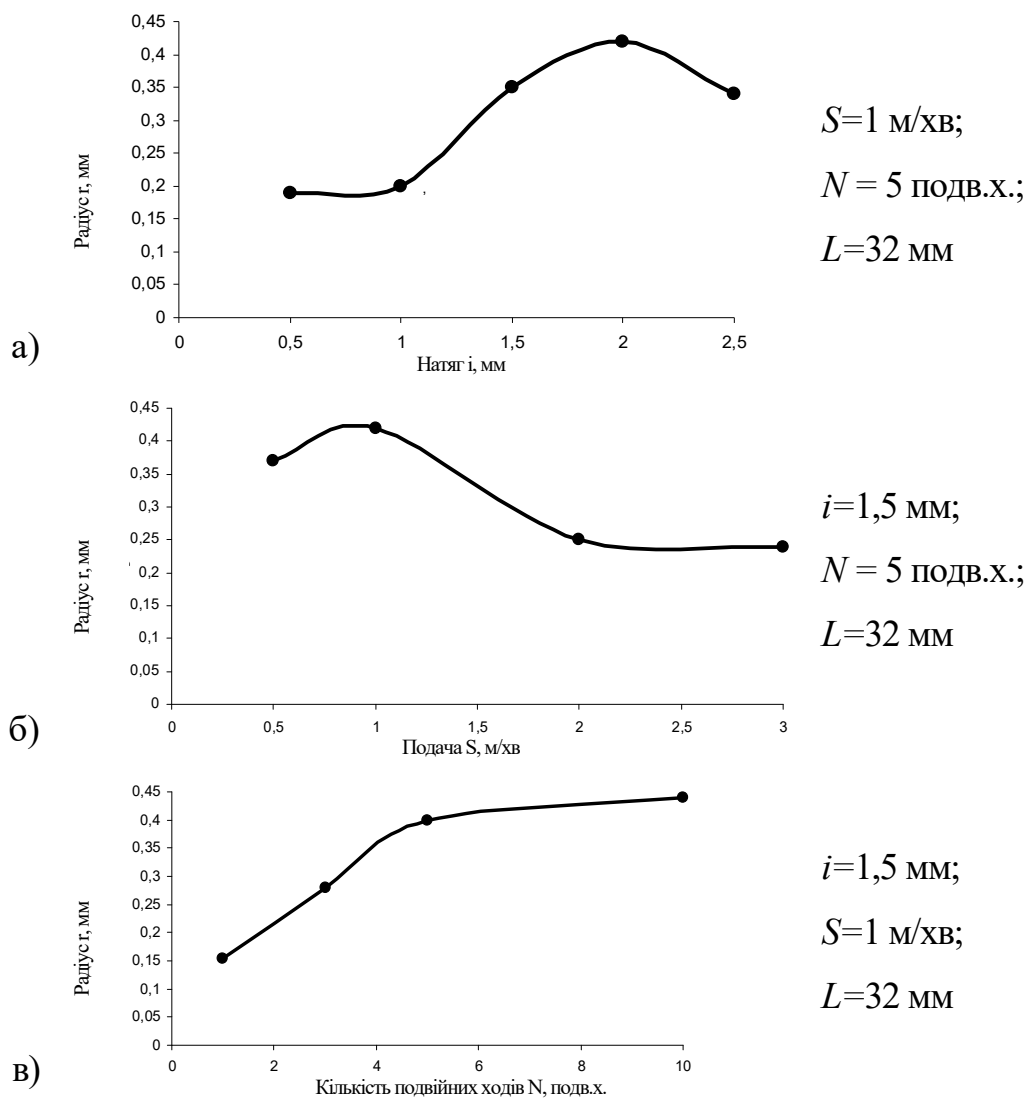


Рис. 3.24. Залежність радіусу заокруглення від натягу  $i$  (а), подачі  $S$  (б) і кількості подвійних ходів  $N$  (в) при обробці «м'якою» ПАЦ та встановленні зразка під кутом  $\alpha=10^\circ$

Таким чином, найкращим варіантом видалення задирок і заокруглення гострої кромки отриманням радіуса заокруглення правильної форми раціонально використовувати «м'який» інструмент ( $L=30...35$  мм) з режимами: натяг  $i=1,5...2$  мм, подача  $S=1$  м/хв,  $N=5$  подв.х., швидкість  $V=17$  м/с. При цьому площа з задиркою повинна складати  $77...80^\circ$  до напрямку подачі інструменту [83].

Дані результати, отримані на сталі 3, було повністю підтверджено на нікелевих і алюмінієвих сплавах. Титанові сплави ВТ3, ВТ8-М дали аналогічні результати, але при робочій окружній швидкості  $6...10$  м/с.

### 3.7 Висновки

1. В результаті дослідження впливу режимів і умов обробки, а також параметрів ПАЩ на одержувану шорсткість поверхні було визначено раціональні режими обробки і параметри ПАЩ відповідно до поставленої мети фінішної обробки (виліт  $L$  і діаметр  $d_e$  волокон, зернистість  $F$  і матеріал абразиву ПАЩ; подача  $S$ , натяг  $i$ , швидкість  $V$  і кількість подвійних ходів  $N$ , ЗОТС) для зразків з різних матеріалів, а також для комбінованої обробки ПАЩ.

2. Встановлено наявність зміцнюючого ефекту – наведення сприятливих властивостей поверхневого шару на глибині до  $20...50$  мкм при обробці дисковими ПАЩ на раціональних режимах: ступінь поверхневого наклепу досягала  $12...15\%$ , стискаючі залишкові напруження  $-175...-40$  МПа.

3. Статистична обробка отриманих даних підтвердила раніше передбачувану відмінність впливу ПАЩ з різним вилітом волокон – коротким ( $L=8$  мм) і довгим ( $L=32$  мм). Визначено режими, варіюючи якими можна значно впливати на параметри якості поверхневого шару – за значимістю: натяг  $i$ , швидкість  $V$ , подача  $S$ .

4. Оцінка ступеня шаржування поверхні неметалічними включеннями

після обробки ПАЩ показала, що невисокого силового і теплового впливу ПА волокон недостатньо для глибокого вдавнення абразивних частинок в поверхню.

5. За допомогою дослідження якості видалення задирок і заокруглення гострих кромek складних геометричних форм ПА щітками було встановлено раціональні режими ( $V=15...18$  м/с,  $S_{np}=1$  м/хв,  $i=1,5...2$  мм,  $N=3...7$  подв.х.) і параметри ПАЩ ( $L=30$  мм і більше,  $d_s=1$  мм). Для одержання радіуса заокруглення правильної форми необхідно встановити деталь площиною з задиркою під  $77...80^\circ$  до напрямку подачі ПАЩ.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПАЩ

Для збереження працездатного стану полімерно-абразивних щіток, який значною мірою впливає на якість і продуктивність обробки, необхідно встановити температурні обмеження через низьку теплостійкість полімерної основи волокон.

#### **4.1 Дослідження теплових процесів при обробці полімерно-абразивними щітками**

Принциповою відмінністю шліфувального круга (ШК) від ПАЩ є той факт, що при вивченні теплових процесів при шліфуванні не розглядають термостійкість ШК, оскільки абразивні зерна – термостійкі за своєю природою, а зв'язки підібрано так, щоб не послабляти зв'язок з абразивними зернами при високих контактних температурах.

При обробці ПАЩ, абразивні зерна входять до складу полімерного волокна, температура розм'якшення і плавлення якого відносно низька. Це є важливою умовою, яку необхідно враховувати при призначенні раціональних режимів експлуатації полімерно-абразивних щіток.

Полімерно-абразивне волокно з одного (робочого) кінця (рис. 4.1, позиція 1) контактує з оброблюваним виробом, де в результаті тертя і різання відбувається їх нагрів. Температура нагріву волокна може перевищувати температуру його розм'якшення, що призводить до намазування полімерної складової на оброблювану поверхню і до втрати щіткою різальної здатності. З іншого кінця волокна (у точці його закріплення в маточині, рис. 4.1, позиція 2) енергія його деформації при кожному оберті щітки також переходить в тепло,

яке зі збільшенням часу її роботи може призводити до розм'якшення і, можливо, до відриву волокна від маточини.

Оскільки полімерний матеріал у волокнах щіток різних фірм-виробників є комерційною таємницею, і не завжди виробники вказують граничну температуру експлуатації полімерно-абразивних щіток, необхідно знати температуру початку розм'якшення і плавлення полімерно-абразивного волокна, а також вплив режимів обробки на величину контактної температури в зоні обробки.

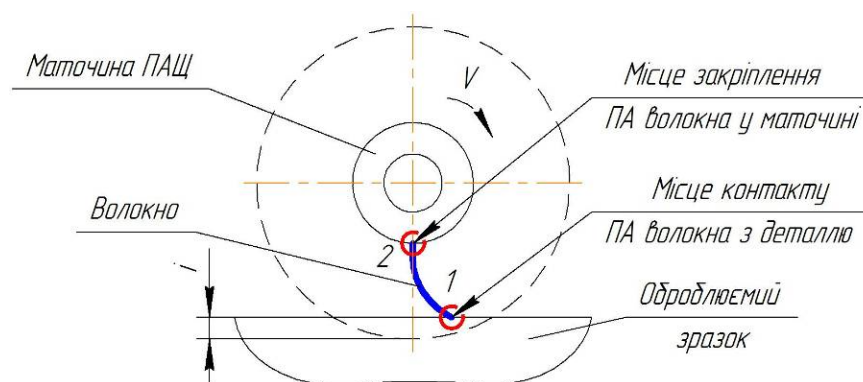


Рис. 4.1. Зони нагріву полімерно-абразивного волокна під час роботи ПАЩ:  
1 – в зоні контакту з оброблюваною деталлю; 2 – в місці закріплення в маточині

#### 4.1.1 Розробка методики і дослідження впливу температури на розм'якшення одиничних полімерно-абразивних волокон

Для визначення температури початку розм'якшення ПА волокна було розроблено спеціальний пристрій, принципова схема роботи якого представлена на рис. 4.2.

Пристрій працює таким чином. Волокно 5, закріплено в гнізді 4. Воно, в свою чергу, встановлено на важелі 3, який за допомогою пружини 6 притискається до нагрівача 8. На початку виміру нагрівач має кімнатну

температуру. У кінці важеля встановлено з початковим зазором  $\delta$  датчик переміщення 10, який в процесі нагріву волокна дозволяє точно фіксувати початок його розм'якшення у момент повороту важеля відносно осі 2.

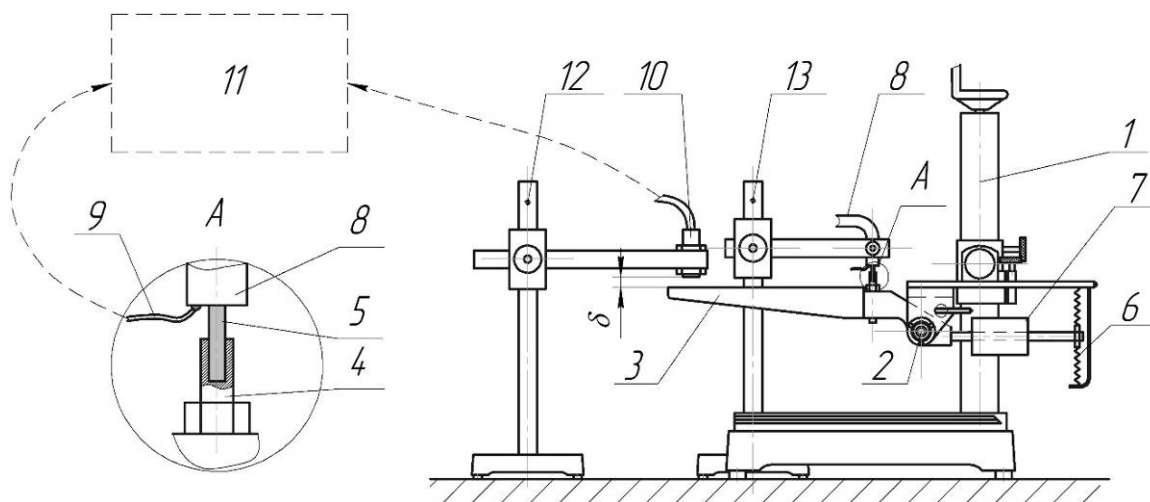


Рис. 4.2. Схема конструкції приладу для визначення температури розм'якшення ПА волокна: 1 – стійка (регулятор сили притиску ПА волокна); 2 – вісь важеля; 3 – важіль; 4 – гніздо; 5 – волокно; 6 – пружина; 7 – противага; 8 – нагрівач; 9 – термопара; 10 – індуктивний датчик; 11 – реєструвальний прилад; 12, 13 – індикаторна стійка

При включенні нагрівача 8, температура в точці дотику з ним волокна поступово підвищується. У момент початку розм'якшення волокна його початкова довжина зменшується і, відповідно, відстань  $\delta$  починає скорочуватися. На рис. 4.3 цей момент показано точкою 1. Оскільки вимір температури ведуть одночасно зі свідченнями датчика переміщення, то можна точно визначити температуру початку розм'якшення. За допомогою багатоканального знімання інформації і обробки її в програмі PowerGraph забезпечується отримання результатів вимірів температури  $T$  і величини зазору  $\delta$  за часом в графічній формі (рис. 4.3).

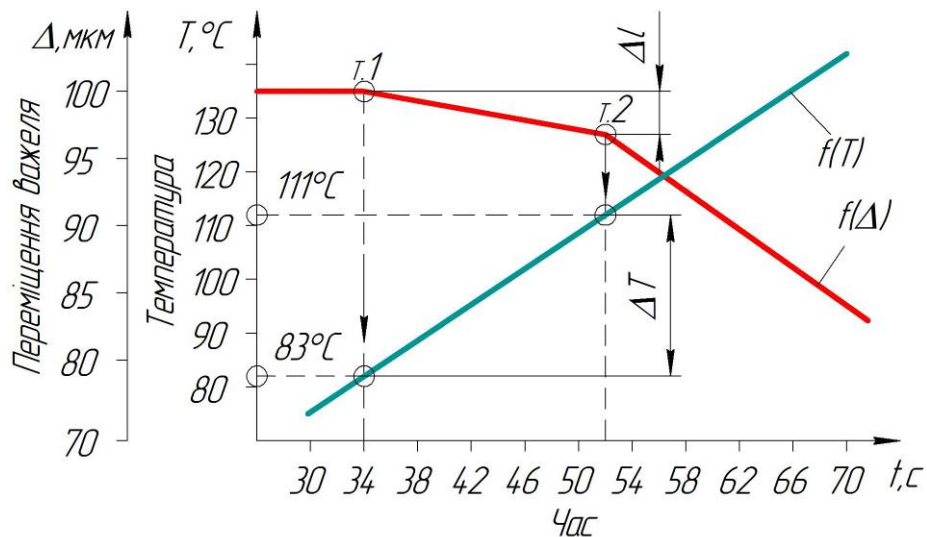


Рис. 4.3. Результати виміру температури початку розм'якшення і початку плавлення одиничного ПА волокна за часом

На рис. 4.3 температура розм'якшення складає  $T_{pe}=83$  °С. При підвищенні температури вище за точку 2, починається інтенсивне зменшення зазору  $\delta$ , через відповідне переміщення важеля  $\Delta$ , що свідчить про плавлення полімерної складової волокна. Таким чином в роботі визначали температуру початку розм'якшення волокна, тобто температуру, що відповідає точці 1 [92].

Умову тарування терморпарі показано на рис. 4.4, а. На рис. 4.4, б приведено тарировочний графік температури  $T$  від вихідної напруги  $U$ , тарировочне рівняння:  $T=55,54U-8,12$ .

На метод і пристрій (рис. 4.5) для виміру температури початку розм'якшення полімерно-абразивного волокна отримано патент України №105954 [93].

За допомогою розробленого пристрою були досліджені ПА волокна з щіток різних фірм-виробників. Проводили 10 дослідів на одному волокні, остаточне значення температури визначали, як середнє арифметичне отриманих показників.

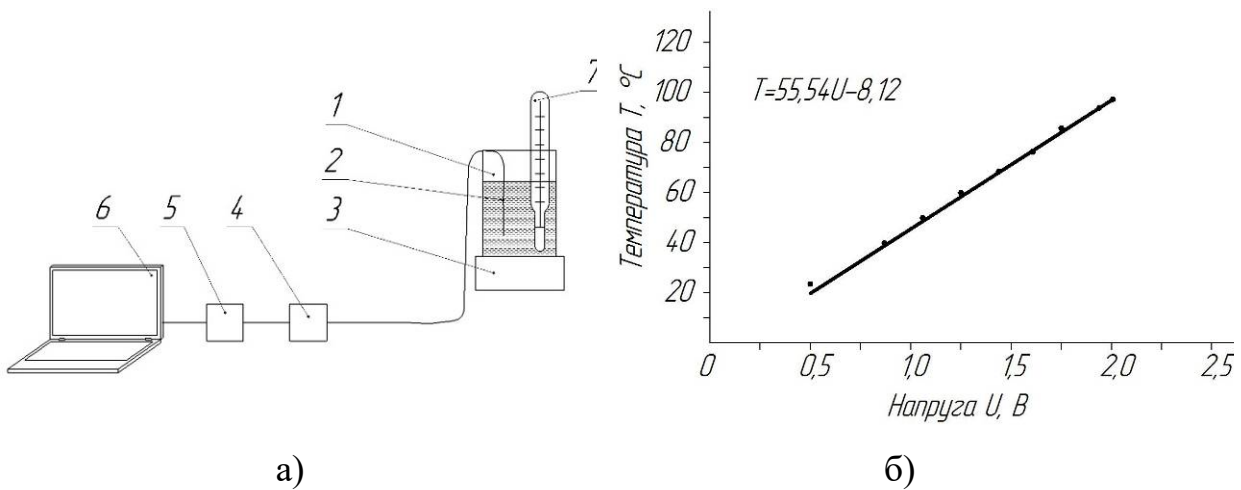


Рис. 4.4. Тарування термопари: а – схема; б – тарувальний графік  $T=f(U)$ :  
 1 – нагрівальна посудина з водою; 2 – термопара хромель-копель (діаметром 0,3 мм); 3 – нагрівальний елемент; 4 – підсилювач; 5 – АЦП; 6 – ПК;  
 7 – термометр

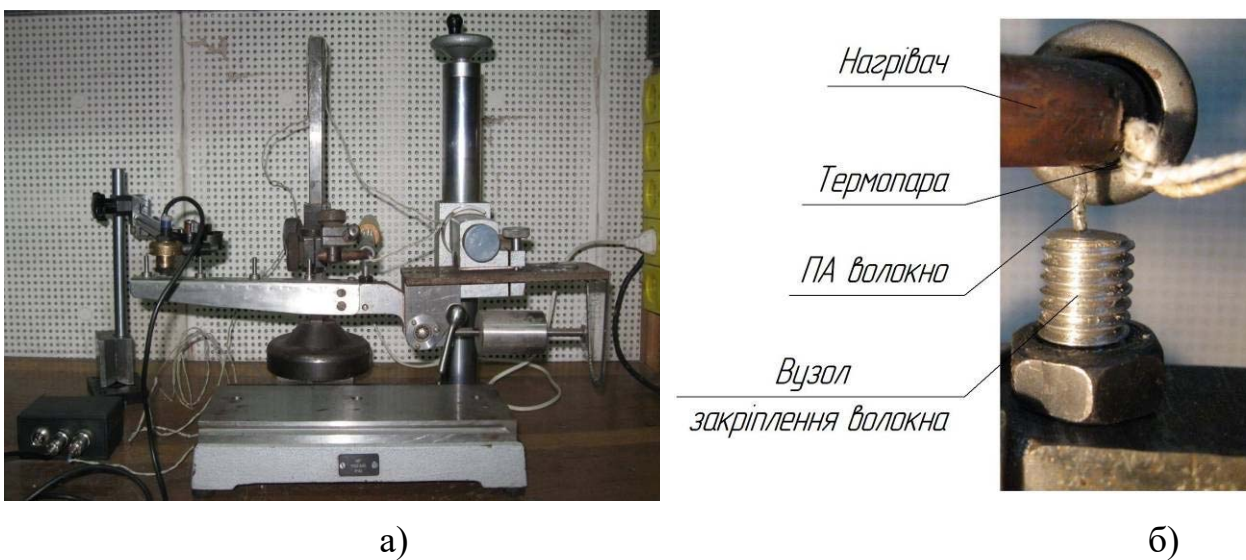


Рис. 4.5. Пристрій для виміру температури розм'якшення ПА волокна: а) загальний вигляд; б) вузол закріплення і нагріву ПА волокна





Результати вимірів температур початку розм'якшення ПА волокон (табл. 4.1, рис. 4.6) показали, що волокна ПАЩ, що випускаються фірмою «Osborn» (Німеччина), значно – до двох і більше разів – перевершують по теплостійкості ПА волокна, що випускаються фірмою «Піран'я» (Україна). Середнє значення температури початку розм'якшення у ПА волокон фірми

«Osborn» складали від 78 до 117 °С, а для фірми «Піран'я» 51–52 °С. Така значна різниця в температурі розм'якшення волокон однозначно показує перевагу ПАЩ фірми «Osborn», особливо при використанні їх для важкооброблюваних матеріалів, вживаних в авіадвигунобудуванні.

З іншого боку, результати досліджень температури початку розм'якшення полімерної складової ПА волокна показують перспективний напрям подальшого вдосконалення і розширення області ефективного використання ПАЩ.

Цим напрямом може бути розробка нового складу полімерної основи ПА волокна з підвищеними теплофізичними характеристиками. Необхідно відмітити, що останнім часом з'явилися нові, більш термостійкі полімерні матеріали (без втрати пружності), які фірми почали використовувати для виготовлення полімерно-абразивних волокон. Температура розм'якшення таких волокон складає 200...250 °С [70].

Результати досліджень температури розм'якшення ПА волокон

№ досл.	Абразив		Діаметр волокна $d_f$ , мм	Фірма-виробник	Температура початку розм'якшення			Зовнішній вигляд волокна, $10^{\times}$
	Матеріал	Зернистість			$T_{min}$ , °C	$T_{max}$ , °C	Середня температура $T_c$ , °C $T_c = \frac{\sum T}{10}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	63С	F180	1,0	«Osborn» (Німеччина)	97	136	117	
2	63С	F120	1,0	«Osborn» (Німеччина)	86	136	110	
3	63С	F150	1,0	«Osborn» (Німеччина)	72	114	88	
4	63С	F120	1,2	«Osborn» (Німеччина)	71	92	80	

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	63С	F180	0,6	«Osborn» (Німеччина)	69	81	78	
6	63С	F80	1,0	«Піран'я» (Україна)	47	57	52	
7	63С	F180	0,6	«Піран'я» (Україна)	47	55	51	

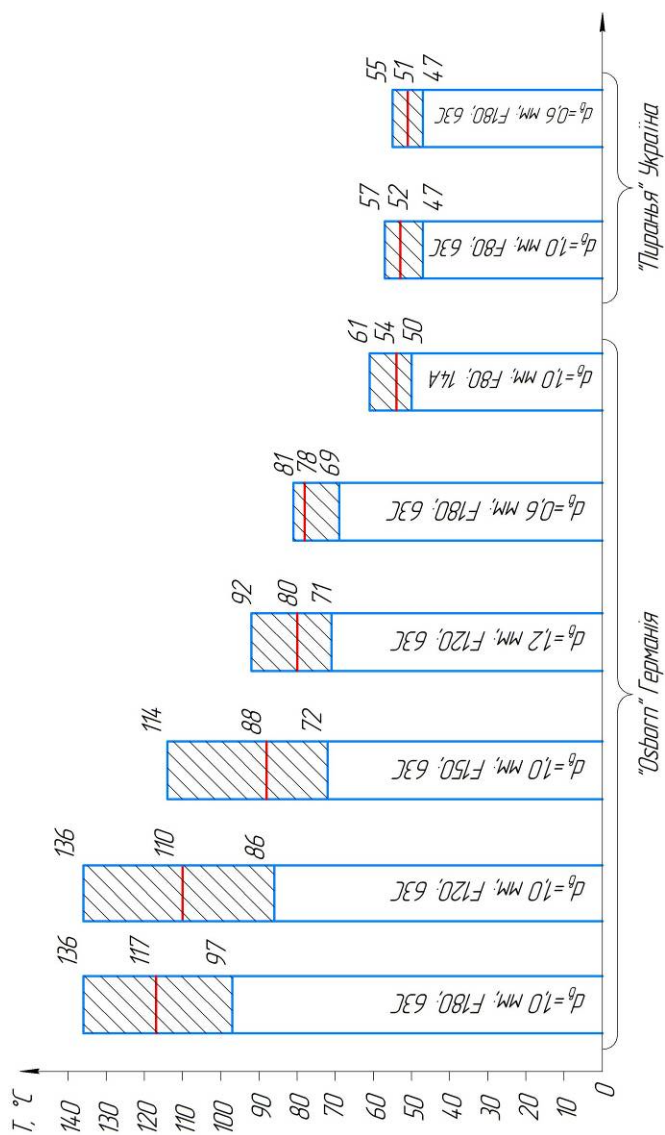


Рис. 4.6. Граничні і середні температури початку розм'якшення ПА волокон різних фірм-виробників

#### **4.1.2. Розробка методики дослідження контактної температури в зоні обробки полімерно-абразивними щітками**

Проведені в п. 4.1.1 дослідження дають змогу визначити граничну температуру експлуатації ПАЩ. Варіюючи режимами обробки та параметрами ПА щіток можливо регулювати тепловий рівень в контактній зоні системи «ПАЩ – деталь». Для вивчення впливу вищеназваних чинників на температуру плями контакту було сконструйовано спеціальний пристрій (рис. 4.7, 4.8).

На рис. 4.7 приведено принципову схему виміру усередненої контактної температури при обробці ПАЩ [94]. Корольок термопари затискається складеним зразком на оброблюваній поверхні. Аналогічний метод виміру контактної температури успішно використали при шліфуванні [95]. ТермоЕДС, що виникає в термопарі 4, через підсилювач 5, оцифрували в АЦП 6 і зберігали в ПК 7 (рис. 4.7). Сигнал записували за допомогою програми «LGraph».

На рис. 4.8 показано спосіб підведення термопари в зону контакту з ПАЩ, а також схема установки і закріплення складеного зразка з досліджуваного матеріалу. Загальний вигляд установки і зона обробки приведено на рис. 4.9. Умови тарировки термопари і отримання тарировального графіка аналогічні п. 4.1.1 (рис. 4.4).

Попередніми експериментами встановлено, що контактна температура при збільшенні числа подвійних ходів  $N$  столу верстата поступово збільшується і досягає умов теплової рівноваги при  $N=6$  подв.х. Тому контактну температуру вимірювали після  $N=6$  подв.х. робочого столу верстата (рис. 4.10).

Аналіз отриманих експериментальних даних проводили за допомогою програми «PowerGraph».

Дослідження контактної температури проводили для трьох різних дискових ПАЩ  $\varnothing 150$  мм фірми «Osborn», які відрізнялися діаметром полімерних волокон і зернистістю абразиву (табл. 4.2). Виліт волокон змінювали накладками.

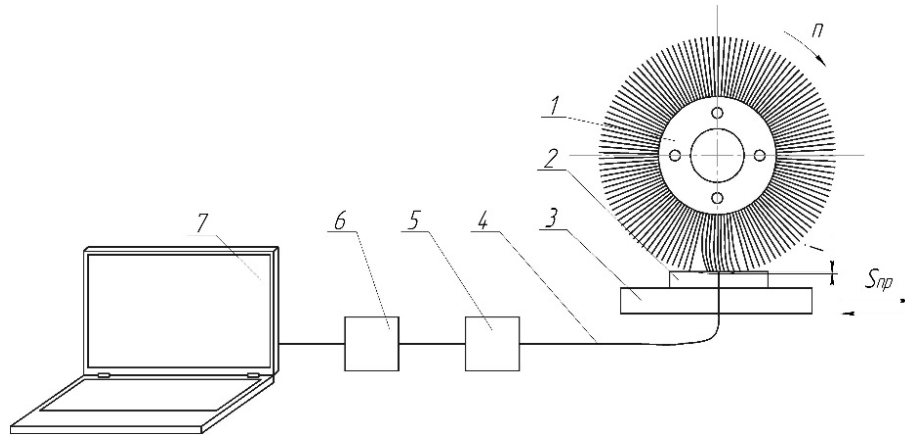


Рис. 4.7. Принципова схема виміру контактної температури: 1 – ПАЩ; 2 – зразок; 3 – пристосування для установки зразка при вимірі температури; 4 – термопара (хромель-копель); 5 – підсилювач; 6 – АЦП; 7 – ПК

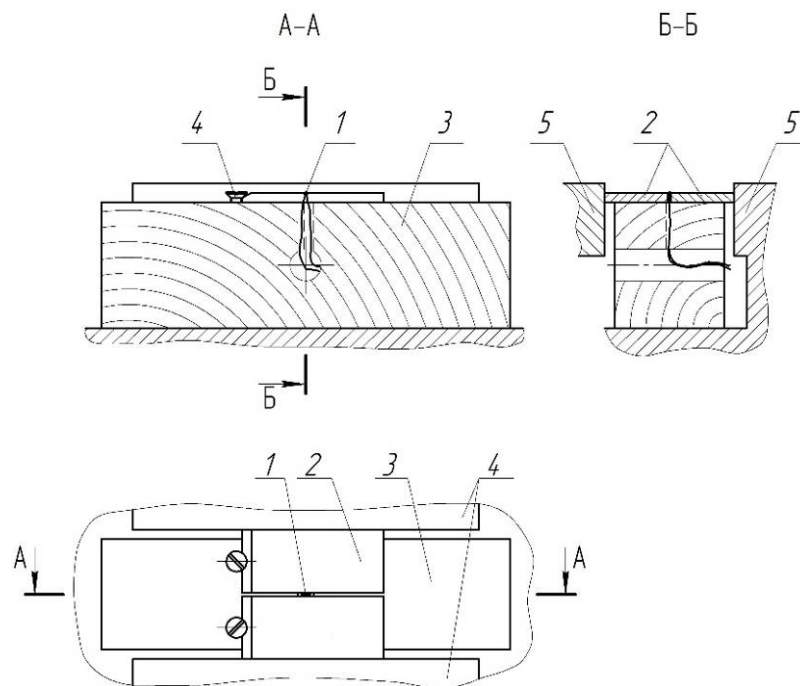


Рис. 4.8. Схема кріплення складеного зразка і підкладки при вимірі температури в зоні обробки ПА щіткою: 1 – термопара; 2 – складений зразок; 3 – дерев'яна підкладка; 4 – упор; 5 – лещата

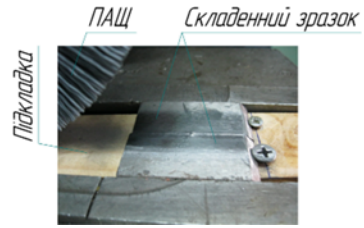


Рис. 4.9. Загальний вигляд установки для проведення температурних досліджень при обробці ПАЩ

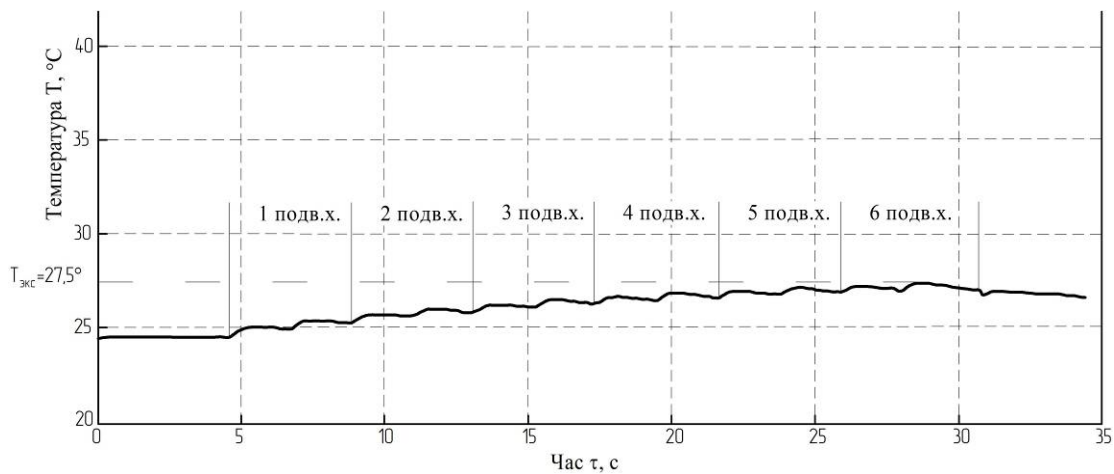


Рис. 4.10. Експериментальний графік залежності контактної температури від числа  $N$  – подвійних ходів столу верстата

Таблиця 4.2 –

### Характеристики використовуваних для експериментів ПАЩ

№ досл.	Характеристика ПАЩ			Температура початку розм'якшення волокна $T_c$ , °C (з таблиці. 4.1)
	Діаметр волокна $d_v$ , мм	Зернистість	Матеріал абразиву	
1	0,6	F180	63С	78
2	1,0	F150	63С	88
3	1,2	F120	63С	80

Середня температура початку розм'якшення волокон для даних ПАЩ складала від 78...88 °С. Тому на графіках допустиму межу контактної температури приймали 80 °С, вище за яку вживані умови обробки призводили до намазування полімерної складової на оброблювану поверхню (рис. 4.11). Це явище (сліди полімеру на оброблюваній поверхні) обов'язково фіксувалось в протоколах дослідів, що проводилися.

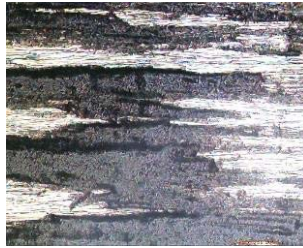


Рис. 4.11. Сліди полімерної основи волокон, залишені на обробленій поверхні ( $\times 150$ )

Залежно від довжини вільної частини полімерно-абразивного волокна змінюється жорсткість щітки, що безпосередньо впливає на контактну температуру. Тому для дослідження цього впливу для ПАЩ, приведених в таблиці 4.2, у яких виліт волокон складав  $L=32$  мм, застосовували бічні накладки (рис. 2.8, б), що дозволяють зменшити виліт волокон до  $L=8$  мм. Таким чином в дослідженні застосовували 6 варіантів ПАЩ з різними параметрами:

- серія 1А:  $d_v=0,6$  мм,  $L=32$  мм («найм'якіша» ПАЩ);
- серія 2А:  $d_v=1,0$  мм,  $L=32$  мм;
- серія 3А:  $d_v=1,2$  мм,  $L=32$  мм;
- серія 1Б:  $d_v=0,6$  мм,  $L=8$  мм;
- серія 2Б:  $d_v=1,0$  мм,  $L=8$  мм;
- серія 3Б:  $d_v=1,2$  мм,  $L=8$  мм («найжорсткіша» ПАЩ).

Дослідження контактної температури проводили в наступному діапазоні зміни основних режимів обробки ПАЩ:

- натяг:  $i = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  мм;
- повздовжня подача:  $S_n = 1,0; 3,0; 6,0$  м/хв;
- швидкість різання:  $V = 5; 16; 23$  м/с.

Таким чином план експериментальних досліджень для одного варіанту ПАЩ складався з 36 дослідів, приведених в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 –

**План експериментального дослідження контактної температури  
для одного варіанту ПАЩ**

№ досл.	Натяг $i$ , мм	Подача $S_n$ , м/хв	Швидкість $V$ , м/с	№ досліду	Натяг $i$ , мм	Подача $S_n$ , м/хв	Швидкість $V$ , м/с	
1	0,5	1	5	19	1,5	1	5	
2			16	20			16	
3			23	21			23	
4		3	3	5		22	3	5
5				16		23		16
6				23		24		23
7		6	6	5		25	6	5
8				16		26		16
9				23		27		23
10	1	1	5	28	2	1	5	
11			16	29			16	
12			23	30			23	
13		3	3	5		31	3	5
14				16		32		16
15				23		33		23
16		6	6	5		34	6	5
17				16		35		16
18				23		36		23

Застосування планування експериментів (по методу Бокса-Уілсона) в цих дослідженнях з ПАЩ, які мають великі відмінності в характеристиках полімерно-абразивних волокон, було неможливе, оскільки для цих умов не можна застосовувати різні інтервали варіювання режимами, а також використати «зоряні точки» через обмеження по температурах розм'якшення полімерного волокна. Тому ряд експериментів при критичному співвідношенні режимів і жорсткості ПАЩ провести було неможливо, хоча за планом їх необхідно було посилювати.

*Матеріал зразків – Сталь 3.*

Для зразків із сталі 3 було проведено усі шість серій експериментів по 36 дослідів в кожній. Обробку зразків ПАЩ проводили без ЗОТС.

Результати вимірів температур в контактній зоні при обробці ПАЩ з  $L=32$  мм (серії 1А, 2А, 3А) рисунок 4.12 показують, що зі збільшенням подачі від 1 до 6 м/хв спостерігається зниження контактної температури, накладки не утримують волокна з боків – при збільшенні натягу волокна розходяться в сторони, збільшуючи пляму контакту, але між ковзаючими волокнами з'являються порожні місця, які не нагріваються, знижуючи середню контактну температуру, оскільки зі збільшенням подачі зменшується час контакту інструменту із зразком.

Встановлення натягу від 0,5 до 2 мм незначно підвищує температуру в зоні контакту.

Змінення швидкості від 5 до 23 м/с викликає монотонне підвищення температури у зв'язку з тим, що збільшується контактна швидкість мікрорізання і тертя (переміщення активної частини волокна по поверхні зразка), інтенсивніша ударна дія і деформація. До того ж в одиницю часу через локальну одиничну зону контакту проходить більша кількість волокон, яка прямо пропорційна збільшенню швидкості різання.

В цілому, температури в зоні плями контакту «інструмент - зразок» в серіях 1А, 2А, 3А не перевищували нижнього теплового порогу розм'якшення ПА волокон (табл. 4.2). Тому можна зробити висновок, що застосування даних

ПАЩ з  $d_{\epsilon}=0,6; 1,0; 1,2$  мм з великим вилітом волокон  $L=32$  мм на усіх досліджуваних діапазонах режимів обробки забезпечують низький рівень контактних температур (до  $70^{\circ}\text{C}$ ) без застосування ЗОТС.

Загальні закономірності зміни температур в експериментах серій 1Б, 2Б, 3Б (рис. 4.13) зберігаються. Проте, зменшивши виліт волокон за допомогою накладок до 8 мм з метою збільшення жорсткості ПАЩ, була обмежена можливість самоохолодження волокон, які тимчасово вийшли із контакту зі зразком. В результаті, за винятком ПАЩ з  $d_{\epsilon}=0,6$  мм, які за рахунок невисокої жорсткості мали можливість розпушуватись і охолоджувати волокна, на «жорсткіших» режимах (високі швидкості і маленькі подачі) сталося підвищення контактних температур майже в 2 рази. При  $T>80\dots 85^{\circ}\text{C}$  на зразках з'являється тонка плівка – сліди полімеру (рис. 4.11). На рисунку 4.13 ця область неприпустимих температур відокремлена червоною лінією.

Такі режими при роботі без ЗОТС необхідно виключати, оскільки, по-перше, падає інтенсивність обробки, по-друге, забруднюється оброблювана поверхня, по-третє, тривала робота на таких режимах сприяє зношуванню інструменту.

З практичної точки зору плівка полімеру легко видаляється цією ж ПАЩ на раціональних або «м'якших» режимах.

Також слід зазначити, що навіть краплинне застосування ЗОТС різко знижує температуру в зоні обробки на «жорстких» режимах. При подальших дослідженнях процесу обробки ПАЩ на п'ятикоординатному верстаті «Starragheckert SX-051 В», де 4 сопла під тиском подають ЗОТС прямо в зону обробки з різних боків, усі теплові обмеження «жорстких» режимів було знято.

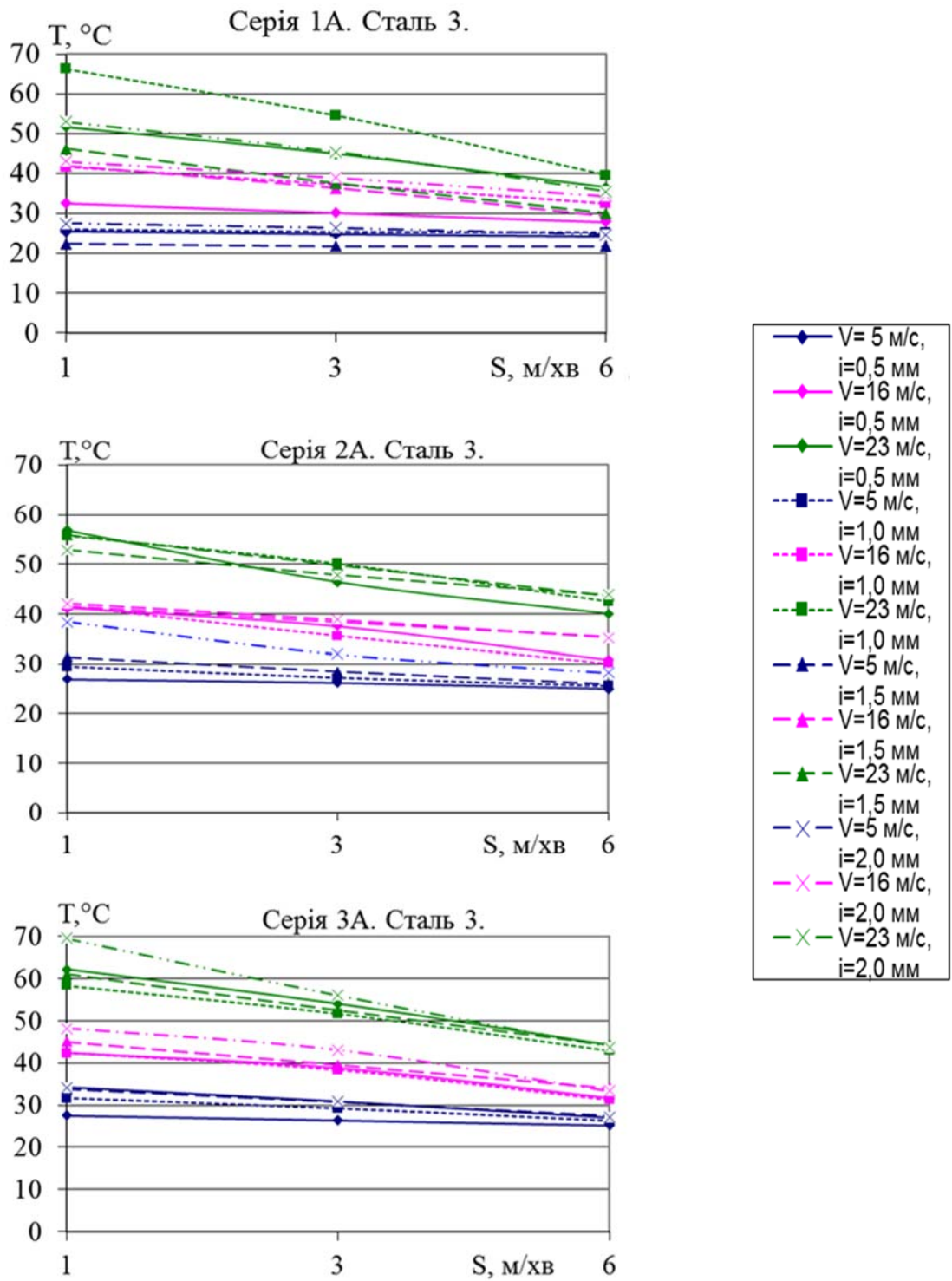


Рис. 4.12. Залежність контактних температур  $T$  від подачі  $S$  (з варіюванням  $V$  і  $i$ ) для ПАЩ з вилітом волокна  $L=32$  мм. Сталь 3

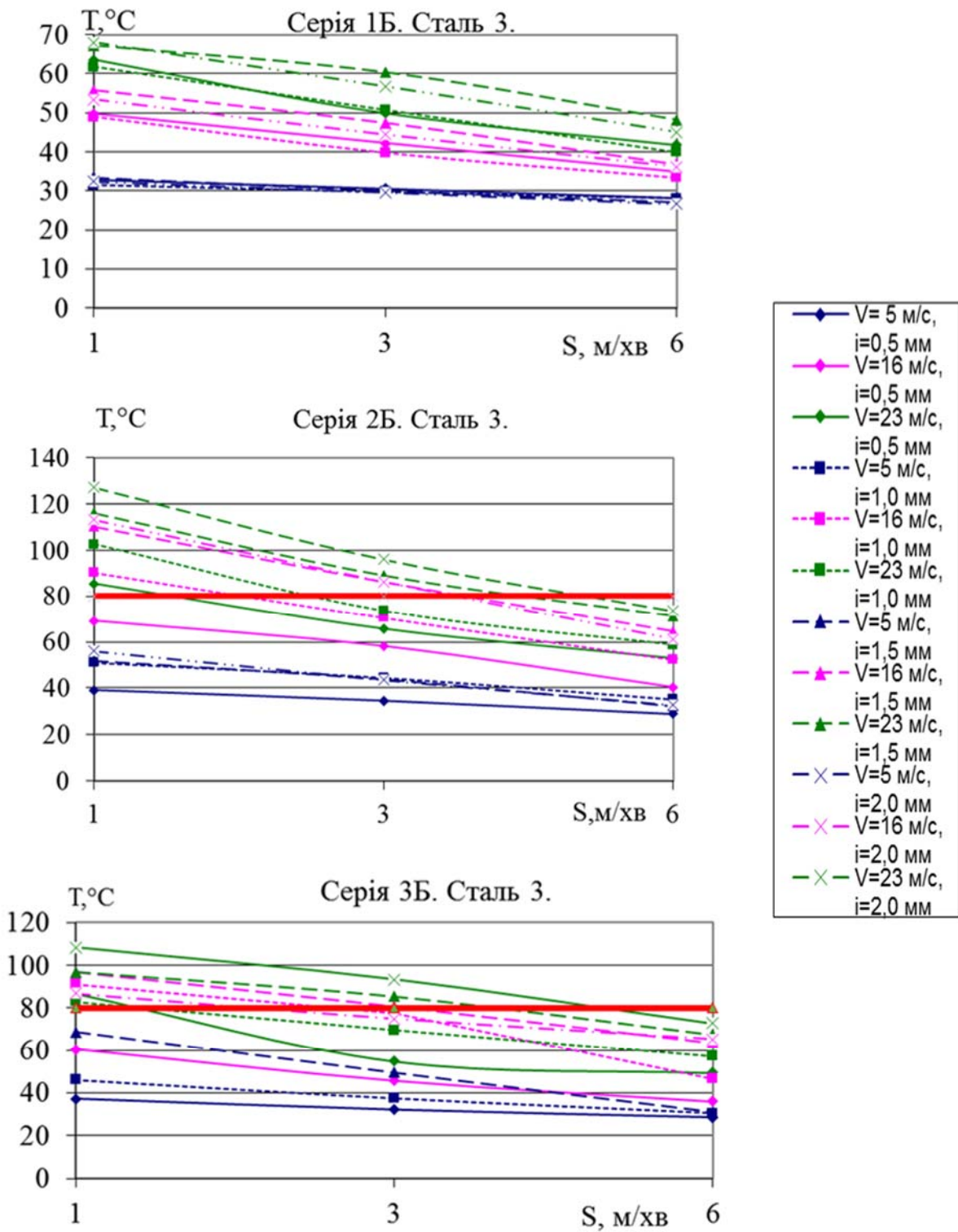


Рис. 4.13. Залежність контактних температур від подачі  $S$  (з варіюванням  $V$  і  $i$ ) для ПАЦ з вилітом волокон  $L=8$  мм. Сталь 3

Таким чином, експерименти на зразках із сталі 3 без застосування ЗОТС показали, що при перевищенні температури розм'якшення волокон ПАЩ в зоні обробки (80...85 °С), волокно частково втрачає свої експлуатаційні властивості і залишає плівку полімерної основи на оброблюваній поверхні. Також встановлена повна відповідність граничних температур, отриманих в цих серіях експериментів, температурам, отриманим вище (п.4.1.1) при оцінці теплостійкості окремих волокон цих інструментів (табл. 4.1).

Для побудови математичної моделі температури застосуємо повний факторний дворівневий аналіз по п'яти варійованих чинниках (табл. 4.4).

Число можливих комбінацій рівнів чинників  $N=2^5=32$  (табл. 4.5). Попередні експерименти (рис. 4.12, 4.13) показали переважно лінійний вид залежностей, тому застосовувати трирівневий експеримент  $3^k$  немає необхідності.

Таблиця 4.4 –

#### Варіації рівнів чинників

Чинник	Натяг $i$		Подача $S$		Швидкість $V$		Виліт $L$		Діаметр волокна $d_v$	
	X1		X2		X3		X4		X5	
Рівень	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Значення чинника	0,5	2	1	6	5	23	8	32	0,6	1,2

**Матриця планування і результати проведення експерименту**

№ з/п	X1	X2	X3	X4	X5	T, °C
	<i>i</i> , мм	<i>S</i> , м/хв	<i>V</i> , м/с	<i>L</i> , мм	<i>d<sub>6</sub></i> , мм	
1	1	1	-1	1	-1	27,5
	2	6	5	32	0,6	
2	1	-1	-1	1	1	34,2
	2	1	5	32	1,2	
3	-1	1	1	-1	-1	32,6
	0,5	6	23	8	0,6	
4	-1	-1	1	-1	1	86,6
	0,5	1	23	8	1,2	
5	1	1	1	-1	-1	45
	2,0	6	23	8	0,6	
6	1	-1	-1	-1	1	73,3
	2,0	1	5	8	1,2	
7	1	1	1	1	-1	35,4
	2,0	6	23	32	0,6	
8	1	-1	1	-1	1	106,9
	2,0	1	23	8	1,2	
9	-1	-1	1	-1	-1	63,5
	0,5	1	23	8	0,6	
10	1	1	1	1	1	43,7
	2,0	6	23	32	1,2	
11	1	1	-1	-1	1	45,7
	2,0	6	5	8	1,2	
12	1	-1	1	1	-1	52,9
	2,0	1	23	32	0,6	

Продовження таблиці 4.5

№ з/п	X1	X2	X3	X4	X5	T, °C
	<i>i</i> , мм	<i>S</i> , м/хв	<i>V</i> , м/с	<i>L</i> , мм	<i>d<sub>в</sub></i> , мм	
13	-1	-1	1	1	-1	51,6
	0,5	1	23	32	0,6	
14	1	1	-1	-1	-1	26,6
	2,0	6	5	8	0,6	
15	-1	-1	-1	-1	-1	32,9
	0,5	1	5	8	0,6	
16	-1	-1	-1	1	-1	25,4
	0,5	1	5	32	0,6	
17	1	-1	1	-1	-1	68
	2,0	1	23	8	0,6	
18	1	1	1	-1	1	72,8
	2,0	6	23	8	1,2	
19	-1	1	1	1	-1	36,4
	0,5	6	23	32	0,6	
20	-1	1	-1	-1	-1	28,2
	0,5	6	5	8	0,6	
21	-1	-1	-1	1	1	27,5
	0,5	1	5	32	1,2	
22	1	-1	-1	-1	-1	32,3
	2,0	1	5	8	0,6	
23	-1	1	-1	1	-1	24,3
	0,5	6	5	32	0,6	
24	-1	1	1	1	1	25,2
	0,5	6	23	32	1,2	

Продовження таблиці 4.5

№ з/п	X1	X2	X3	X4	X5	T, °C
	<i>i</i> , мм	<i>S</i> , м/хв	<i>V</i> , м/с	<i>L</i> , мм	<i>d<sub>6</sub></i> , мм	
25	1	-1	1	1	1	69,6
	2,0	1	23	32	1,2	
26	1	1	-1	1	1	27,1
	2,0	6	5	32	1,2	
27	1	-1	-1	1	-1	27,5
	2,0	1	5	32	0,6	
28	-1	-1	-1	-1	1	37,1
	0,5	1	5	8	1,2	
29	-1	1	-1	-1	1	28,4
	0,5	6	5	8	1,2	
30	-1	1	-1	1	1	25,2
	0,5	6	5	32	1,2	
31	-1	-1	1	1	1	62,2
	0,5	1	23	32	1,2	
32	-1	1	1	-1	1	49,4
	0,5	6	23	8	1,2	

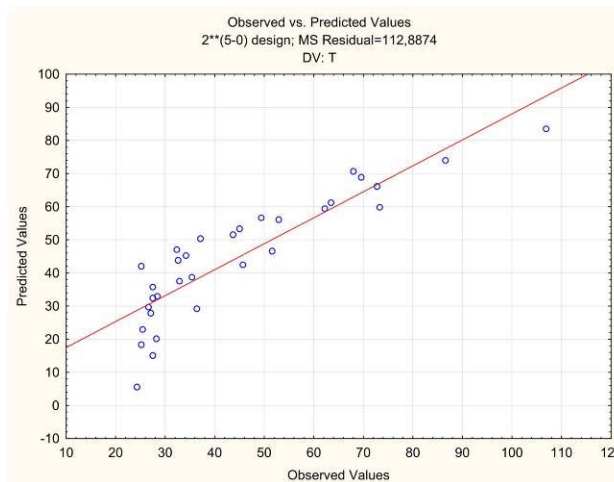
За допомогою програми «Statistica» було отримано модель першого порядку (рис. 4.14, а) без урахування взаємодії чинників між собою з коефіцієнтом кореляції  $R=0,78$

$$T=23,339+6,333 \cdot i-3,475 \cdot S+1,315 \cdot V-0,608 \cdot L+21,333 \cdot d. \quad (4.1)$$

Збіг розрахункових (predicted) «передбачених» значень температури і експериментально отриманих (observed) «спостережуваних» значень показано на рисунку 4.14, б. Середня помилка за даними 32-х дослідів склала 21,1%. По контрольним 15 дослідом – 16%. Для точності моделі цього недостатньо.

Regr. Coefficients; Var.:T; R-sqr=,78367; Adj.:,74207 (Ok_ish temp nenormir) 2**(5-0) design; MS Residual=112,8874 DV: T						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(26)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	23,33958	8,386085	2,78313	0,009896	6,10174	40,57743
(1)i	6,33333	2,504301	2,52898	0,017845	1,18567	11,48100
(2)S	-3,47500	0,751290	-4,62538	0,000090	-5,01930	-1,93070
(3)V	1,31458	0,208692	6,29916	0,000001	0,88561	1,74356
(4)L	-0,60833	0,156519	-3,88665	0,000628	-0,93006	-0,28660
(5)d	21,33333	6,260752	3,40747	0,002144	8,46417	34,20249

а)



б)

Рис. 4.14. Результати розрахунку моделі температури 1-го порядку

Тому модель ускладнили. Розраховали модель 2-го порядку з урахуванням взаємодії чинників між собою, що має компенсувати деяке відхилення від лінійності залежності  $T$  від початкових чинників.

Первинний розрахунок коефіцієнтів регресії показав (рис. 4.15, а), що вплив на  $T$  таких чинників як  $i$  і  $S$  набагато менше, ніж вплив їх взаємодії. Після виключення цих чинників з моделі (рис. 4.15, б), у зв'язку з чим вона дещо спростилася, було остаточно отримано модель 2-го порядку з коефіцієнтом кореляції  $R=0,96$

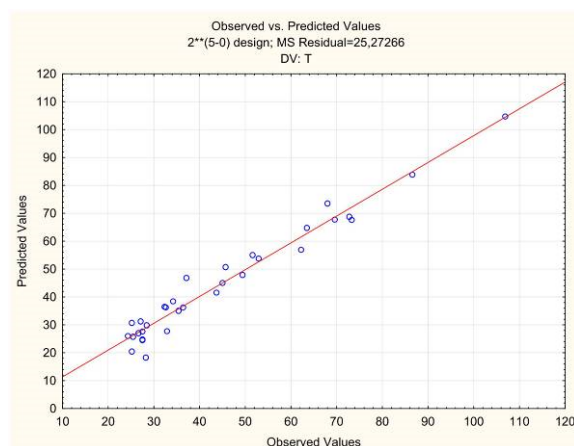
$$T = -7,398 + 2,413 \cdot V + 0,778 \cdot L + 37,095 \cdot d - 0,277 \cdot i \cdot L + 13,433 \cdot i \cdot d - 0,21 \cdot S \cdot V + 0,08 \cdot S \cdot L - 2,485 \cdot S \cdot d + 0,0179 \cdot V \cdot L - 1,193 \cdot L \cdot d \quad (4.2)$$

Regr. Coefficients; Var.:T; R-sqr=.97214; Adj.:.94602 (Ok_ish temp nenormir.sta) 2**(5-0) design; MS Residual=23,62438 DV: T						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(16)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,76366	10,38713	0,07352	0,942304	-21,2561	22,78338
(1)i	-3,78389	4,74538	-0,79738	0,436903	-13,8437	6,27587
(2)S	1,48194	1,45715	1,01702	0,324278	-1,6071	4,57096
(3)V	<b>1,74782</b>	<b>0,39955</b>	<b>4,37445</b>	<b>0,000472</b>	<b>0,9008</b>	<b>2,59484</b>
(4)L	<b>0,78800</b>	<b>0,29659</b>	<b>2,65689</b>	<b>0,017225</b>	<b>0,1593</b>	<b>1,41673</b>
(5)d	<b>28,50787</b>	<b>9,47108</b>	<b>3,00999</b>	<b>0,008305</b>	<b>8,4301</b>	<b>48,58566</b>
1 by 2	-0,06333	0,45825	-0,13821	0,891802	-1,0348	0,90812
1 by 3	0,10000	0,12729	0,78559	0,443584	-0,1698	0,36985
1 by 4	<b>-0,24931</b>	<b>0,09547</b>	<b>-2,61138</b>	<b>0,018899</b>	<b>-0,4517</b>	<b>-0,04692</b>
1 by 5	<b>15,47222</b>	<b>3,81876</b>	<b>4,05163</b>	<b>0,000926</b>	<b>7,3768</b>	<b>23,56764</b>
2 by 3	<b>-0,22722</b>	<b>0,03819</b>	<b>-5,95015</b>	<b>0,000020</b>	<b>-0,3082</b>	<b>-0,14627</b>
2 by 4	<b>0,06854</b>	<b>0,02864</b>	<b>2,39315</b>	<b>0,029316</b>	<b>0,0078</b>	<b>0,12926</b>
2 by 5	<b>-3,40833</b>	<b>1,14563</b>	<b>-2,97508</b>	<b>0,008932</b>	<b>-5,8370</b>	<b>-0,97971</b>
3 by 4	<b>-0,01794</b>	<b>0,00796</b>	<b>-2,25495</b>	<b>0,038500</b>	<b>-0,0348</b>	<b>-0,00107</b>
3 by 5	0,66204	0,31823	2,08037	0,053921	-0,0126	1,33665
4 by 5	<b>-1,19271</b>	<b>0,23867</b>	<b>-4,99726</b>	<b>0,000132</b>	<b>-1,6987</b>	<b>-0,68674</b>

a)

Regr. Coefficients; Var.:T; R-sqr=.96088; Adj.:.94226 (Ok_ish temp nenormir) 2**(5-0) design; MS Residual=25,27266 DV: T						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(21)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-7,39815	6,087307	-1,21534	0,237724	-20,0574	5,26110
(3)V	<b>2,41282</b>	<b>0,230004</b>	<b>10,49032</b>	<b>0,000000</b>	<b>1,9345</b>	<b>2,89114</b>
(4)L	<b>0,77853</b>	<b>0,298034</b>	<b>2,61222</b>	<b>0,016274</b>	<b>0,1587</b>	<b>1,39832</b>
(5)d	<b>37,09470</b>	<b>6,882695</b>	<b>5,38956</b>	<b>0,000024</b>	<b>22,7813</b>	<b>51,40804</b>
1 by 4	<b>-0,27763</b>	<b>0,087354</b>	<b>-3,17820</b>	<b>0,004527</b>	<b>-0,4593</b>	<b>-0,09597</b>
1 by 5	<b>13,43309</b>	<b>2,147625</b>	<b>6,25486</b>	<b>0,000003</b>	<b>8,9669</b>	<b>17,89932</b>
2 by 3	<b>-0,21127</b>	<b>0,036217</b>	<b>-5,83346</b>	<b>0,000009</b>	<b>-0,2866</b>	<b>-0,13595</b>
2 by 4	<b>0,08136</b>	<b>0,026779</b>	<b>3,03822</b>	<b>0,006250</b>	<b>0,0257</b>	<b>0,13705</b>
2 by 5	<b>-2,48530</b>	<b>0,756680</b>	<b>-3,28449</b>	<b>0,003536</b>	<b>-4,0589</b>	<b>-0,91170</b>
3 by 4	<b>-0,01794</b>	<b>0,008229</b>	<b>-2,18017</b>	<b>0,040767</b>	<b>-0,0351</b>	<b>-0,00083</b>
4 by 5	<b>-1,19271</b>	<b>0,246858</b>	<b>-4,83155</b>	<b>0,000089</b>	<b>-1,7061</b>	<b>-0,67934</b>

б)



в)

Рис. 4.15. Результати розрахунку моделі температури 2-го порядку

Графічне зображення «observed vs. Predicted Values» цієї моделі (рис. 4.15, в) показує, що відхилення експериментальних значень від

розрахункових набагато менше в порівнянні з моделлю 1-го порядку (рис. 4.14, б).

В результаті перевірки моделі після проведення 15 контрольних дослідів середня помилка цієї моделі склала близько 8%.

*Матеріал зразків – титановий сплав VT8-M.*

Як відомо, титанові сплави мають низьку теплопровідність (табл. 4.6), іноді на порядок менше, ніж у сталей, тому відведення тепла із зони обробки ускладнене. Це посилює температурні обмеження при обробці ПАЩ [96]. З серії експериментів з вилітом волокон ПА інструменту  $L=32$  мм був досліджений інструмент з найбільшим діаметром волокна  $d_e=1,2$  мм (серія 3А). На досліджених діапазонах режимів (рис. 4.16) температура була нижча граничної, і налипання на поверхню зразка не спостерігалось. Експерименти серій 1А і 2А не проводили, оскільки, ПАЩ з тоншим волокном  $d_e=0,6$  і  $1,0$  мм і вилітом  $L=32$  мм (серія 1А і 2А) гарантовано забезпечать нормальну обробку без температурних обмежень по режимах в досліджених діапазонах.

Для ПАЩ  $L=8$  мм провели експерименти серії 1Б з  $d_e=0,6$  мм. При цьому контактні температури в зоні обробки перевищували граничні  $80\dots 85$  °С навіть на найменших швидкостях обробки, іноді досягаючи  $150$  °С (рис. 4.16, б). Обробка без ЗОТС можлива тільки при подачі  $6$  м/хв, проте попередні експерименти показали низьку продуктивність при такій подачі.

Серії експериментів 2Б і 3Б проводити не було необхідності, оскільки в них бере участь інструмент з ще жорсткішим волокном ( $d_e=1,0$  і  $1,2$  мм) і, відповідно, температури в зоні обробки будуть більше.

З проведених експериментів можна зробити наступний висновок: титанові сплави (як матеріали з низькою теплопровідністю) обробляти ПАЩ з  $L=8$  мм без ЗОТС не можна. При цьому подача ЗОТС має бути постійною, у великій кількості, і спрямованою по можливості в зону контакту, оскільки, поперше, волокна стислі через накладки, тому інструмент майже подібний до шліфувального круга з полімерною зв'язкою, до того ж пляма контакту

маленька, усе тепло концентрується локально, а, по-друге, самоохолодження волокон також ускладнене із-за їх щільного притискання один до одного.

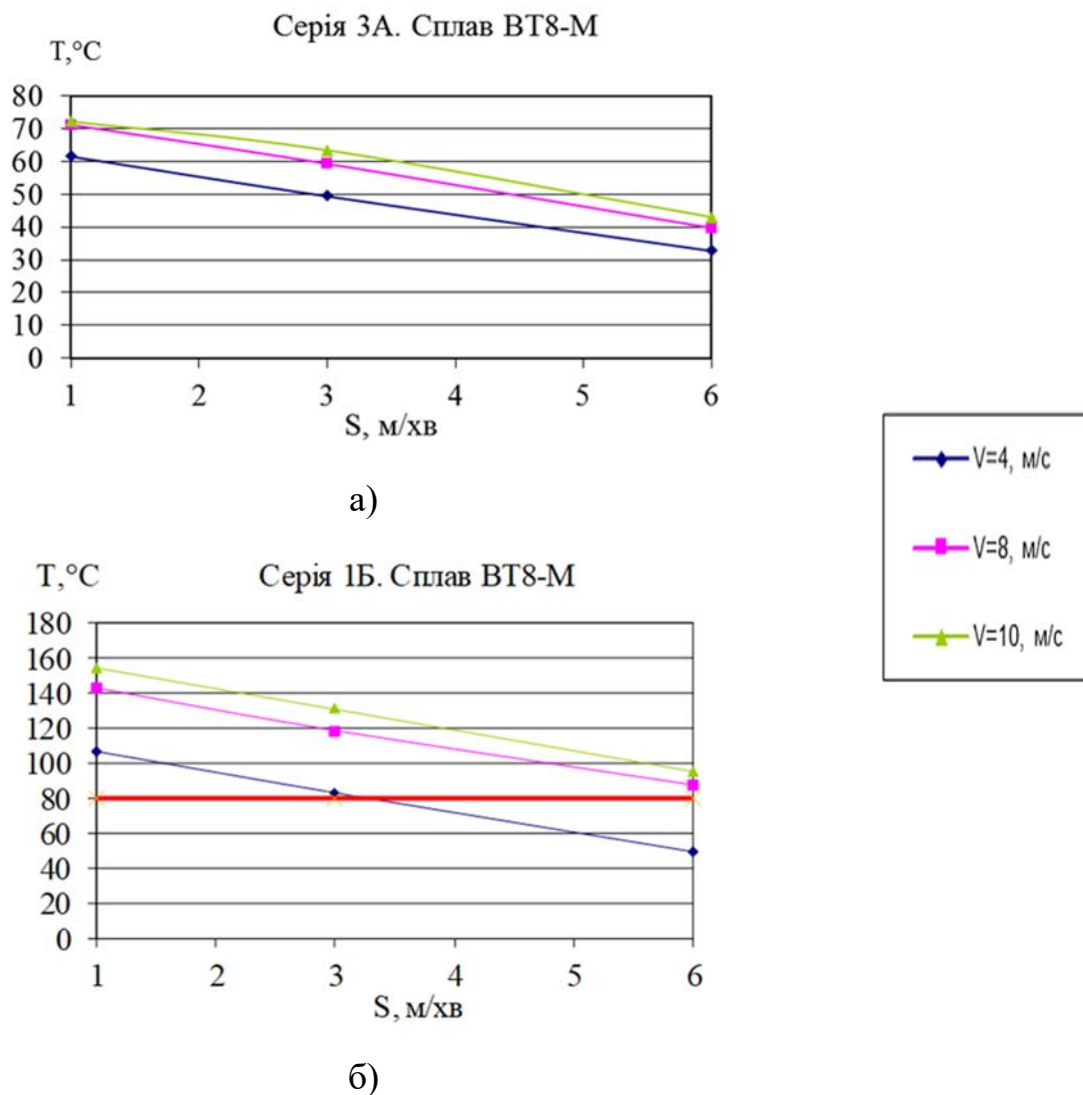


Рис. 4.16. Залежність контактної температури в зоні обробки ПАЩ: а – серія 3А ( $d_6=1,2$  мм,  $L=32$  мм,  $i=1,5$  мм); б – серія 1Б ( $d_6=0,6$  мм,  $L=8$  мм,  $i=1,5$  мм) від подачі  $S$ . Титановий сплав ВТ8-М

При вильоті волокон  $L=32$  мм за рахунок «розпушування» і самоохолодження волокон зона контакту не прогрівається до граничних температур, тому за таких умов обробляти без ЗОТС можна в дослідженому діапазоні режимів обробки.

*Матеріал зразків – жароміцний сплав на нікелевій основі ЭИ698-ВД.*

На відміну від титанових сплавів, нікелеві краще відводять тепло із зони різання. Теплопровідність сплаву ЭИ698-ВД в 2 рази вища, ніж у титанового сплаву ВТ8-М (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 –

**Характеристики досліджуваних сталей і сплавів [97], [98]**

Матеріал	АК12	Сталь 3	ЭИ698-ВД	ВТ8-М
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2650	7800	8320	4430
Теплопровідність при 100 °С, Вт/(м·град)	168	55	14	6,6

При обробці ПАЩ з великим вилітом волокон (серія 3А) за рахунок самоохолодження волокна і ширшій плямі контакту, температури в зоні обробки не досягали граничного рівня (рис. 4.17, а). Досліджені діапазони режимів дають можливість обробляти цей нікелевий сплав без ЗОТС, оскільки контактні температури не перевищують 80...85 °С. Відповідно, логічно припустити, що тонше волокно  $d_s=0,6$  і 1,0 мм (серії 1А і 2А) забезпечить менший рівень температур в зоні обробки ПАЩ без застосування ЗОТС.

При порівнянні результатів виміру температури в зоні обробки серії експериментів 1Б (рис. 4.17, б), видно, що при малому виліту волокон  $L=8$  мм і найтоншому волокні ( $d_s=0,6$  мм) значення температур на 20...30 °С менше, ніж у титанового сплаву відповідної серії (рис. 4.16, б), проте, все одно виходять за межу граничних. Обробляти без ЗОТС можна на найнижчій швидкості  $V=4$  м/с або подачі  $S=6$  м/хв, проте, попередні експерименти показали, що обробка на таких режимах нікелевих жароміцних сплавів малоефективна. Отже, при обробці таких сплавів ПАЩ з невеликим вилітом волокон необхідне застосування ЗОТС.

*Порівняльний аналіз матеріалів, що мають різну теплопровідність.*

Для порівняльного аналізу рівня температур в зоні обробки ПА щітками були узяті зразки із сталі 3, титанового сплаву ВТ8-М, нікелевого сплаву ЭИ698-ВД, а також з алюмінієвого сплаву АК12, який має високу теплопровідність (табл. 4.6) і застосовується для виготовлення складнопрофільних відливок.

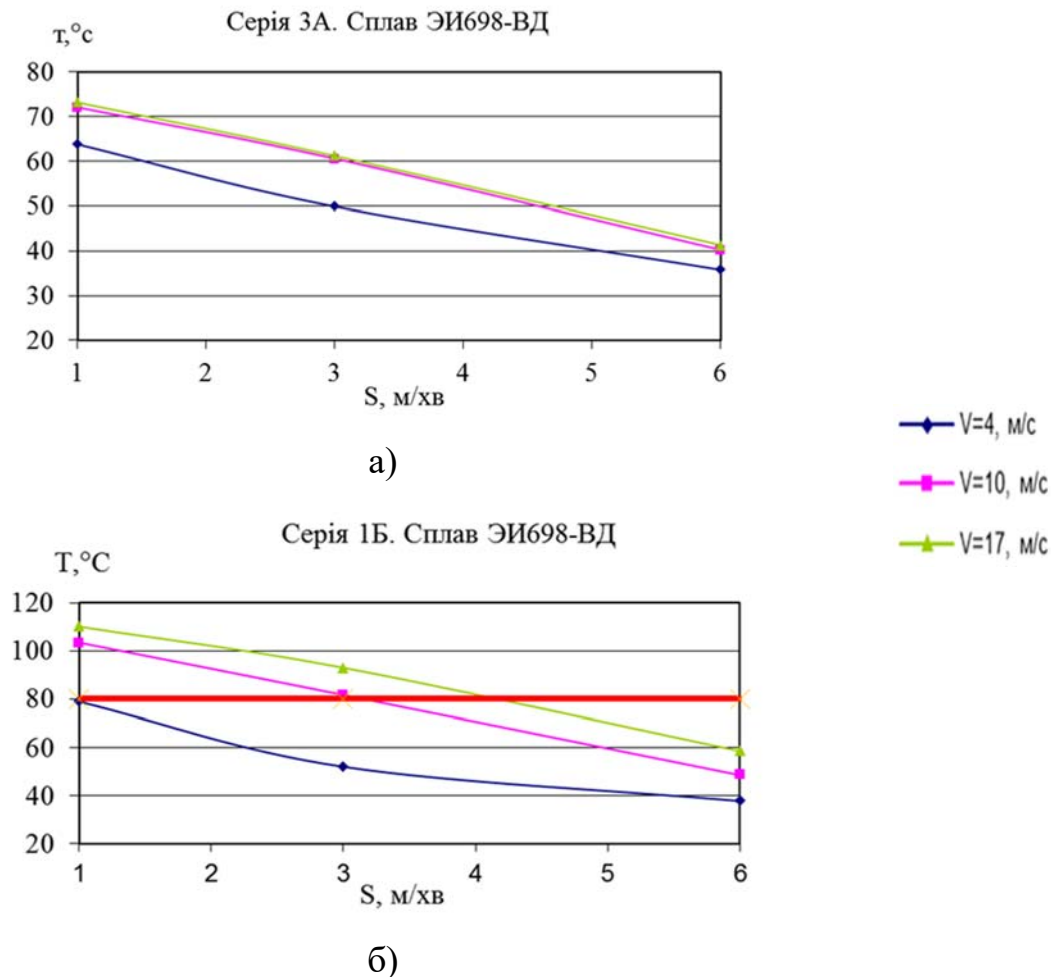


Рис. 4.17. Залежність контактної температури в зоні обробки ПАЩ: а – серія 3А ( $d_с=1,2$  мм,  $L=32$  мм,  $i=1,5$  мм); б – серія 1Б ( $d_с=0,6$  мм,  $L=8$  мм,  $i=1,5$  мм) від подачі  $S$ . Нікелевий сплав ЭИ698-ВД

Зразки обробляли на визначених для цих матеріалів раціональних режимах (п.5), які забезпечують високу якість обробки, продуктивність, сприятливі властивості поверхневого шару обробленої поверхні. Обробку проводили без ЗОТС на тому ж устаткуванні і оснащенні.

Для ПАЩ з вилітом  $L=32$  мм, обробка на раціональних режимах без ЗОТС можлива для усіх перерахованих матеріалів (рис. 4.18). Обробку «жорсткою» ПАЩ ( $L=8$  мм) на раціональних режимах без ЗОТС можна проводити тільки на алюмінієвих і сталевих зразках, завдяки їх високій теплопровідності.

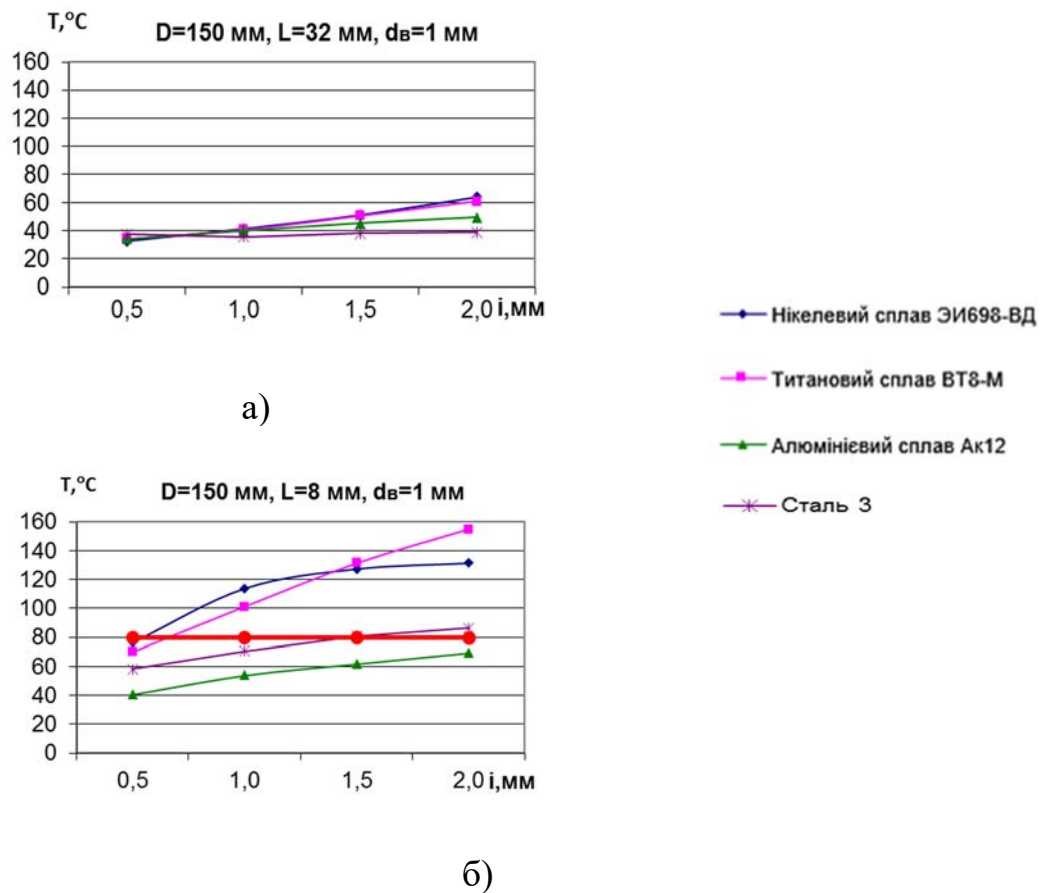


Рис. 4.18. Залежність контактної температури від натягу  $i$ , при раціональних режимах обробки

Нікелевий сплав ЭИ698-ВД і титановий сплав ВТ8-М на раціональних режимах (натяг, що забезпечує високу якість і продуктивність обробки, для цих матеріалів складає  $i=1,0...1,5$  мм), як видно з рисунка 4.18, необхідно обробляти із застосуванням ЗОТС.

## 4.2 Дослідження силової дії полімерно-абразивних щіток на оброблювану поверхню

За допомогою дослідження силової дії з боку ПАЩ, по-перше, проаналізували можливість обробляти цим інструментом тонкостінні деталі, і, по-друге, оцінювали дію силової складової в появі зміцнюючого ефекту при цьому методі фінішної обробки.

Первинне вивчення рівня силової дії одиничного волокна дає можливість потім оцінити спільний вплив волокон в повній щітці. Найбільшу силову дію волокна роблять в першій «ударній» зоні контакту *AB* (рис. 2.9). Тому найбільший інтерес представляє сила першого удару волокна об оброблювану поверхню.

### 4.2.1 Силова дія одиничного полімерно-абразивного волокна

Оцінку сили ударної дії на плоский зразок проводили аналітичним методом для одиничного ПА волокна без урахування його взаємодії з сусідніми волокнами [99].

Інженерний метод розрахунку на удар заснований на припущенні, що уся кінетична енергія, яку мало ударяюче тіло до зіткнення з тим, що ударяється, повністю переходить в потенційну енергію системи у момент її найбільшої деформації при ударі. Кінетичну енергію волокна визначали [100] як кінетичну енергію  $T$  стрижня, що обертається навколо нерухомої осі – осі обертання ПАЩ (рис.4.19).

$$T = \frac{1}{2} \cdot I_o \cdot \omega^2, \quad (4.3)$$

де  $I_o$  – момент інерції стрижня відносно осі обертання щітки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\omega$  – кутова швидкість обертання щітки,  $\text{хв}^{-1}$ .

Момент інерції  $I_o$  знаходимо за формулою

$$I_O = I_c + m \cdot OC^2, \quad (4.4)$$

де  $I_c$  – момент інерції стрижня відносно осі, що проходить через його центр мас (середину) паралельно осі обертання щітки,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;

$m$  – маса стрижня,  $\text{кг}$ ;

$OC$  – відстань між двома згаданими осями,  $\text{м}$  (рис. 4.19).

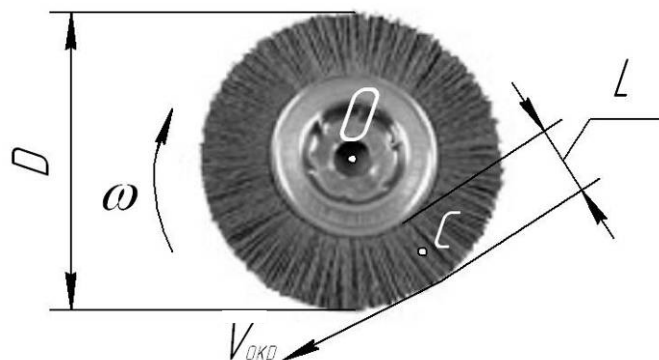


Рис. 4.19. Загальний вигляд ПАЩ з основними характеристиками

Момент інерції стрижня  $I_c$  визначається таким чином [100]

$$I_c = \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2, \quad (4.5)$$

де  $L$  – виліт волокна,  $\text{м}$ .

Відстань між двома згаданими осями можна визначити так

$$OC = \frac{D}{2} - \frac{L}{2}, \quad (4.6)$$

де  $D$  – діаметр щітки,  $\text{м}$ .

Кутова швидкість обертання щітки

$$\omega = \frac{2 \cdot v}{D}, \quad (4.7)$$

де  $V$  – кутова швидкість точок полімерно-абразивного волокна, що знаходяться на відстані  $D/2$  від осі обертання щітки, м/хв.

Підставивши вирази (4.5) і (4.6) у формулу (4.4), а потім отримане вираження  $I_O$  та  $\omega$  з формули (4.7) – у формулу (4.3), отримаємо

$$T = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2 + m \cdot \left( \frac{D}{2} - \frac{L}{2} \right)^2 \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot v}{D} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot \left( \left( 1 - \frac{L}{D} \right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{L}{D} \right)^2 \right).$$

Матеріал полімерно-абразивного волокна – це суміш поліаміду щільністю  $\rho_{пол}$  і абразивних часток щільністю  $\rho_{абр}$ . Усереднена щільність

$$\rho = \rho_{абр} \cdot c_{абр} + \rho_{пол} \cdot c_{пол}, \quad (4.8)$$

де  $c_{абр}$  і  $c_{пол}$  – об'ємні концентрації відповідно абразиву і поліаміду в матеріалі полімерно-абразивного волокна.

Маса одного ПА волокна

$$m = \rho \cdot S \cdot L, \quad (4.9)$$

де  $S$  – площа круглого поперечного перерізу волокна ( $S = \pi d^2/4$ , де  $d$  – діаметр полімерно-абразивного волокна), м<sup>2</sup>.

Потенційна енергія деформації системи складається з потенційної енергії деформації зігнутого стрижня (волокна) і потенційної енергії дотичного абразивного зерна і матеріалу оброблюваної заготовки.

Потенційну енергію деформованого волокна знайдемо, розглядаючи це волокно як стрижень, що жорстко затиснений одним кінцем (у маточині ПАЩ), а іншим кінцем б'є по нерухомій опорі (поверхні деталі). У момент удару прискорення затисненого кінця стрижня дорівнює нулю, а прискорення

рухомого кінця має максимальне значення. Тоді у момент удару стрижень (рис. 4.20) буде навантажений:

- силами інерції, інтенсивність яких лінійно міняється від нуля в місці затискання до значення  $q_{max}$  на вільному кінці;
- силою реакції  $P$  з боку матеріалу деталі.

Така система є один раз статично невизначною. Розкриваючи статичну невизначність цієї системи, можна встановити зв'язок між силою  $P$  і величинами  $q_{max}$  та  $L$  [101]

$$P = \frac{11}{40} \cdot q_{max} \cdot L \quad (4.10)$$

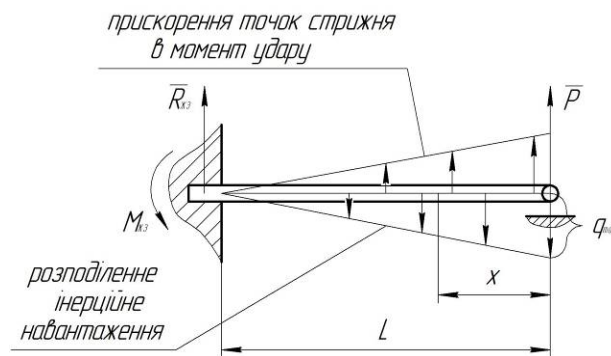


Рис. 4.20. Схема навантаження стрижня у момент удару

Момент вигину в поперечному перерізі стрижня на відстані  $x$  від його незатисненого кінця визначиться виразом [102]

$$M(x) = \frac{1}{2} \cdot q_{max} \cdot L \cdot x \cdot \left( \frac{11}{20} - \frac{x}{L} + \frac{1}{3} \cdot \frac{x^2}{L^2} \right) \quad (4.11)$$

Потенційну енергію деформованого стрижня  $U_3$  визначаємо таким чином [103]

$$U_3 = \int_0^L \frac{(M(x))^2}{2 \cdot E_{корд} \cdot I_z} dx = \frac{11 \cdot q_{max}^2 \cdot L^5}{22400 \cdot E_{корд} \cdot I_z} \approx 5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{q_{max}^2 \cdot L^5}{E_{корд} \cdot I_z} \quad (4.12)$$

де  $E_{корд}$  – модуль Юнга полімерно-абразивного корду, Па;

$I_Z$  – момент інерції кругового поперечного перерізу ПА волокна відносно осі, що проходить через його діаметр ( $I_Z = \pi d^4 / 64$ ) м<sup>4</sup>.

Потенційну енергію деформації абразивного зерна і матеріалу деталі оцінюємо за допомогою формули для потенційної енергії  $U_{конт}$  пружних куль, що притискаються одна до одної [103]. При цьому поверхню деталі вважаємо плоскою, тобто  $R_{дет} \rightarrow \infty$ , тоді

$$U_{конт} = \frac{8}{15} \cdot h^{5/2} \cdot \frac{\sqrt{R_{абр}}}{\frac{1 - \nu_{абр}^2}{E_{абр}} + \frac{1 - \nu_{дет}^2}{E_{дет}}} . \quad (4.13)$$

де  $E_{абр}$ ,  $E_{дет}$  та  $\nu_{абр}$ ,  $\nu_{дет}$  – модулі Юнга, Па і коефіцієнти Пуассона абразиву і матеріалу деталі, відповідно;

$R_{абр}$  – радіус абразивного зерна, м;

$h$  – величина пружного зближення абразивного зерна і деталі, м.

Тепер ми можемо записати рівняння енергетичного балансу

$$U_з + U_{конт} = T . \quad (4.14)$$

Для визначення двох невідомих величин  $q_{max}$  і  $h$  отримаємо ще одне рівняння, прирівнявши вираз (4.11) для сили  $P$  до сили стискування абразивного зерна і деталі [103] у момент їх найбільшої деформації при ударі:

$$\frac{11}{40} \cdot q_{max} \cdot L = \frac{4}{3} \cdot h^{3/2} \cdot \frac{\sqrt{R_{абр}}}{\frac{1 - \nu_{абр}^2}{E_{абр}} + \frac{1 - \nu_{дет}^2}{E_{дет}}} . \quad (4.15)$$

Вирішуючи це рівняння спільно з рівнянням енергетичного балансу, можна визначити величини  $q_{max}$  і  $h$ , а потім величину  $P$  знайти за формулою (4.10).

Наприклад, для зразка з титанового сплаву ВТ8-М з наступними вихідними даними:  $\rho_{абр}=3750 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{пол}=1140 \text{ кг/м}^3$  – щільність абразивних частинок і поліаміду;  $c_{абр}=0,4$ ,  $c_{пол}=0,6$  – об’ємна концентрація абразиву і поліаміду;  $d_6=1 \text{ мм}$ ,  $L=12 \text{ мм}$  – діаметр і виліт полімерно-абразивного волокна;  $D=75 \text{ мм}$  – діаметр дискової ПАЩ;  $V=4 \text{ м/с}$  – окружна швидкість;  $R_{абр}=0,1 \text{ мм}$  – середній радіус абразивного зерна;  $E_{корд}=2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$  – модуль пружності полімерно-абразивного корду;  $E_{абр}=1 \cdot 10^{12} \text{ Па}$ ,  $\mu_{абр}=0,1$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона абразива;  $E_{дет}=1,12 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ,  $\mu_{дет}=0,32$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу деталі, отримали значення  $P=1,12 \text{ Н}$ . Варіюючи значеннями змінних (режимами обробки і параметрами інструменту) отримали шуканий діапазон розрахункової сили впливу одного ПА волокна на плоску поверхню  $P=0,7 \dots 1,8 \text{ Н}$ .

Аналогічні дослідження були проведені з волокном, яке встановлене в чашковій щітці [104].

#### *Комп’ютерна візуалізація.*

Сумарну силу впливу одиничного ПА волокна і її складові також визначали за допомогою комп’ютерного міцностного пакета ANSYS і модуля LS-DYNE за методикою, викладеною в розділі 2.

В результаті отримували графічну залежність силової дії на зразок за часом (рис. 4.21).

Варіюючи параметрами волокон ( $d_6=0,6 \dots 1,2 \text{ мм}$ ,  $L=8 \dots 32 \text{ мм}$ ) і режимами обробки ( $S=0,5 \dots 6 \text{ мм}$ ,  $i=0,5 \dots 3 \text{ мм}$ ,  $V=5 \dots 35 \text{ м/хв}$ ) отримали максимальне значення сил пари «зразок-волокно» в діапазоні  $0,8 \dots 1,45 \text{ Н}$ .

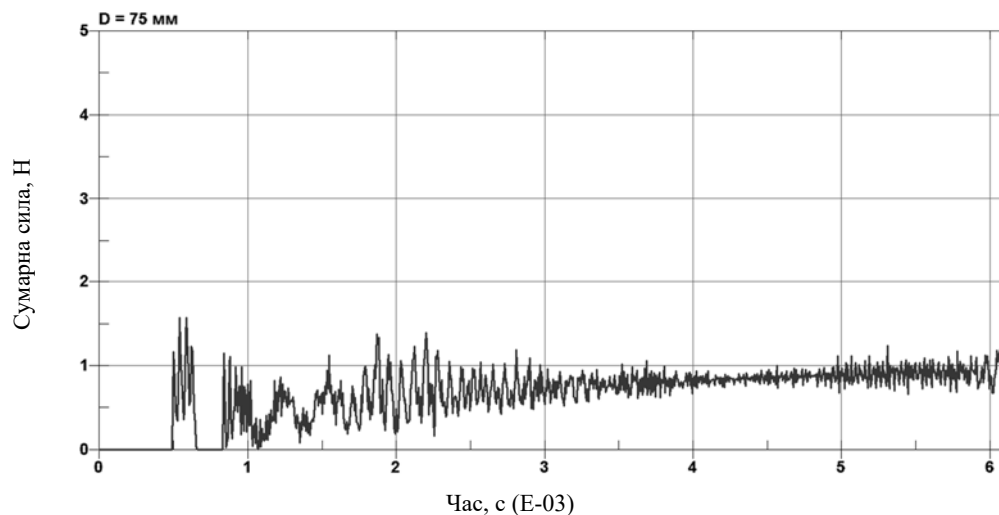


Рис. 4.21. Результат віртуального моделювання силового контакту пари «зразок-волокно»

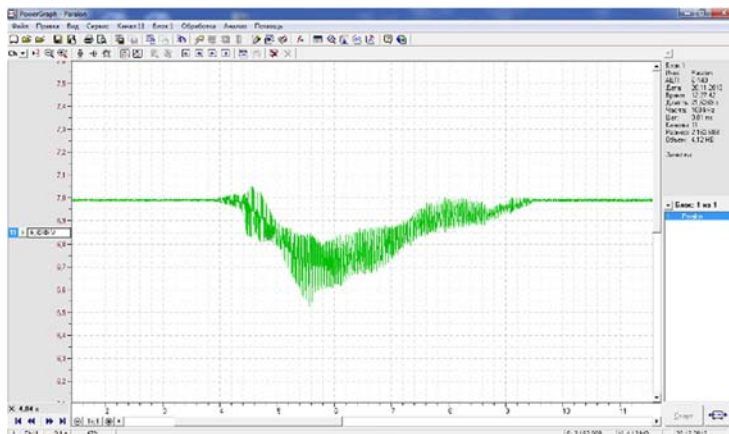
*Експериментальне визначення сили одного ПА волокна.*

За методикою (п. 4.2.2) за допомогою пристрою, що імітує ПАЩ з одним волокном (рис. 4.22, а), замість повної ПА щітки, було проведено експериментальні виміри силового впливу ПА волокна на оброблювану поверхню. На рис. 4.22, б показано приклад осцилограми експерименту з одним волокном від моменту першого торкання волокна з зразком до виходу з контакту при поздовжньому переміщенні зразка. Пружна деформація верхнього плеча скоби, яка характеризується умовною середньою лінією, досягла максимального значення над датчиком. Частота розгойдування, видима на рисунку, склала 45 Гц, що відповідає 45 обертам волокна в секунду (2700 об/хв).

Після обробки отриманих осцилограм при варіюванні параметрів інструменту, перенесених на одне волокно (таких як виліт і діаметр волокна, зернистість і матеріал абразиву, загальний діаметр умовної ПАЩ) і режимів обробки (швидкість  $V$ , натяг  $i$ , подача  $S$ ) в діапазонах, зазначених в п. 4.2.3, значення радіальних сил, що діють з боку одного волокна на зразок відрізнялись, від отриманих аналітичним і чисельним методами не більше ніж на 5...7% і становили 0,65...1,3 Н.



а)



б)

Рис. 4.22. Спеціальний пристрій для закріплення одного ПА волокна (а) і осцилограма (б)

Загальні закономірності впливу досліджених чинників (режимів  $S$ ,  $i$ ,  $V$  та параметрів  $d_v$ ,  $L$ ) на силу  $P$  відповідали закономірностям, отриманим в п. 4.2.3 для повної щітки.

Якщо враховувати, що сила 0,65...1,3 Н зосереджена локально в точці або відрізьку контакту з ріжучою кромкою або вершиною абразивного зерна (або декількох зерен), і контактну температуру в точці дотику, то можна пояснити появу наклепаного шару і стискаючих залишкових напружень на глибині до 20...50 мкм (п. 3.2).

Дані результати також можна використовувати при конструюванні нових видів ПАЩ – пелюсткових, переривчастих тощо, а також при дослідженнях працездатності окремих ПА волокон і ПАЩ в цілому.

#### 4.2.2 Методика вимірювання сил при обробці ПАЩ

Для визначення силового впливу як цілої ПАЩ, так і одного волокна на оброблювану поверхню було розроблено простий і зручний у

використанні оригінальний пристрій – динамометр для визначення сил від постійних, непостійних і періодичних навантажень, в тому числі розподілених, який має можливість гасити надмірні коливання в разі їх виникнення, а також дозволяє проводити моніторинг з реєстрацією вимірюваних сил в реальному часі і забезпечує широкі можливості подальшої обробки результатів, з високою чутливістю – через те, що дія ПАЩ відрізняється порівняно невеликим силовим тиском, розподіленим типом зусилля, швидко мінливих в короткий проміжок часу.

Для цього було проведено аналіз методів і приладів для визначення сил різання [105], [106], [107], [108], [109] і розроблено принципову схему вимірювального пристрою (рис. 4.23).

Система має пружний елемент, деформацію якого можна легко виміряти, – скобу 1 з двома плечима (рис. 4.23). Схожий принцип застосовувався раніше [110], [111], [112] і добре себе зарекомендував.

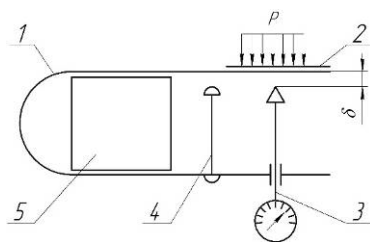


Рис. 4.23. Схема вимірювального пристрою: 1 – скоба; 2 – каретка; 3 – вимірювальний пристрій; 4 – запобіжний пристрій; 5 – буферна прокладка.

Каретка 2, сприймає як зосереджені, так і розподілені навантаження, жорстко прикріплюється до верхнього, менш потужного, плеча скоби. Також вона має можливість переміщатися уздовж скоби, змінюючи виліт плеча до місця прикладання сили (фактично змінюючи жорсткість скоби), для вимірювання навантажень в різних діапазонах. Це підвищує універсальність приладу. Величину необхідного вильоту визначають експериментально перед початком серії дослідів.

Вимірювальний пристрій 3 також має можливість переміщення вздовж

скоби. Для цього в нижній частині скоби, яка виконана більш масивною (для більш надійного її закріплення на верстаті і міцного утримання додаткових елементів 3 і 4) передбачений наскрізний повздовжній паз практично на всю довжину скоби. Вимірюваним параметром обраний зазор  $\delta$  (рис. 4.23), як пряма характеристика деформації пружного верхнього плеча скоби. Вимірювальний датчик має бути чутливим, малоінерційним, реагувати на швидкоплинні процеси за мілі секунди і бути відносно недорогим. Цим умовам задовольняють електричні аналогові пристрої, наприклад, з використанням безконтактної технології індуктивні датчики.

Запобіжний пристрій 4 найпростішої конструкції не допускає занадто велику деформацію скоби, в результаті якої може відбутися повний вибір зазору  $\delta$  і удар, торкання або тиск на датчик при попередньому налаштуванні динамометра перед початком експерименту або під час експерименту. Передбачено простий принцип його вертикального регулювання, а також можливість подальшого швидкого зняття з скоби.

Буферні прокладки 5 з різних матеріалів – пароніта, паролонна, гуми і тощо при необхідності можна встановлювати між плечима скоби для гасіння надмірного розгойдування верхнього плеча при вимірюванні непостійних або періодичних навантажень.

На даний пристрій (рис. 4.24, 4.25) отримано патент України №110930 [113].

Тарирування динамометра для визначення сил за величиною аналогового сигналу, проводили за допомогою контрольних мас, отримуючи тарирувальний графік навантаження  $P$  від вихідної напруги  $U$  і його рівняння:  $P = -160,71U + 1110,2$ .

В результаті кожного експерименту за допомогою програми «L-Graph» отримували осцилограмму (рис. 4.26), яку потім обробляли за допомогою демоверсії програми «Power-Graph», отримуючи максимальне значення радіальної сили.

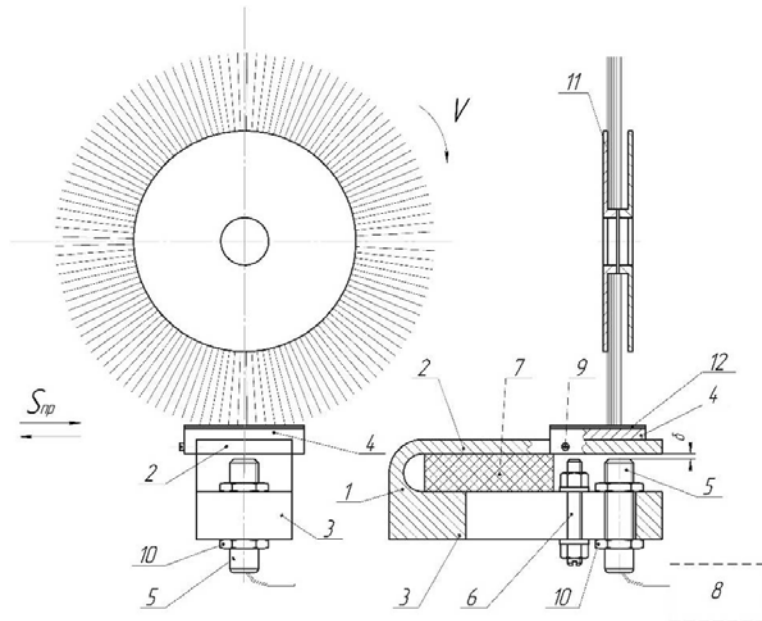


Рис. 4.24. Конструкція динамометра: 1 – пружня скоба; 2 – верхнє плече;  
 3 – нижнє плече; 4 – каретка; 5 – бесконтактний індукційний датчик  
 XS4РАВ110; 6 – запобіжний пристрій; 7 – буферна прокладка; 8 – ПК;  
 9 – гвинт; 10 – гайка; 11 – ПАЩ; 12 – зразок



а)



б)

Рис. 4.25. Вимірювання рівня сил від дискових ПАЩ з вилітом волокна  
 $L = 32$  мм (а) и  $L = 8$  мм (б)

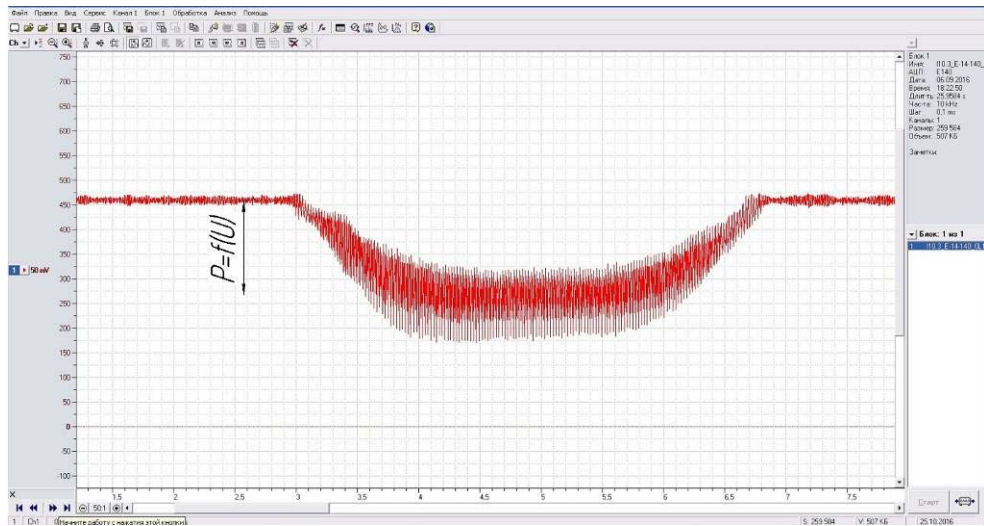


Рис. 4.26. Приклад осцилограми, отриманої в результаті експериментів

### 4.2.3 Експериментальні дослідження

Для дослідження силового впливу з боку ПАЩ на зразки варіювали наступними параметрами інструменту і режимами обробки:

- виліт волокон  $L = 8; 16; 32$  мм;
- подача  $S = 1,0; 3,5; 5,5; 10$  м/хв;
- натяг  $i = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0$  мм;
- швидкість  $V = 17; 27; 40$  м/с.

Інші параметри взято постійними: діаметр ПАЩ 150 мм; діаметр волокна 1,2 мм; матеріал абразиву 63С і його зернистість F80.

Результати експериментів зразків зі сталі 3 (рис. 4.27) підтвердили невисокий рівень силового впливу на зразок з боку дискової полімерно-абразивної щітки. У досліджених діапазонах параметрів щіток і режимів обробки значення радіальної сили становило 11...67 Н.

Зі збільшенням натягу  $i$  рівень силового впливу збільшується (рис. 4.27, а): для вильоту волокна  $L=8$  мм – пропорційно, так як інструмент за властивостями наближається до ШК. Для вильотів  $L=16$  і 32 мм при натягах більше 2 мм пружні волокна згинаються, збільшується кількість волокон, що

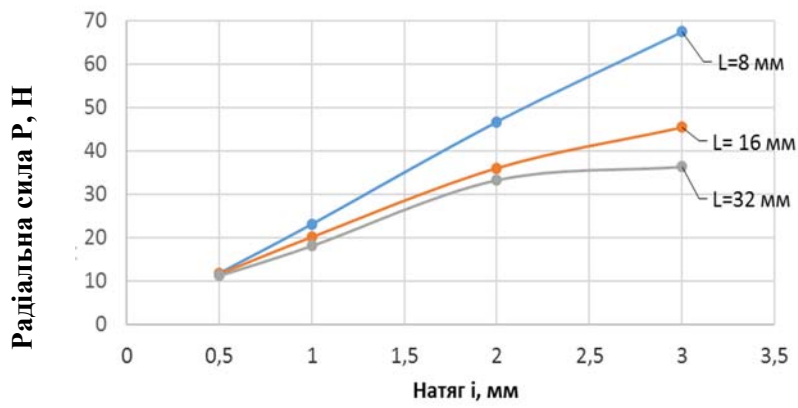
ковзають бічною поверхнею, жорсткість інструмента в цілому зменшується, тому сила  $P$  зі збільшенням натягу (при швидкості  $V=17$  м/с, що є для сталі 3 оптимальною) зростає менш інтенсивно.

Виліт волокон  $L$ , як показник жорсткості ПАЩ, показав очікувані результати – чим більше виліт, тим менше жорсткість інструмента в цілому, і, відповідно, нижчий рівень силового впливу (рис. 4.27, а, в).

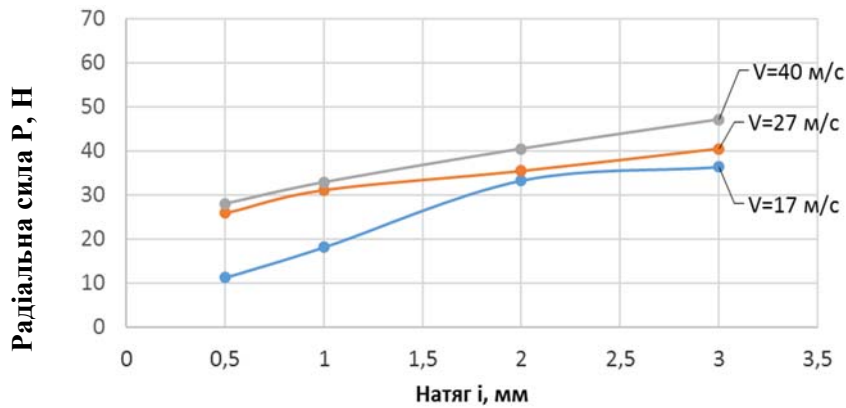
Практично не впливає на рівень силового впливу зміна значення поздовжньої подачі  $S_n=0,5...10$  м/хв (рис. 4.27, в), через те, що кількість волокон, які знаходяться в контакті зі зразком в одиницю часу залишається незмінною, зменшується тільки загальний час контакту ПАЩ зі зразком.

Збільшення окружної швидкості ПАЩ за рахунок збільшення динамічної і ударної складової, трохи підвищує рівень силового впливу на зразок (рис. 4.27, б).

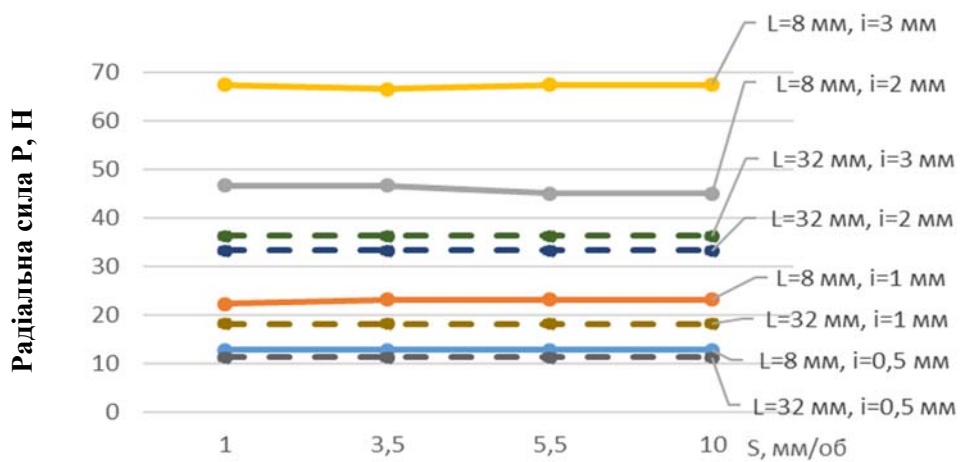
Для побудови математичної моделі застосували повний факторний експеримент (ПФЕ). Попередні експерименти показали переважно лінійний вид залежності (рис. 4.27), тому досить було дворівневого ПФЕ. У ньому кожен фактор представлений на двох рівнях, максимальному і мінімальному. Число можливих комбінацій всіх рівнів факторів  $N = 2^k$ , де  $k$  – число факторів. Як було зазначено вище, кількість варійованих факторів – чотири (натяг  $i$ , подача  $S$ , швидкість  $V$ , виліт волокон  $L$ ), отже, кількість дослідів – 16. Після нормування факторів (табл. 4.7) було складено матрицю експерименту (табл. 4.8).



а)  $D=150$   
 мм,  
 $d_6=1,2$  мм,  
 $V=17$  м/с,  
 $S=1$  м/хв



б)  $D=150$   
 мм,  
 $d_6=1,2$  мм,  
 $L=32$  мм,  
 $S=1$  м/хв



в)  $D=150$   
 мм,  
 $d_6=1,2$  мм,  
 $V=17$  м/с

Рис. 4.27. Залежність радіальної сили дії ПАЩ на зразок від: а – натяга  $i$  та виліту  $L$ ; б – натяга  $i$  та швидкості  $V$ ; в – від подачі  $S$ . Сталь 3

**Варіації рівней факторів**

Фактор	Натяг $i$		Подача $S$		Швидкість $V$		Виліт $L$	
	X1		X2		X3		X4	
Рівень	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Значення фактора	0,5	3,0	1	10	17	40	8	32

**Матриця планування ПФЕ**

Номер досліду	X1 ( $i$ )	X2 ( $S$ )	X3 ( $V$ )	X4 ( $L$ )
1	1	-1	-1	-1
2	1	1	1	1
3	-1	-1	-1	-1
4	-1	1	1	-1
5	-1	1	1	1
6	-1	-1	1	1
7	1	-1	-1	1
8	-1	1	-1	-1
9	1	-1	1	1
10	1	1	-1	1
11	1	-1	1	-1
12	1	1	1	-1
13	-1	-1	-1	1
14	-1	-1	1	-1
15	-1	1	-1	1
16	1	1	-1	-1

За цим планом було проведено відповідні експерименти, виміряно сила  $P_y$  (табл. 4.9) за запропонованою вище методикою. Розрахунки вели за допомогою пакету «Statistica».

Таблиця 4.9 –

**Матриця експерименту і результати вимірювання**

Номер дослідк	$i$ , мм	$S$ , м/хв	$V$ , м/с	$L$ , мм	$P_y$ , Н
1	3	1	17	8	67,4
2	3	10	40	32	47,1
3	0,5	1	17	8	11,8
4	0,5	10	40	8	42,8
5	0,5	10	40	32	26,3
6	0,5	1	40	32	26,3
7	3	1	17	32	36,3
8	0,5	10	17	8	11,8
9	3	1	40	32	47,1
10	3	10	17	32	36,3
11	3	1	40	8	91,9
12	3	10	40	8	91,4
13	0,5	1	17	32	11,2
14	0,5	1	40	8	42,7
15	0,5	10	17	32	11,2
16	3	10	17	8	67,4

Розраховували коефіцієнти регресії моделі 1-го порядку (без урахування взаємодії факторів між собою) і моделі 2-го порядку – з їх урахуванням. Після первинного дисперсійного та регресійного аналізу проявився фактор, що не впливає на величину радіальної сили. Подача  $S$  в дослідженому діапазоні, а також її взаємодія з іншими факторами не впливає на  $P_y$  (рис. 4.28, а; рис. 4.29, а). Після видалення  $S$  і повторного дисперсійного аналізу (рис. 4.28, б; рис. 4.29, б) були отримані модель 1-го порядку (4.16) і модель 2-го порядку (4.17)

$$P_y=9,68+15,04 \cdot i+0,8815 \cdot V-0,9656 \cdot L; R=0,89, \quad (4.16)$$

$$P_y=-27,31+27,53 \cdot i+1,58 \cdot V+0,64 \cdot L-0,09 \cdot i \cdot V-0,49 \cdot i \cdot L-0,027 \cdot V \cdot L; R=0,99. \quad (4.17)$$

Графічно збіг «передбачених» (розрахункових) та «спостережуваних» (експериментальних) значень показано на рис. 4.28, в, 4.29, в, відповідно, для моделей 1-го і 2-го порядку. Це ілюструє отримані коефіцієнти кореляції моделей: 0,89 і 0,99, відповідно.

Після проведення 10 контрольних дослідів з проміжними значеннями факторів, режимами, близькими до раціональних значень, середня похибка розрахунку функції відгуку склала, відповідно, 21,4% і 3,3%. Що говорить на користь моделі 2-го порядку.

Аналогічні результати були отримані на зразках з нікелевого сплаву ЭИ698-ВД.

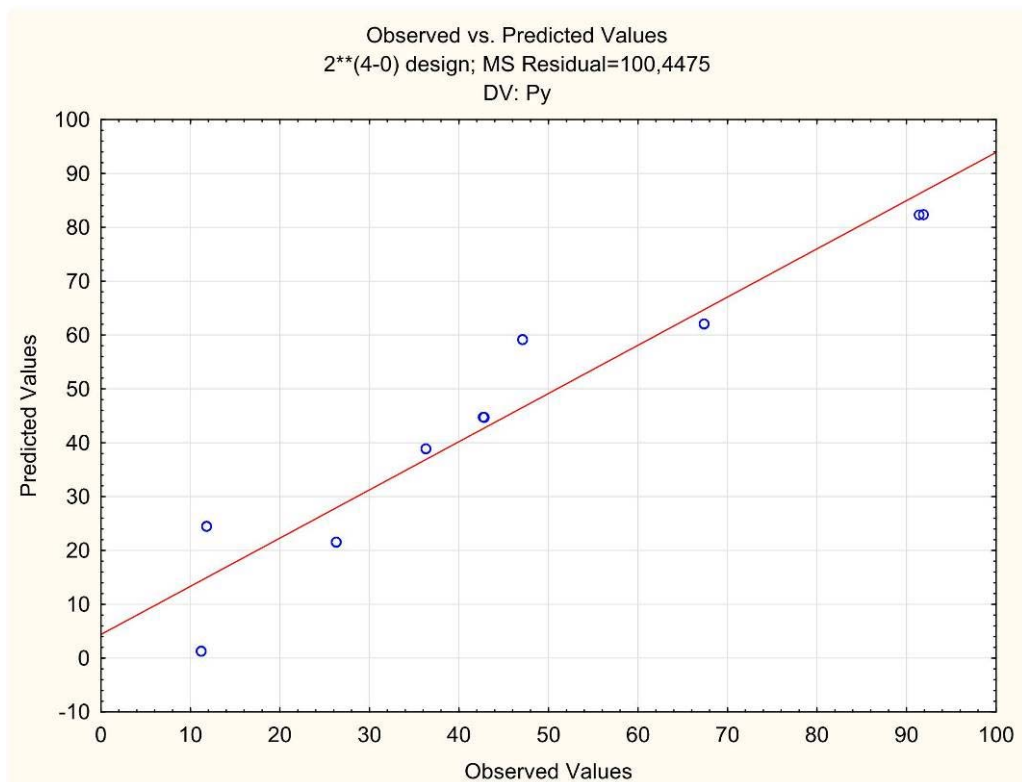
Такі ж експерименти було проведено для зразків з алюмінієвого сплаву АК7ч (рис. 4.30, а, б, в). Всі закономірності зміни  $P$  збереглися, але через більшу в'язкість матеріалу частина енергії силового впливу ПАЩ розсіювалися в зразку, тому радіальна сила впливу ПАЩ для даного матеріалу була менше (в залежності від режимів на 10...30%).

Regr. Coefficients; Var.:Py; R-sqr=,89529; Adj:,85722 (Ok_ish_sily.sta) 2**(4-0) design; MS Residual=100,4475 DV: Py						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(11)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	9,71219	9,162842	1,05995	0,311885	-10,4551	29,87947
(1)i	<b>15,04000</b>	<b>2,004470</b>	<b>7,50323</b>	<b>0,000012</b>	<b>10,6282</b>	<b>19,45181</b>
(2)S	-0,00556	0,556797	-0,00998	0,992218	-1,2311	1,21995
(3)V	<b>0,88152</b>	<b>0,217877</b>	<b>4,04596</b>	<b>0,001929</b>	<b>0,4020</b>	<b>1,36107</b>
(4)L	<b>-0,96562</b>	<b>0,208799</b>	<b>-4,62466</b>	<b>0,000735</b>	<b>-1,4252</b>	<b>-0,50606</b>

a)

Regr. Coefficients; Var.:Py; R-sqr=,89529; Adj:,86912 (Ok_ish_sily.sta) 2**(4-0) design; MS Residual=92,07771 DV: Py						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(12)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	9,68163	8,268321	1,17093	0,264354	-8,33349	27,69675
(1)i	<b>15,04000</b>	<b>1,919143</b>	<b>7,83683</b>	<b>0,000005</b>	<b>10,85855</b>	<b>19,22145</b>
(3)V	<b>0,88152</b>	<b>0,208602</b>	<b>4,22585</b>	<b>0,001177</b>	<b>0,42702</b>	<b>1,33603</b>
(4)L	<b>-0,96562</b>	<b>0,199911</b>	<b>-4,83028</b>	<b>0,000412</b>	<b>-1,40119</b>	<b>-0,53006</b>

б)



в)

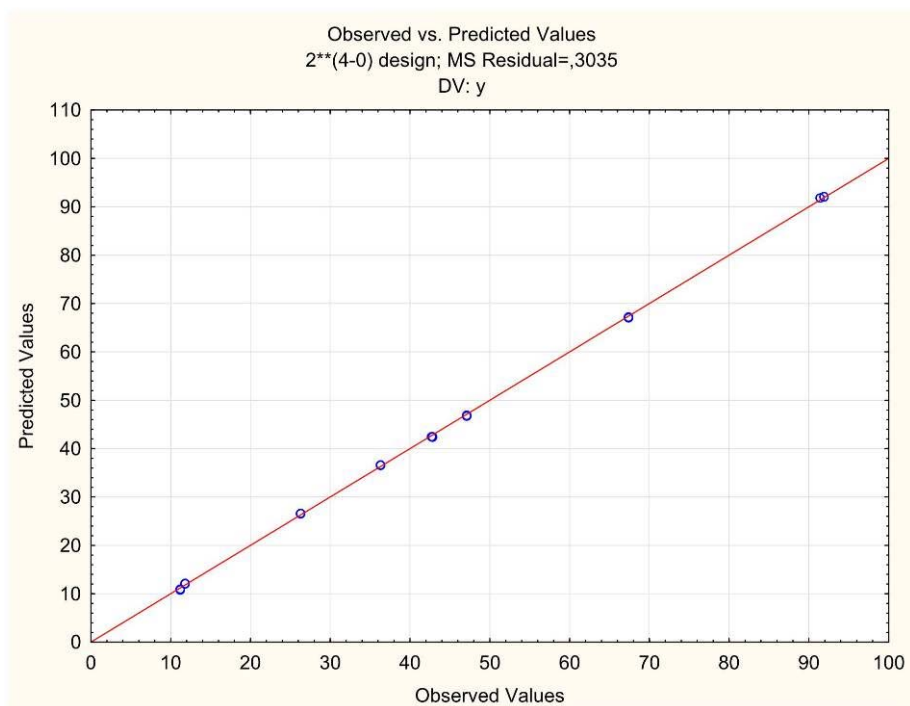
Рис. 4.28. Результати розрахунку моделі 1-го порядку

Regr. Coefficients; Var.:Py; R-sqr=,99986; Adj:,99957 (Ok_ish_sily.sta) 2**(4-0) design; MS Residual=,3035 DV: Py						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(5)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	<b>-27,3668</b>	<b>1,103265</b>	<b>-24,8053</b>	<b>0,000002</b>	<b>-30,2028</b>	<b>-24,5308</b>
(1)	<b>27,5694</b>	<b>0,372234</b>	<b>74,0647</b>	<b>0,000000</b>	<b>26,6126</b>	<b>28,5263</b>
(2)S	0,0106	0,105489	0,1007	0,923722	-0,2605	0,2818
(3)V	<b>1,5824</b>	<b>0,032206</b>	<b>49,1324</b>	<b>0,000000</b>	<b>1,4996</b>	<b>1,6652</b>
(4)L	<b>0,6428</b>	<b>0,037359</b>	<b>17,2057</b>	<b>0,000012</b>	<b>0,5468</b>	<b>0,7388</b>
1 by 2	-0,0067	0,024485	-0,2723	0,796295	-0,0696	0,0563
1 by 3	<b>-0,0957</b>	<b>0,009581</b>	<b>-9,9835</b>	<b>0,000172</b>	<b>-0,1203</b>	<b>-0,0710</b>
1 by 4	<b>-0,4883</b>	<b>0,009182</b>	<b>-53,1849</b>	<b>0,000000</b>	<b>-0,5119</b>	<b>-0,4647</b>
2 by 3	-0,0005	0,002661	-0,1815	0,863090	-0,0073	0,0064
2 by 4	0,0005	0,002551	0,1815	0,863090	-0,0061	0,0070
3 by 4	<b>-0,0265</b>	<b>0,000998</b>	<b>-26,5924</b>	<b>0,000001</b>	<b>-0,0291</b>	<b>-0,0240</b>

a)

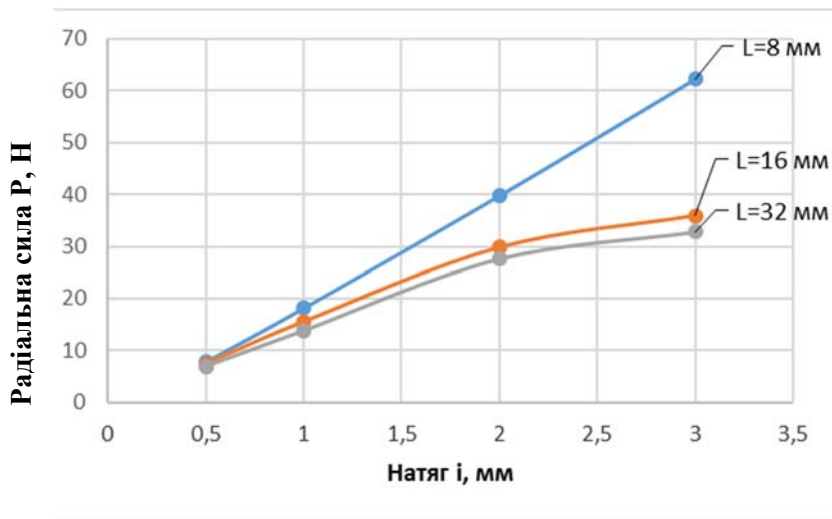
Regr. Coefficients; Var.:Py; R-sqr=,99985; Adj:,99975 (Ok_ish_sily.sta) 2**(4-0) design; MS Residual=,1744444 DV: Py						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(9)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	<b>-27,3084</b>	<b>0,711430</b>	<b>-38,3852</b>	<b>0,000000</b>	<b>-28,9178</b>	<b>-25,6990</b>
(1)i	<b>27,5328</b>	<b>0,263090</b>	<b>104,6514</b>	<b>0,000000</b>	<b>26,9376</b>	<b>28,1279</b>
(3)V	<b>1,5797</b>	<b>0,021749</b>	<b>72,6331</b>	<b>0,000000</b>	<b>1,5305</b>	<b>1,6289</b>
(4)L	<b>0,6453</b>	<b>0,026251</b>	<b>24,5833</b>	<b>0,000000</b>	<b>0,5860</b>	<b>0,7047</b>
1 by 3	<b>-0,0957</b>	<b>0,007264</b>	<b>-13,1684</b>	<b>0,000000</b>	<b>-0,1121</b>	<b>-0,0792</b>
1 by 4	<b>-0,4883</b>	<b>0,006961</b>	<b>-70,1518</b>	<b>0,000000</b>	<b>-0,5041</b>	<b>-0,4726</b>
3 by 4	<b>-0,0265</b>	<b>0,000757</b>	<b>-35,0759</b>	<b>0,000000</b>	<b>-0,0283</b>	<b>-0,0248</b>

б)

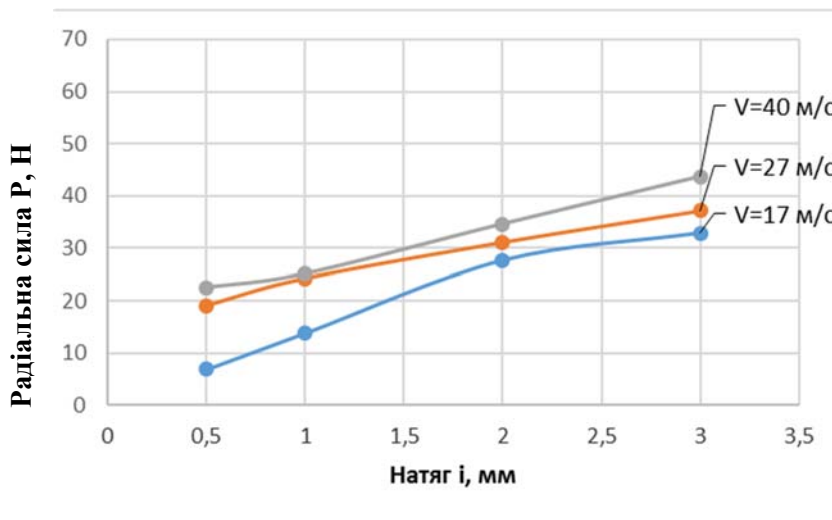


в)

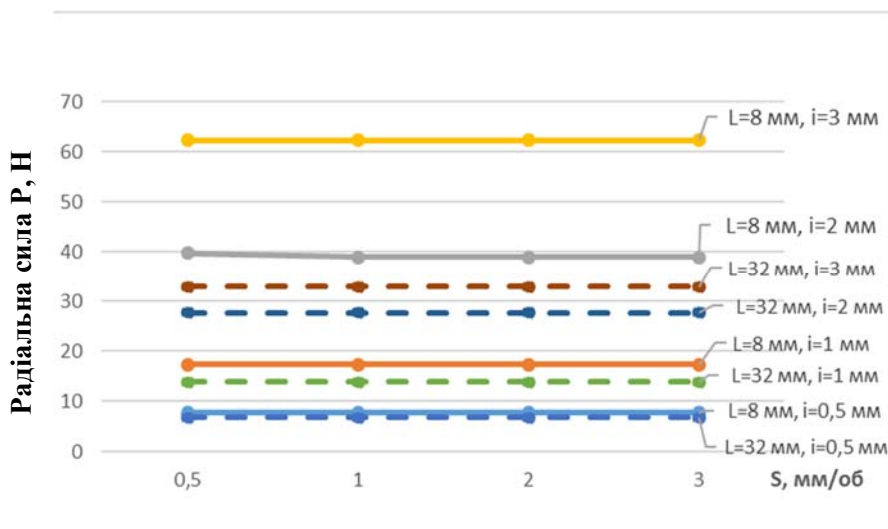
Рис. 4.29. Результати розрахунку моделі 2-го порядку



а)  $D=150$  мм,  
 $d_{\delta}=1,2$  мм,  $V=17$  м/с,  
 $S=1$  м/хв



б)  $D=150$  мм,  
 $d_{\delta}=1,2$  мм,  $L=32$  мм,  
 $S=1$  м/хв



в)  $D=150$  мм,  
 $d_{\delta}=1,2$  мм,  $V=17$  м/с

Рис. 4.30. Залежність радіальної сили дії ПАЩ на зразок від: а – натягу  $i$  та виліту  $L$ ; б – натягу  $i$  та швидкості  $V$ ; в – від подачі  $S$ . АК7 ч

### 4.3 Висновки

1. Розроблено пристрій і методику визначення критичних температур розм'якшення і плавлення полімерно-абразивних волокон, що безпосередньо впливають на їх працездатний стан. Пристрій простої конструкції дозволяє перевіряти термостійкість дроту, волокон, проводів з різних матеріалів. Температура розм'якшення ПА волокон різних фірм-виробників, при якій знижуються експлуатаційні властивості волокон, склала 55...120 °С.

2. Запропоновано методику і розроблено пристрій, що дозволяє вимірювати температуру в зоні контакту щітки і зразка при обробці ПАЩ. Для матеріалів, що мають різні теплофізичні властивості (сталі, алюмінієві, титанові і нікелеві сплави), визначено обмеження щодо режимів обробки і параметрів ПАЩ. Підтверджено невисокий рівень теплового впливу на зразок (менше 80 °С) при застосуванні раціональних режимів і умов обробки.

3. Для одиничного волокна було визначено радіальну силу першого удару при вході в контакт зі зразком за допомогою аналітичного розрахунку, комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень. Вона склала 0,65...1,3 Н, що при зосередженій локальній ударній дії досить для отримання зміцнюючого ефекту.

4. Для вивчення силового впливу ПАЩ розроблено оригінальний динамометр, який можна використовувати для вимірювання постійних сил, що діють на зразок, але особливу цінність він має при вимірюванні змінних зусиль, особливо, які змінюються в короткі проміжки часу. Встановлено, що обробка на різних режимах дисковими ПАЩ не робить значного силового впливу на оброблювану поверхню (не перевищує 100 Н), тому такий вид фінішної обробки можна рекомендувати для тонкостінних деталей.

## РОЗДІЛ 5

### ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПАЩ НА ФІНІШНОМУ ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ І РЕМОНТУ ТОНКОСТІННИХ І СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

#### **5.1 Загальні принципи вибору ПАЩ для обробки тонкостінних і складнопрофільних деталей**

За результатами проведених досліджень можна сформулювати загальні принципи, якими необхідно керуватися при виборі щіткових полімерно-абразивних інструментів, умов і режимів обробки для певної операції в такому порядку:

1) вид ПАЩ (дискові, циліндричні, чашкові, торцеві тощо) визначається конфігурацією складнопрофільних елементів деталей і наявністю і формою важкодоступних місць обробки;

2) матеріал абразивного зерна в полімерному волокні залежить від матеріалу оброблюваної деталі. Якщо певних «протипоказань» немає, то поширенішими є ПА волокна на базі карбиду кремнію, – він на 20% продуктивніший, ніж електрокорунд нормальний;

3) оскільки у більшості випадків зернистість абразиву визначає діаметр ПА волокон, то ці два параметри вибирають в комплексі, залежно від двох чинників: глибини шару, що знімається, і необхідної шорсткості обробленої поверхні. У загальному випадку більш інтенсивне видалення певного шару матеріалу деталі забезпечить крупнозернистий абразив і, відповідно, ПАЩ з більшим діаметром волокон (1,2...1,6 мм). Тонкі волокна з дрібнодисперсним абразивом виконують тонке полірування, забезпечуючи високу якість отриманої поверхні;

4) за цими ж чинниками вибирають виліт волокон: «жорстка» ПАЩ з невеликим вильотом волокон (8...12 мм) забезпечує грубішу обробку з видаленням тонкого основного шару матеріалу з поверхні деталі

(обмеженням тут може служити тепловий фактор); «м'яка» щітка – з великим вилітом волокон (20...35 мм) – полірує м'якше, працює з мікронерівностями поверхні, що оброблюється, додатково наводячи сприятливі властивості поверхневого шару;

5) раціональне значення натягу практично в усіх випадках 1...2 мм. Занадто мала величина знижує продуктивність обробки через меншу кількість абразивних зерен, що беруть участь в процесі мікрорізання, занадто велика – підвищує відсоток роботи бічної поверхні волокон, що також знижує продуктивність і призводить до невиправданого зношення інструменту;

б) швидкість різання для досліджених матеріалів (сталь, алюмінієві, титанові і нікелеві сплави) слід вибирати в діапазоні 15...30 м/с. Проте через теплове обмеження при швидкості вище 25 м/с маз бути інтенсивна подача охолоджувального середовища в зону контакту, щоб виключити плавлення волокон, що перегріваються. Поверхні, що мають великі мікронерівності, у вигляді хвилястості, необхідно обробляти на знижених швидкостях (4...7 м/с);

7) вибір подачі. Раціональне значення повздовжньої подачі дискових ПАЩ складає 1 м/хв; поперечна подача залежить від необхідної тривалості обробки елементарної площі поверхні або кількості подвійних ходів;

8) застосування охолоджувальних середовищ не є обов'язковим при дотриманні раціональних умов і режимів обробки, за винятком обробки матеріалів з низькою теплопровідністю (наприклад, титан і титанові сплави), для яких застосування ЗОТС є обов'язковим. Вид ЗОТС обирають залежно від оброблюваного матеріалу, оскільки полімерна основа щіткових ПА інструментів стійка до розчинів більшості лугів і кислот.

Дотримання цих рекомендацій дозволяє забезпечити необхідну продуктивність обробки, необхідну якість отримуваної поверхні і високу стійкість ПАЩ.

Отримані дані було використано при розробці технологічних рекомендацій для ряду операцій фінішного етапу технологічного процесу виготовлення тонкостінних складнопрофільних деталей з різних матеріалів (п.5.2-5.6).

## **5.2 Диски газотурбінних двигунів**

Одним з представників особливоріповідальних тонкостінних і складнопрофільних деталей є диски газотурбінних двигунів (ГТД), які встановлюють на літальні апарати (ЛА) і енергетичні установки (ЕУ). Для виконання свого функціонального призначення вони виготовляються з жароміцних сталей і сплавів, які відносяться до групи важкооброблюваних матеріалів. Ці деталі, важконавантажені в експлуатації, можуть обмежувати ресурс роботи усього двигуна, тому підвищенню якості поверхонь, як резерву підвищення ресурсу таких деталей, приділяється значна увага. Вибір інструментів і методів для фінішних операцій при виготовленні і ремонті цих специфічних деталей, які часто відрізняються конфігурацією (виробництво дрібносерійне і одиничне – як виготовлення, так і ремонт), викликає відомі ускладнення.

Характерним прикладом є лопатеві диски компресорів і турбін авіаційних двигунів. Для прикладу були узяті середньогабаритні типові диски 6 та 7 ступенів компресора високого тиску (КВТ) авіадвигуна Д-36. Диски виготовляють з жароміцного нікелевого сплаву ЭИ698-ВД, що має у своєму складі інтерметалідну жароміцну  $\gamma'$ -фазу [119], що різко знижує властивості оброблюваності цього матеріалу.

Конструктивною особливістю цих дисків є полотно завтовшки від 2,5 мм в самій тонкостінній частині (при загальному діаметрі  $\approx 500$  мм) і складнопрофільна ободна частина з пазами типу «ластівчин хвіст», які

прорізано під кутом  $40^\circ$  до осі диска (рис. 5.1) набором з декількох протяжок. Кількість пазів кожного диска цих ступенів – понад 100.

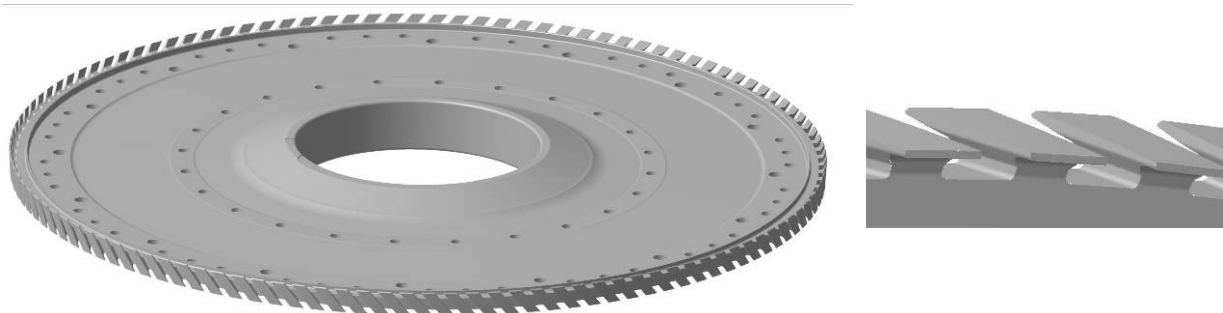


Рис. 5.1. Модель диска 6-го ступеня КВТ авіаційного двигуна Д-36 і його ободна частина

Механізація слюсарної операції видалення задирок, отриманих після протягання пазів типу «ластівчин хвіст» (рис. 5.2, а), і притупленню усіх гострих крайок пазів і міжпазових виступів ободної частини є актуальним завданням, яке необхідно вирішувати також і в ремонтній технології цих дисків при перепротяганні пазів [78], [79].

Метою вдосконалення фінішного етапу технологічного процесу виготовлення лопатевих дисків було спростити, механізувати, зменшити тривалість і вартість проведення цього етапу робіт.

За діючою технологією трудомістка операція видалення задирок і зняття фаски на гострих крайках (рис. 5.2, б) по контуру пазів з двох боків диска виконується вручну. Використовують інструмент – спеціальну фрезу, що за формою нагадує зенковку (приводиться в обертання бормашинкою пневматичного типу ТПМ-3), який вимагає частої заміни через інтенсивне затуплення при різанні важкооброблюваного матеріалу диска. Деталь встановлюють на підставку і вручну провертають після обробки декількох пазів чергового сектора. Потім диск перевертають і обробляють з іншого боку. Тривалість цієї операції в середньому складає 216 хвилин.

Потім для зняття отриманих на цій операції дрібніших вторинних задирок і заокруглення крайок фаски і інших елементів ободної частини

застосовують турбоабразивний метод, після чого конфігурація крайок має форму згладженої фаски (рис. 5.2, в).

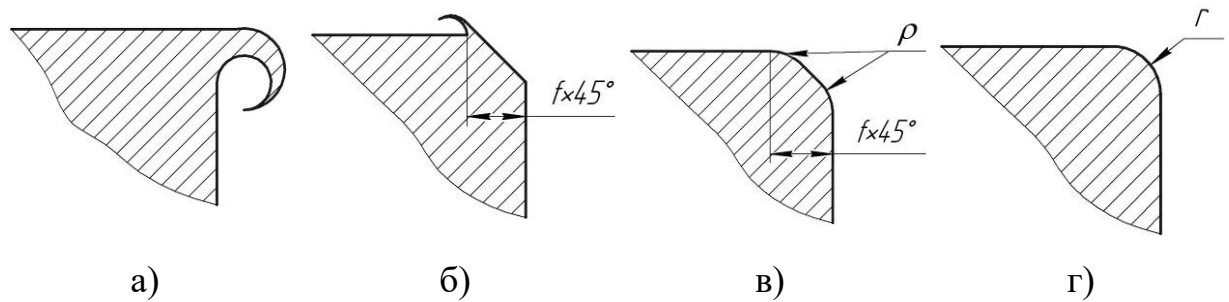


Рис. 5.2. Етапи видалення задирок в пазах типу «ластівчин хвіст» після протягання

Спробою зменшити частку ручної праці на цьому етапі явилось застосування автоматизованої установки [120], компоновання якої показане на рис. 5.3 (схема розроблялась за участі здобувачів освіти ЗДТУ).

Для підвищення продуктивності одночасно в роботі знаходяться 4 спеціальних фрези – дві на кожній стороні диска. Тривалість операції 27 хв.

Проте попередній розрахунок показав, що вартість виготовлення цієї установки виявилася дуже високою через жорсткі вимоги до точності позиціонування інструменту відносно деталі, наявності дорогих елементів – кулачків, ділального механізму, командоапарата, і необхідності частої заміни зношених інструментів в процесі обробки одного диска. Додаткова автоматизація цього допоміжного переходу значно ускладнила конструкцію пристрою. До того ж залишилась необхідність проведення турбоабразивної обробки.

Оптимальнішим геометричним рішенням зменшення концентрації напружень при притуплюванні гострих крайок є отримання при цьому не фаски, а радіусу заокруглення (рис. 5.2, г), проте його отримання зв'язане з величезними трудовитратами і складністю автоматизації процесу. У кінці 80-х, початку 90-х років минулого століття було зроблено спробу зняти задирки і отримати радіус заокруглення ручним способом за допомогою каната,

просоченого пастою ГОИ. Через високу вартість і дуже низьку продуктивність цю операцію було визнано нераціональною.

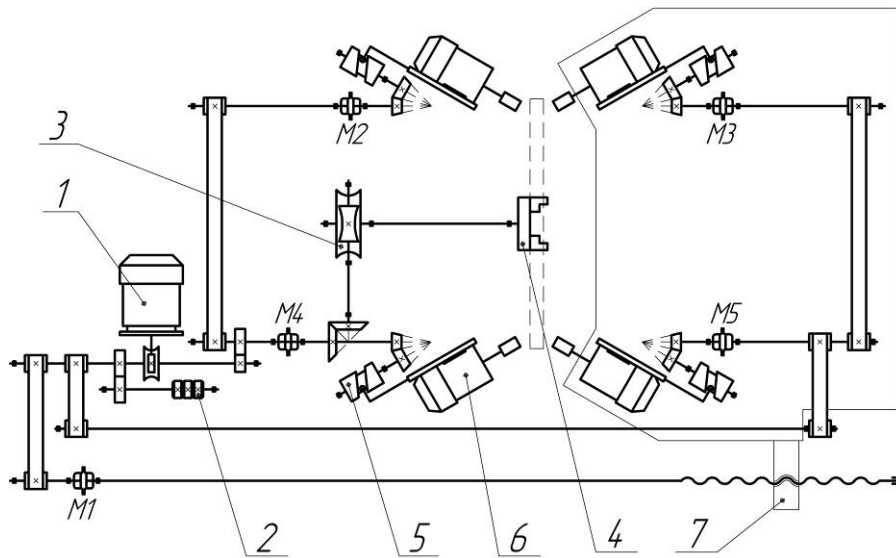


Рис. 5.3. Компонувальна схема установки для зняття гострих краєнок пазів «ластівчин хвіст» диска КВТ за допомогою спеціальних фрез:

- 1 – електродвигун, 2 – командоапарат, 3 – ділильний механізм,
- 4 – розтискна оправка, 5 – механізм подач, 6 – виконавчий орган,
- 7 – ходовий гвинт

Слід зазначити, що у фінішному етапі обробки серійних дисків наявна операція полірування полотна, де механізовано тільки привід обертання деталі, а силова дія на полірувальний важіль і переміщення полірувальника виконується вручну слюсарем за допомогою дерев'яного важіля.

Для удосконалення фінішної обробки цих дисків і заміни ручної праці механізованою запропоновано замінити три операції: зняття задирок і заокруглення гострих кромek пазів спеціальною фрезою, турбоабразивну обробку ободної частини і полірування полотна дисків – на одну полірувальну операцію з використанням трьох типів ПАЩ (рис. 1.2, а, б, в, рис. 5.4) і установки (рис. 5.5). Цей варіант дозволяє максимально використати переваги різних типів ПАЩ.

Дискові (1), діаметром 150 мм (рис. 5.4) швидко видаляють задирки по усьому контуру паза; кінцеві торцеві, які називають чашковими (2) діаметром 45 мм забезпечують отримання рівномірного радіусу заокруглення по контуру міжпазового виступу 0,4...0,5 мм; циліндричні (3) діаметром 75...150 мм розташовані діаметрально для полірування полотна диска.

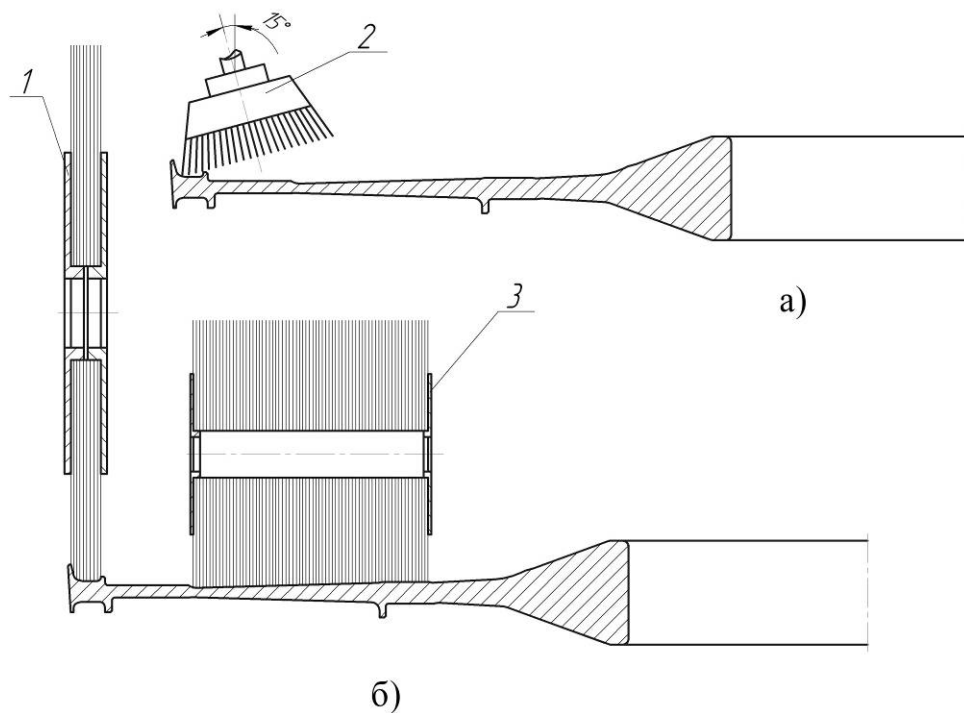


Рис. 5.4. Схематичне зображення розташування інструментів і диска:

1 – дискова ПАЩ, 2 – чашкова ПАЩ, 3 – циліндрична ПАЩ

На кожному боці деталі працюють шість ПА щіток одночасно; диск робить 5 повних обертів в один бік, потім 5 – в інший (механізм реверсування обертання диска на схемі рис. 5.5 не показано).

Конструкція цієї установки набагато простіша, універсальніше і, відповідно, дешевше, – немає необхідності в ділильному пристрої, в кулачках, в складному командоапараті. Інструменти постійно знаходяться у контакті з деталлю, яка безперервно обертається, забезпечуючи необхідну подачу.

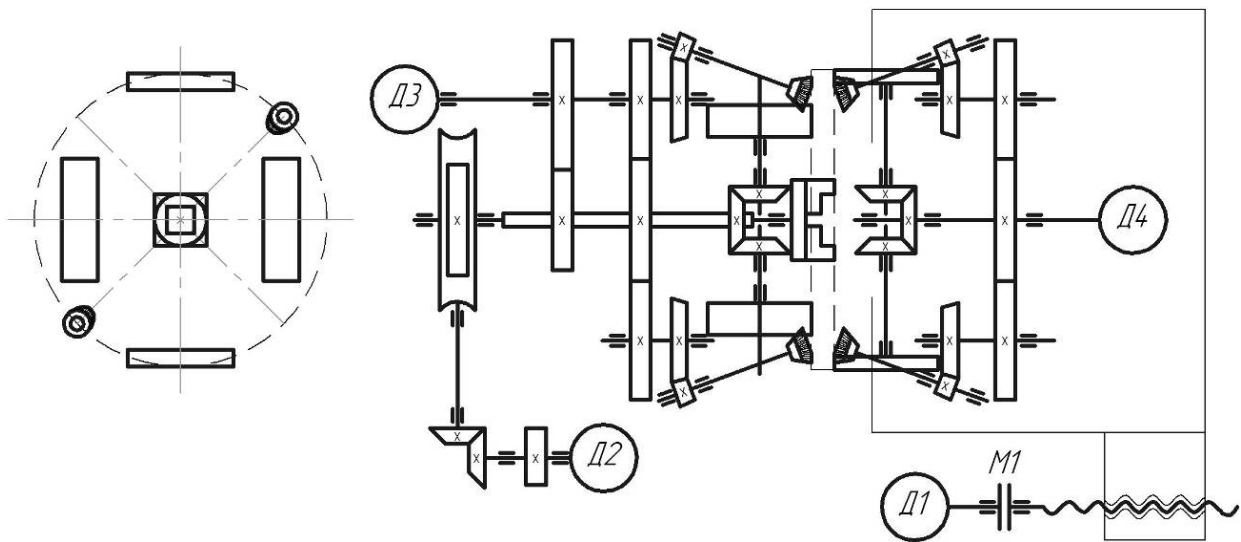


Рис. 5.5. Компонувальна схема установки з ПАЩ диска ГТД

Виміри отриманого контура радіусу заокруглення (п.2.2.2) в різних місцях крайки паза – в гострому і тупому кутах біля основи міжпазового виступу і в середині крайки дна усіх оброблених пазів з двох боків показали, що радіуси заокруглення після обробки двома типами ПАЩ мають рівномірний контур і досягають величини 0,4...0,6 мм [74], що забезпечує вимоги креслення.

Для описаних трьох варіантів фінішного етапу було проведено техніко-економічний розрахунок [120], який показав, що за відсутності ручної праці і відносно простої конструкції установки ПА щітки забезпечують кращу якість, найменшу тривалість операції (14 хв.) і значно меншу собівартість.

Для здешевлення виконання цієї операції замість нової установки можна застосувати вже існуючу установку, використовувану раніше для полірування дисків сизалевими кругами до появи турбоабразивної установки (рис. 5.6).

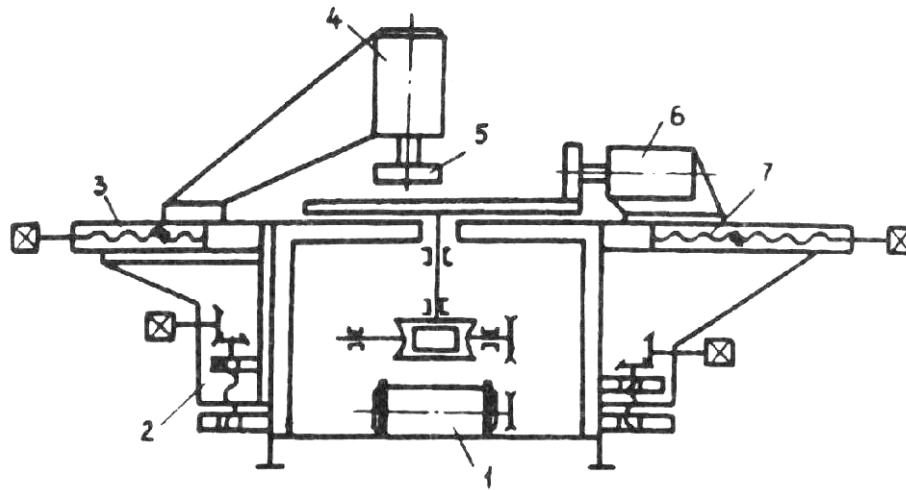


Рис. 5.6. Схема установки для полірування сизалевими кругами [75]:  
1, 4, 6 – електродвигуни; 2 – корпус; 3 – спрямляюча; 5 – сизалевий круг

Цей варіант фінішного етапу виграє за рахунок того, що ця установка існує, апробована і вимагає тільки невеликої модернізації [79], [121].

Технологічні рекомендації, параметри інструментів, умови і режими обробки для виконання цієї операції приведено в додатку Б. В результаті заміни трьох операцій фінішного етапу, дві з яких виконували в ручному режимі, на одну – механізовану, повністю була видалена ручна праця, геометрія конструктивних елементів – стабільна (у діапазоні допусків креслення) в 7-10 разів скоротилася тривалість і в 2-4 рази вартість фінішної обробки цих поверхонь [122].

### 5.3 Лопатки газотурбінних двигунів

Лопатки – деталі лопаткових машин, призначені для зміни в них параметрів газу або рідини. Лопатки працюють в потоці, параметри якого дуже сильно змінюються по її довжині. Лопатки ГТД, що застосовуються в ЛА і ЕУ, в компресорах і турбінах, мають специфічну форму: поперечний переріз по довжині плавно зменшується від кореневого перерізу до вершини,

певний кут початкового закручування і так звані кути положень перерізів по висоті з плавним збільшенням від кореня (комлевої частини) до вершини. Ці особливості геометрії, як і габаритні розміри, змінюються в широких діапазонах для різних лопаток (рис. 5.7) навіть в межах одного двигуна.



Рис. 5.7. Конструкції лопаток [123]

Конструкція лопаток повинна задовольняти вимогам аеродинаміки, міцності і технологічності виготовлення [124], [125], [125], [127]. Проте, в усіх випадках, лопатки відносяться до тонкостінних складнопрофільних деталей. Необхідно пам'ятати, що їх виготовляють з важкооброблюваних жароміцних сплавів на нікелевій і титановій основі.

### 5.3.1 Перо лопатки

Технологія формуючого етапу виготовлення пера лопатки і, звичайно, вимоги креслення переважно визначають вибір методів фінішної обробки.

Найбільш простий варіант – безрозмірне полірування після чистових операцій оброблення пера лопаток. Складніше – доведення розмірів по перерізах або видалення «строчок» (рис. 5.10 а), що залишились після напівчистового високошвидкісного фрезерування. В усіх випадках специфічна конструкція пера і дрібносерійне виробництво викликає певні затруднення в пошуку і затвердженні тих або інших фінішних методів обробки, у тому числі і з використанням ручної праці, що вимагає дуже високої кваліфікації і великого досвіду робітника, тому виключення ручної праці є одним з першочергових завдань.

Метою цього етапу роботи було автоматизувати процес видалення «строчок» після швидкісного фрезерування і процес полірування пера, забезпечивши точність і якість, вказану на кресленні, на прикладі лопаток 1-го ступеня КВТ авіадвигуна Д-36, виготовлених з жароміцного титанового сплаву BT8-M (рис. 5.8).

Завершальною операцією формоутворення пера цих лопаток є високошвидкісне фрезерування, що виконується на 5-ти координатному фрезерному верстаті моделі «Starragheckart SX-051 B». Лопатки встановлюють в затискне пристосування верстата, закріплюють за хвостовик, підтискають правим центром по «полиці» (технологічній штучній базі) і обробляють за програмою набором спеціальних фрез послідовно. Після цього залишаються «строчки» заввишки 0,03 мм і кроком 0,8 мм, що відносяться швидше до хвилястості, чим до шорсткості. Для їх видалення застосовували ручну доводку і послідовне полірування декількома шліфувальними кругами різної «м'якості» і зернистості на полірувальній бабці. Робота ручна монотонна і тривала.



Рис. 5.8. Зовнішній вигляд лопатки 1-го ступеня КВД

Складність ручної доводки і полірування полягає у збереженні форми початкових перерізів лопатки, які контролюються по 7-ми рівням, рахуючи від кореневого перерізу. Тому регулярно робітник призупиняє полірування і контролює лопатку на контрольному пристосуванні, щоб не «прослабити» розміри пера лопатки, що є непоправним браком деталі. У зв'язку з цим робітник виконує полірування обережно, знімаючи мінімальний шар, через що тривалість цієї операції багаторазово подовжується і може скласти 0,5...2 години.

Для виключення ручної праці в магазин 5-ти координатного верстата «Starragheckart SX-051 B», на якому виконувалось напівчистове ірезерування пера лопатки, за допомогою спеціально сконструйованих перехідників, що відбалансували, було встановлено два типи ПАЩ (рис. 5.9) фірми «Osborn» [128].

Попередні дослідження показали, що дискова полімерно-абразивна щітка  $\varnothing 75$  мм з вилітом волокон 12 мм забезпечує високу продуктивність обробки спинки і корита лопаток, не травмує вхідну і вихідну крайки лопаток, але недостатньо захоплює прикомлеву ділянку.

Найбільш раціональним варіантом обробки лопаток є послідовне застосування дискової і кінцевої (кистьової) ПАЩ (рис. 1.2, а, г); кінцева ПАЩ забезпечує обробку важкодоступних місць прикомлевої частини і полірувальний ефект [129]. Результатом є повне видалення гребінців «строчок» і значне поліпшення параметрів шорсткості.

Для отримання програми обходу складнопрофільних аеродинамічних поверхонь корита і спинки використали 3D-модель лопатки, створену в пакеті «Unigraphics».

Конструктивно-технологічні особливості 5-ти координатного фрезерного верстата зумовили поворот осі дискової ПАЩ на  $75^\circ$ , що забезпечило правильну адаптацію програми без втрати продуктивності.

Програма забезпечувала повну обробку усіх поверхонь (рис. 5.9, а, б) пера лопатки. Поперечна подача 1 мм/хід при гарантованій активній ширині

майданчика контакту «інструмент-деталь» 10 мм дозволяє виконати 10 встановлених ходів для видалення «рядків».

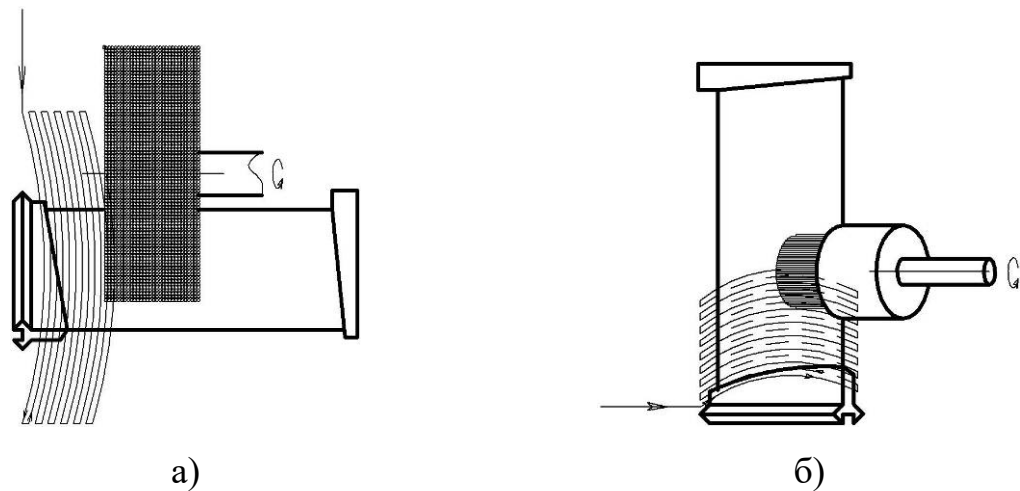


Рис. 5.9. Схема обробки пера лопаток: а – дискова ПАЩ; б – кінцева ПАЩ

Для визначення інтенсивності обробки різних ділянок корита і спинки проводився контроль геометричних розмірів лопатки по перерізах до обробки ПАЩ і після (додаток В, таблиця В1). Було встановлено, що глибина знятого шару з урахуванням висоти гребінців рядків і сходинок прикомлевої частини складає 0,01...0,18 мм. В середньому було знято шар 0,06 мм. В цілому лопатка успішно пройшла контроль. Надалі ці дані використовувалися для коригування програми, щоб змінити інтенсивність обробки окремо взятих ділянок, наприклад, збільшуючи або зменшуючи поперечну подачу, натяг тощо.

Контроль якості поверхні показав поліпшення шорсткості в 4...10 разів (додаток В, таблиця В2), а також повне видалення «строчок» (рис. 5.10).

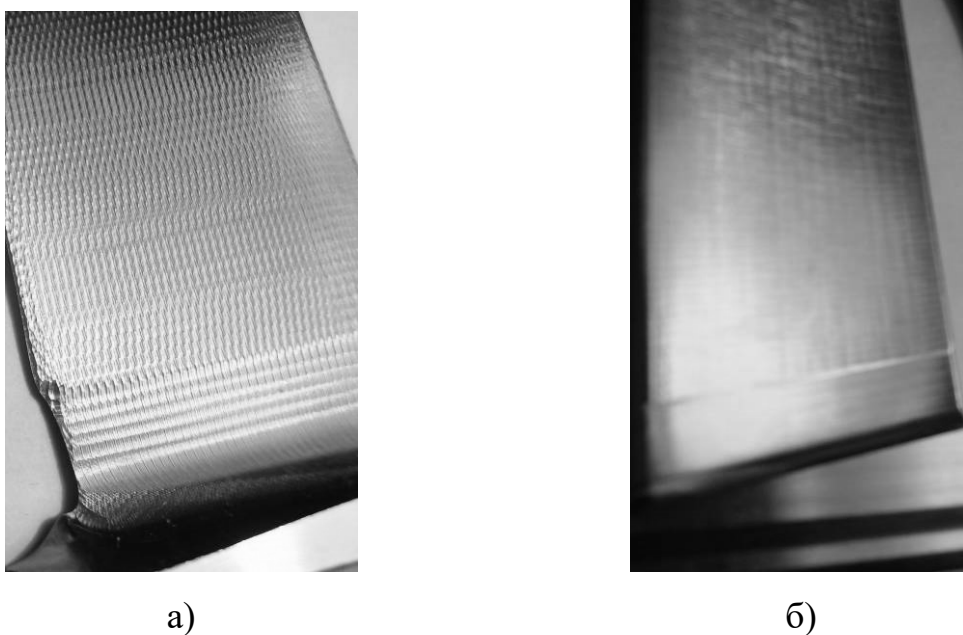


Рис. 5.10. Поверхня корита лопатки ( $\times 1,5$ ): а – до обробки ПАЩ з «строчками»; б – після обробки ПАЩ.

Цю частину фінішного етапу можна виконувати на 3-х координатних верстатах, враховуючи, що доступ ЗОТС в зону обробки має бути інтенсивним (через низьку теплопровідність титанових сплавів); робоча зона верстата має бути герметично закрита через розбризкування охолоджувального середовища волокнами ПАЩ.

При завчасному перерахуванні технологічних припусків з урахуванням автоматичного виконання полірування ПАЩ (тобто після значного зменшення припуску, що раніш залишили під ручне полірування), тривалість і вартість цього етапу різко скорочується.

В результаті проведених досліджень були запропоновані технологічні рекомендації (додаток Г) щодо застосування інструменту на основі полімерно-абразивних волокон для фінішної обробки пера лопаток ГТД, не знімаючи деталі з верстата. Це дозволило скоротити число перезакріплень оброблюваної деталі, зменшити частку ручної праці, спростити технологічний цикл і підвищити точність обробки.

### 5.3.2 Хвостовики лопаток

Основними формоутворюючими операціями виготовлення хвостовиків лопаток [124] залежно від конструкції є: фрезерування, протягання, фасонне шліфування або їх комбінації [130]. В усіх випадках на складнопрофільних крайках хвостовика залишаються задирки, які видаляють різними способами: у дрібногабаритних лопаток – віброгалтовкою, у середньо- і великогабаритних – переважно на ручній слюсарній операції. Найскладніше обробляти хвостовики типу «ялинка». Особливо, коли форма і розмір радіусу заокруглення строго регламентовані.

Мета цього етапу роботи – за допомогою ПАЩ мінімізувати частку ручної праці і зменшити тривалість слюсарної операції на прикладі обробки «ялинкового» хвостовика робочих лопаток турбіни двигуна ТВ3-117, виготовлених з жароміцного нікелевого сплаву ЭИ437Б-ВД (рис. 5.11).

Попередні експерименти, проведені за розробленою методикою (п. 2.2.2), показали, що для отримання радіусу заокруглення правильної форми поверхня із задиркою має бути виставлена під кутом  $77...80^\circ$  до напрямку подачі ПАЩ.

Для правильного положення лопатки під час обробки хвостовика застосували експериментальну наладку (рис. 5.12), яка дозволяє виставляти площини хвостовика під будь-яким кутом.

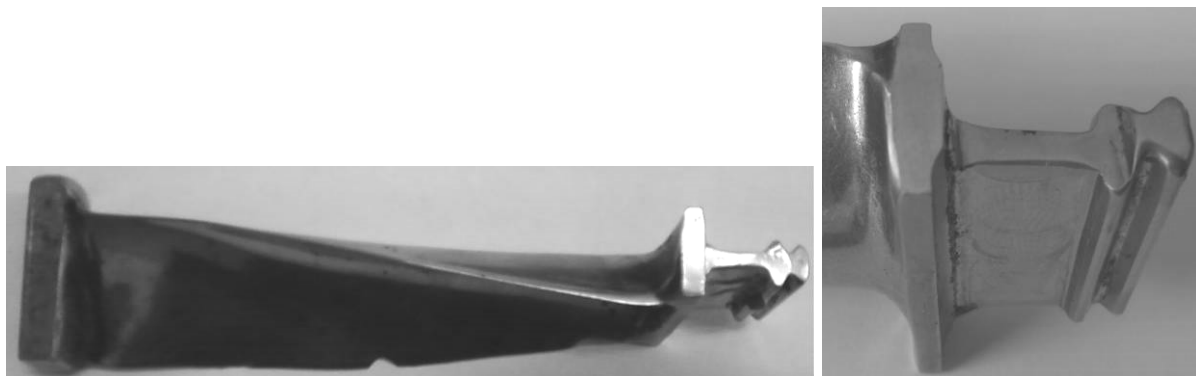


Рис. 5.11. Зовнішній вигляд лопатки з «ялинковим» хвостовиком

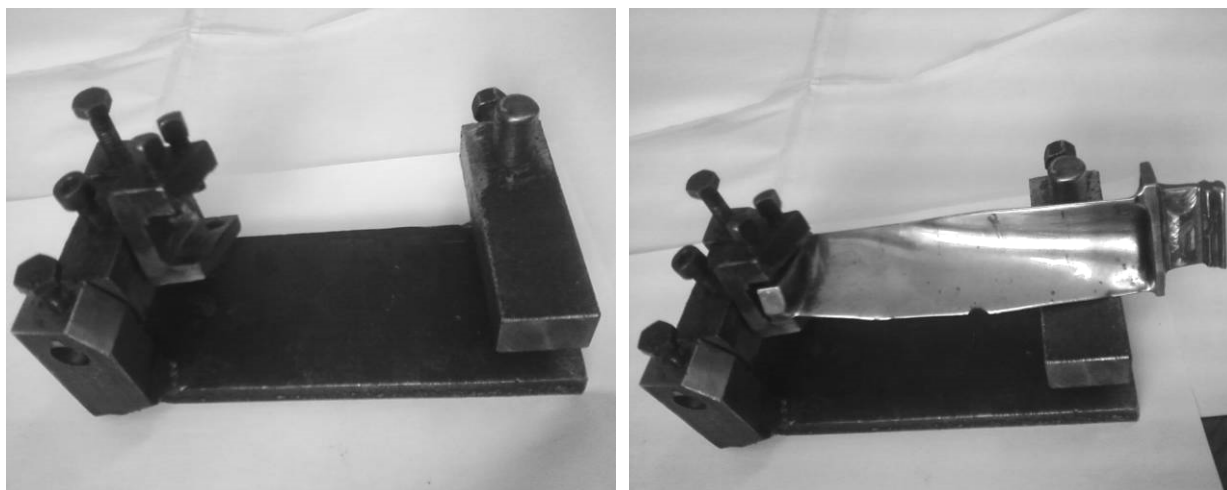


Рис. 5.12. Конструкція наладки (установочного елемента) для робочої лопатки турбіни двигуна ТВ3-117

Після обробки кожного хвостовика (видалення задирок і заокруглення гострих крайок) на раціональних режимах визначених в п.3.6, його контролювали в 24-х точках (рис. 2.5).

Величина радіусу заокруглень кромки на ніжці по кресленню складає 0,3...0,9 мм; по «ялинці» 0,1...0,4 мм.

Результати контролю наступні:

- на ніжці хвостовика по усіх перерізах і гранях радіус заокруглення – правильної форми, його величина 0,25...0,6 мм;

- по контуру «ялинкової» частини всю задирку видалено, величина радіусу в западині і виступах крайки «ялинки» складає 0,1...0,3 мм, що забезпечує виконання вимог креслення;

- оскільки плоскі поверхні хвостовика не обробляються взагалі (його встановлено під кутом і обробляється тільки крайка), то їх розмір залишається початковим.

На сьогодні на підприємстві є спеціальна полірувальна установка з поворотним столом, яку використовують переважно для полірування полотна і інших суцільних поверхонь дисків ГТД (рис. 5.6), а також для обробки лопаток, встановлених в так звані «технологічні» (монтажні) диски, сизалевими кругами.

Установка складається з тумби-корпусу, в якій вертикально встановлено двигун, що обертає поворотний стіл. Над столом діаметрально розташовано два кронштейни з електродвигунами (полірувальні бабки), що приводять в дію сизалеві круги. Конструкція кронштейнів (салазки та кутова планка) дає можливість виставити інструмент на певний діаметр поворотного столу і під певним кутом. Зазвичай деталь (диск ГТД або монтажний диск з лопатками) встановлюється в центрі поворотного столу і закріплюється.

Як було встановлено, для найбільш якісного і продуктивного видалення крайок і заокруглення гострих кромek формуванням радіусу заокруглення на «ялинкових» хвостовиках лопаток необхідне забезпечення раціональних режимів різання (різних для різних матеріалів лопаток), певного положення гострої крайки із задиркою по відношенню до інструменту, а також реверсивне обертання полімерно-абразивних щіток.

Виходячи з вищесказаного, для використання цієї установки (зі збереженням її універсальності) для цієї слюсарної операції необхідно наступне:

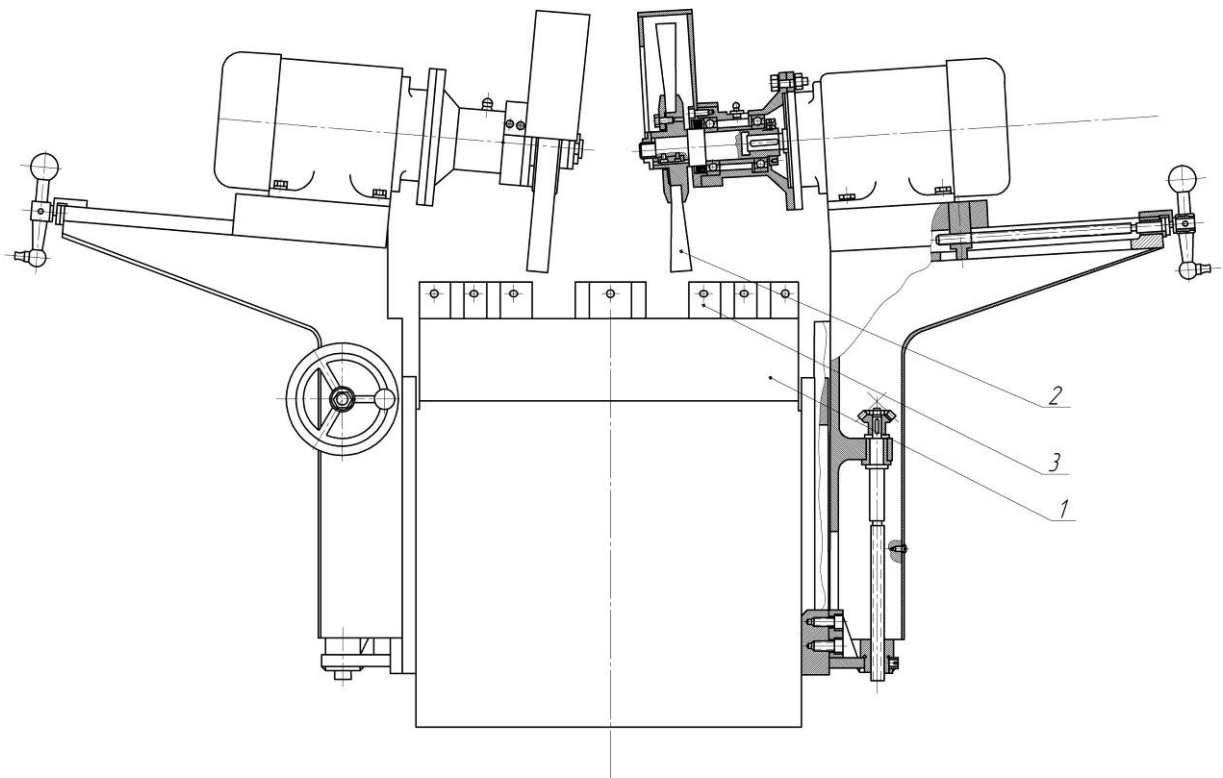
- центральний двигун обертання столу повинен мати окружну швидкість в діапазоні 0,5...3 м/хв (що для оброблюваних хвостовиків забезпечує необхідну поздовжню подачу), тобто частота обертання поворотного столу має бути регульованою без втрати потужності (з урахуванням величини діаметру, на якому розташовані оброблювані елементи деталей 300...700 мм) в діапазоні  $n=1...5$  об/хв;

- дві діаметрально розташовані полірувальні бабки також повинні мати двигуни з регульованою частотою обертання, оскільки швидкість обробки ПАЩ різних жароміцних матеріалів, варіюється від 4 до 18 м/с. Враховуючи, що діаметр дискових ПАЩ також можна вибирати залежно від робіт (від 75 до 250 мм), що проводяться, діапазон частоти обертання складає  $n=300...4600$  об/хв. Їх обертання у різних напрямках одночасно забезпечує врізне полірування (для зняття задирки) і попутне (для формування правильної форми радіусу скруглення), що робить непотрібною додаткову

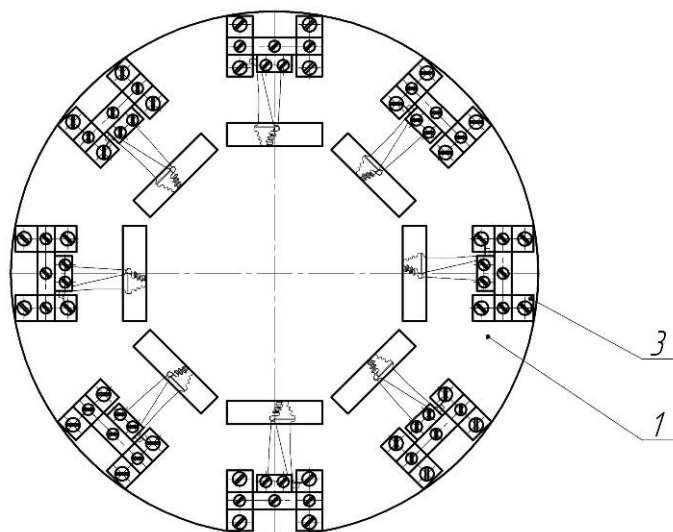
функцію реверсу у разі застосування однієї ПАЩ (у початковій установці центральний двигун мав функцію реверсу);

- для установки хвостовиків лопаток в певне кутове положення, що забезпечує найбільш продуктивну обробку, потрібний спеціальний установочний елемент – наладка – досить універсальний, щоб встановлювати, перевстановлювати і закріплювати лопатки подібних типорозмірів. Така наладка для робочої лопатки турбіни двигуна ТВЗ-117, що дозволяє переставляти лопатку чотирма гранями хвостовика під кутом  $10^\circ$  до площини столу, було розроблено з урахуванням простоти і надійності конструкції (рис. 5.12). Декілька поворотних вісей, і рухома підйомна планка забезпечують будь-яке положення лопаток. Таких установочних елементів на поворотний стіл можна встановити від 8 і більше (рис. 5.13). Недолік цієї конструкції в тому, що кожного разу лопатки необхідно виставляти під певним кутом за допомогою шаблону. Альтернативою цій наладці є монтажні диски з пазами для хвостовиків. Перевага їх застосування в тому, що відпадає необхідність виставляти кожну лопатку під необхідним кутом і закріплювати, тобто значно скорочується допоміжний час, особливо у тому випадку, якщо в наборі більше 10-ти лопаток, оскільки в диск встановлюються усі лопатки набору. Проте недоліки наступні – для обробки кромки хвостовика з чотирьох боків необхідні два монтажні диски двосторонньої конструкції. Їх собівартість висока. Крім того, кожна пара дисків призначена для установки набору лопаток одного типорозміра, тобто для кожного набору іншого типорозміру лопаток необхідно виготовляти нові монтажні диски;

- по можливості необхідно передбачити подачу ЗОТС (розпилюванням або краплинно). Забезпечити видалення дрібної стружки (в оригінальній установці вона є); встановити лічильник обертів столу (1 оберт столу еквівалентний 1 подв.х.).



а)



б)

Рис. 5.13. Схема установки для слюсарної обробки хвостовиків лопаток (а) з поворотним столом (б): 1 – поворотний стіл; 2 – полімерно-абразивна щітка; 3 – установочний елемент (наладка) з лопаткою.

Як альтернатива існуючій установці, в якій переміщення лопаток забезпечується обертанням поворотного столу було запропоновано касетне

приспособлення, разом з яким лопатки переміщуються прямолінійно. У простому випадку це приспособлення (рис. 5.14), можна встановлювати на столі будь-якого площинношліфувального верстата, закріпивши на шпинделі замість шліфувального круга дискову полімерно-абразивну щітку. На станині верстата закріплюється мікрометричний індикаторний годинник, що дозволяє точно встановлювати натяг ПАЩ.

Приспособлення є плитою, до якої кріпляться установочні елементи, – наладки для лопаток (зовнішній вигляд – рис. 5.12, ескіз – рис. 5.14). Їх можна встановлювати впритул один до одного. Підйомна планка виконана загальною для усіх наладок, що зменшує час установки лопаток.

Для обробки хвостовиків лопаток з жароміцного сплаву на нікелевій основі ЭИ437Б-ВД було розроблено технологічні рекомендації (додаток Д).

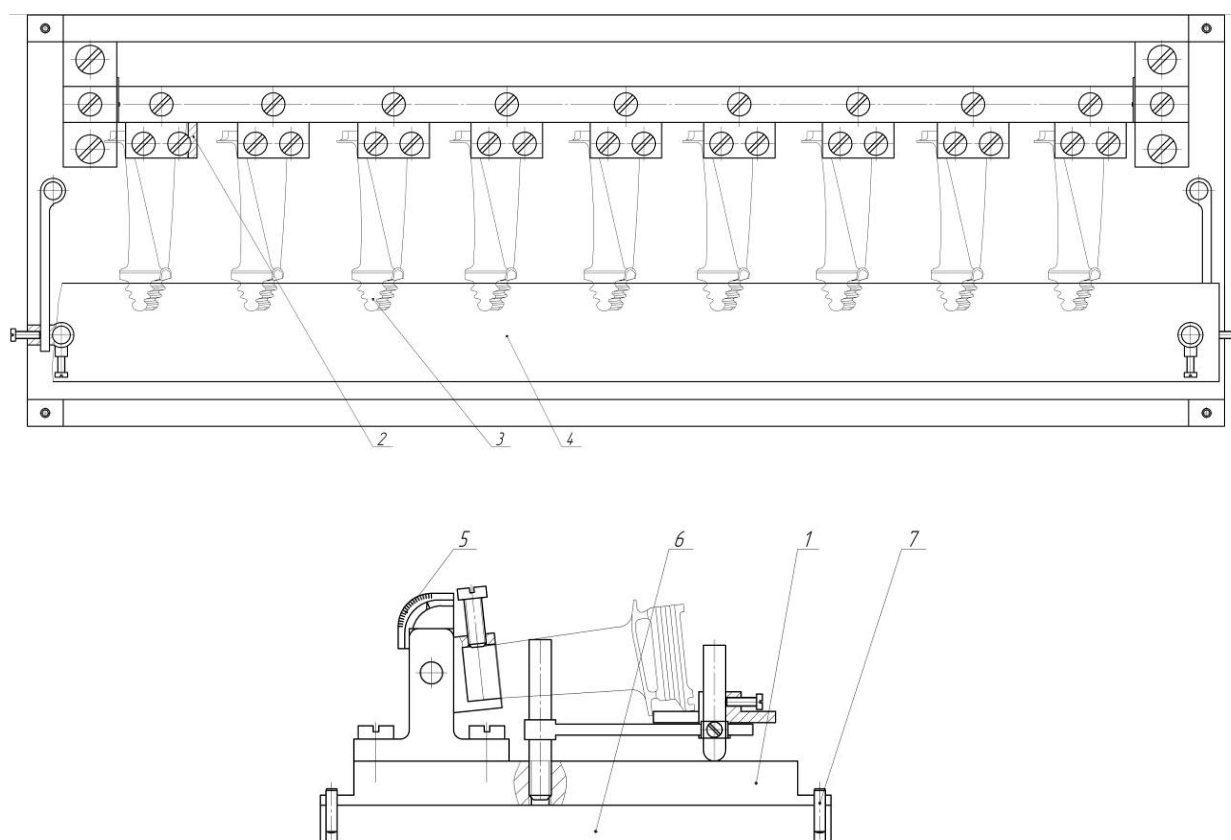


Рис. 5.14. Схема касетного приспособлення: 1 – плита; 2 – установочний елемент; 3 – деталь; 4 – підйомна планка; 5 – кутомір; 6 – поворотна плита; 7 – штифт

Для визначення найбільш економічного варіанту було проведено техніко-економічне порівняння [131] 4-х варіантів виконання технології фінішної обробки хвостовиків лопаток:

- варіант 1 – вручну на шліфувальній установці – полірувальній бабці (базова технологія);
- варіант 2 – двома ПАЩ, працюючими одночасно, на установці з поворотним столом і наладками;
- варіант 3 – двома ПАЩ на установці з поворотним столом за допомогою монтажного диска;
- варіант 4 – однієї ПАЩ на площинношліфувальному верстаті в касетному пристосуванні з наладками.

Техніко-економічний розрахунок варіантів виконання слюсарної обробки крайок «ялинкових» хвостовиків наведено у додатку Е.

Наближений розрахунок економічної ефективності застосування розглянутих варіантів виконання цієї фінішної операції, в перерахунку на 1 лопатку, показав наступне. Застосовуючи механізовану установку і пристосування (варіанти 2 і 4), час обробки можна скоротити в 2...3 рази в порівнянні з ручною операцією, а у разі застосування монтажних дисків (варіант 3) – більш ніж в 10 разів.

Собівартість механізованої операції по 2-у варіанту в 2 рази менше виконуваної вручну, а по 4-у варіанту – майже в 4 рази. У 3-му варіанті вартість виготовлення монтажних дисків перевищує ефект від скорочення тривалості операції.

Таким чином, касетне пристосування (варіант 4) для площинношліфувального верстата дає можливість механізувати операцію зняття задирок, значно скоротити вартість і час виконання робіт.

Оскільки конструкція запропонованих наладок універсальна, їх можна застосовувати для середньогабаритних лопаток не лише турбін, але і компресорів і забезпечити повне завантаження устаткування.

## 5.4 Конічні шестерні

Якщо оброблювана деталь має елементи зубчастого зачеплення, трудомісткість слюсарних операцій істотно зростає, що в сукупності з ручним характером виконання може вплинути на якість готового продукту. Обробка циліндричних зубчастих коліс за допомогою ПАЩ показала високу якість [43].

Конічні шестерні мають свої конструктивні особливості. У зв'язку з цим було запропоновано метод фінішної обробки зубчастого вінця конічної шестерні, що дозволяє виконати слюсарну обробку по видаленню задирок і заокругленню гострих кромek з високою продуктивністю і якістю.

Для виконання слюсарної обробки контура вінця конічної шестерні в напівавтоматичному режимі запропонована компоновальна схема установка (рис. 5.15). В процесі обробки використовуються два види ПАЩ: дискова 1 і кінцева 2. Це обумовлено тим, що зубчастий вінець має два різних складнопрофільних контура – з двох боків (на вході різального інструменту – гостра кромка, на виході – задирка). Така схема забезпечує знімання задирок як з торцевої частини евольвенти зубчастого вінця, так і з довколишніх кромek криволінійного профілю шестерні. Після того, як деталь зробить 5 обертів (загальне число проходів  $n=10$  подв.х.), включається реверсивне обертання деталі і повторна обробка для рівномірного зняття задирок з обох боків западин зубчастого вінця.

З метою збільшення продуктивності слюсарної операції в схемі передбачена установка двох інструментів кожного виду.

Таким чином, застосування полімерно-абразивного інструменту при виконанні слюсарних операцій дозволить істотно збільшити продуктивність обробки, забезпечивши її високу якість і стабільність, незалежно від майстерності і рівня кваліфікації робітника [132].

Для середньо- і великогабаритних зубчастих коліс на деяких підприємствах застосовують крацовку металевою щіткою. В цьому випадку

досить використати те ж устаткування і поміняти тільки інструменти. При цьому безпосереднє зняття задирок також відбувається повністю в автоматичному режимі, обробляються також всі поверхні зубців (бічні поверхні, виступи і западини), гарантується відсутність прижогів на поверхнях зубчастих коліс, а також перенесення металу механічної щітки на поверхні деталі.

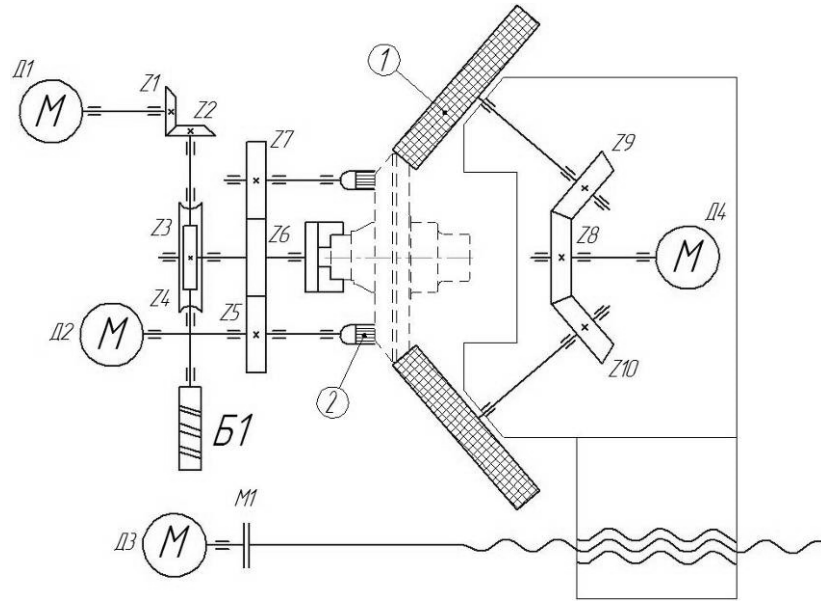


Рис. 5.15. Компоновочна схема установки для зняття задирок по контуру зубчастого вінця конічної шестерні

Режими і умови обробки залежать від матеріалу колеса; вони визначені в п.3.6.

## 5.5 Оздоблювальна і слюсарна обробка алюмінієвих деталей

В результаті поступового зношення ливарних форм і відсутності можливості їх заміни, при отриманні складнопрофільних відливок в кокіль і під тиском, трудомісткість подальших слюсарних і оздоблювальних операцій доведення заготовок до споживчого виду різко зростає. До того ж частина ручної праці при обламуванні і видаленні залишків обля, задирок і

заокруглення гострих крайок через складну конфігурацію виливків займає велику частину процесу виготовлення з них деталей, – особливо за відсутності подальшої механічної обробки, наприклад, у разі тільки подальшого нанесення захисно-декоративних покриттів. Попри те, що більшість алюмінієвих сплавів вважаються легкооброблюємими, тонкі кромки, які необхідно видалити, мають підвищену твердість і крихкість. Це затруднює процес обробки і зменшує розрахункову стійкість інструменту.

Високу якість показали полімерно-абразивні щітки за умови застосування раніше визначених раціональних режимів і умов обробки при зачистці дрібно- і середньогабаритних виливків радіаторів і корпусів, «зірочок», деталей інвалідних колясок і сепараторів, виготовлених з алюмінію і сплавів на його основі [133].

Алюміній відноситься до матеріалів з високою теплопровідністю, які швидко відводять тепло в тіло деталі із зони обробки, що дає можливість використати «жорсткі» режими і параметри ПАЩ (без застосування ЗОТС).

Враховуючи, що полімерно-абразивні волокна найбільш продуктивно працюють торцевою частиною, необхідно чітко витримувати призначену величину натягу. Гнучкість полімерно-абразивних щіток дає можливість обходити частини конструкції деталі, що виступають, і обробляти важкодоступні місця виливків.

Більшість операцій слюсарної обробки полімерно-абразивним щітковим інструментом для видалення залишкового облоя, задирок і заокруглення гострих крайок алюмінієвих виливків вдалося механізувати, використовуючи при цьому звичайні площинношліфувальні верстати або спеціально сконструйовані установки нескладної конструкції.

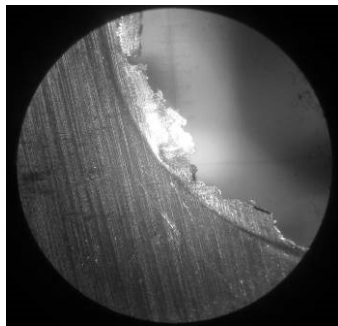
Залишковий облой великих розмірів 1...10 мм (рис. 5.16), видалявся вручну заздалегідь – це не вимагало великих зусиль, оскільки його товщина складала 0,1...0,3 мм. Після цього необхідно видалити задирку, що залишилась, і заокруглити гостру крайку.

У цих типах деталей форма радіусу заокруглення не мала значення –

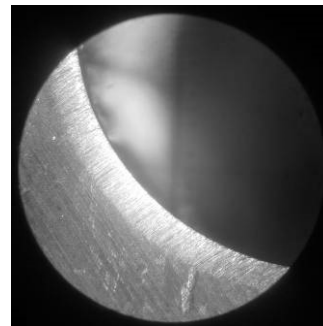
головне – це відсутність задирки і гострої крайки. Величина радіусу заокруглення (який в деяких деталях за вимогами креслення допускається замінювати фаскою) складала 0,2...0,4 мм. Це досягалось за 3...5 подв. ходів (рис. 5.17).



Рис. 5.16. Облой, що залишився на виливках (×3)



×10



×10



Рис. 5.17. Крайки корпусу до і після обробки ПАЩ

Технологічні рекомендації, параметри інструментів, умови і режими обробки для виконання таких операцій приведено в додатку Ж.

У разі великої товщини залишкової задирки можна застосовувати металеві щітки [20], а потім для декору – ПАЩ.

## **5.6 Особливості застосування ПАЩ в ремонтних технологіях відновлення деталей, що були в експлуатації**

Через поступове зношення парку ГТД літальних апаратів, наземних енергетичних установок і газоперекачуючих станцій якість проведення ремонтних робіт для продовження ресурсу двигунів представляє велику важливість. До складних операцій ремонтного виробництва відноситься зняття нагару, окисленого шару або зношеного покриття із складнопрофільних поверхонь деталей ГТД. Наприклад, видалення 10...30 мкм по глибині шару поверхонь хвостовика типу «ялінка» або «ластівчин хвіст», або з аеродинамічних поверхонь пера лопатки із збереженням заданої форми і розмірів представляє певну складність. Для деяких з перерахованих робіт було використано ПА щітки [49].

Для видалення окисленого шару з лопаток були вибрані дискові ПАЩ, особливістю яких є волокно відносно малого діаметру 0,6...1 мм. Такі волокна мають підвищену гнучкість і можливість обробляти важкодоступні місця хвостовика і комлевої частини лопаток, такі як пази, западини, виточки.

Для збільшення продуктивності послідовно було застосовано декілька дискових ПАЩ:

- діаметр інструменту 150 мм, діаметр волокон 1 мм, зернистість абразиву F80 – для швидкого зняття основного дефектного шару і нагару;
- діаметр інструменту 150 мм, діаметр волокон 0,6 мм, зернистість абразиву F280...F320 – для остаточного полірування;
- діаметр інструменту 75 мм, діаметр волокон 0,6 мм, зернистість абразиву F280 – для остаточної обробки корита лопатки.

Для апробації запропонованої ремонтної технології було оброблено

декілька лопаток останніх ступенів компресора з жароміцного сплаву на нікелевій основі ЭИ698-ВД, перо яких піддалось інтенсивному окисленню на глибину 20...25 мкм. Цей шар було видалено, якість обробки складала  $Ra$  0,4...0,5 мкм.

Також успішно ПАЩ було видалено нагар з «ялинкової» поверхні хвостовика лопаток турбіни [134], виготовлених з жароміцного титанового сплаву BT8 (рис. 5.18).

Високоєфективною показала себе обробка ПАЩ дрібногабаритних ремонтних лопаток компресора (середня товщина пера яких складає 0,5...1 мм) по зняттю тонкого шару захисного покриття нітриду титану глибиною 15 мкм (рис. 5.19). Після контролю і відновлення пера, TiN наносять знову.

В результаті можна зробити висновок, що полімерно-абразивні щіткові інструменти можна ефективно застосовувати в ремонтному виробництві перед відновними операціями для очищення поверхонь складного профілю деталей, виготовлених з різних і матеріалів, у тому числі з важкооброблюваних жароміцних нікелевих титанових сплавів.



Рис. 5.18. Хвостовик лопатки турбіни до і після видалення нагару ( $\times 0,5$ )



Рис. 5.19. Зовнішній вигляд лопатки компресора до і після зняття захисного покриття TiN ( $\times 2$ )

Режими обробки вищеперелічених операцій вибирались відповідно до матеріалу деталі.

## **5.7 Висновки**

1. Розроблено оригінальні спеціальні і універсальні пристосування для закріплення деталей ГТД специфічної форми і обробки їх ПА щітками.

2. Розроблено технологічні рекомендації по застосуванню ПАЩ для фінішної обробки тонкостінних складнопрофільних деталей з різних, у тому числі і важкооброблюваних, матеріалів можна без доопрацювання включати в технологічні процеси виготовлення і ремонтного відновлення:

- дисків ГТД;

- лопаток ГТД;

- зубчастих коліс, «зірочок», корпусів, радіаторів тощо з метою підвищення ефективності фінішної обробки вищеописаних і подібних до них деталей.

3. Застосування ПАЩ для досліджених складнопрофільних і тонкостінних деталей скорочує час фінішної обробки в 2...10 разів, собівартість операцій в 2...4 раза. Також більшість операцій були механізовані, що дало можливість повністю відмовитися від ручної праці або значно скоротити її частку від загальної тривалості фінішного етапу виготовлення або ремонту деталей.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Провівши аналіз відомих на даний момент доступних методів і інструментів фінішної обробки тонкостінних і складнопрофільних виробів було встановлено, що високоефективною альтернативою є застосування щіткових інструментів обертальної дії на основі полімерно-абразивних волокон.

2. Результати вивчення формування якості поверхні і властивостей поверхневого шару при обробці ПАЩ показують можливість забезпечення необхідної чистоти поверхні ( $Ra$  0,2...1,6 мкм) і наведення сприятливих властивостей поверхневого шару (наклеп 7...20 %; залишкові напруження стискування  $-50...-150$  МПа на глибині до 50 мкм), в залежності від параметрів ПАЩ, режимів обробки і матеріалів, що обробляються. Проведено статистичну обробку результатів і визначено раціональні режими і умови обробки ПАЩ різних матеріалів.

3. Визначені раціональні умови, режими ( $V=15...18$  м/с,  $S_n=1$  м/хв,  $i=1,5...2$  мм,  $N=3...7$  подв.х.) і параметри ПАЩ ( $L=30$  мм і більше,  $d_e=1$  мм) для видалення задирок і заокруглення гострих крайок за допомогою полімерно-абразивних щіток. Для отримання радіусу заокруглення правильної форми необхідно встановити деталь площиною із задиркою під кутом  $77...80^\circ$  до напрямку подачі ПАЩ.

4. Розроблено пристрій і методику визначення критичних температур розм'якшення і плавлення волокон, що безпосередньо впливають на їх працездатний стан. Встановлено, що гранична температура досліджених ПА волокон варіюється від  $55$  до  $120$  °С в залежності від складу волокон і фірми-виробника. Визначено режими і умови обробки, які забезпечують дотримання температурних обмежень. Підтверджено невисокий рівень теплової дії на зразок (менше  $80...85$  °С) при застосуванні раціональних режимів і умов обробки.

5. Для вивчення силового впливу ПАЩ розроблено динамометр, за допомогою якого можна вимірювати постійні сили та змінні зусилля, що змінюються в короткі проміжки часу, моніторити силу дії на оброблювану поверхню вільним абразивом – струминної обробки, щіток обертальної дії з металевим і неметалевим волокном, пелюсткових кругів і інших нежорстких типів інструментів. Встановлено, що силовий вплив дискових ПАЩ є незначним (11...67 Н), тому такий вид фінішної обробки можна застосовувати для тонкостінних деталей. Розроблено математичну модель впливу технологічних чинників на радіальну силу.

6. Розроблені оригінальні спеціальні і універсальні пристосування для закріплення деталей ГТД специфічної форми і обробки їх ПА щітками.

7. Розроблені технологічні рекомендації по застосуванню ПАЩ для фінішної обробки тонкостінних складнопрофільних деталей з різних, у тому числі і важкооброблюваних, матеріалів можна без доопрацювання включати в технологічні процеси виготовлення і ремонтного відновлення: дисків ГТД; лопаток ГТД; зубчастих коліс, «зірочок», корпусів, радіаторів тощо з метою підвищення ефективності фінішної обробки вищеназваних і подібних до них деталей.

8. Застосування ПАЩ для досліджених складнопрофільних і тонкостінних деталей скорочує час їх фінішної обробки в 2...10 разів, собівартість операцій в 2...4 рази. Також більшість операцій були механізовані, що дало можливість повністю відмовитися від ручної праці або значно скоротити її частку від загальної тривалості фінішного етапу виготовлення або ремонту деталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2000. Раздел III: Технология производства машин. Т. III-3: Технология изготовления деталей машин, 2002. 839 с.
2. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
3. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
4. Dr. Mark Krieg. Chemical, thermal or mechanical processes. *International Surface Technology*. 2008. №1. P. 52-54.
5. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Мозговой В.Д. Финишные технологии обработки деталей ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2009. №1. С. 71-78.
6. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
7. Сулима А.М., А.М. Евстигнеев. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
8. Степанов Д.Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопрофильных деталей. Сообщение 1. Анализ финишно-отделочных методов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. №2. С. 122-125.
9. Степанов Д.Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопрофильных деталей. Сообщение 2. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных волокон. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. №2. С. 126-132.
10. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

11. Dirk Gather. Vibratory Finishing Process for stainless Steel Spectacles. *Metal Finishing News*. 2004. №5. P. 40-41.
12. Dirk Gather. The Shiny Way Polishing of Alloy Wheels. *Metal Finishing News*. 2006. №7. P. 24-25.
13. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Мозговой В.Ф., Корневский Е.А. Технология производства авиационных двигателей. Издательский комплекс «Мотор Сич», г. Запорожье, 2000. 944 с.
14. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов: производственно-практическое издание. М. Машиностроение, 1972. 272 с.
15. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. Киев, 1993. 332 с.
16. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Минск, «Наука и техника», 1976. 328 с.
17. Лурье Г.Б. Шлифование абразивными лентами: Учеб. Пособие для проф.-техн. училищ. М.: Высшая школа, 1980. 45 с.
18. Гдалевич А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами. М.: Машиностроение, 1990. 112 с.
19. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.М. Технология упрочнения машиностроительных материалов. К.: НД «Профессионал», 2006. 352 с.
20. Серебrenицкий П.П. Обработка деталей механическими щетками. Ленинград: Лениздат, 1967. 152 с.
21. Кургузов Ю.И., Папиев Д.Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками. *Вестник машиностроения*. 1986. №4. С. 54-58.

22. Леванцевич М.А. Технологические возможности покрытий, нанесенных металлическими щетками. *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. В, Прикладные науки. 2003. Т.2, №4. С. 53-55.

23. Гавриш А.П. Термомеханічна обробка внутрішніх циліндричних поверхонь деталей сталевими щітками. *Вестник двигателестроения*. 2006. №2. С.116-119.

24. Клокова Э, Логинова А. О свойствах поверхностных слоев, образующихся при обработке металлов щеткой, и влияние этих свойств на процесс сцепления. «Изв. АН Латвийской ССР», 1960.

25. Белевский Л.С., Завалишина Е.Г. Металлизация поверхности стали металлическими щетками. *Теория и практика процессов обработки композиционных и сплошных материалов: Межвузовский сборник научных трудов*. (г. Магнитогорск, 1990 г.) Магнитогорск: МГМИ, 1990. С.88-92.

26. Абрашкевич Ю.Д., Оглобинский В.А. Абразивные инструменты для обработки строительных материалов и горных пород. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1996. №11-12. С.27-28.

27. Куликовских В.А. Исследование качества поверхности, обработанной щетками. *ПНТ и ПО, ГОСИНТИ*. 1962, тема 6, вып. 48, № М-62-258/48.

28. Леванцевич М.А. Технологические возможности покрытий, нанесенных металлическими щетками. *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. В, Прикладные науки. 2003. Т. 2, №4. С. 53-55.

29. Боков А.И. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования методом плакирования гибким инструментом с учетом его износа и усталостного разрушения: дис. ... канд. техн. Наук. Магнитогорск. М., 2001. 129 с.

30. ГОСТ 1181-2007. Изделия канатные из манильской пеньки и сизали 3-; 4- и 8-прядные. [Действителен от 2007-11-30]. Изд. оф. Москва: Стандартинформ, 2008. 7 с.

31. ГОСТ 12859-67. Волос (сырье) конский и крупного рогатого скота. [Взамен ОСТ 39002; введ. 01.01.1968.]. Изд. оф. Государственный комитет СССР по стандартам, Москва: Издательство стандартов, 1989. 7 с.

32. ГОСТ 13681-77. Щетина-шпарка. Технические условия. [Взамен ГОСТ 13681-68; введ. 01.01.1979.]. Изд. оф. Государственный комитет стандартов совета министров СССР, Москва: Издательство стандартов, 1978. 11 с.

33. Бирштейн Т.М. Полимерные щетки. *Соровский Образовательный Журнал*. 1999. №5. С. 42-47.

34. Herman F. Mark. Encyclopedia of polymer science and technology, Concise: 12 Vol. Set. Wiley: Hardback, 2007. Edition 3. 1462 pages.

35. Адашкин А.М., Зуев В.М. Материаловедение (металлообработка). Москва: Издательский центр «Академия», 2002. 240 с.

36. Будницкий Г.А. Полимерные волокна третьего поколения: разработки, свойства, применение. *Технический текстиль*. 2004. №10. С. 12-17.

37. Пахомов П.А. Полимерные волокна прочнее стали. *Химия и жизнь*. 2002. №6. С. 10-13.

38. Абрашкевич Ю.Д., Компанцев А.Н. Расширение области применения полимерно-абразивных щеток. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1996. №1. С. 9-14.

39. Яковлев Д.Р. Теоретическое и экспериментальное исследование технологических возможностей абразивно-полимерных щеток с определением эффективных областей их использования. Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». Секция №7 «Технологии и оборудование механосборочного производства». 2010. С. 293-299.

40. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками. *Вестник национальной академии наук Беларуси*. 2012. №4. С. 63-68.

41. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками. *Вестник Половского государственного университета*. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2012. №3. С. 90-94.

42. Абрашкевич Ю.Д. Влияние различных факторов на износостойкость абразивного инструмента. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2008. №3. С. 9-13.

43. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Технологические возможности полимер-абразивного инструмента. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Серія: машинообладнання. Випуск 1: Донецьк, ДонНТУ, 2004. URL: <http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/jspui/handle/123456789/27111>.

44. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке тел вращения полимерно-абразивными щетками. *Вестник национальной академии наук Беларуси*. 2011. №2. С. 62-68.

45. Трошин Ф.В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса. *Автомобильная промышленность*. 2008. №8. С. 35.

46. Абрашкевич Ю.Д. Рациональное применение полимерно-абразивных щеток. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2007 №7. С. 23-26.

47. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е. Влияние колебаний волокон дисковой полимерно-абразивной щетки на ее работоспособность. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2012. №10. С. 5-8.

48. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.Н. Устройство для очистки полимерно-абразивными щетками. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2013. №5. С. 2-5.

49. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимерабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2006. №23. С. 106-108.

50. Негруб С.Л. Підвищення ефективності фінішної обробки еластичними полімер-абразивними інструментами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Донецький національний технічний ун-т». Донецьк, 2008. 25 с.

51. Абрашкевич Ю.Д., Оглобинский В.А. Новая область применения полимерно-абразивных щеток. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2009. №6. С. 10-14.

52. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2011. №3(16). С. 38-42.

53. Устинович Д.Ф., Голуб В.М., Управление тепловыми режимами при шлифовании валов дисковыми щетками. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. №1(18). С. 75-79.

54. Курілович В.Д. Підвищення якості оброблених поверхонь виробів з природного каменю інструментом з алмазно-полімерного волокна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.01 НАН України, Ін-т надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. Київ, 2014. 20 с.

55. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Расчет крутящего момента при шлифовании наружной цилиндрической поверхности полимерно-абразивными кругами – щетками. Сборник научных трудов конференции «*MicroCAD-2001*». (г. Харьков: НТУ «ХПИ», 2001 г.). Харьков, 2001. С. 27-30.

56. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке дисковыми абразивными щетками. *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В. Полоцк, 2009. С. 130-134.

57. Яркович В.М. Косоугольное шлифование мало жестких деталей. *Прогрессивные технологии обработки мало жестких деталей*: тез. обл. межотр. науч.-техн. конф. (г. Тольятти, 12-13 мая 1987 г.). Тольятти, 1987. С. 85-86.

58. Дядя С.И., Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Черный В.И., Алексеенко О.В. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2010. №2. С. 145-148.

59. Лapidус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. Гос. ун-т управления; Нац. Фонд подготовки кадров. М.: ОАО «Типография «Новости»», 2000. 432 с.

60. Васильев В.А., Новиков В.А. Управление качеством и сертификация. – М: Интермет инжиниринг, 2002. 416 с.

61. Глазов В.М., Вигдорович В.Н., Микротвердость металлов и полупроводников: 2-е изд. М.: Металлургия, 1969. 248 с.

62. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1963. 232 с.

63. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. [Взамен ГОСТ 1778-62; введ. 01.01.1972.]. М.: Стандартиформ, 2011. 31 с.

64. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. Х.: Изд. «Основа» при Харьк. ун-те, 1991. 272 с.

65. Чигарев А.В, Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

66. John O. Hallquist. LS-DYNA Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation. California. USA, 2006. 680 p.

67. Криворучко Д.В., Залога В.О., Корбач В.Г. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2010. 209 с.

68. Грабченко А.И., Федорович В.А. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки: моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. 376 с.

69. Степанов Д.Н., Гончар Н.В., Кучугуров М.В. 3D-моделирование взаимодействия полимерно-абразивных щеток и образца с помощью ANSYS/LS-DYNA : моногр. Запорожье: ЗНТУ, 2017. 67 с.

70. OSBORN international: catalog / Burgwald, Germany, 2013. 15P.

71. Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н., Кучугуров М.В. Исследование процесса обработки полимерно-абразивным инструментом при помощи моделирования. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2013. №83. С. 55-63.

72. Карданов С.Б. Компьютерное моделирование деталей и проектирование технологии их изготовления в программном комплексе PowerSOLUTION: учеб. пособие в 2-х частях. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2006. Ч.1: Система трехмерного моделирования PowerShape. / под ред. С.Б. Карданов. 270 с.

73. Степанов Д.М., Гончар Н.В., Кучугуров М.В. Методика моделювання спільної роботи пружних полімерно-абразивних волокон при контактї з поверхнею зразка. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2011. №3/58. С.9-11.

74. Степанов Д.Н., Гончар Н.В., Щекин В.О., Зинченко М.В. Методика контролю качества выполнения радиусов скругления кромок. *Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции: Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок*. (г. Алушта, 23-28 сентября 2013 г.) Запорожье, АО «Мотор Сич», 2013. С. 95-96.

75. Степанов Д.Н., Гончар Н.В. Особенности износа волокон щеточного полимерно-абразивного инструмента. *Тезисы докладов Международной научно-технической конференции: Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических*

установок. (г. Запорожье, 16-17 октября 2014 г.). Запорожье, АО «Мотор Сич», 2014. С. 91-93.

76. Степанов Д.Н., Внуков Ю.Н. Исследование условий контактирования полимерно-абразивной щетки с обрабатываемой поверхностью. *Матеріали XVI міжнародної молодіжної науково-технічної конференції: «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»*. (м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р.). Суми, СумДУ, 2016. С.128-130.

77. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава ВТ8-М. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2012. № 2. С. 87-90.

78. Внуков Ю.Н., Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н. Применение полимерно-абразивных инструментов для обработки острых кромок пазов типа «ласточкин хвост». *Резание и инструмент в технологических системах*. 2011. № 79. С. 14-24.

79. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. Киев, 1993. 332 с.

80. Лурье Г.Б. Шлифование абразивными лентами: Учеб. Пособие для проф.-техн. училищ. М.: Высшая школа, 1980. 45 с.

81. J. Solis Romero. The Effect of Saturation and Duplex Peening on Fatigue Resistance of the 2024-T351 Aluminium Alloy. *Metal Finishing News*. 2004. Vol.5, July Issue. p. 38-40.

82. Закс Л. Статистическое оценивание: перевод с нем. М.: Статистика, 1976. 598 с.

83. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.

84. Бельченко Г. И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали. Киев: Техника, 1980. 168 с.

85. Конева Н.А. Физика прочности металлов и сплавов. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. №7. С. 95-102.

86. Богуслаев В.А., Сахно А.Г., Яценко В.К., Гончар Н.В. Прогнозирование выносливости дисков компрессора из сплава ХН73МБТЮ-ВД. *Проблемы прочности*. 1999. №4. С. 125-131.

87. Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н. Формирование радиуса скругления острых кромок сложных пространственных форм при помощи полимерно-абразивного инструмента. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Вип. 2 (41). Полтава, 2014. С. 178-183.

88. Степанов Д.Н., Гончар Н.В., Гончар Е.А., Шаталов А.А. Оценка качества поверхности образцов из никелевого сплава после обработки полимерно-абразивным инструментом. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. №10/67. С. 69-71.

89. Степанов Д.Н., Сушко Д.Л., Гончар Н.В. Статистический анализ результатов исследования процесса обработки образцов из жаропрочного сплава инструментом на полимерно-абразивной основе. *Матеріали міжвузівської науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. Нові орбіти сучасного машинобудування. Питання новітніх технологій та обладнання в машинобудуванні*. (м. Кривий ріг, 29 квітня 2008 р.). Кривий Ріг. С. 22-23.

90. Степанов Д.Н., Гончар Н.В., Мерликова Ю.Р. Применение центрального композиционного анализа для определения рациональных режимов полирования дисковыми полимерно-абразивными щетками. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції: у 2-х т.* (м. Чернігів, 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. Т. 1. С.160-162.

91. Stepanov D., T. Semeryuk, A. Bila. Minimization of the number of experiments by means of factor analysis at the study of polishing with polymer-abrasive tools. *Тезиси докладов XI Международных молодежных научно-*

*технических чтений им. А.Ф. Можайского.* (г. Запорожье, 14-17 мая 2018 г.).  
Запорожье: АО «Мотор Сич. 2018. С. 166-167.

92. Внуков Ю.Н., Гончар Н.В., Степанов Д.Н. Исследование температуры размягчения и плавления волокон различных инструментов. *Резание и инструмент в технологических системах.* 2015. № 85. С. 42-47.

93. Пристрій для вимірювання температури плавлення волокон: пат. 105954 Україна: МПК G01N 25/04. № 105954; заявл. 13.10.15; опубл. 11.04.16, Бюл. №7. 3 с.: іл.

94. Степанов Д.Н., Внуков Ю.Н. Методика измерения контактных температур в рабочей зоне при обработке инструментом на основе полимерно-абразивных волокон. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: Збірник тез доповідей XIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції.* (м. Кременчук, 30 жовтня – 1 листопада 2013 р.). Кременчук, 2013. С. 32-33.

95. Ящерицын П. И., Коцур А.К., Еременко М.Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 211 с.

96. Kondratjuk E.V., Honchar N.V., Stepanov D.N. Titanium alloys finishing processing with tools based on polymer-abrasive fibers. *WORLD SCIENCE «Scientific Issues of the Modernity».* Dubai, UAE. 2016. №5(9). P.72-76. URL: [http://ws-conference.com/view\\_issue.php?issue=20](http://ws-conference.com/view_issue.php?issue=20).

97. Теплопроводность стали и чугуна, теплофизические свойства. Справочник теплофизика. URL: [http://thermalinfo.ru/publ/tverdye\\_veshhestva/metally\\_i\\_splavy/teploprovodnost\\_teploemkost\\_stalej\\_i\\_chuguna/7-1-0-8](http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/metally_i_splavy/teploprovodnost_teploemkost_stalej_i_chuguna/7-1-0-8).

98. Марочник стали и сплавов. URL: <http://www.splav-kharkov.com/main.php>.

99. Попович А.Г., Гончар Н.В., Степанов Д.Н. Расчет сил ударного воздействия эластичного волокна на деталь при финишной обработке. *Авиационно-космическая техника и технология.* 2012. №7/94. С. 11-14.

100. Курс теоретической механики: в 2 т. / под ред. Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. 3-е изд., исправленное. М.: Наука, 1985. Т.2: Динамика. 496с.
101. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Наук. думка, 1988. 736с.
102. Сопротивление материалов / Писаренко Г.С. др.; под ред. Г.С. Писаренка. 4-е изд., перераб. и доп. К.: Вища школа, 1979. 696с.
103. Теоретическая физика: в 9 т. / под ред. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. 3-е изд., исправленное и дополненное. М.: Наука, 1965. Т.7: Теория упругости. 204с.
104. Попович А.Г., Гончар Н.В., Степанов Д.Н. Расчет силы воздействия упругого волокна чашечного щеточного инструмента на деталь. *Вестник двигателестроения*. 2014. №1. С. 104-108.
105. Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов. Москва – Свердловск: Машгиз, 1962. 108 с.
106. Youssef Helmi A., EL-Hofy Hassan. Machining technology: machine tools and operation. CRC Press. Taylor&Francis Group. U.S, 2008.
107. Bray A., Barbato G., Levi R. Theory and practice of force measurement. London, San Diego: Academic Press, 1990.
108. Serway R.A., Beichner R.J. Physics For Scientists and Engineers. Saunders College Publishing. Orlando, 2000. 5th ed. Vol. 1.
109. Электронный каталог компании Kistler. URL: [http://www.kistler.com/ru\\_ru-ru/KistlerCountryhome\\_Ru](http://www.kistler.com/ru_ru-ru/KistlerCountryhome_Ru).
110. Rapier A.C. Cutting Force Dynamometers / H.M. Stationary Office, NEL Plasticity Report, 1959.
111. Динамометр: пат: А.с. 769369 СССР; МКИЗ G01L 1/12. № 769369; заяв. 14.12.78; опубл. 07.10.80, Бюл. № 37. 6 с.: ил.
112. Динамометр: пат. А.с. 481800 СССР; МКИЗ G01L 1/04. №481800; заяв. 06.06.73; опубл. 25.08.75, Бюл. № 31. 3 с.: ил.

113. Динамометр: пат. 110930 Україна; МПК G01L 1/04. № 110930; заявл. 15.04.16; опубл. 25.10.16, Бюл. №20. 3 с.: іл.

114. Степанов Д.Н., Внуков Ю.Н., Гончар Н.В. Исследование температуры размягчения и плавления волокон различных инструментов. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2015. № 85. С. 42-47.

115. Степанов Д.Н. Методика измерения силы давления полимерно-абразивного волокна при обработке плоского образца. *Збірник тез доповідей XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції: Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. (м. Київ, 22-25 жовтня 2012р.). Київ.

116. Степанов Д.Н., Внуков Ю.Н. Методика измерения контактных температур в рабочей зоне при обработке инструментом на основе полимерно-абразивных волокон. *Збірник тез доповідей XIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції: Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. (м. Кременчук, 30 жовтня – 1 листопада 2013 р.). Кременчук, 2013. С. 32-33.

117. Степанов Д.М., Внуков Ю.М. Температурні обмеження при використанні щіткових інструментів на основі полімерно-абразивних волокон. *Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні»*. (м. Львів, 2-6 лютого 2015 р.). Львівська політехніка, 2015. С. 29-30.

118. D. Stepanov, N. Gonchar, O. Kachan [та ін]. Measurement of Non-rigid Tools Action Force During Finishing. *Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019 V. Ivanov et al. (Eds.): DSMIE - 2018., LNME*, pp. 23–32.

119. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы: 2-е изд. М.: Металлургия, 1969. 752 с.

120. Степанов Д.Н., Кучугуров М.В., Гончар Н.В. Автоматизация слесарной операции удаления заусенцев в пазах типа «ласточкин хвост» лопаточных дисков осевых компрессоров ГТД. *Материалы VII*

*международной научно-технической конференции молодых ученых по проблемам энергосбережения и механизации в горно-металлургическом комплексе.* (г. Кривой Рог, 26 апреля 2011 г.). Кривой Рог, 2011. С. 155-160.

121. Установка для скругления острых кромок пазов дисков турбины газотурбинного двигателя: пат. 79066 Российская Федерация; МПК В24В9/00. № 79066; заявл. 30.06.08; опубл. 20.12.08, Бюл. № 35. 9 с.: ил.

122. Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н. Повышение несущей способности дисков компрессоров авиационных ГТД: моногр. Запорожье: ЗНТУ, 2016. 170 с.

123. ОАО «Турбоатом». URL: <http://hard-life.ru/oao-turboatom-provelo-ispytanie-novykh-lopatok-parovoj-turbiny>.

124. ГОСТ 23537-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. [Введ. 01.01.1980]. Изд. Офиц. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. 30 с.

125. Лопатка. Википедия: URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лопатка>.

126. Лозицкий Л.П., Ветров А.Н., Дорошко С.М. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Воздушный транспорт, 1992. 536 с.

127. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955. 548 с.

128. Стандартная продукция OSBORN 2016: каталог товаров / Osborn International GmbH, Ringstrabe 10. Germany, 2016. 168 с.

129. Степанов Д.М. Комплексна фінішна обробка аеродинамічних поверхонь лопаток полімерно-абразивними інструментами. Тези доповідей XV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції «*Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*». (м. Житомир, 4-7 листопада 2015 р.). Житомир, ЖДТУ, 2015. С. 76-78.

130. Технология производства авиационных двигателей. Часть 3. Методы обработки деталей авиационных двигателей. / редкол.: В.А. Богуслаев [и др.]. Запорожье. Изд. ОАО «Мотор Сич», 2006. 638 с.

131. Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Кучугуров М.В. Экономическое обоснование выбора варианта операции финишной обработки кромок хвостовиков лопаток ГТД. *Технічні науки та технології*. 2016. №4(6). С. 44-52.

132. Степанов Д.Н., Кучугуров М.В., Гончар Е.А., Дядя С.И. Применение полимерно-абразивных инструментов для слесарной обработки торцевых поверхностей зубьев конических зубчатых колес. *Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок»*. (г. Алушта, 23-28 сентября 2013 г.). Запорожье, АО «Мотор Сич», 2013. С. 92-94.

133. Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Тришин П.Р. Снятие заусенцев на алюминиевых заготовках, полученных литьем в кокиль и под давлением, при помощи полимерно-абразивного щеточного инструмента. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научно-технической конференции* (г. Одесса, 22-24 сентября 2014 г.). Киев. 2014. С. 42-43.

134. Степанов Д.Н., Гончар Н.В., Кондратюк Э.В. Снятие нагара с ремонтных лопаток газотурбинных двигателей. *Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: збірка матеріалів XIII Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Запоріжжя, 07-09 жовтня 2014 р). Запоріжжя. 2014. С. 57-58.

135. Степанов Д.Н. Повышение качества финишной обработки сложнопрофильных деталей, изготовленных из различных материалов, и ее механизация при помощи щеточных полимерно-абразивных инструментов. *Збірник тез доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції: Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. (м. Суми, 27-31 жовтня 2014р.). Суми, 2014. С. 87-88

Додаток А

Результати дослідження характеру контактування і НДС системи «зразок-  
волокно»

Таблиця А.1 –

**Вид і тривалість контактування, напружений стан зразка (діаметр  
волокна  $d_b=1$  мм)**

№ досліду	Виліт волокна $L$ , мм	Нацяг $i$ , мм	Швидкість $V$ , м/с	Кількість ударів	Тривалість, с			Максимальне напруження в зразку, МПа
					Мікрорізання (дряпання)	загального контактування	максимально можливого контакту	
1	8	0,5	4	М	0,0043	0,0043	0,0043	6,5
2			16	1+М	0,0009	0,0011	0,0011	7,1
3			23	2+М	0,0005	0,0008	0,0008	8,57
4		1,5	4	М	0,0075	0,0075	0,0075	4,2
5			16	1+М	0,00103	0,0018	0,0019	5,27
6			23	2+М	0,00056	0,0013	0,0013	6,8
7		3,0	4	М	0,01	0,01	0,0105	1,88
8			16	1+М	0,0024	0,0026	0,0026	4,7
9			23	2+М	0,00153	0,0018	0,0018	5,6
10	32	0,5	4	4	удари	0,0039	0,0043	1,2
11			16	5	удари	0,0008	0,0011	4,6
12			23	3	удари	0,00076	0,008	3,5
13		1,5	4	3+М	0,003	0,0073	0,0075	2,2
14			16	3	удари	0,00073	0,0019	4,2
15			23	5	удари	0,00083	0,0013	5,2
16		3,0	4	2+М	0,0087	0,0102	0,0105	1,4
17			16	3	удари	0,00082	0,0026	4,3
18			23	4+М	0,00021	0,0008	0,0018	7

Примітка: М – мікрорізання (дряпання)

**Вид і тривалість контактування, напружений стан зразка (діаметр  
волокна  $d_b=1,5$  мм)**

№ досліду	Виліт волокна $L$ , мм	Натяг $i$ , мм	Швидкість $V$ , м/с	Кількість ударів	Тривалість, с			Максимальне напруження в зразку, МПа
					Мікрорізання (дряпання)	загального контактування	максимально можливого контакту	
1	8	0,5	4	М	0,0043	0,0043	0,0043	8,7
2			16	М	0,001	0,001	0,0011	9,9
3			23	М	0,0008	0,0008	0,0008	10,5
4		1,5	4	М	0,0065	0,0065	0,0075	4,3
5			16	М	0,00173	0,00173	0,0019	4,8
6			23	М	0,00114	0,00114	0,0013	5,2
7		3,0	4	М	0,0089	0,0089	0,0105	3,2
8			16	М	0,0022	0,0022	0,0026	6,1
9			23	М	0,00161	0,00161	0,0018	8,6
10	32	0,5	4	1+М	0,00403	0,00412	0,0043	2,3
11			16	1	удари	0,0005	0,0011	5,4
12			23	2	удари	0,00036	0,008	5,6
13		1,5	4	1+М	0,0063	0,0073	0,0075	3,1
14			16	2	удари	0,00141	0,0019	5,3
15			23	2	удари	0,00043	0,0013	8,3
16		3,0	4	1+М	0,0094	0,01	0,0105	2,6
17			16	1+М	0,0019	0,0025	0,0026	6
18			23	1+М	0,001	0,0017	0,0018	7,2

Примітка: М – мікрорізання (дряпання)

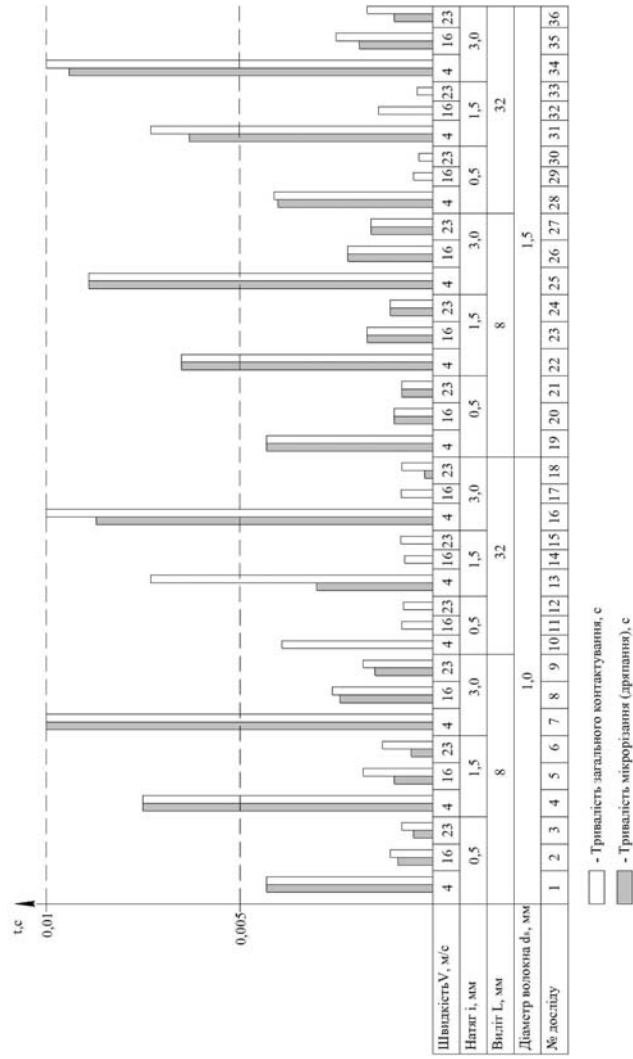


Рис. А.1. Тривалість контакту пари «волокно-зразок» при різних режимах обробки і параметрах ПА волокна

## Додаток Б

### Технологічні рекомендації щодо фінішної обробки лопатевих дисків ГТД полімерно-абразивними щітками.

Технологічні рекомендації включають: параметри інструментів, умови і режими обробки.

Обробка важкодоступних елементів дисків ГТД – зняття задирок і заокруглення гострих крайок пазів типу «ластівчин хвіст» або «ялинка» і міжпазових виступів дисків щітковим інструментом на основі полімерно-абразивних волокон.

I. Видалення більшої частини задирок і первинне заокруглення гострих крайок:

- тип інструменту – дискова ПАЩ діаметром 100 мм (шифр за каталогом [70] 9902-515 025);
- виліт полімерно-абразивного волокна 12...20 мм;
- діаметр волокон 1 мм;
- матеріал абразивного зерна – рекомендований карбід кремнію 63С або електрокорунд нормальний 14А;
- зернистість F80;
- подача 1 м/хв;
- швидкість різання 17 м/с;
- натяг 1,5...2 мм;
- кількість подвійних ходів 3...10.

II. Остаточне заокруглення гострих крайок в «викружках» і на донці паза:

- інструмент – чашкова полімерно-абразивна щітка діаметром 45 мм (шифр за каталогом [70] 0802-600 891);
- виліт волокон 4...8 мм;
- діаметр волокон 1 мм;

- матеріал абразивного зерна – 63С або 14А;
- зернистість F80;
- подача 1 м/хв;
- швидкість різання 17 м/хв;
- натяг 1 мм;
- кількість подвійних ходів 10.

III. Полірування – поліпшення якості базової поверхні полотна диска компресора циліндричною полімерно-абразивною щіткою:

- циліндрична ПАЩ діаметром 150 мм (шифр за каталогом [70] 9902-515 082 набір щіток – 4 шт.);
- виліт волокон 20...32 мм;
- діаметр волокон 0,6 мм;
- матеріал абразивного зерна 14А або 63С;
- зернистість F320;
- подача 1 м/хв;
- швидкість різання 17 м/с;
- натяг 1 мм;
- кількість подвійних ходів 3-5.

Додаток В

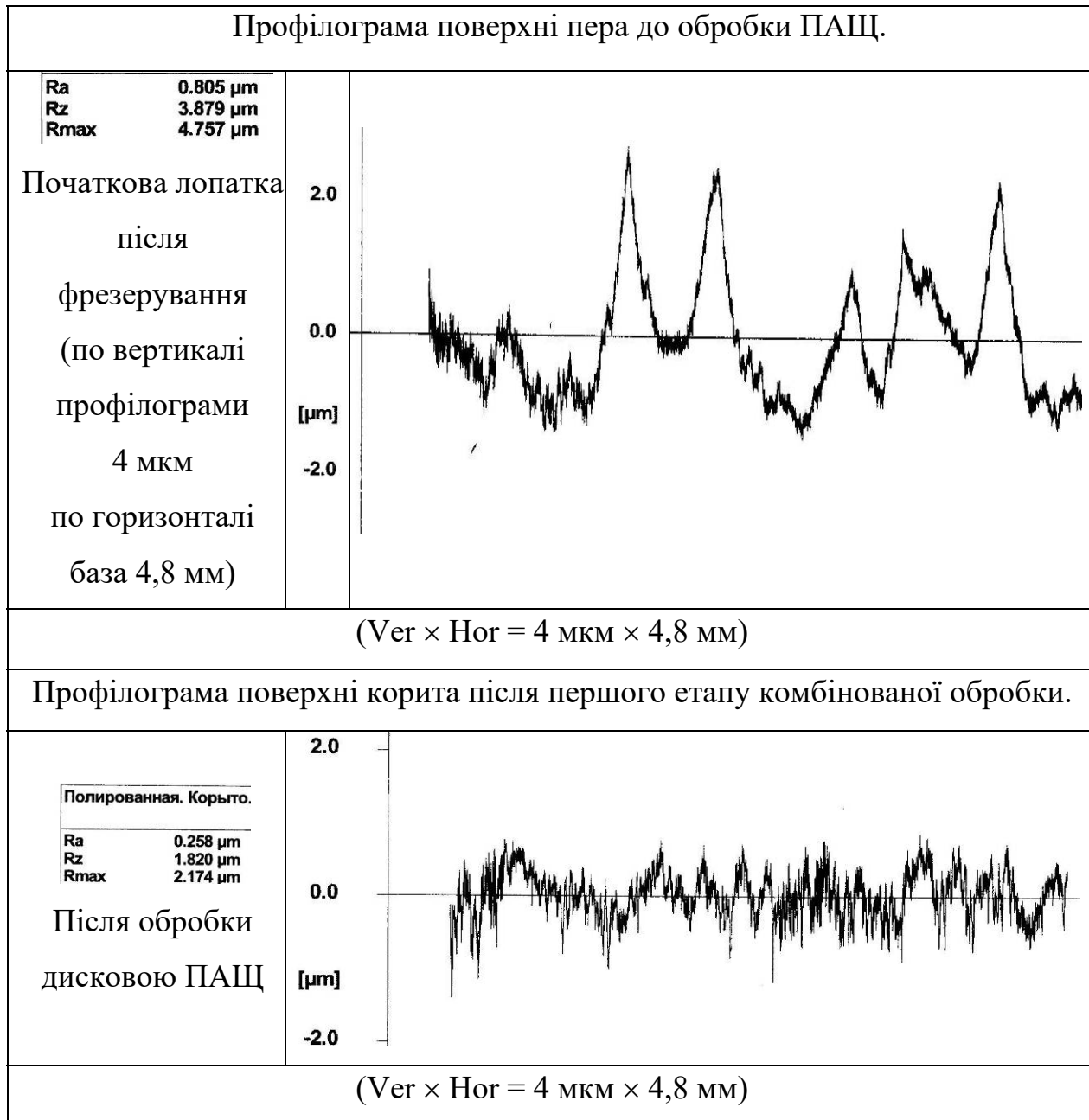
Протоколи вимірів. Перо лопатки 1 ступеня КВД дв. Д-36.

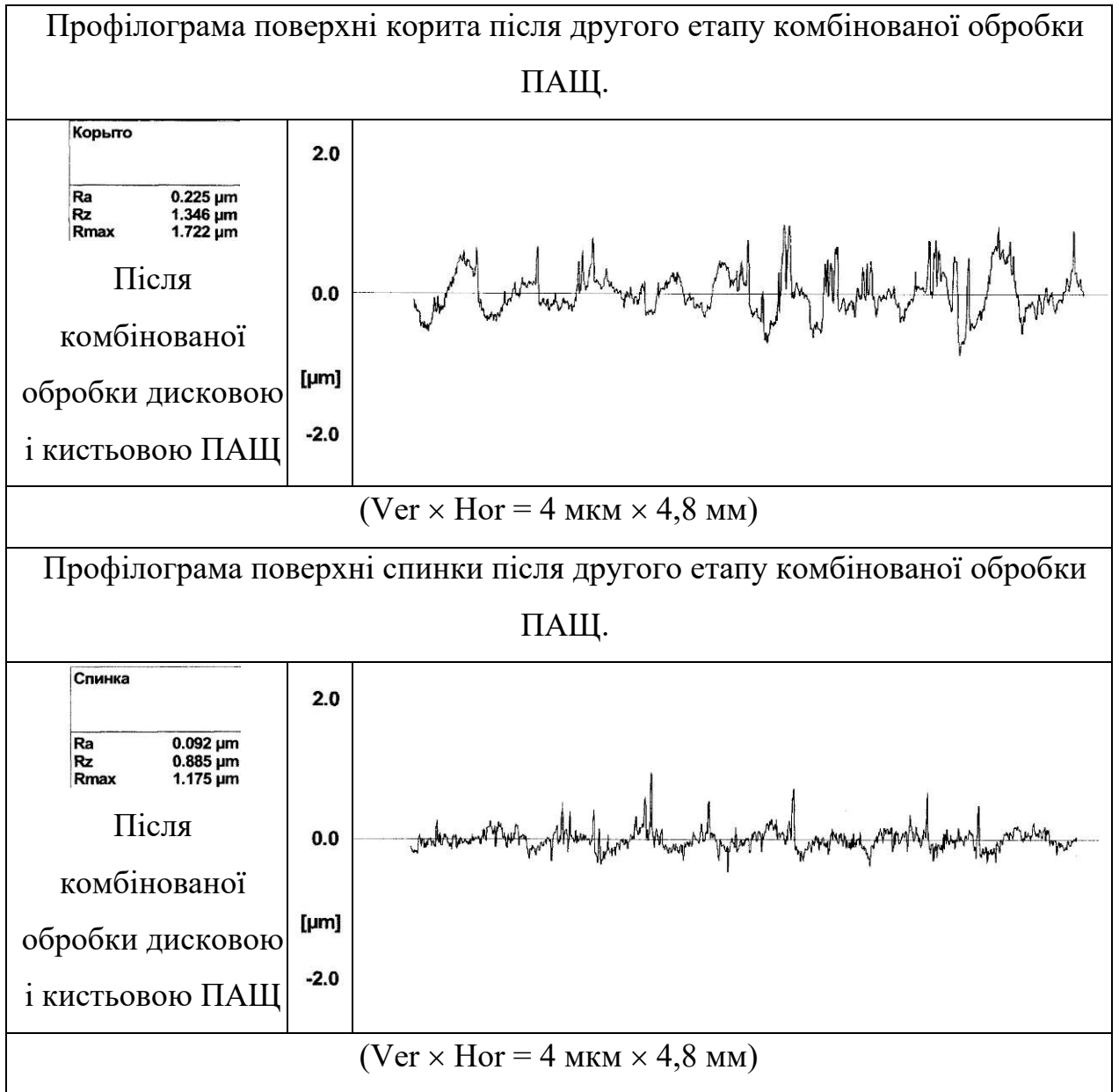
Таблиця В.1 –

Протоколи виміру на координатно-вимірювальній машині.

Виміри до обробки ПАЩ			Виміри після обробки ПАЩ		
<p>ОКБ ЦИЛ   СПРАВКА № 859 о результатах поверки</p> <p>Ломаско ГС КБД</p> <p>Наименование   №   Заказ</p>			<p>ОКБ ЦИЛ   СПРАВКА № 880 о результатах поверки</p> <p>Ломаско ГС КБД</p> <p>Наименование   №   Заказ</p>		
№ п-п	Элементы поверок	Данные	№ п-п	Элементы поверок	Данные
	N1			N1	
	C1 сеч Аз	1,96		C1 сеч Аз	1,85
	Ав	1,71		Ав	1,67
	Ав	1,48		Ав	1,41
	C2 сеч Аз	1,15		C2 сеч Аз	1,05
	Ав	1,0		Ав	0,98
	Ав	0,89		Ав	0,85
	Cmax сеч Аз	2,83		Cmax сеч Аз	2,65
	Ав	2,40		Ав	2,37
	Ав	2,11		Ав	2,04
	N2			N2	
	C1 сеч Аз	1,93		C1 сеч Аз	1,9
	Ав	1,69		Ав	1,67
	Ав	1,49		Ав	1,44
	C2 сеч Аз	1,18		C2 сеч Аз	1,08
	Ав	1,0		Ав	0,98
	Ав	0,89		Ав	0,85
	Cmax сеч Аз	2,83		Cmax сеч Аз	2,65
	Ав	2,40		Ав	2,38
	Ав	2,11		Ав	2,05
	N3			N3	
	C1 сеч Аз	1,92		C1 сеч Аз	1,84
	Ав	1,72		Ав	1,68
	Ав	1,48		Ав	1,45
	C2 сеч Аз	1,14		C2 сеч Аз	1,07
	Ав	1,0		Ав	0,98
	Ав	0,82		Ав	0,8
	Cmax сеч Аз	2,8		Cmax сеч Аз	2,68
	Ав	2,4		Ав	2,35
	Ав	1,13		Ав	2,07

**Профілограмми поверхонь пера лопаток 1 ступеня КВД, отриманих за допомогою контуроміру «НОММЕЛ Т - 8000».**





## Додаток Г

Технологічні рекомендації щодо фінішної обробки пера середньогабаритних лопаток ГТД полімерно-абразивними щітками.

Фінішна обробка пера лопаток КВТ, які виготовляються з титанового сплаву ВТ8-М, щітковим інструментом на основі ПА волокон, після фрезерного формоутворення, складається з двох етапів.

I. Режими обробки поверхонь, що забезпечують зняття шару металу зі «строчками», що залишилися після високошвидкісного фрезерування (або зняття дефектного шару після травлення), з високою продуктивністю без втрати сприятливих властивостей поверхневого шару (таких як шорсткість, наклеп, залишкові напруження), наступні:

- тип інструменту – дискова ПАЩ діаметром 75 мм (шифр за каталогом [70] 9902-515 001);

- виліт полімерно-абразивного волокна 12 мм;

- діаметр волокон 1...1,2 мм;

- матеріал абразива 63С або 14А;

- зернистість F90;

- повздовжня подача 0,5...1,0 м/хв;

- швидкість різання 4...5 м/с;

- натяг 1,5 мм;

- поперечна подача 0,5...1,0 мм/хід;

- ЗОТС – «АЗМОЛ» 7%.

II. Доведення прикомлевої ділянки і тонке полірування пера лопаток:

- тип інструменту – кінцева (кистьова) ПАЩ діаметром 22 мм (шифр за каталогом [70] 3202-509 913);

- виліт полімерно-абразивного волокна 10 мм;

- діаметр волокна 0,6 мм;

- матеріал абразива 63С або 14А;

- зернистість F320;
- повздовжня подача 1,0 м/хв;
- швидкість різання 6...7 м/с;
- натяг 1,5 мм;
- поперечна подача 1,0 мм/хід;
- ЗОТС – «АЗМОЛ» 7%.

## Додаток Д

### Технологічні рекомендації слюсарної обробки зняття задирок на хвостовиках лопаток ГТД за допомогою полімерно-абразивних щіток

Ці технологічні рекомендації щодо обробки «ялинкових» хвостовиків лопаток турбіни, які виготовляються з нікелевого сплаву ЭИ437Б-ВД, щітковим інструментом на основі полімерно-абразивних волокон можна застосовувати при будь-якому з вищеперелічених варіантів устаткування (п.5.3.2).

1. Деталь необхідно встановити площиною із задиркою під  $77...80^\circ$  до напряму подачі інструменту для отримання заокруглення правильної форми.

2. Режими обробки гострих крайок із задирками для отримання радіусів заокруглення величиною до 0,6 мм:

- тип інструменту – дискова ПАЩ діаметром 75...250 мм;
- виліт полімерно-абразивного волокна 20...30 мм;
- діаметр волокна 1 мм;
- матеріал абразивного зерна карбід кремнію 63С;
- зернистість F90;
- натяг 1,5...2 мм;
- подача 1 м/хв;
- швидкість різання 15...18 м/с;
- кількість подвійних ходів 5...7;
- ЗОТС – «Аминил СР» 2%.

## Додаток Е

### Техніко-економічний розрахунок варіантів виконання слюсарної обробки крайок «ялинкових» хвостовиків лопаток

Загальні початкові дані:

- набір лопаток ГТД  $N=42$  шт.;
- кількість проходів ПАЩ  $n=5$  подв.х.;
- повздовжня подача ПАЩ  $S=1$  м/хв.
- 4 варіанти виконання операції видалення задирок та заокруглення

гострих крайок «ялинкових» хвостовиків лопаток турбіни авіаційного двигуна ТВ3-117:

Варіант 1. Вручну на шліфувальній установці – полірувальній бабці (базова серійна технологія).

Варіант 2. Дві ПАЩ одночасно, на установці з поворотним столом і наладками.

Варіант 3. Дві ПАЩ на установці з поворотним столом і монтажними дисками.

Варіант 4. Одна ПАЩ на площинношліфувальному верстаті в касетному пристосуванні з наладками.

Умова оптимальності варіанту технологічної операції:

$$C = \min(C_1; C_2; C_3; C_4), \quad (E.1)$$

де  $C_1 \dots C_4$  – собівартість фінішної обробки лопатки кожного з варіантів.

Собівартість виготовлення деталі розраховується за формулою:

$$C = 3 + H + A + E + I + П + Ж + O, \quad (E.2)$$

де 3 – заробітна плата робітника, грн;

$H$  –нарахування, складає 39,5% від заробітної плати, грн;

$A$  –амортизаційні відрахування, складають 20% від заробітної плати,грн;

$E$  – витрати на електроенергію, грн;

$I$  – витрати на інструмент, грн;

$\Pi$  – витрати на переточування/правку інструменту, грн;

$Ж$  – витрати на ЗОТС, грн;

$O$  – вартість установки в перерахунку на одну деталь, грн.

Заробітна плата робітника:

$$З = C_T \cdot t_{um} / 60, \quad (E.3)$$

де  $C_T$  – годинна ставка працівника, грн/год; для ручної обробки на шліфувальній бабці робітникові 7-го розряду 7,4 грн/год; для обробки на установці слюсареві 3-го розряду – 5,09 грн/год;

$t_{um}$  – штучний час, хв, розраховується за формулою:

$$t_{um} = t_o + t_{don} + t_{dod}, \text{ хв} \quad (E.4)$$

де  $t_o$  – основний час, що витрачається безпосередньо на обробку, хв;

$t_{don}$  – допоміжний час, що витрачається на установку, перевстановлення і зняття оброблюваних деталей і допоміжного оснащення, хв;

$t_{dod}$  – додатковий час, хв, приймається 10% від суми основного і допоміжного часу.

Мінімальний основний час для ручної обробки хвостовика однієї лопатки 12 хв. Для механізованої операції розраховується за формулою:

$$t_o = \frac{\pi \cdot D}{1000 \cdot S} \cdot z \cdot p \cdot n / N, \text{ хв} \quad (E.5)$$

де  $z$  – кількість запусків установки для обробки усього набору деталей, залежить від числа одночасно оброблюваних виробів; для варіантів 2...4 дорівнює відповідно 6, 1, 5;

$p = 4$  – кількість оброблюваних поверхонь.

Допоміжний час  $t_{дон}$  залежно від варіанту обробки розраховується по різному. Для варіанту 1 приймається рівним 3 хв. Для варіантів 2 і 4 розраховується за формулою (Е.6), для варіанту 3 за формулою (Е.7).

$$t_g = t_y + q \cdot t_n + t_3, \text{ хв} \quad (\text{Е.6})$$

де  $t_y$  – час установки деталі в налазці, приймається 0,17 хв;

$t_n$  – час перестановки деталі в налазці, дорівнює 0,12 хв;

$t_3$  – час зняття деталі з налазки, дорівнює 0,17 хв;

$q = 3$  – число переустановлень деталі в процесі обробки.

$$t_{дон} = ((t_y + t_n + t_c) \cdot N + t_{dy} + t_{dz}) \cdot 2 / N, \text{ хв} \quad (\text{Е.7})$$

де  $t_{dy} = 1 \text{ хв}$  – час установки монтажного диска;

$t_{dz} = 1 \text{ хв}$  – час зняття монтажного диска.

Для варіанту 3 час установки, перевстановлення і зняття деталі приймаються 0,05 хв.

Витрати на електроенергію розраховуються за формулою:

$$E = P_{\Sigma} \cdot t_{ум} \cdot E_{СТ}, \quad (\text{Е.8})$$

де  $E_{СТ}$  – вартість електроенергії на виробництві, складає 0,33 грн/кВт;

$P_{\Sigma}$  – сумарна потужність вживаного електроустаткування; з урахуванням кількості двигунів установок і розрахункової потужності 0,5 кВт на одиницю для варіантів обробки 1...4 приймається, відповідно, 2 кВт, 1,5 кВт, 1,5 кВт, 0,5 кВт.

Вартість інструменту  $I$ , що враховується в собівартості деталі, визначається його видом і кількістю, достатньою для виконання обробки. Для ручної праці і механізованої обробки ця вартість розраховується за формулою:

$$I = Ц_I \cdot K_D / (N \cdot V), \text{ грн} \quad (\text{Е.9})$$

де  $C_I$  – вартість одного інструменту; вартість шліфувального круга для варіанта 1 дорівнює 250 грн; вартість однієї ПАЩ складає 200 грн;

$K_D$  – кількість інструментів на набір деталей; для варіантів обробки 1...4 відповідно рівне 4, 2, 2, 1;

$V$  – число наборів, що обробляються на відповідному устаткуванні в рік; для варіантів обробки 1...4 приймається, відповідно, 100, 200, 200, 50.

Витрати на переточування/правку інструменту  $\Pi$  визначаються витратами на відновлення різальних (оброблювальних) властивостей інструменту:

$$\Pi = \Pi_p \cdot K_{pp} \cdot K_D, \text{ грн} \quad (\text{E.10})$$

де  $\Pi_p$  – вартість правки інструменту; на виробництві вартість правки шліфувального круга дорівнює 20 грн, вартість правки ПАЩ дорівнює 5 грн;

$K_{pp}$  – число правок на одну деталь; для усіх варіантів обробки 0,02, тобто на 50 деталей 1 правка.

Витрати на ЗОТС обчислюються для механізованої операції (варіанти 2...4), хоча обробка ПАЩ на раціональних режимах не вимагає обов'язкового його застосування.

$$Ж = C_{ж} \cdot O_{ж} / 1000, \text{ грн} \quad (\text{E.11})$$

де  $C_{ж}$  – вартість 1л ЗОТС, складає 55 грн/л;

$O_{ж}$  – об'єм ЗОТС, потрібний для обробки однієї деталі (35 мл).

Вартість обладнання в перерахунку на одну деталь  $O$  залежить від його конфігурації і розраховується за формулою:

$$O = (O_{CT} + O_{ЗУ}) / (N \cdot V), \text{ грн} \quad (\text{E.12})$$

де  $O_{CT}$  – вартість стаціонарної установки, грн;

$O_{3v}$  – вартість змінних вузлів, грн

При ручній обробці крайок хвостовиків використовується спеціальна шліфувальна установка, вартість якої приймається рівною 3000 грн. Вартість поворотного столу складає 3000 грн. При обробці на поворотному столі з використанням монтажних дисків вартість останніх (250 грн за 1 диск) на один набір лопаток, оскільки для кожного набору виготовляються нові диски з певною геометрією. При обробці на площинношліфувальному верстаті вартість касетного пристосування складає 250 грн.

Отримані результати зведено в таблицю Е.1.

Таблиця Е.1 –

**До розрахунку економічної ефективності варіанту операції**

Параметр	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар.4
1	2	3	4	5
Початкові дані:				
Набір лопаток $N$ , шт	42			
Діаметр обробки на столі $D$ , що обертається, мм	600			
Величина повздовжньої подачі $S$ , м/хв	1			
Кількість подв. ходів або обертів столу	5			
Допоміжні величини				
Ставка робочого 7-го / слюсаря 5-го розряду $C_T$ , грн/год	7,40	5,09	5,09	5,09
Кількість оброблюваних лопаток за одну установку	1	8	42	9
Кількість оброблюваних поверхонь $p$	4	4	4	4
Кількість проходів (фактичних) $n$	-	5	5	5
Число запусків установки для обробки усього набору $z$	-	6	1	5
Основний час обробки $t_o$ , хв	12,00	5,39	0,90	4,49
Час установки однієї лопатки $t_y$ , хв	-	0,17	0,05	0,17
Час переустановлення однієї лопатки $t_n$ , хв	-	0,12	0,05	0,12
Час зняття однієї лопатки $t_z$ , хв	-	0,17	0,05	0,17
Час установки монтажного диска $t_{\partial y}$ , хв	-	-	1,00	-
Час зняття монтажного диска $t_{\partial z}$ , хв	-	-	1,00	-
Допоміжний час $t_{\partial on}$ , хв	3,00	0,68	0,40	0,68
Додатковий час $t_{\partial od}$ , хв	1,50	0,61	0,13	0,52

Продовження таблиці Е.1

1	2	3	4	5
Штучний час $t_{шт}$ , хв	16,50	6,68	1,42	5,69
Відсоток амортизації $A$ , %	20	20	20	20
Сумарна потужність електродвигунів $P_{\Sigma}$ , кВт	2	1,5	1,5	0,5
Вартість електроенергії $E_{ст}$ , грн/кВт	0,33	0,33	0,33	0,33
Вартість шліфувального круга для ручної обробки $Ц_1$ , грн	250	-	-	-
Вартість однієї ПАЩ $Ц_1$ , грн	-	200	200	200
Кількість інструментів в обробці $K_d$ , шт	4	2	2	1
Вартість правки шліфувального круга $П_p$ , грн	20	-	-	-
Вартість правки ПАЩ $П_p$ , грн	-	5	5	5
Число правок інструменту на одну деталь $K_{пр}$ , шт	0,02	0,02	0,02	0,02
Вартість 1 л ЗОТС $С_{ж}$ , грн/л	-	55	55	55
Кількість ЗОТС на 1 деталь $O_{ж}$ , мл	-	35	35	35
Вартість установки $O_{ст}$ , грн	3000	3000	3000	250
Вартість знімних вузлів $O_{зв}$ , грн			500	
Вартість монтажного диска, грн	-	-	250	-
Кількість монтажних дисків для установки, шт	-	-	2	-
Число наборів, що обробляються установкою $V$ , шт/рік	100	200	200	50
Норми витрат (на 1 деталь)				
1. Заробітна плата $З$ , грн	2,04	0,57	0,12	0,48
2. Нарахування на ЗП (39,5%) $H$ , грн	0,80	0,22	0,05	0,19
3. Амортизація $A$ , грн	0,41	0,11	0,02	0,10
4. Витрати на електроенергію $E$ , грн	7,92	2,67	0,44	0,74
5. Вартість інструменту $I$ , грн	0,24	0,05	0,05	0,10
6. Витрати на переточування/правку $П$ , грн	1,60	0,20	0,20	0,10
7. Використання ЗОТС $Ж$ , грн	-	1,93	1,93	1,93
8. Вартість установки на 1 деталь $O$ , грн	0,71	0,36	12,26	0,12
Загальна норма витрат на 1 лопатку $С$ , грн	13,72	6,10	15,07	3,75
Загальна норма витрат на набір лопаток $С_n$ , грн	576,16	256,15	632,9	157,48

## Додаток Ж

Технологічні рекомендації щодо видалення задирок і заокруглення гострих крайок за допомогою полімерно-абразивних щіток на деталях з алюмінію і сплавів на його основі.

Тип щіткового інструменту і його конструкцію вибирають, виходячи з форми крайки і задирки:

- тип інструменту – дискові ПАЩ діаметром 75...150 мм, чашкові ПАЩ діаметром 25...75 мм, кінцеві (кистьові) ПАЩ діаметром 10...28 мм;
- виліт полімерно-абразивного волокна 8...32 мм;
- діаметр волокон 1,0...1,2 мм;
- матеріал абразиву 63С або 14А;
- зернистість F80...180;
- подача 0,5...1 м/хв;
- швидкість різання 15...18 м/с;
- натяг 1...2 мм;
- кількість подвійних ходів 3...10 подв.х.;
- ЗОТС (при необхідності) – «Азмол» 7% або будь-яке інше, яке підходить під конкретну марку алюмінію або сплаву.

Наукове видання

СТЕПАНОВ Дмитро Миколайович

ГОНЧАР Наталя Вікторівна

КОНДРАТЮК Едуард Васильович

ТРИШИН Павло Романович

**ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ І  
ТОНКОСТІННИХ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ЩІТКОВИМИ  
ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ**

*Монографія*

Комп'ютерний набір та верстання *Савчук Н.О.*

Підписано до друку 11.11.2022. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 11,62

Тираж 100 прим. Зам. № 851

Національний університет «Запорізька політехніка»

Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64

Тел.: (061) 769-82-96, 220-12-14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019