

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**П. Р. Тришин, Н. В. Гончар**

**ФІНІШІНГ КАНАЛУ КУТОВИХ  
ХВИЛЕВОДІВ ПОЛІРУВАННЯМ  
ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ**

**Монографія**

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2023

УДК 621.372.82

Т 65

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

Рецензенти:

**Бєлоконь Ю. О.**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки ІННІ ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету;

**Павленко І. В.**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Комп'ютерної механіки ім. В. Марцинковського» Сумського державного університету.

Т 65 **Тришин П. Р.** Фінішінг каналу кутових хвилеводів поліруванням полімерно-абразивними щітками : монографія / П. Р. Тришин, Н. В. Гончар. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 135 с.

ISBN 978-617-529-382-9

У монографії проведено аналіз існуючих методів фінішного оброблення каналу прямокутних кутових хвилеводів. Виявлені основні недоліки цих методів. Проаналізовано вплив якості оброблення струмопровідних поверхонь на електричні характеристики хвилеводу. На основі комплексного дослідження шорсткості та властивостей поверхневого шару каналу хвилеводів, електричних характеристик хвилеводів за допомогою математичного й фізичного моделювання розроблено та науково обґрунтовано новий метод фінішного оброблення за допомогою полірування полімерно-абразивними щітками обертальної дії, що дозволяє підвищити якість оброблення струмопровідних поверхонь та зменшити затухання електромагнітних хвиль.

Для студентів, аспірантів, інженерів і наукових співробітників відповідних спеціальностей.

**УДК 621.372.82**

ISBN 978-617-529-382-9

© П. Р. Тришин, Н. В. Гончар, 2023  
© Національний університет  
«Запорізька політехніка», 2023

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ КАНАЛУ КУТОВИХ ПРЯМОКУТНИХ ХВИЛЕВОДІВ.....	10
1.1 Аналіз конструкції прямокутних куткових хвилеводів.....	10
1.2 Вплив якості оброблення струмопровідних поверхонь на електричні характеристики хвилеводу.....	16
1.3 Аналіз типової технології виготовлення прямокутних куткових хвилеводів S-діапазону .....	21
1.4 Задачі фінішного оброблення навколошовних зон каналу хвилеводів .....	23
1.5 Методи фінішного оброблення каналу прямокутних куткових хвилеводів.....	24
1.5.1 Фінішне оброблення слюсарним методом.....	26
1.5.2 Вібраційне фінішне оброблення.....	27
1.5.3 Механічне полірування на притиральних верстатах.....	28
1.5.4 Аналіз застосування хімічних та електрохімічних методів полірування.....	30
1.5.5 Фінішне оброблення абразивними середовищами.....	32
1.5.6 Альтернативні інструменти слюсарного оброблення каналу куткових прямокутних хвилеводів.....	38
1.6 Висновки.....	41
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	43
2.1 Загальні положення.....	43
2.2 Методика дослідження впливу методів і інструментів фінішного оброблення на властивості поверхневого шару каналу хвилеводів.....	44

2.2.1	Методика дослідження шорсткості .....	44
2.2.2	Методика дослідження наклепу поверхневого шару.....	50
2.2.3	Методика визначення електропровідності .....	50
2.3	Методика дослідження впливу якості струмопровідної поверхні, отриманої обробленням різними інструментами, на електричні параметри кутових хвильоводів.....	51
2.3.1	Методика дослідження КСХН.....	54
2.3.2	Методика вимірювання коефіцієнта загасання.....	54
2.3.3	Методика дослідження електроміцності хвильоводів.....	55
2.4	Висновки.....	57
<b>РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОКУТНИХ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ.....</b>		
3.1	Дослідження мікрорельєфу та властивостей струмопровідного шару каналу .....	58
3.1.1	Оцінка залежності шорсткості каналу від параметрів оброблення.....	58
3.1.2	Аналіз існуючих математичних залежностей визначення шорсткості при абразивному обробленні.....	73
3.1.3	Статистичний аналіз експериментальних даних залежності шорсткості від параметрів оброблення.....	76
3.1.4	Дослідження наклепу поверхневого шару каналу.....	80
3.1.5	Оцінка впливу фінішного оброблення на електропровідність стінок хвильоводу.....	83
3.2	Оцінка впливу якості струмопровідного шару прямокутного кутового хвильоводу, отриманої фінішним обробленням різними інструментами, на його електричні параметри.....	86
3.2.1	Оцінка впливу фінішного оброблення на значення КСХН прямокутних кутових хвильоводів.....	87

3.2.2 Оцінка впливу фінішного оброблення на значення коефіцієнту загасання прямокутних кутових хвилеводів.....	89
3.2.3 Оцінка впливу фінішного оброблення на електроміцність прямокутних кутових хвилеводів.....	95
3.3 Висновки.....	95
РОЗДІЛ 4 ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ПАЩ ПРЯМОКУТНИХ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ S-ДІАПАЗОНУ.....	97
4.1 Автоматизація та механізація фінішного оброблення кутових прямокутних хвилеводів.....	99
4.1.1 Фінішне оброблення прямокутних хвилеводів на верстатах з ЧПК.....	100
4.1.2 Механізація полірування каналу прямокутних хвилеводів S-діапазону складної конструкції.....	104
4.1.3 Техніко-економічний розрахунок варіантів виконання полірування каналу прямокутних кутових хвилеводів на верстаті з ЧПК	108
4.2 Аналіз проблем виробничого впровадження фінішного оброблення ПАЩ хвилеводів .....	114
4.3 Технологічні рекомендації вибору параметрів ПАЩ та режимів фінішного оброблення прямокутних кутових хвилеводів.....	116
4.4 Висновки.....	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120

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

АЕО	Абразивно-екструзійне оброблення
ВРП	Високий рівень потужності
ГТД	Газотурбінний двигун
ЕПО	Електроплазмове оброблення
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КСХН	Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою
НВЧ	Надвисокі частоти
ПА	Полімерно-абразивний
ПАЩ	Полімерно-абразивна щітка
ПШК	Пелюстковий шліфувальний круг
РЛС	Радіолокаційна станція
ТУ	Технічні умови
ЧПК	Числове програмне керування
$a, b$	Розміри внутрішнього каналу хвилеводу, м
$C$	Собівартість оброблення, грн
$D$	Діаметр ПАЩ, мм
$d_B$	Діаметром волокон, мм
$f$	Частота електромагнітної хвилі, Гц
$H_\mu$	Мікротвердість поверхні, МПа
$HВ$	Твердість оброблюваного матеріалу, МПа
$i$	Натяг інструменту, мм
$L_B$	Виліт волокна, мм
$n$	Кількість проходів інструментом
$P$	Зернистість інструменту
$Ra$	Шорсткість поверхні, мкм
$S$	Подача оброблення, мм/об
$t_{доd}$	Додатковий час, хв, приймається 10% від суми основного і допоміжного часу, хв

$t_{don}$	Допоміжний час, що витрачається на установку, перевстановлення і зняття оброблюваних деталей і допоміжного оснащення, хв
$t_o$	Основний час, що витрачається безпосередньо на оброблення, хв
$u$	Величину наклепу, %
$V$	Швидкість оброблення, м/с
$\alpha$	Коефіцієнт загасання
$\delta$	Глибина проникнення струму, мкм
$\lambda$	Довжина електромагнітної хвилі, м
$\mu_r$	Відносна магнітна проникність.
$\sigma$	Електропровідність металу стінок хвилеводу, См/м
$\sigma_B$	Межа міцності оброблюваного матеріалу, МПа
$A$	Амортизаційні відрахування в перерахунку на одну деталь, грн
$E$	Витрати на електроенергію, грн
$Z$	Заробітна плата робітника, грн
$I$	Витрати на інструмент, грн
$H$	Податкові нарахування, грн
$\Pi$	Премія, грн

## ВСТУП

Одним з головних компонентів радіолокаційних станцій, які служать напрямними системами для передачі енергії надвисокої частоти (НВЧ) від генератора на передавальну антену і від прийомної антени до радіопередавача є хвилеводи. Хвилевід являє собою штучний направляючий канал, в якому може поширюватись електромагнітна хвиля. В антені S-діапазону застосовуються прямокутні хвилеводи з численними кутовими вигинами через свою компактність, але при цьому вони мають велику кількість з'єднувальних швів.

Потік потужності, що переноситься хвилею, зосереджено всередині каналу та в його поверхневому шарі. Втрати в хвилеводах залежать від шорсткості поверхні каналу та властивостей поверхневого шару металу через те, що глибина проникнення НВЧ-струму внаслідок поверхневого ефекту складає 1,5...2,5 мкм, тобто порівняна з висотою мікронерівностей. Також втрати потужності можливі при перетині лініями мікронерівностей ліній руху НВЧ-струмів, тому мікрорельєф також впливає на експлуатаційні властивості.

Основним способом виготовлення прямокутних хвилеводів S-діапазону перерізу 34 мм × 72 мм з кутовими вигинами в дрібносерійному виробництві є паяння або зварювання секцій прямокутної труби товщиною 2,5 мм, яка в стані постачання вже має необхідну шорсткість та точність каналу. Такий метод виготовлення призводить до локальних перегрівів і деформацій стінок хвилеводів в зоні швів, напливів припою. Для усунення даних дефектів канал в навколошовних зонах рихтують та полірують, при цьому решта каналу цього не потребує.

Аналіз літературних джерел, наукових публікацій та патентів показує, що для оброблення каналу хвилеводів існує низка специфічних фінішних методів, кожен з яких має суттєві недоліки. Для реалізації деяких з них застосовуються дорогі спеціалізовані установки, спеціальний складний інструмент та оснащення, які проектуються під конкретну деталь. Більшість

методів призначені для оброблення прямолінійного каналу і непридатні для полірування кутових хвилеводів. Через це при фінішному обробленні навколошовних зон кутових прямокутних хвилеводів застосовується непродуктивне трудомістке ручне слюсарне оброблення. В якості інструменту застосовується наждачний папір, який має низьку стійкість, шаржує поверхню, потребує послідовного використання паперу різної зернистості. Альтернативними інструментами можуть бути шліфувальні голівки з нетканого абразивного матеріалу, пелюсткові круги, шліфувальні нескінчені стрічки, полімерно-абразивні щітки (ПАЩ). Але при фінішному обробленні каналу хвилеводів кожен з інструментів створює як свій характерний мікрорельєф поверхні, так і наводить певний ступінь наклепу поверхневого шару, який може змінювати його електропровідність.

Тому актуальним є проведення досліджень, спрямованих на удосконалення слюсарного фінішного методу оброблення кутових хвилеводів на основі застосування щіткових інструментів, які забезпечують вищу якість поверхні і меншу трудомісткість, які можливо інтегрувати в автоматизовані або механізовані процеси фінішного оброблення.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ КАНАЛУ КУТОВИХ ПРЯМОКУТНИХ ХВИЛЕВОДІВ

### 1.1 Аналіз конструкції прямокутних куткових хвилеводів

Більшість радіолокаційних станцій (РЛС) працюють в S-діапазоні частот ( $f=2...4$  ГГц) електромагнітних хвиль. Основою передавальної лінії даних станцій є прямокутний хвилевід – штучний направляючий канал, в якому може поширюватися електромагнітна хвиля. При цьому потік потужності, що переноситься хвилею, зосереджено всередині цього каналу та в його поверхневому шарі. За допомогою хвилеводів сигнали генератора передаються на випромінювачі антенних пристроїв, а також здійснюється передача відбитих хвиль від об'єкта на приймальні пристрої. Основною хвилею у прямокутних хвилеводах S-діапазону є електромагнітна хвиля типу  $H_{10}$ , яка поширюється шляхом багаторазових перевідбиттів від бічних стінок [1]. Структура електромагнітної хвилі типу  $H_{10}$  має одну складову  $E_y$  електричного поля і дві складові  $H_x$  і  $H_z$  магнітного поля (рис. 1.1).

Існує багато методів виготовлення хвилеводів, але для прямокутних хвилеводів S-діапазону основним є зварювання або паяння секцій прямокутних труб (які в стані постачання мають необхідні вимоги точності і якості поверхні каналу) між собою і до приєднувальних фланців [2]. Шорсткість каналу хвилеводної труби в стані постачання становить  $Ra=0,4...0,6$  мкм, припуск для подальшого оброблення відсутній. Для уніфікації конструкцій хвилеводів використовується стандартизований ряд розмірів перерізу каналу  $a \times b$  (рис. 1.1) в залежності від робочого діапазону частот. Найпоширенішим перерізом каналу хвилеводу S-діапазону є  $72 \times 34$  мм з товщиною стінки 2,5 мм, який має найменші розміри при необхідній заданій потужності НВЧ.

Для прямокутних хвилеводів розроблено галузеві стандарти

(ОСТ4 Г0.206.203, ОСТ4 Г0.005.247-82, ОСТ4 Г0.206.200 тощо), призначені для рекомендацій при проектуванні, виготовленні та експлуатації. Вони регламентують конструктивні особливості, типи зварних та паяних з'єднань, покриття, обладнання, що використовується тощо.

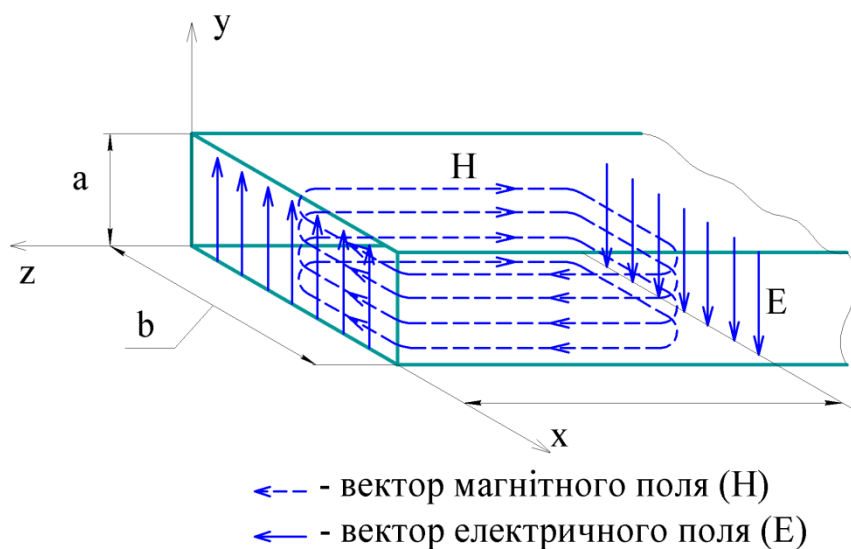


Рис. 1.1. Структура поля хвилі  $H_{10}$  [1]

Залежно від конструктивних вимог і призначення хвилеводи бувають прямолінійними, вигнутими, скрученими, можуть мати змінний по довжині переріз, гофровані стінки і складну просторову конструкцію [2]. Існують два види вигинів хвилеводу: плавні (радіусні) та кутові. Недоліком плавного вигину є його відносно великі розміри, він не є компактним, але є більш простим у виготовленні. Переважно в конструкції РЛС застосовуються хвилеводи з багатоступінчастими кутовими вигинами (рис. 1.2), через їх просторову компактність, але при цьому вони мають велику кількість з'єднувальних швів. Основним методом зварювання і паяння кутових хвилеводів через складну конструкцію та дрібносерійний тип виробництва залишається ручний. При зварюванні або паянні секцій хвилеводів в зоні шва виникають деформації і дефекти поверхні, які усуваються наступним фінішним обробленням, в той час як решта каналу не потребує цього. Кутові хвилеводи мають високі електричні характеристики, але є трудомісткими у

виробництві, насамперед при фінішному обробленні важкодоступних місць кутового вигину каналу.



Рис. 1.2. Хвилеводи з багатоступінчастими кутовими вигинами

Такі характеристики хвилеводів, як електричні параметри, точність розмірів і форми, шорсткість поверхні, закладаються при проектуванні в залежності від призначення, умов експлуатації та виконуваних функцій. Надто високий рівень конструкторських вимог збільшує трудомісткість і собівартість виготовлення і зазвичай значно не підвищує функціональної якості хвилеводів в цілому. Якість виготовлення каналу хвилеводів забезпечується фінішною технологією виготовлення. Внутрішні робочі поверхні хвилеводів S-діапазону повинні мати жорсткі розрахункові допуски  $(3...15) \cdot 10^7 / f$  мм та шорсткість  $Ra=0,40...0,80$  мкм [3], [4], але у зв'язку із важкодоступністю місць оброблення існуючими методами, насамперед у кутових вигинах, шорсткість навколошовних зон знижують на 1...2 класи (до  $Ra=1,6...3,2$  мкм). Це призводить до зростання втрат потужності хвиль при проходженні каналом та зменшує коефіцієнт корисної дії (ККД) всієї РЛС в цілому. Тому підвищення якості оброблення навколошовних зон потребує особливої уваги.

Матеріали, з яких виготовляються елементи хвилеводів, мають певні характеристики:

- високу електричну провідність і низьку магнітну проникність;
- стійкість до дії корозії;

- механічну міцність для забезпечення незмінності геометричних розмірів в процесі експлуатації;

- порівняно малу вагу;

- високу здатність до механічного оброблення, зварювання, паяння.

В якості матеріалів для виготовлення хвилеводної труби (табл. 1.1. 1.2) використовується алюміній (АД0) та латунь (Л96). Чим вище ступінь чистоти застосованого матеріалу, тим вище його електропровідність. Матеріалом для фланців хвилеводів служить алюміній (АМГ3) та латунь (Л63).

Таблиця 1.1

**Хімічний склад матеріалу елементів хвилеводів [5]**

Марка матеріалу	АД0	АМГ3	Л63	Л96
Fe, %	≤0,4	≤0,5	≤0,2	≤0,1
Cu, %	≤0,05	≤0,1	62...65	95...97
Mg, %	≤0,05	3,2...3,8	-	-
Si, %	≤0,25	0,5...0,8	-	-
Zn, %	≤0,07	≤0,2	34,22...37,5	2,66...4,8
Mn, %	≤0,05	0,3...0,6	-	-
Ti, %	≤0,05	≤0,1	-	-
Al, %	основа	основа	-	-
P, %	-	-	≤0,01	≤0,01
Pb, %	-	-	≤0,07	≤0,03
Cr, %	-	≤0,05	-	-

До хвилеводів, на відміну від інших пристроїв НВЧ, пред'являється ряд особливих вимог, обумовлених фізичними принципами розповсюдження хвилі та умовами експлуатації (ОСТ4 ГО.206.014).

Вплив різноманітних чинників та умови проходження хвилі з мінімальними втратами зумовлює застосування при виготовленні певних методів оброблення та певних геометричних обмежень розмірів. Хвилеводи

основного перерізу S-діапазону (72×34 мм) мають, згідно конструкторської документації, наступні технічні вимоги:

- зварні шви I-II класу згідно ГОСТ 14806-80;
- паяні шви виконують газополум'яним спаюванням;
- навколошовні зони калібрують в розмір  $72^{+0,07} \times 34^{+0,07}$  мм з шорсткістю  $Ra=1,6 \dots 3,2$  мкм (з плавним переходом до основного матеріалу каналу);
- герметичність контролюють методом бароакваріума;
- гостра кромка між каналом і фланцем повинна бути не більше 0,1 мм;
- неперпендикулярність торців фланців до каналу хвилеводу повинна бути не більше 0,15 мм, їх площинність – до 0,05 мм.

Таблиця 1.2

#### Механічні властивості матеріалу хвилеводів [5]

Марка матеріалу	АД0	АМГЗ	Л63	Л96
Межа міцності, МПа	$\geq 60$	$\geq 245$	$\geq 390$	$\geq 480$
Відносне подовження, %	$\geq 20$	$\geq 7$	$\geq 30$	$\geq 3$
Твердість НВ10 <sup>-1</sup> , МПа	20...80	$\geq 65$	$\geq 70$	$\geq 130$

Основним і остаточним показником якості виготовлення хвилеводів є значення електропараметрів, які дають об'єктивну характеристику їх функціональності, залежать від конкретної конструкції хвилеводу і регламентуються гранично допустимими значеннями. До основних електропараметрів хвилеводів відносяться:

- коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН);
- коефіцієнт загасання;
- електроміцність.

КСХН – відношення максимального значення амплітуди напруженості електричного поля стоячої хвилі в лінії передачі до мінімального. Значення КСХН не залежить від внутрішнього опору лінії і потужності джерела електромагнітної хвилі (генератора), в однорідній лінії передачі без втрат він

є постійним по всій довжині. Оптимальне значення КСХН в хвилеводі близьке до одиниці, при цьому його ККД максимальний. Допустимі значення КСХН на робочій частоті або в діапазоні робочих частот для хвилеводів регламентуються в технічних умовах, та в більшості випадків мають значення від 1,05 до 1,15. Значення КСХН залежить від багатьох факторів, зокрема:

- від співвідношення між хвильовим опором лінії передачі і опором навантаження;
- від наявності неоднорідностей поверхонь каналу;
- від якості виготовлення струмопровідних поверхонь.

Через те, що якість поверхонь каналу хвилеводу формується при фінішному обробленні, тому застосований при цьому метод має один з вирішальних впливів на значення КСХН.

Токи провідності, що протікають по стінках хвилеводу, частково перетворюють енергію електромагнітного поля хвиль в теплову енергію внаслідок наявності електроопору металу стінок, і в процесі руху вздовж хвилеводу потужність хвиль зменшується. Тому важливим електропараметром при оцінці якості оброблення каналу є коефіцієнт загасання  $\alpha$ , який характеризує величину втрат енергії хвилеводу. Для хвилі основного типу  $H_{10}$  прямокутного хвилеводу з ідеально гладкими стінками коефіцієнт загасання розраховується за формулою (1.1) [1]:

$$\alpha_{H_{10}} = \frac{0,793 \cdot \left[ 1 + \frac{2b}{a} \cdot \left( \frac{\lambda}{2a} \right) \right]}{b \sqrt{\sigma \cdot \lambda \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]}}, \text{ дБ/м} \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, м;

$a, b$  – розміри внутрішнього каналу хвилеводу, м;

$\sigma$  – електропровідність металу стінок хвилеводу, См/м.

Перевагою хвилеводів, в порівнянні з кабельними лініями передачі, є їх велика електроміцність, що дозволяє передавати ними великі потужності

НВЧ. Електроміцність хвилеводу визначається ділянкою з найменшим значенням критичної напруженості електричного поля. Під час передачі граничного значення потужності електричне поле досягає критичної напруженості та при наявності в лінії дефектів поверхні викликає в ній електричний пробій. Допустима пропускна потужність хвилеводів залежить від режиму роботи, особливостей конструкції, якості оброблення внутрішнього каналу та інших чинників.

## 1.2 Вплив якості оброблення струмопровідних поверхонь на електричні характеристики хвилеводу

В каналі хвилеводу на границі розділу двох середовищ енергія електромагнітної хвилі частково відбивається, а частково проникає в метал [6]. Внаслідок поверхневого ефекту відбувається зменшення амплітуди електромагнітних хвиль при проникненні вглиб стінки каналу, тому електричний струм НВЧ тече тільки в поверхневому шарі. Щільність струму НВЧ зменшується в напрямку від поверхні всередину стінки хвилеводу за експоненціальним законом. Відстань, на якій щільність струму зменшується в 2,72 рази, називається глибиною проникнення або товщиною поверхневого струмопровідного шару [7]:

$$\delta = \frac{1}{2\pi\sqrt{30}} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu_r \sigma}}, \text{ м} \quad (1.2)$$

де  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність.

Глибина проникнення струму в S-діапазоні у алюмінієвому хвилеводі складає  $\delta=1,1\dots1,9$  мкм, у латунному –  $1,9\dots2,8$  мкм [6]. На рис. 1.3 приведено залежність глибини проникнення струму від частоти хвилі  $f$ .

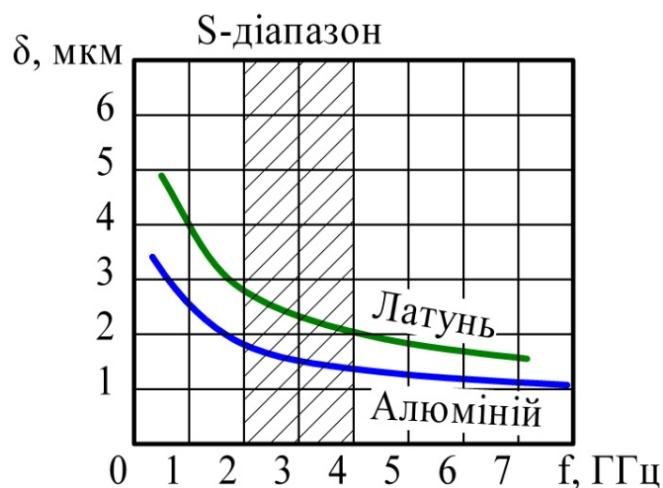


Рис. 1.3. Величина проникнення струму в поверхневий шар хвилеводу [9]

Величина активних втрат енергії в хвилеводах залежить не тільки від провідності і магнітної проникності матеріалу, а й від якості оброблення струмопровідних поверхонь. На якість струмопровідних поверхонь хвилеводів впливають поверхневі дефекти, висота мікронерівностей, їх спрямованість, структура металу, механічні й електричні властивості, хімічний склад [8]. Поверхневі дефекти – це тріщини, розшарування, пори, раковини, вм'ятини, подряпини, забоїни, сторонні включення, що залишилися після процесу виготовлення хвилеводу.

Втрати, обумовлені шорсткістю, є функцією частоти, тому хвилеводи для різних частотних діапазонів виготовляють з різною висотою мікронерівностей. Відомо, що груба шорсткість каналу збільшує довжину шляху струмів НВЧ в металі (рис. 1.4) [9] і, через те, що матеріал хвилеводу має певний електричний опір, це збільшує частку втрати енергії, яка витрачається на нагрів стінок. Для хвилі типу  $H_{10}$  теоретичне значення коефіцієнта загасання в алюмінієвих прямокутних хвилеводах перерізом  $72 \times 34$  мм з ідеально гладкими поверхнями каналу, викликане електроопором металу стінок, дорівнює 0,029 дБ/м, для латунних – 0,043 дБ/м [3]. Експериментально встановлено, що при висоті мікронерівностей ( $h_{сер}$ ), що дорівнює глибині проникнення струму ( $\delta$ ), втрати енергії зростають в 1,6 рази; а при висоті ( $h_{сер}$ ), яка дорівнює половині глибини проникнення – в 1,2 рази

[10]. Тому для виключення втрат, пов'язаних з шорсткістю, висота мікронерівностей повинна бути менше половини глибини проникнення струму ( $\delta$ ) в заданому діапазоні частот.

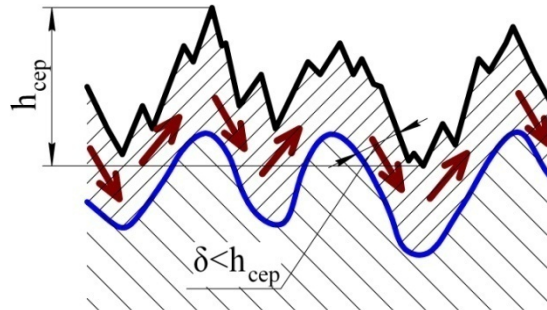


Рис. 1.4. Вплив шорсткості на шлях струму в разі, якщо глибина проникнення струму  $\delta$  менше висоти мікронерівностей  $h_{ср}$  [6]

Існує досить багато досліджень [11], [12], [13], [14], [15] впливу параметрів шорсткості каналу на втрати, коефіцієнт загасання, розподіл електричного поля в хвилеводах. Було встановлено, що шорсткість поверхні хвилеводу є випадковою, а висота мікронерівностей відповідає Гауссовському випадковому процесу [16], [17]. Слід також зазначити, що існуючі розрахункові залежності коефіцієнту загасання хвилеводу з ідеально гладкими поверхнями каналу не враховують реальний мікрорельєф струмопровідних поверхонь, що вносить суттєву похибку до розрахунків [18], [19], [20]. Так, для грубо оброблених поверхонь експериментальне значення коефіцієнта загасання перевищувало розрахункове приблизно в два рази, а для більш точно виготовлених хвилеводів – на 30 % [6].

Аналіз різних чисельних методів [21] розрахунку коефіцієнта загасання для прямокутного хвилеводу з ідеально гладкими поверхнями каналу, при рівних вихідних умовах, показав результати з чималим розходженням. Тому в цих дослідженнях пропонують використовувати для прогнозування електропараметрів реальних хвилеводів поправочні коефіцієнти, які враховують величину мікронерівностей або істинну довжину периметру шорстких стінок каналу по відношенню до ідеально гладких. У роботі [6]

пропонується формула розрахунку коефіцієнту загасання з урахуванням шорсткості, яка має вигляд:

$$\alpha = \frac{0.0434}{b} \sqrt{\frac{f\mu_m}{\sigma}} \frac{\left(K_2 + 2\frac{b}{a}K_1\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2\right)}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} K_3, \text{ дБ/м} \quad (1.3)$$

де  $K_1$  – відношення дійсної довжини ( $X_1+X_2+\dots+X_n$ ) поперечного перерізу до довжини ідеального перерізу ( $L$ ) для широкої стінки хвилеводу (рис. 1.5):

$$K_1 = \frac{X_1+X_2+\dots+X_n}{L} \quad (1.4)$$

$K_2$  – аналогічне відношення для вузької стінки хвилеводу;

$K_3$  – коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхні в поздовжньому напрямку.

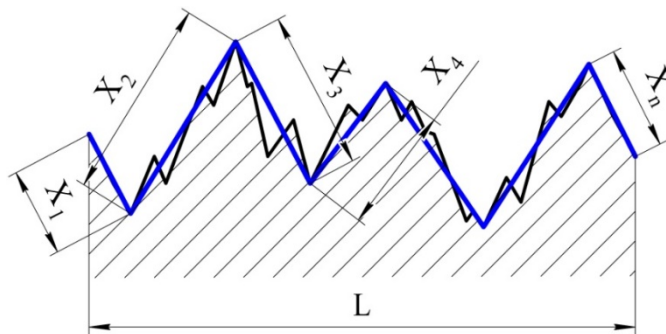


Рис. 1.5. Схема для визначення коефіцієнту шорсткості [6]

У роботах [22], [23] показано, що наявність шорсткості поверхонь хвилеводів еквівалентна зменшенню питомої провідності цих поверхонь в порівнянні зі значеннями, що входять в граничні умови Щукіна-Леонтовича для гладких поверхонь. Морган [24] в своєму дослідженні встановив, що збільшення втрат, викликаних мікронерівностями, паралельними току, в конкретному випадку становило одну третину від втрат, викликаних поперечним напрямком мікронерівностей аналогічного розміру.

В роботі [25] була запропонована формула вибору класу шорсткості оброблення струмопровідної поверхні  $N_M$  хвилеводу за умови, що шорсткість збільшує активні втрати не більше ніж на 10%, яка має вигляд:

$$N_M \geq \ln^2 \left( \frac{35 \cdot 10^{-6}}{\delta} \right) \quad (1.5)$$

Електричні параметри хвилеводу також пов'язані з характером руху струмів високої частоти в поверхневому шарі каналу. Вектори руху струму  $J_C$  і  $J_B$  в стінках хвилеводу (рис. 1.6) спрямовані перпендикулярно вектору магнітного поля  $H$  [26]: на вузькій стінці вони мають тільки поперечний напрямок, а на широкій – як поздовжній так і поперечний напрямок. При цьому поперечні струми на вузьких стінках не залежать від координати  $y$  і залишаються постійними по всій довжині, в той же час як поздовжні струми рівні нулю.

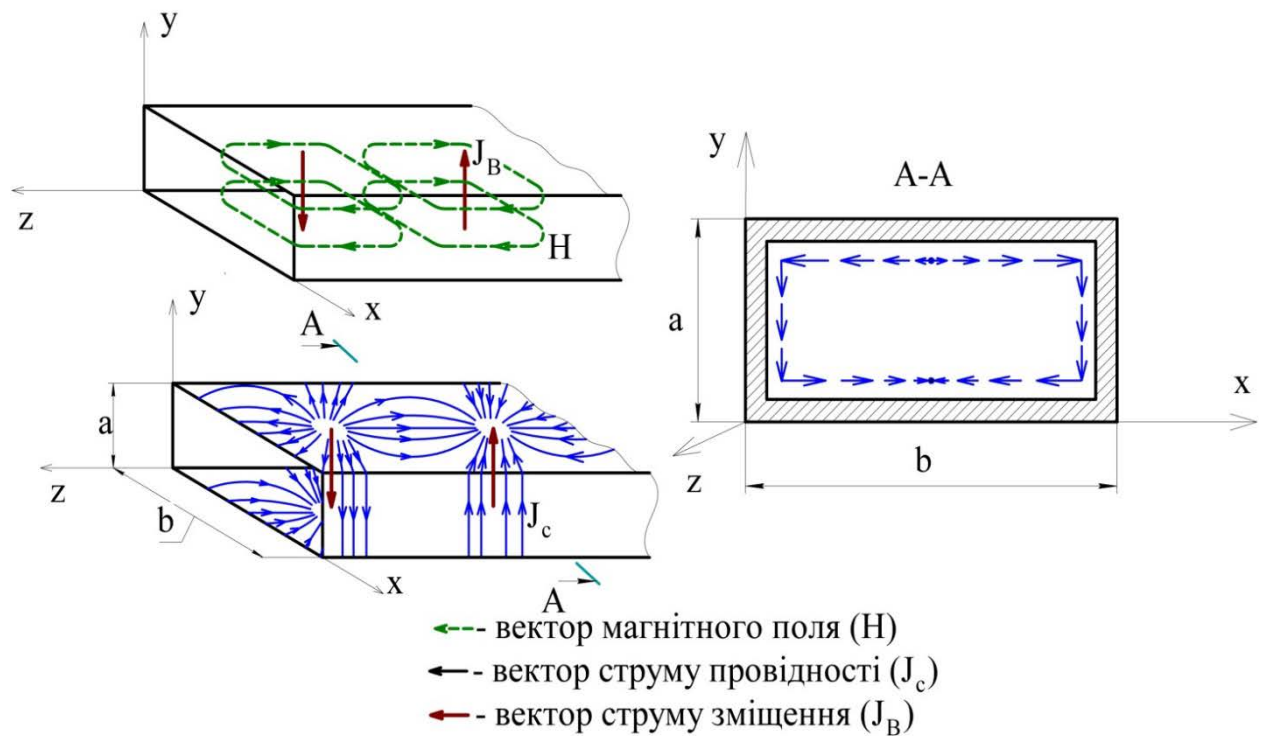


Рис. 1.6. Структура ліній струмів в стінках хвилеводу для хвилі  $H_{10}$  [26]

На широкій стінці струми залежать від координати  $z$  і приймають значення від нуля до максимуму на відстані половини довжини хвилі. Для забезпечення кращих показників електропараметрів необхідно, щоб спрямованість мікрорельєфу, наведена фінішним обробленням, не перетинала лінії руху струмів, щоб не збільшувати довжину їх шляху в металі.

Матеріал каналу хвилеводу (насамперед алюміній) має порівняно низьку твердість, через що під час фінішного оброблення він може піддаватися певному ступеню наклепу.

Відомо, що наклеп збільшує питомий електроопір металів, що погіршує провідність електричного струму. В даний час є достатня кількість досліджень, які свідчать про позитивний вплив поверхневого наклепу на збільшення міцності, зносостійкості, твердості тощо. Але для хвилеводів S-діапазону наклеп в певній мірі може погіршувати електричні характеристики.

### **1.3 Аналіз типової технології виготовлення прямокутних кутових хвилеводів S-діапазону**

Конструкція хвилеводів, вимоги до їх властивостей і технологія виготовлення завжди знаходяться в тісному зв'язку. Залежно від конструкції хвилеводи можуть бути збірними (зварними) або цільними. Для їх виготовлення застосовуються такі методи [2]:

- пайка і зварювання з використанням в якості вихідних заготовок попередньо оброблених секцій хвилеводних труб;

- точне лиття;

- холодне видавлювання;

- нарощування металу;

- комбіновані способи формоутворення.

Питання оптимальності вибору методу виготовлення хвилеводів нерозривно пов'язане з аналізом їх конструктивного рішення. Цей зв'язок обумовлено тим, що метод виготовлення багато в чому визначається конструкцією хвилеводу, і, навпаки, конкретний метод виготовлення накладає обмеження на конструкцію [27].

Отримання хвилеводу S-діапазону за допомогою паяння і зварювання секцій хвилеводної труби є найбільш поширеним методом виготовлення,

економічно доцільним у дрібносерійному виробництві, оскільки не вимагає дорогого устаткування. Виготовлення хвилеводів з секцій хвилеводних труб не є складним процесом і, як правило, передбачає наступні операції:

- 1) порізка хвилеводної труби на секції; механічне оброблення секцій;
- 2) зварювання (паяння) секцій у кутовий вигин;
- 3) рихтування вигину;
- 4) полірування каналу в зоні швів  
(пп. 2...4 повторюють за кількістю вигинів у хвилеводі);
- 5) зварювання (паяння) фланців;
- 6) дорнування та полірування каналу з боку фланцю на відстань 40...45 мм; механічне оброблення фланців;
- 7) перевірка електропараметрів;
- 8) нанесення покриттів.

В залежності від кількості вигинів конструкції хвилеводу операції 2...4 можуть повторюватися, але їх немає можливості об'єднати через недоступність навколошовних зон в глибині каналу з декількома вигинами.

Одним з відповідальних етапів виготовлення хвилеводу є зварювання або паяння. Під час цього стінки нерівномірно нагріваються, що веде до їх викривлення. Для хвилеводу з перерізом  $72 \times 34$  мм деформація стінок досягає до 0,5 мм біля шва, з максимумом по середині каналу [28]. Також при ручному зварюванні в залежності від кваліфікації зварника шви можуть мати значну нестабільність геометричних розмірів (нерівномірність ширини шва, опуклості або увігнутості шва тощо), є ймовірність утворення пор і усадкових раковин [29].

Після зварювання (паяння) виконують рихтування та дорнування каналу хвилеводу. Дорнування здійснюють на спеціальній установці в два етапи, поступово збільшуючи розмір дорну. Після цього поверхні каналу полірують. Подальше оброблення залежить від конструктивних особливостей хвилеводу. Стан поверхневого шару каналу і його геометрія, отримані після фінішного оброблення, є одним з основних факторів, що впливають на експлуатаційні

електропараметри хвилеводів.

#### **1.4 Задачі фінішного оброблення навколошовних зон каналу хвилеводів**

В даний час через складну конструкцію і високі вимоги до якості внутрішнього каналу хвилеводи мають велику трудомісткість у виготовленні, особливо на фінішних операціях. Слюсарний метод фінішного оброблення каналу хвилеводів в місцях зварювання (паяння) секцій для усунення дефектів поверхні та забезпечення необхідної шорсткості в більшості випадків є основним. Матеріал хвилеводів легко обробляється різанням, добре зварюється, але має низьку твердість і міцність, через що звичайними методами фінішного оброблення важко домогтися високої шорсткості в важкодоступних місцях каналу. Через це вимоги до неї в навколошовних зонах технологічно занижують до  $Ra=1,6...3,2$  мкм. Це збільшує величину активних втрат в хвилеводі, пов'язаних із шорсткістю.

При дослідженні проблем фінішного оброблення кутових хвилеводів на КП «НВК «Іскра» було проаналізовано етап ручного зварювання та паяння секцій хвилеводної труби. Аналіз їх до зварювання показав, що розмір каналу відповідав технічним вимогам і становив  $72...72,1$  мм та  $34...34,1$  мм; шорсткість в поздовжньому напрямку складала  $Ra_{новз}=0,28...0,61$  мкм, а в поперечному –  $Ra_{non}=0,57...0,91$  мкм, що задовольняло вимогам конструкторської документації.

Зовнішній огляд хвилеводів різної конструкції після зварювання секцій кутових переходів та фланців виявив, що навколошовні зони каналу мають дефекти поверхні: опуклість або увігнутість, провари, пори і усадкові раковини, зміщення з'єднаних країв секцій (рис. 1.7). Деформація стінок каналу досягала 0,5 мм, напливи припою до 0,3 мм.

Дорнуванням та рихтуванням каналу виправлялась геометрія перерізу та

забезпечувався розмір під полірування (33,9...34 мм і 71,9...72 мм), але з'являлись нові дефекти поверхні (подряпини, задири) глибиною до 0,05 мм.

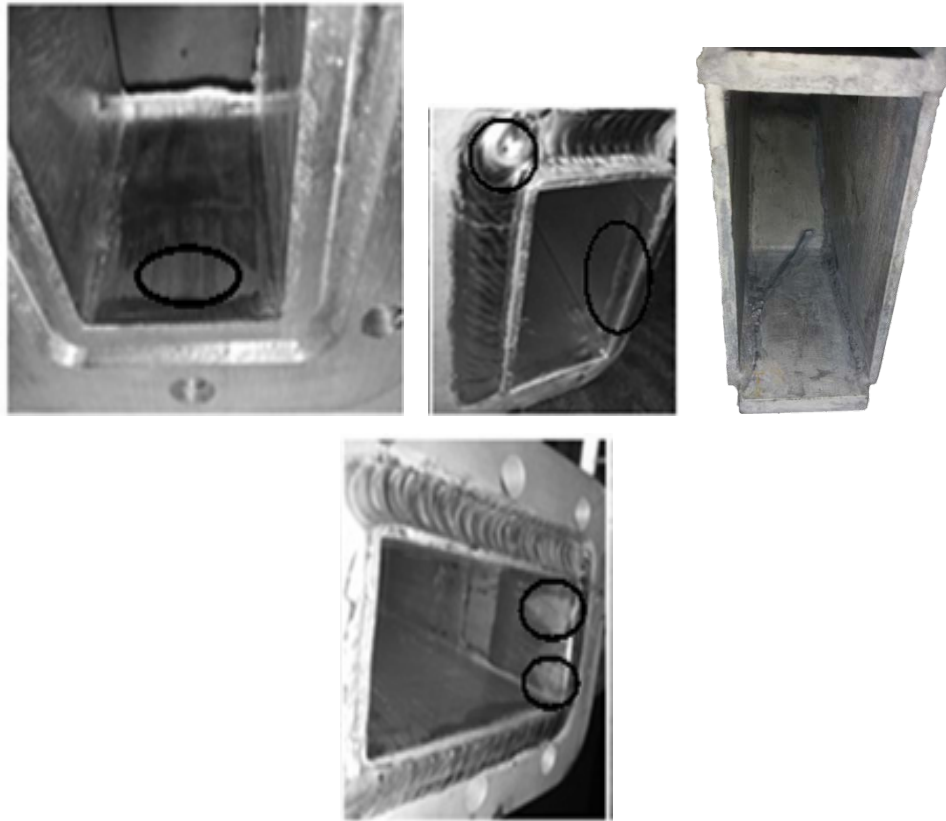


Рис. 1.7. Дефекти поверхні каналу при зварюванні та паянні

Для усунення всіх перерахованих дефектів поверхні використовують ручне полірування наждачним папером на оправці за допомогою шліфмашинки. Після полірування каналу шорсткість в навколошовних зонах становила  $Ra_{новз}=1,58...2,79$  мкм, що перевищувало розрахункові значення та впливало на електричні параметри хвилеводу. Тому з'являлась необхідність додатково полірувати ці ділянки поверхонь.

### **1.5 Методи фінішного оброблення каналу прямокутних кутових хвилеводів**

Фінішне оброблення хвилеводів (притуплення гострих крайок, видалення задирок, полірування навколошовних зон каналу та фланців) є

остаточним етапом виробництва та проводиться з метою усунення всіх дефектів поверхні, які утворилися на попередніх операціях, і надання їй необхідної шорсткості. Операції фінішного оброблення хвилеводів становлять до 30% загальної трудомісткості їх виготовлення. Особливості, які необхідно враховувати при виборі методу фінішного оброблення прямокутного каналу хвилеводу, такі:

- обмежений внутрішній простір каналу хвилеводів;
- мінімізація силового тиску на оброблювані поверхні через тонкі стінки та через те, що метал хвилеводів має невисоку твердість;
- наявність важкодоступних місць для оброблення в кутових вигинах каналу.

Аналіз відомих фінішних методів оброблення поверхонь у обмеженому просторі таких конструкцій показав, що для досягнення необхідної шорсткості поверхні використовуються трудомісткі методи оброблення, найчастіше, використовують 2-3 методи послідовно (наприклад, механічний і хімічний).

При виборі методу фінішного оброблення прямокутних хвилеводів розрізняють три підходи до використовуваних інструментів:

- жорсткий інструмент: профіль інструменту, або його траєкторія руху точно повторює форму оброблюваної поверхні;
- нежорсткий пружний інструмент: вимоги до точності виконання вищевказаних умов різко знижуються або скасовуються;
- відсутність інструменту – наявність робочого середовища різного наповнення (повітря, рідина, абразивний матеріал, кульки тощо).

Аналізуючи всі можливі методи фінішного оброблення, не розглядали методи та інструменти, які не можливо використати для замкнутого обмеженого простору каналів хвилеводів, які мають високий силовий або температурний вплив на тонкі стінки хвилеводу, або явний зміцнювальний ефект.

### 1.5.1 Фінішне оброблення слюсарним методом

В більшості випадків, фінішне оброблення кутових хвилеводів через складну конструкцію та дрібносерійне виробництво виконується слюсарним методом вручну або засобами малої механізації. Оброблення за допомогою засобів малої механізації істотно підвищує продуктивність, а також дозволяє отримати необхідну якість поверхні при невисокій собівартості оброблення. При поліруванні каналу деталь встановлюють в лещатах і вручну повертають після оброблення стінки каналу з кожного боку (рис. 1.8, а). Для полірування фланців використовують наждачний папір, закріплений на столі верстаку (рис. 1.8, в).

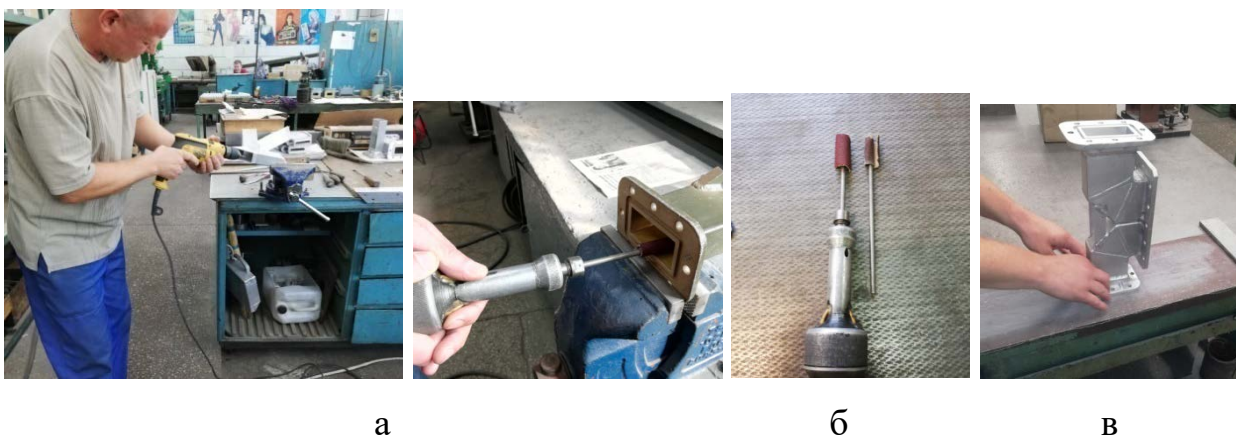


Рис. 1.8. Слюсарне полірування каналу (а) наждачним папером на оправці (б) та полірування фланцю вручну (в)

Найуживанішим та універсальним інструментом для слюсарного оброблення кутових вигинів каналу хвилеводів є наждачний папір на оправці (рис. 1.8, б). Для забезпечення високої якості поверхонь необхідно використовувати послідовно наждачний папір меншої зернистості.

Загальними недоліками слюсарного методу оброблення є наступні: шаржування поверхні абразивом; невисока продуктивність; низька стійкість і необхідність частої заміни інструменту; полірування вимагає від робочого особливої уваги за зусиллям притиснення інструменту та ручною подачею, щоб не допустити утворення зарізів. В результаті чого цей метод оброблення

має високу трудомісткість та найчастіше не забезпечує необхідну шорсткість в важкодоступних місцях кутового вигину каналу.

### **1.5.2 Вібраційне фінішне оброблення**

У машинобудуванні досить широко поширене оброблення з накладанням вібрацій, особливо при виконанні фінішних операцій. Це такі процеси, як віброгалтовка, віброполірування, які відносять до так званого віброабразивного оброблення [30]. Важко забезпечити стабільність оброблення поверхонь при використанні цих методів для кутових хвилеводів. Для віброабразивного оброблення хвилеводів круглого і овального перерізу застосовуються сталеві кульки [2]. Канал на 35...45 % заповнюється кульками та хвилеводу надається повільне обертання навколо осі, при цьому накладаються вібрації з амплітудою коливань 2...3 мм і частотою 30...40 Гц. В результаті чого шорсткість оброблюваних поверхонь підвищується на 1...2 класи та відбувається додаткове ущільнення поверхневого шару металу. Проте через те, що прямокутний хвилевід має внутрішні кути і важкодоступні місця кутового вигину каналу – обробка на різних ділянках каналу проводиться з різною інтенсивністю, а також наклеп в ньому не є рівномірним, оброблення даним методом до прямокутних хвилеводів застосовувати не можна.

Широке застосування при фінішному обробленні знаходять сьогодні ручні апарати ультразвукового полірування металу [31]. Але через невисоку продуктивність і невеликий виліт інструменту даний метод при поліруванні каналу хвилеводу не отримав широкого застосування.

### 1.5.3 Механічне полірування на притиральних верстатах

Для фінішного оброблення каналу хвилеводів застосовуються спеціальні притиральні верстати, які дозволяють скоротити час оброблення, і підвищити якість одержуваної поверхні. Зазвичай притиральне оброблення здійснюється абразивними сумішами, що наносяться на притир, дозволяє отримувати шорсткість поверхонь до  $Ra=0,04...0,02$  мкм, а також високу точність розмірів і форми. Головною відмінною рисою процесу притирання є одночасний хіміко-механічний вплив абразиву, що забезпечує знімання найтонших шарів металу, в результаті чого зменшуються макро- і мікронерівності, виправляються незначні геометричні похибки.

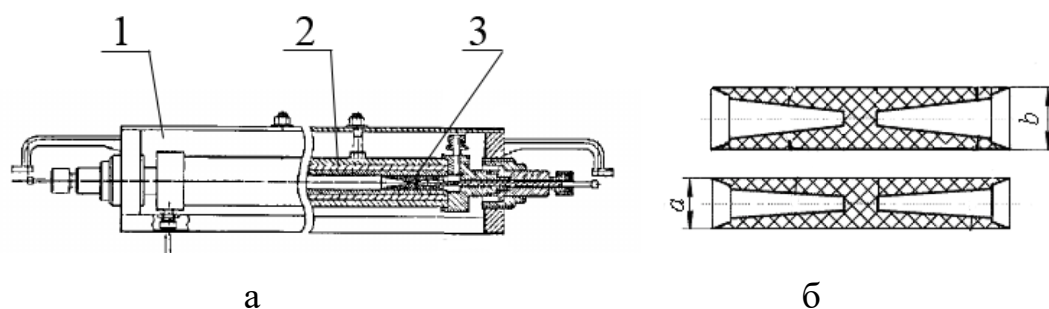
Але з точки зору оброблення хвилеводів механічні методи полірування внутрішнього каналу хвилеводів мають ряд суттєвих недоліків:

- утворення поверхневого шару зі складною структурою, який містить частинки абразиву, полірувальної пасти, оксиди, подрібнені кристали, що вимагає додаткового очищення;
- можливість деформації тонких стінок хвилеводів в процесі полірування.

В роботах [32], [33], [34] для полірування хвилеводу запропоновано спеціальну гідравлічну установку, яка рухає каналом еластичний притир з нанесеною на поверхню алмазною пастою. В якості притира для полірування каналу запропоновано використовувати порожнистий з двох боків поліуретановий стрижень (рис. 1.9). Порожнини стрижня виконані у вигляді усіченої піраміди і повторюють його зовнішній профіль. Перевага цього еластичного інструмента полягає в тому, що абразивні зерна при обробленні, пружно переміщаючись всередину основи, не утворюють глибоких рисок на поверхні.

Багаторазове поздовжнє переміщення притиру всередині хвилеводу здійснюється робочою рідиною під тиском в обидві сторони хвилеводу, за рахунок чого досягається задана шорсткість. Після полірування порожнини

хвильоводів повністю по всьому об'єму покриваються абразивною масою. Для її видалення застосовують комбінований спосіб очищення: хімічний із застосуванням ультразвуку [35]. Істотним недоліком даної установки є необхідність створення протитиску зовні хвильоводу для запобігання деформації стінок та застосування її тільки для прямолінійних конструкцій.



1 – корпус; 2 – хвильвід; 3 – притир

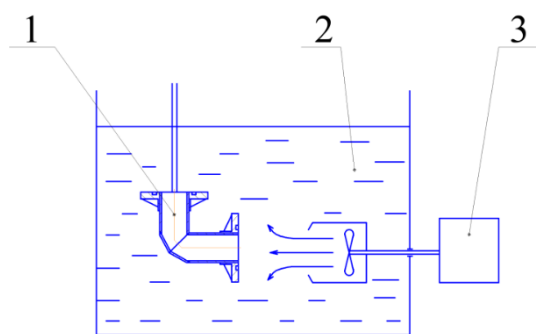
Рис. 1.9. Установка (а) полірування каналу хвильоводів поліуретановим притиром (б) [34]

Для механічного полірування внутрішнього каналу хвильоводів також використовуються пневматичні установки з повстяними або фетровими притирами [2], просоченими абразивним порошком або пастами. Притир являє собою вкладиш, розміри якого забезпечують щільне переміщення в каналі хвильоводу. Також застосовуються конструкції притирів з гумовими або пружинними прокладками, що забезпечують рівномірний і постійний притиск по периметру стінок каналу. Під час оброблення притир вводиться в канал (рис. 1.10, а), потім стиснене повітря надходить по черзі в обидва кінця хвильоводу, що призводить до руху притира з високою швидкістю.

Дослідження [9] полірування повстяним притиром з нанесеною алмазною пастою показали зменшення шорсткості за 200 циклів з 5...7 мкм до 0,3 мкм. При обробленні була виявлена нерівномірність шорсткості обробленої поверхні каналу і її шаржування абразивними зернами. Тому після полірування притирами хвильвід потребував очищення від абразивних частинок і знежирення. Також цей метод призначений для тонкого



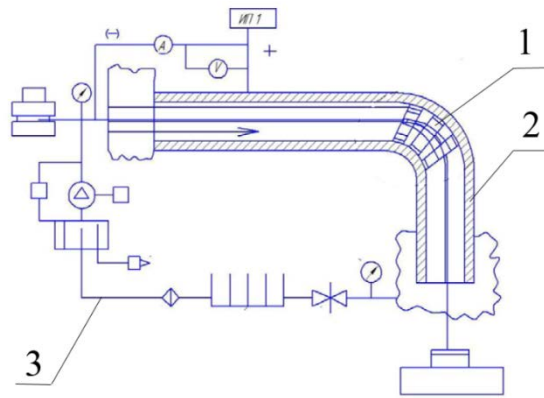
Електроплазмове оброблення (ЕПО) – це метод більш складний, порівняно з електрохімічним поліруванням, але має високу ефективність. Під впливом напруги електроліт, що знаходиться в ємкості, доходить до кипіння [38], в результаті чого, у поверхні оброблюваного хвилеводу утворюється плівка. Розряди, що проходять через неї, запускають серію плазмових процесів. Там, де розташовуються мікроступи, спостерігається значне зростання електричного поля, що веде до їх руйнування. Перевагою ЕПО є те, що використовуються недорогі й доступні електроліти, що не завдають шкоди здоров'ю людей та навколишньому середовищу, процес має високу продуктивність. Але в роботі [39], [40] було встановлено, що ЕПО не дозволяє забезпечити рівномірну шорсткість оброблюваної поверхні та зберегти вихідну точність. Також ЕПО, як і електрохімічне, вимагає попереднього механічного оброблення при наявності помітних подряпин та відносно великої кількості електроенергії. Для полірування кутових хвилеводів, також необхідно забезпечити в каналі течію електроліту (рис. 1.11).



1 – гальванічна ванна; 2 – хвилевід; 3 – пристрій для створення течії

Рис. 1.11. Схема установки для ЕПО хвилеводів

Для фінішного оброблення каналів хвилеводів в роботах [40], [41] запропоновано використовувати анодно-абразивне вібраційне полірування (рис. 1.12), яке полягає в анодному видаленні гребінців мікронерівностей за допомогою використання електроліту з пасивуючими добавками. Активація гребінців поверхні здійснюється вібрацією еластичного інструмента, виконаного із поліуретану з додаванням алмазної крихти, в який інтегровано катод.



1 – інструмент; 2 – хвилевід; 3 – гідросистема установки

Рис. 1.12. Схема анодно-абразивного вібраційного полірування [41]

Даний метод дозволяє забезпечити необхідну рівномірну шорсткість оброблюваної поверхні, усунути шаржування і зберегти вихідну точність. Однак цей метод не продуктивний, потребує постійного прокачування через канал хвилеводу електроліту і застосовується лише до прямих хвилеводів або з плавним вигином.

### 1.5.5 Фінішне оброблення абразивними середовищами

Фінішне оброблення каналів прямокутних хвилеводів, які мають вигини, традиційними методами є ускладненим, а іноді і неможливим через важкодоступність місць полірування. Тому для цих цілей є можливим використання спеціальних технологій фінішного оброблення, в яких в якості інструменту застосовується потік робочого середовища, що несе абразивні елементи. Даний вид оброблення дозволяє здійснити механізацію процесу, поліпшити умови праці, знизити час оброблення.

Оброблення абразивними середовищами [42], [43], [44] є: гідро- і пневмоструминне, турбоабразивне, магнітоабразивне, ультразвукове кавітаційно-абразивне оброблення, оброблення у псевдозрідженому шарі абразиву тощо. Робоче середовище, крім абразиву, може бути наповненим

також неорганічними або органічними робочими елементами. При використанні методів цієї групи до хвилеводів необхідно звернути увагу на обмежені можливості управління потоком робочого середовища, неконтрольоване видалення металу, що не дозволяє рівномірно обробляти поверхні. До найбільш застосовуваних методів при обробленні хвилеводів відносяться: гідроабразивне прокачування, абразивно-екструзійне оброблення (АЕО), струменеве пневмоабразивне, магніто-абразивне оброблення та.

Для оброблення криволінійних каналів прямокутних хвилеводів (рис. 1.13) в працях [45], [46] запропоновано використовувати гідроабразивне прокачування. Це є процес ерозії оброблюваної поверхні потоком гідроабразивної суспензії, яка прокачується через виріб в обох напрямках, створюючи спрямовану шорсткість.



а



б

Рис. 1.13. Оброблення хвилеводу (а) в установці гідроабразивного прокачування КП-100У (б) [46]

Отримана шорсткість залежить від розміру і концентрації абразивних зерен. Базова технологія оброблення каналу хвилеводів використовує суспензію з концентрацією абразивного матеріалу в робочому середовищі 2...6 %, тиском прокачування – 4...8 МПа і відносною швидкістю течії робочого середовища – 30...70 м/с. До недоліків даного методу оброблення відноситься нерегульована ерозія при великій концентрації абразиву і високій швидкості потоку. Також розміри оброблюваних хвилеводів обмежуються

розмірами робочої камери та потужністю гідросистеми обладнання.

Для дослідження рівномірності оброблення кутових хвилеводів було проведено моделювання гідроабразивного прокачування за допомогою програмного забезпечення «FlowVision» для вигинів різних типів (рис. 1.14) на різних режимах. Воно показало суттєвий недолік цього процесу – потік робочого середовища обтікає внутрішній кут внаслідок різкої зміни напрямку стінок. При цьому за внутрішнім кутом виникає коловоротна зона, в якій різко знижується тиск на стінки каналу, і, як наслідок, знижується інтенсивність оброблення поверхонь.

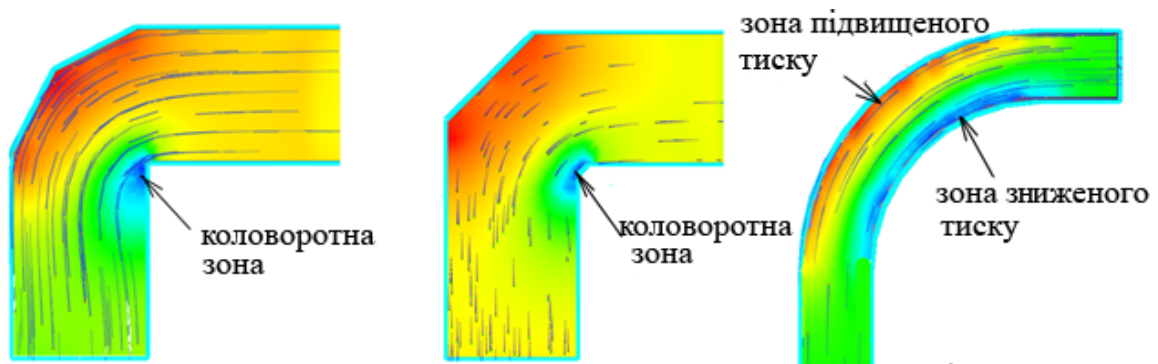


Рис. 1.14. Моделювання процесу гідроабразивного прокачування кутових переходів різних типів

Між транзитним потоком і коловоротною зоною виникає поверхня розділу, яка відокремлює між собою течії з різними швидкостями і є ознакою місцевого опору. На поверхні розділу утворюються окремі вихори, які безперервно переміщуються. При цьому одні маси робочого середовища в коловоротній зоні замінюються іншими.

При обробленні хвилеводів з плавним вигином каналу коловоротних зон не виникає, але виникають відцентрові сили, які збільшують тиск робочого середовища на стінки з великим радіусом заокруглення і зменшують на стінки з меншим. В результаті чого створюються умови для руху частинок робочого середовища в поперечному напрямку від області більшого тиску до області меншого тиску, що викликає турбулентність потоку. Після плавного повороту

каналу хвилеводу виникає обертально-поступальний рух робочого середовища, який згасає на деякій відстані. Тому забезпечити рівномірне оброблення каналу цим методом неможливо [47].

Суть методу абразивно-екструзійного оброблення (АЕО) хвилеводів [48], [49], [50] полягає в екструзії уздовж каналу робочого середовища із полімерної основи, яку наповнено абразивними зернами, яке здатне до в'язкопружного деформування. При перепресуванні робочого середовища на вході в канал формується абразивний «джгут», який під час руху повторює контур каналу, що дозволяє здійснювати фінішне оброблення. Абразивні зерна при цьому контактують з поверхнею каналу, внаслідок чого знімається певний шар матеріалу. Товщина видаленого шару матеріалу складає від 1 до 10 мкм за цикл. В роботах [51], [52], [53] експериментально досліджувалась АЕО каналу хвилеводів сантиметрового діапазону. Оброблення хвилеводів здійснювалось під тиском 2,5 МПа робочим середовищем, наповненим карбідом кремнію зернистістю P100, та за шість циклів шорсткість каналу знизилась з  $R_a=1,25$  мкм до  $R_a=0,22$  мкм. Аналіз цих досліджень показав, що при обробленні каналів великої довжини або з вигинами якість обробленої поверхні часто неоднорідна через значні зміни характеру течії робочого середовища. Головним недоліком АЕО є необхідність пристосування, яке не дасть стінкам хвилеводу деформуватися під час оброблення [41], [54] (рис. 1.15, а). Також цей метод відрізняється низькою швидкістю оброблення і необхідністю відмивання і знежирювання оброблених поверхонь хвилеводу [35].

Моделювання процесу АЕО кутових хвилеводів з перерізом каналу  $72 \times 34$  мм за допомогою програмного забезпечення «FlowVision» (рис. 1.15, б) показало, що течія робочого середовища схожа за рухом на гідроабразивне прокачування. Однак істотною відмінністю є високий внутрішній тиск робочого середовища на стінки каналу і низька швидкість його течії, пов'язана з високою в'язкістю рідкої складової. При цьому виникають так само коловоротні зони потоку за прямим кутом каналу, що в свою чергу веде до

зменшення інтенсивності його оброблення. Тобто цей метод також не може забезпечити рівномірність оброблення поверхонь каналу.

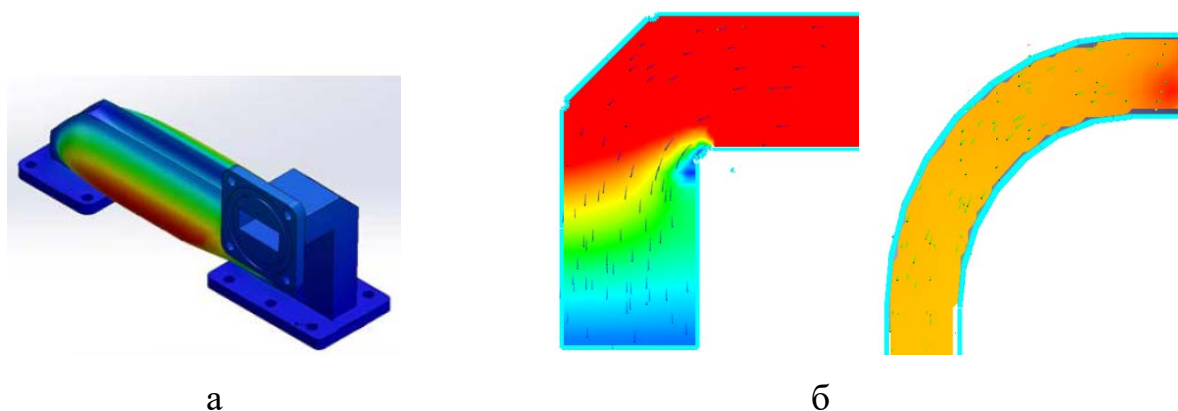


Рис. 1.15. Моделювання деформацій стінок (а) від тиску робочого середовища [51] та характеру його течії (б)

Струменеве гідроабразивне або пневмоабразивне оброблення являє собою процес ударної дії на оброблювану поверхню високошвидкісного абразивного струменю [55]. Характер взаємодії абразивних частинок, що знаходяться в струмені, з поверхнею, визначає вихідні параметри процесу – продуктивність і якість оброблення. Процес струменевого гідроабразивного оброблення полягає в направленні струменя суспензії, що складається з води (повітря) і частинок абразивних матеріалів, на оброблювану поверхню [56]. В результаті такого оброблення утворюються чисті матові поверхні без спрямованої шорсткості [57]. Робота з видалення металу проводиться за рахунок кінетичної енергії абразивних частинок. Один із різновидів струменевого пневмоабразивного оброблення – склоструменеве, яке широко застосовується для оброблення деталей авіадвигунів [55]. Суть методу полягає в бомбардуванні поверхні деталі повітряною сумішшю скляних сферичних кульок певного діаметру. Кульки мають мікроскопічні розміри, тому їх кінетична енергія невелика, що дозволяє проводити оброблення без змінення геометрії, пошкодження поверхонь і втрати механічних властивостей. Спеціальний склад і пружність роблять кульки дуже твердими, стійкими до

ударів і, таким чином, малозношувальними. Але дані методи можна застосувати лише при обробленні зовнішніх поверхонь хвилеводів через те, що при обробленні каналу складно керувати струменем, що може призвести до нерівномірного зняття матеріалу.

Магнітно-абразивний метод полірування запропоновано у роботі [58] для оброблення каналу хвилеводів складної форми (рис. 1.16). Для цього хвилевід закріплюють на кронштейнах, на яких встановлюють кільцевий робочий орган з постійними магнітами, рівновіддалений від його зовнішньої поверхні.

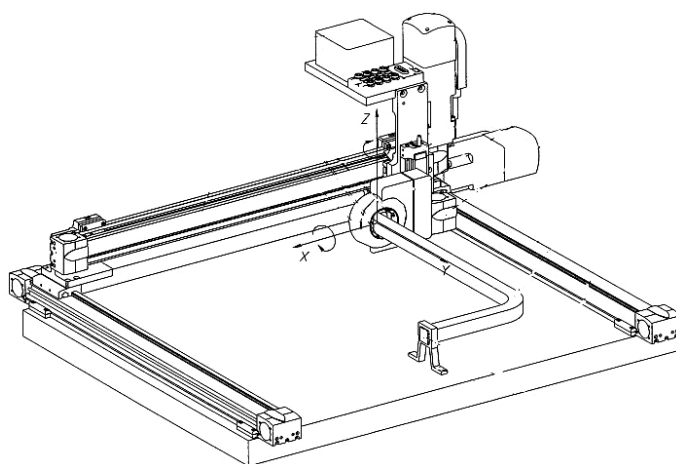


Рис. 1.16. Магнітно-абразивний метод полірування хвилеводів складної форми [58]

Канал хвилеводу наповнюють магнітним абразивом, металевими кульками, феромагнітною, магнітореалогічною рідиною або без неї. Переміщуючи вздовж хвилеводу робочий орган з постійними магнітами, виконується оброблення каналу. Даний метод мало поширений через складне обладнання та низьку продуктивність.

Проаналізувавши методи (п. 1.5.1...1.5.5) можна сказати, що їх з різних причин неможливо або нераціонально застосовувати для оброблення каналу кутових хвилеводів, особливо, в умовах дрібносерійного виробництва. Тому розглянемо сучасні більш продуктивні інструменти слюсарного оброблення.

### 1.5.6 Альтернативні інструменти слюсарного оброблення каналу кутових прямокутних хвилеводів

В якості альтернативних інструментів наждачному паперу (п. 1.5.1) на оправці можуть бути використані жорсткі, гнучкі або пружні інструменти обертального дії такі як, абразивні пелюсткові круги, шліфувальні головки з нетканого матеріалу, абразивні нескінченні стрічки (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Інструмент для слюсарного оброблення каналу кутових хвилеводів: ПШК на оправці (а); шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу (б); нескінченна стрічка з наждачного паперу (в); нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу (г)

Пелюстковий шліфувальний круг (ПШК), показаний на рис. 1.17, а, є модифікацією наждачного паперу на оправці, стійкість його вище, але недоліки він має ті ж самі.

Одним з нових матеріалів, використовуваних при фінішному обробленні, є об'ємне неткане абразивне полотно. Основою цього матеріалу є нейлонові, поліефірні волокна, просочені суспензією з смоли і абразивного матеріалу [59]. Шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу (рис. 1.17, б) характеризується більшим терміном служби, в порівнянні з наждачним папером, і високою якістю оброблення. До недоліків нетканого абразивного полотна можна віднести: невисоку механічну міцність, відносно високу засалюваність і неможливість очищення.

Ще одним інструментом, який на даний час широко використовуються

для фінішного оброблення тонкостінних та складнопрофільних деталей є полімерно-абразивні щітки (ПАЩ). Даний інструмент (рис. 1.18, а, б) складається з скріплених в маточині полімерних волокон, в яких рівномірно розподілено абразивні зерна. Характерними властивостями ПАЩ, що говорять на користь їх можливого використання у обробленні хвилеводів [60] (рис. 1.18, в), є:

- незначні зусилля і температура в зоні полірування;
- рівномірний шліфувальний ефект, тому що при зношуванні волокон постійно відкривається новий абразивний матеріал;
- частинки абразиву практично не проникають в поверхневий шар;
- висока пружність і гнучкість інструменту без небезпеки руйнування;
- відсутність засалювання матеріалу робочими відходами;
- великий термін служби при оптимальних режимах;
- можливість полірувати поверхні будь-якої геометрії (плоскі, опуклі, круглі) і навіть деталі складної конфігурації;
- висока якість обробленої поверхні з рівномірною мікротекстурою поверхні без рисок і вторинних задирок;
- можливість застосування для сухого і вологого полірування;
- висока продуктивність оброблення.

ПАЩ демонструють також такі переваги гнучких інструментів, як зниження вимог до точності взаємного розташування деталі і інструменту, зменшення складності руху інструменту, що робить технічно і економічно можливою механізацію слюсарних операцій. Застосування ПАЩ при виконанні фінішних операцій дозволяє істотно збільшити продуктивність оброблення, забезпечивши високу якість поверхонь, незалежно від майстерності і рівня кваліфікації робітника. Це дозволяє істотно підвищити ефективність оброблення і знизити частку ручної праці. Основним недоліком при застосуванні ПАЩ є суворе дотримання температурного режиму в зоні оброблення через відносно низьку температуру плавлення полімерної основи волокон.



а



б



в

Рис. 1.18. Дисківі (а) та йоржикові (б) ПАЩ та їх можливе застосування для полірування хвильоводів (в)

За результатами попередніх досліджень [61] шорсткості, отриманої при поліруванні слюсарним методом різними абразивними інструментами з однією зернистістю алюмінієвих зразків, вирізаних з прямокутних кутових хвильоводів (табл. 1.3), найкращі результати отримано обробленням ПАЩ. Полірування ПАЩ є перспективним технологічним методом фінішного оброблення струмопровідної поверхні каналу хвильоводу.

Таблиця 1.3

### Результати дослідження шорсткості

Найменування інструменту	Повздовжня шорсткість	Поперечна шорсткість
	$Ra_{повз}$ , мкм	$Ra_{поп}$ , мкм
Наждачний папір на оправці	1,88...2,09	1,47...1,90
Шліфувальний пелюстковий круг	1,55...1,81	1,49...1,63
Шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу	1,06...1,40	0,79...0,96
ПАЩ	0,93...1,34	0,74...0,82

### 1.6 Висновки

1. Величина активних втрат в хвилеводі істотно залежить від якості струмопровідних поверхонь, яка забезпечується фінішним обробленням. Встановлено, що використовуване в теперішній час полірування наждачним папером навколошовних зон кутового хвилеводу слюсарним методом не забезпечує необхідної шорсткості. Експериментально було встановлено [62], що фактичні значення електропараметрів хвилеводів перевищують розрахункові значення через вплив шорсткості поверхонь каналу. При грубому обробленні, якщо висота мікронерівностей буде перевищувати глибину проникнення струму, це викличе значне загасання радіохвиль. І навпаки, необґрунтоване підвищення класу шорсткості при поліруванні поверхонь каналу вище розрахункових значень, веде до збільшення собівартості виготовлення та не впливає на працездатність хвилеводів.

2. Існуючі фінішні технології оброблення каналу хвилеводів, в основному, використовують трудомісткі методи, іноді декілька послідовно, що вимагає складного дорогого обладнання. В той же час більшість з них призначені

виключно для оброблення прямолінійних хвилеводів і не здатні якісно полірувати поверхні у важкодоступних місцях вигинів каналу. Здійснений порівняльний аналіз фінішних методів встановив, що з широкого переліку для оброблення навколошовних зон кутових хвилеводів в дрібносерійному виробництві є придатним тільки слюсарне оброблення різними абразивними інструментами обертальної дії.

3. Використання сучасних абразивних інструментів, таких як ПАЩ, може підвищити продуктивність і якість оброблення каналу хвилеводів. Дослідження фінішного оброблення цими інструментами тонкостінних складнопрофільних деталей авіадвигунів показали їх високий потенціал. Тому розробка прогресивної технології з використанням полімерно-абразивного щіткового інструменту обертальної дії для зменшення шорсткості струмопровідної поверхні в місцях зварювання або паяння, підвищення експлуатаційних властивостей прямокутних хвилеводів, зменшення тривалості та вартості фінішних операцій є актуальним.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Загальні положення

Оптимальний метод і інструмент фінішного оброблення навколошовних зон кутових хвилеводів має бути універсальним, забезпечувати необхідну шорсткість поверхонь, повинен мати невисоку собівартість та відповідати вимогам дрібносерійного виробництва, мати мінімальний силовий і температурний вплив на оброблену поверхню. На основі попереднього аналізу (п. 1.5) в якості об'єкту дослідження було обрано фінішне оброблення слюсарним методами. В якості інструментів були використані:

- наждачний папір на оправці;
- шліфувальний пелюстковий круг на оправці;
- полімерно-абразивна йоржикова щітка;
- шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу;
- нескінченна стрічка з наждачного паперу;
- нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу.

Зміну якості струмопровідних поверхонь передбачалось проводити за рахунок зміни методів, інструментів і параметрів фінішного оброблення. При цьому всі заходи щодо зміни параметрів якості поверхонь були технологічно і економічно прийнятні, враховували реальні можливості і умови виробництва. До того ж в умовах експериментального виробництва досліджували можливості електрополірування.

При вивченні впливу факторів фінішного оброблення на якість хвилеводів можливо виділити наступні основні напрямки дослідження: порівняльна оцінка і аналіз отримання мікронерівностей на струмопровідних поверхнях каналу; оцінка впливу методу та режимів фінішного оброблення на електропараметри хвилеводу; вплив наклепу на електропровідність.

На підставі комплексного системного дослідження з визначенням

роздільного і спільного впливу чинників фінішного оброблення для різних методів та інструментів, закономірності зміни шорсткості поверхні можуть бути описані математичними залежностями, для подальшого застосування при призначенні параметрів фінішного оброблення реальних хвилеводів.

Очевидно, що проведення повного експерименту з перебором всіх параметрів, кожен з яких в свою чергу має кілька змінюваних фіксованих значень, вимагає великої кількості натурних деталей, представляє великі труднощі. У зв'язку з цим, можливо виключити або обмежити кількість поєднань деяких змінних параметрів, оскільки вони мають меншу значущість, а в якості зразків для експериментів використовувати конструктивні елементи хвилеводів.

Моделювання умов роботи хвилеводу найбільш повно досягається під час типових або ресурсних випробувань. Однак проведення таких випробувань для вивчення впливу різних методів фінішного оброблення є досить дорогим заходом. Тому таке випробування доцільно застосовувати для остаточної оцінки обраної фінішної технології. Для моделювання експлуатації в лабораторних умовах широкого розповсюдження набули стендові випробування електричних характеристик, за допомогою універсального обладнання, яке повністю відтворює весь спектр необхідних параметрів.

## **2.2 Методика дослідження впливу методів і інструментів фінішного оброблення на властивості поверхневого шару каналу хвилеводів**

### **2.2.1 Методика дослідження шорсткості**

Необхідною умовою при проведенні дослідження був неодмінний облік технологічної спадковості від попередніх операцій. Це обумовило використання в якості об'єкта дослідження виключно конструктивних елементів (кутові вигини) натурних хвилеводів двох типів з алюмінію АД0 і латуні Л96, що мають найбільше застосування і труднощі оброблення. Для

дослідження були обрані хвилеводи S-діапазону з перерізом  $72 \times 34$  мм. Конструктивні елементи кутових згинів хвилеводів для дослідження виготовляли наступним чином: розрізали і фрезерували в розмір секції хвилеводної труби (рис. 2.1, а, б), з'єднували паянням і зварюванням, рихтували, полірували. Таким чином були виготовлені за серійною технологією по 54 конструктивні елементи хвилеводів двох типів (рис. 2.1, в, г), при цьому кожен мав зварні та паяні шви. Шорсткість каналу секцій хвилеводної труби до з'єднання становила:  $Ra_{noz\delta} = 0,24 \dots 0,36$  мкм і  $Ra_{non} = 0,63 \dots 0,75$  мкм.

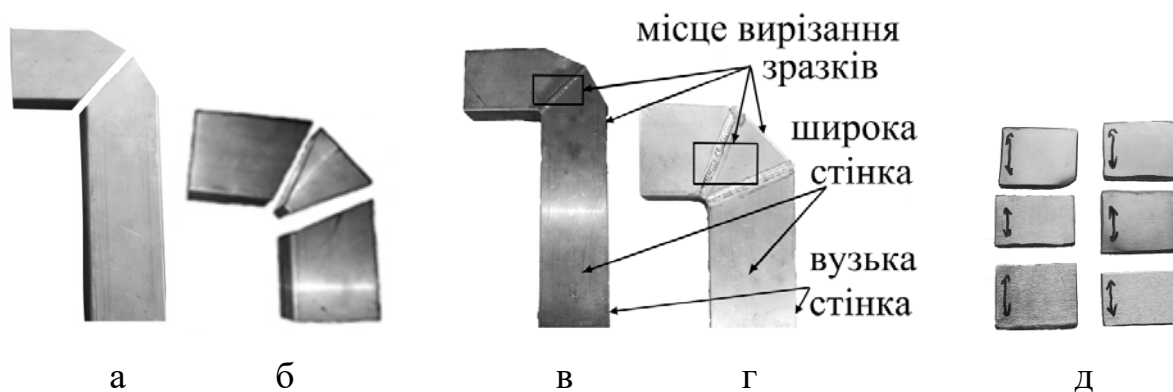


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд секцій прямокутної труби (а, б), з яких виготовлено конструктивні елементи хвилеводів (в, г) двох типів та зразки для дослідження шорсткості (д)

В процесі ручного зварювання та паяння виникали деформації поверхонь, які виправляли рихтуванням. Після цього на поверхні виникали подряпини, задири. Фінішне оброблення навколошовних зон (табл. 2.1) досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів здійснювали до усунення всіх дефектів поверхні та отримання однорідної шорсткості з плавним переходом до основного матеріалу каналу (рис. 2.2). Відповідність розмірів каналу перевіряли нутроміром. Частоту обертання інструменту під час полірування контролювали механічним тахометром. Переміщення інструменту здійснювалось вручну. Час оброблення кожного досліджуваного конструктивного елемента хвилеводу фіксувався для подальшого

економічного порівняння методів і інструментів фінішного оброблення.

Оброблення внутрішнього каналу конструктивних елементів кутового хвилеводу здійснювали електричною прямою шліфмашинкою «Metabo GE 710 Plus» (частота обертання шпинделя –  $10000...30500 \text{ хв}^{-1}$ ). Для оброблення на низьких швидкостях було використано електродріль «Makita HP1630» з максимальною частотою обертання  $3200 \text{ хв}^{-1}$ . Для стрічкового інструменту використовували електричний стрічковий напилок «Makita 9032» із швидкістю обертання стрічки  $5...25 \text{ м/с}$  та діаметром відомого ролика  $14 \text{ мм}$ .

Для оцінки впливу параметрів електрохімічного методу оброблення на якість поверхні каналу досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів була використана промислова лінія електрохімічного полірування.



Рис. 2.2. Полірування навколошовних зон досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів

Для дослідження впливу параметрів полірування на шорсткість поверхонь каналу досліджуваних конструктивних елементів при виконанні серій експериментів варіювали режимами оброблення та параметрами інструменту (табл. 2.2).

## План дослідження

Номер експерименту	Тип полірування	Обладнання	Інструмент
1	Механічний	1) дріль «Makita HP1630»; 2) пряма шліфмашинка «Metabo GE 710 Plus»	1) наждачний папір на оправці; 2) шліфувальний пелюстковий круг на оправці; 3) йоржикові ПАЩ (волокно $\varnothing 0,6$ мм); 4) йоржикові ПАЩ (волокно $\varnothing 1,2$ мм); 5) шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу
2	Механічний та електрохімічний	1) дріль «Makita HP1630»; 2) пряма шліфмашинка «Metabo GE 710 Plus»; 3) гальванічна ванна.	1) наждачний папір на оправці; 2) шліфувальний пелюстковий круг на оправці; 3) йоржикові ПАЩ (волокно 0,6 мм); 4) йоржикові ПАЩ (волокно 1,2 мм); 5) шліфувальна голівка з нетканого абразивного матеріалу
3	Механічний	1) стрічковий напилек «Makita 9032»	1) нескінченна стрічка з наждачного паперу; 2) нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу
4	Механічний та електрохімічний	1) стрічковий напилек «Makita 9032»; 2) гальванічна ванна.	1) нескінченна стрічка з наждачного паперу; 2) нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу

## Параметри інструменту та режими оброблення при виконанні дослідів

Найменування інструменту	Геометричні розміри інструменту	Зернистість інструменту	Швидкість оброблення $V$ , м/с	Напрямок обертання інструменту
Наждачний папір на оправці	$D=14$ мм, $L=30$ мм	P80; P120; P180	2; 13; 19	поперек каналу
Шліфувальний пелюстковий круг на оправці	$D=30$ мм, $L=10$ мм	P80; P120; P180	5; 16; 22	поперек каналу
Шліфувальна голівка з нетканного абразивного матеріалу	$D=34$ мм, $L=20$ мм	P80; P120; P180	6; 18; 25	поперек каналу
Йоржикова ПАЩ	$d_g=1,2$ мм; $l_g=10$ мм; $D=25$ мм	P80; P120;	4; 13; 18	поперек каналу
Йоржикова ПАЩ	$d_g=0,6$ мм; $l_g=10$ мм; $D=25$ мм	P180	4; 13; 18	поперек каналу
Нескінченна стрічка з наждачного паперу	$13 \times 533$ мм	P80; P120; P180	5, 15, 25	вздовж каналу
Нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу	$13 \times 533$ мм	P80; P120; P180	5, 15, 25	вздовж каналу

Для дослідження впливу електрохімічного полірування на якість поверхні каналу досліджуваних кутових вигинів кожна серія експериментів була продубльована із застосуванням даного методу, так як самостійно він не здатний усунути поверхневі дефекти та утворити необхідну шорсткість [2]. Для цього після механічного полірування половина хвилеводу була ізольована спеціальним лаком, а друга була піддана електрохімічному поліруванню.

Для проведення електрохімічного полірування був застосований лужний електроліт з наступним складом:

- пірофосфорнокислий натрій – 100 г/л;
- гексаметафосфат натрію – 50 г/л;
- сода каустична – 30 г/л;
- трилон Б – 1 г/л.

Електрохімічне полірування досліджуваних кутових вигинів проводили на наступних режимах:

- щільність струму – 10...20 А/дм<sup>2</sup>;
- температура електроліту – 70...80 С°;
- напруга – 15...18 В;
- час витримки – 5...10 хв.

Після фінішного оброблення канал досліджуваних конструктивних елементів був ретельно очищений. Потім з конструктивних елементів одрізали стінки каналу і оглядали візуально при різному ступеню збільшення за допомогою мікроскопу МБС-10.

З навколошовних зон стінок вирізали плоскі зразки (рис. 2.1, д) розміром 30×30 мм для подальшого дослідження шорсткості, наклепу та електропровідності.

При огляді виявляли і фіксували характер слідів інструменту, інтенсивність полірування кутів, загальний стан робочих поверхонь, поверхневі дефекти (подряпини, нерівності, зарізи тощо).

Для перевірки шорсткості зразків використовували профілометр моделі 171621 та для оцінки мікрорельєфу – профілометр-профілограф моделі 250. Ділянки вимірювання шорсткості були розташовані рівномірно по поверхні зразків. Вимірювання проводили тричі в поздовжньому (вздовж каналу) і поперечному (поперек каналу) перерізах досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів. Відстань між ділянками вимірювання забезпечувала практичну некореляційність параметрів шорсткості, визначених на сусідніх трасах. На підставі отриманих даних розраховувалось середнє арифметичне значення шорсткості *Ra*.

### 2.2.2 Методика дослідження наклепу поверхневого шару

Після вимірювання шорсткості поверхні на зразках, вирізаних з навколошовних зон каналу конструктивних елементів хвилеводів, на них вимірювали наклеп. Величину наклепу визначали вимірюванням мікротвердості на приладі ПМТ-3 при навантаженнях 50 г і 25 г та розраховували за формулою:

$$u = \frac{H_{\mu max} - H_{\mu вих}}{H_{\mu вих}} 100\% \quad (2.1)$$

де  $H_{\mu max}$  – мікротвердість поверхні досліджуваного зразка, після оброблення, МПа;

$H_{\mu вих}$  – вихідна мікротвердість до фінішного оброблення, МПа.

Значення мікротвердості визначали за таблицями і графіками [63] після визначення середньоарифметичної величини діагоналі відбитку індентора за 15-ма вимірами в різних місцях обробленої поверхні.

Глибину проникнення алмазної пірамідки індентора в досліджуваний шар зразків розраховували за формулою:

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2}tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \text{ мм} \quad (2.2)$$

де  $d$  – середнє значення двох довжин діагоналей відбитка, мм;

$\alpha$  – кут при вершині алмазної піраміди,  $\alpha=136^\circ$ .

### 2.2.3 Методика визначення електропровідності

Вплив методів та інструментів фінішного оброблення на електропровідність оцінювали шляхом порівняння значень електропровідності, виміряної на стінках каналу, вирізаних з досліджуваних

конструктивних елементів хвилеводів за п. 2.2.1, зі значеннями, отриманими на зразках, вирізаних з вихідної хвилеводної труби, з якої їх виготовлено. Для перевірки електропровідності використовували вихрострумний вимірювач електропровідності металів «Константа К6». Діапазон вимірювання електропровідності даного приладу складає  $0,005 \dots 59 \cdot 10^6$  См/м, з похибкою вимірювання 2 %. Перед початком вимірювання прилад було відкалібровано за стандартними зразками питомої електричної провідності.

### **2.3 Методика дослідження впливу якості струмопровідної поверхні, отриманої обробленням різними інструментами, на електричні параметри кутових хвилеводів**

Для дослідження впливу методів і інструментів фінішного оброблення на значення електропараметрів використовували по 6 хвилеводів п'яти типів (рис. 2.3) перерізом  $72 \times 34$  мм, виготовлених за серійною технологією з АД0. При фінішному обробленні каналу хвилеводів (рис. 2.4, а), як і в попередніх дослідях (п. 2.2), використовували засоби малої механізації, а полірування фланців здійснювали на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК. Оброблення зовнішніх ділянок фланців виконували дисковою ПАЩ (рис. 2.4, б) діаметром  $D=100$  мм, з діаметром волокон  $d_B=1,2$  мм, вилітом волокна  $L_B=30$  мм, з наступними режимами оброблення  $S = 1$  м/хв;  $i = 1,5$  мм;  $V = 15 \dots 18$  м/хв [64].

Для дослідження впливу напрямлення мікронерівностей обробленої поверхні каналу на електропараметри хвилеводу, були використані інструменти з однакового матеріалу, але у двох різних виконаннях – у вигляді стрічки та у вигляді шліфувальної голівки (табл. 2.3). Обертання інструменту при цьому здійснювали, в залежності від конструкції, повздовж або поперек каналу хвилеводу. При обробленні хвилеводів варіювали розміром абразивних зерен (P80, P120 та P180) кожного інструменту. Оброблення проводили на раціональних режимах (табл. 2.3), властивих кожному фінішному методу і

інструменту, що забезпечувало необхідну шорсткість і високу продуктивність.



Рис. 2.3. Типи досліджуваних хвилеводів

Вимірювання електропараметрів здійснювали на остаточно виготовлених хвилеводах послідовно на трьох робочих місцях.



а



б

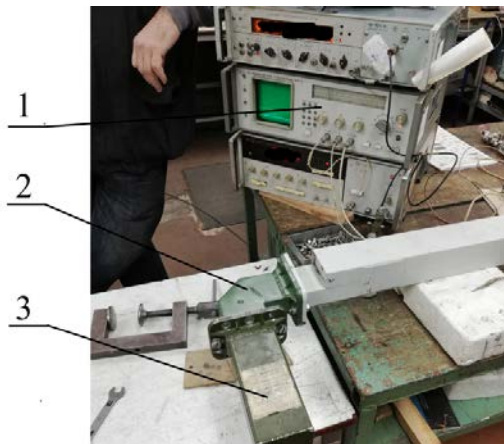
Рис. 2.4. Полірування дослідних хвилеводів ПАЩ

## План дослідження для оброблення каналу з урахуванням направленості шорсткості

Номер серії експериментів	Напрямок обертання інструменту	Обладнання	Тип інструменту	Режими оброблення
1	Поперек каналу	Пряма шліфмашинка «Metabo GE710Plus»	1) Наждачний папір на оправці (D=14 мм; L=30 мм, P80...180)	V=13 м/с; S=ручна
			2) Шліфувальний пелюстковий круг на оправці (D=30 мм; L=10 мм, P80...180)	V=16 м/с; S=ручна
			3) Йоржикова ПАЩ (D=25мм; d=1,2 мм; l=10 мм; L=65 мм, P80 та P120)	V=13 м/с; S=ручна
			4) Йоржикова ПАЩ (D=25мм; d=0,6 мм; l=10 мм; L=65 мм, P180)	V=13 м/с; S=ручна
			5) Шліфувальна голівка з нетканного абразивного матеріалу (D=34мм; L=20 мм, P80...180)	V=18 м/с; S=ручна
2	Вдовж каналу	Стрічковий напилок «Makita 9032»	1) Нескінченна стрічка з наждачного паперу (13x513 мм, P80...180)	V=5 м/с; S=ручна
			2) Нескінченна стрічка з нетканого абразивного матеріалу (13x513 мм, P80...180)	

### 2.3.1 Методика дослідження КСХН

Для перевірки КСХН було зібрано робоче місце (рис. 2.5) з вимірювача панорамного P2-56 (1), узгодженого навантаження (3) і випробуваного хвилеводу (2). Перед початком вимірювання прилад був відкалібрований по навантаженню (3). Потім один фланець випробуваного хвилеводу (2) закріплювався на панорамі (1), а до іншого кінця закріплювали навантаження (3). Після перевірки надійності фіксації всіх фланців, здійснювали вимір значення КСХН в діапазоні робочих частот.



1 – вимірювач P2-56; 2 – хвилевід; 3 – навантаження

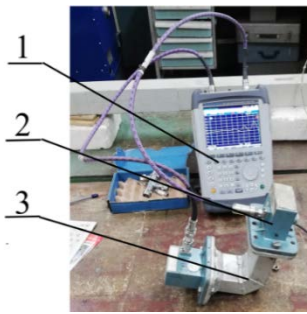
Рис. 2.5. Схема робочого місця для перевірки КСХН хвилеводів

### 2.3.2 Методика вимірювання коефіцієнта загасання

Наступний етап перевірки експлуатаційних електропараметрів хвилеводів – контроль значень коефіцієнта загасання. Перевірка його здійснювали аналізатором «Rohde & Schwarz ZVH8». Даний прилад дозволяє аналізувати вимірювання параметрів відбиття, відстані до місця пошкодження, визначати коефіцієнт загасання в діапазоні частот від 100 кГц до 8 ГГц.

Робоче місце (рис. 2.6) складалось з аналізатора «Rohde & Schwarz ZVH8» (1), коаксиально-хвилеводних переходів (2) і випробуваного хвилеводу (3). Принцип перевірки коефіцієнта загасання хвилеводів в діапазоні робочих частот полягав в наступному:

- до аналізатора через кабелі підключали з'єднанні між собою коаксиально-хвилеводні переходи;
- встановлювали діапазон робочих частот;
- проводили автоматичне калібрування приладу;
- потім встановлювали досліджуваній хвилевід і знімали показання коефіцієнта загасання.



1 – аналізатор; 2 – перехід; 3 – хвилевід

Рис. 2.6. Робоче місце перевірки коефіцієнта загасання хвилеводів

Експериментальні значення коефіцієнтів загасання для кожного типу досліджуваних хвилеводів з урахуванням шорсткості, характерної кожному фінішному методу й інструменту, були перераховані у погонні значення на 1 м довжини.

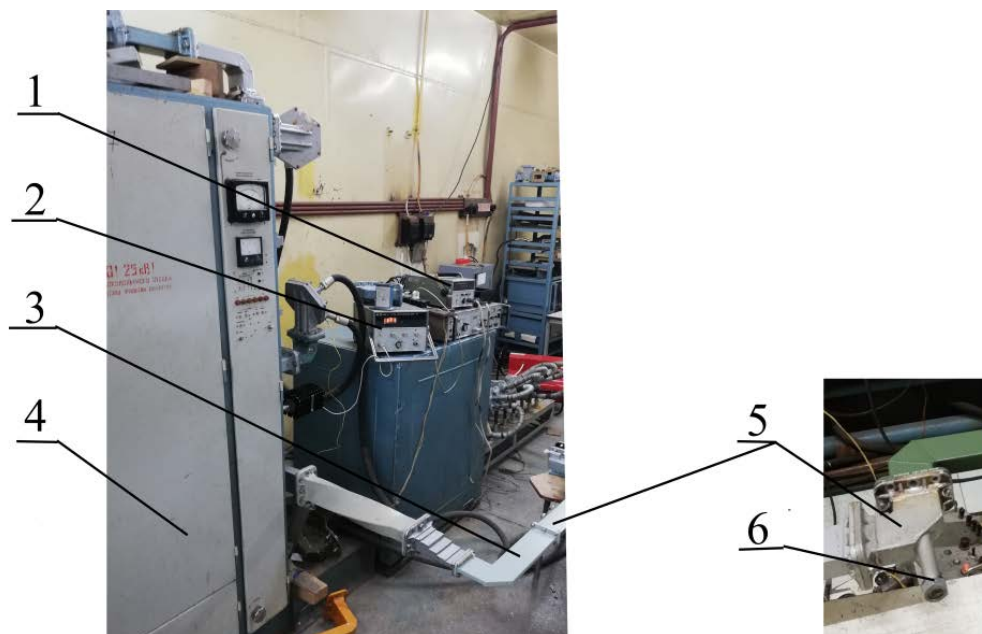
### **2.3.3 Методика дослідження електроміцності хвилеводів**

Робоче місце перевірки хвилеводу на електроміцність (рис. 2.7) представляло собою стенд високого рівня потужності (ВРП) (4), перехідника

(5) з вічком (6), випробуваного хвилеводу (3), вимірювача потужності П-604 (2) і осцилографа С1-65 (1). Перед початком перевірки стенд ВРП було налаштовано згідно технічних рекомендацій.

Частоту імпульсів сигналу виставляли за осцилографом (1). Потім встановлювали випробувальний рівень потужності, який контролювали по вимірювачу потужності (2). Для перевірки електроміцності хвилевід (3) витримували протягом 15 хвилин під заданим рівнем потужності. У процесі перевірки на осцилографі (1) спостерігали криву сигналу стенду ВРП. Критерії відповідності хвилеводу:

- відсутність у випробуваному хвилеводі іскріння та пробою;
- відсутність видимих змін кривої сигналу осцилографа;
- відсутність нагріву хвилеводу.



1 – осцилограф; 2 – вимірювач потужності; 3 – хвилевід; 4 – стенд ВРП;  
5– перехідник; 6 – вічко

Рис. 2.7. Робоче місце для перевірки електроміцності хвилеводів

## **2.4 Висновки**

1. Приведено зображення зразків для випробувань, основні умови проведення експериментів, режими, устаткування, оброблювані матеріали.

2. Описано основні методичні прийоми дослідження параметрів мікрорельєфу та наклепу струмопровідних поверхонь після фінішного оброблення різними методами та інструментами.

3. Приведено методику визначення електропровідності поверхневого шару стінок хвилеводу

4. Розроблено методику дослідження впливу якості струмопровідної поверхні, отриманої поліруванням різними інструментами на електричні параметри кутових хвилеводів. Приведено опис робочих місць для дослідження КСХН, коефіцієнту загасання та електроміцності.

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОКУТНИХ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ

### 3.1 Дослідження мікрорельєфу та властивостей струмопровідного шару каналу

#### 3.1.1 Оцінка залежності шорсткості каналу від параметрів оброблення

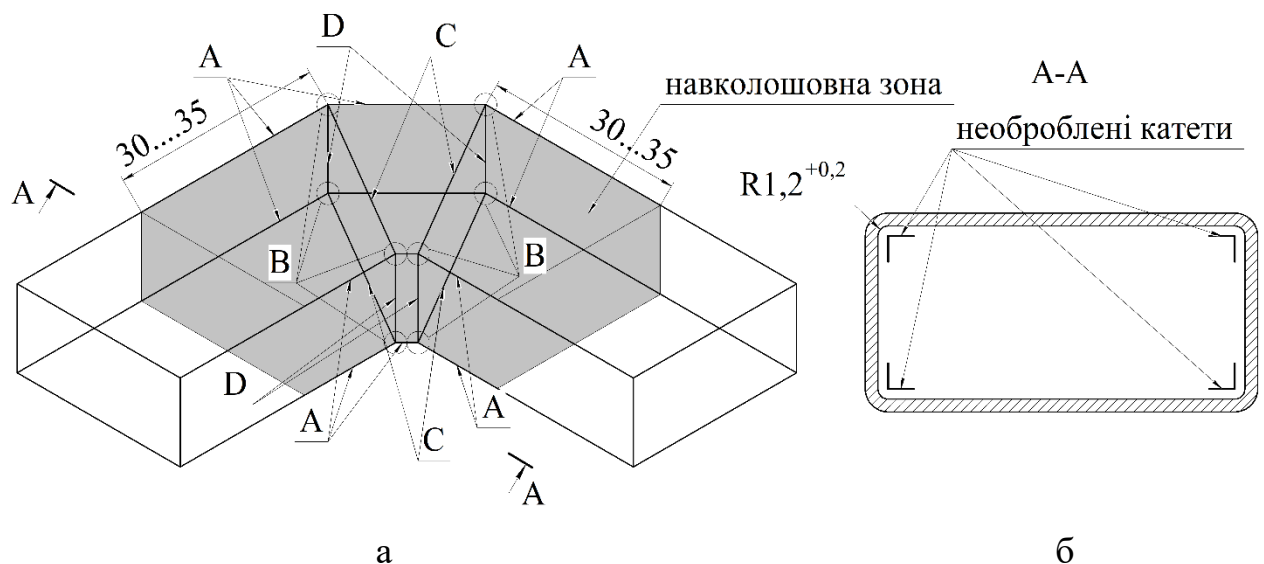
В ході досліджень було оцінено мікрорельєф поверхонь навколошовних зон каналу конструктивних елементів хвилеводів, отриманий поліруванням різними методами та інструментами (за методикою п. 2.2), а також проведено порівняльний аналіз продуктивності оброблення. При виконанні серій експериментів полірування здійснювали наступними типами інструментів:

- тип I – наждачним папером на оправці діаметром 14 мм;
- тип II – шліфувальним пелюстковим кругом діаметром 30 мм;
- тип III – шліфувальною голівкою з нетканого абразивного матеріалу діаметром 34 мм;
- тип IV – йоржиковою ПАЩ діаметром 25 мм;
- тип V – нескінченною стрічкою з наждачного паперу;
- тип VI – нескінченною стрічкою з нетканого абразивного матеріалу.

Кожен інструмент конструктивно мав можливість при обробленні обертатись відносно каналу виключно в одному напрямі (табл. 2.2).

Згідно з раніше розробленим планом експериментів (табл. 2.1) було використано по 54 конструктивних елементи хвилеводів, виготовлених з АД0 та Л96. Після фінішного оброблення та розрізання на частини огляд робочих поверхонь каналу показав, що плоскі поверхні навколошовних зон були добре відполіровані усіма досліджуваними типами інструментів, шорсткість

характеризувалась рівномірністю кроку і рівновисотністю мікронерівностей та мала виражену спрямованість – уздовж або поперек каналу хвилеводу, в залежності від напрямку обертання інструменту. Під час оброблення навколошовну зону досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів умовно було розділено на ділянки: прямокутні кути (А), вершини згинів (В), площини (С) та тупі кути (D) (рис. 3.1, а). Прямокутні кути (А) (рис. 3.1, б) не мали дефектів, шорсткість відповідала шорсткості хвилеводної труби. Це спричинено тим, що кути більш жорсткі в порівнянні зі стінками, в процесі зварювання (паяння) не зазнавали значних деформацій та не потребували рихтування. Вершини згинів (В) після зварювання уявляли собою стик трьох стінок без щілин, а після паяння вони мали галтелі радіусом до 2 мм та не мали дефектів. Площини (С) та тупі кути (D) після оброблення були повністю заполірованими всіма типами досліджуваних інструментів.



А – прямокутні кути; В – вершини згину; С – площини; D – тупі кути

Рис. 3.1. Ділянки навколошовної зони (а) та необроблені катети (б)

При порушенні технології зварювання (паяння) можливі дефекти у вигляді проварів та напливів припою у вершинах згину (В), кутах (D) та на площинах (С), усунення яких можливе тільки обробленням шарошкою або

шабером. На досліджуваних конструктивних елементах хвилеводів даних дефектів не спостерігалось.

При обстеженні навколошовної зони каналу конструктивних елементів хвилеводів встановлено, що жоден із досліджуваних інструментів не зміг повністю обробити кути (табл. 3.1). Інструмент для оброблення мав циліндричну форму робочої частини з радіусом більшим, ніж радіус заокруглення кутів прямокутного профілю каналу (рис. 3.2, 3.3). Тому при обробленні більш «жорстким» інструментом, таким як наждачний папір на оправці або пелюстковий шліфувальний круг, кути були необроблені з катетом 6...12 мм (рис. 3.2, а, б). Однак при обробленні більш «пружним» інструментом (йоржикова ПАЩ та голівка з нетканого абразивного матеріалу) необроблені катети були набагато меншими – 2...6 мм (рис. 3.2, в, г).

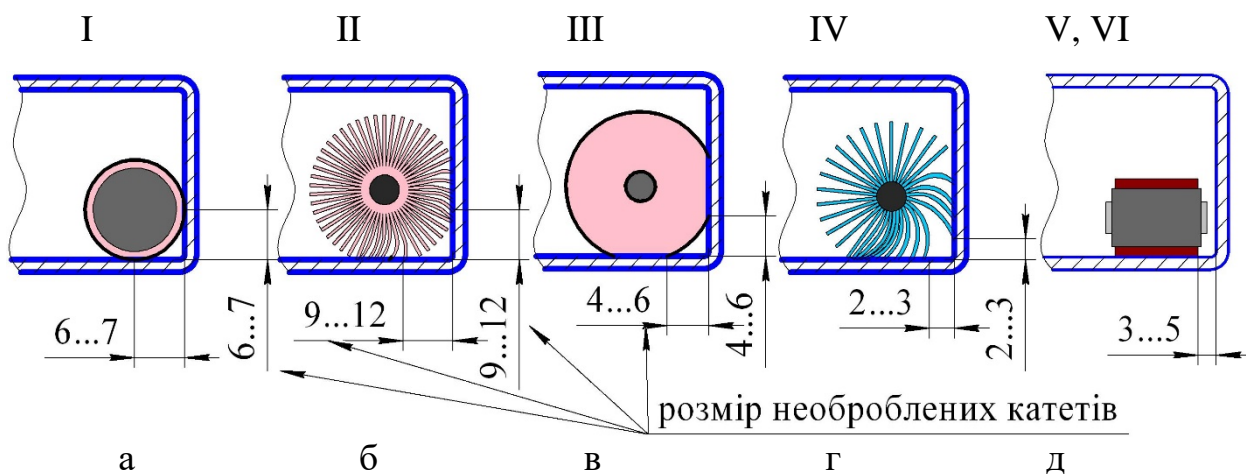
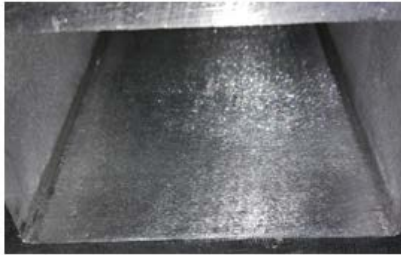


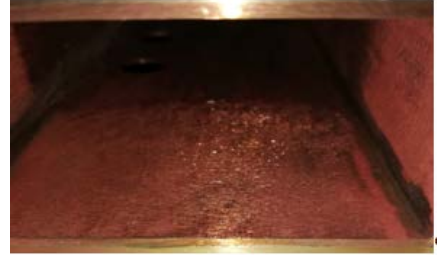
Рис. 3.2. Схеми обробки кутів досліджуваними типами (I...VI) інструментів

При поліруванні шліфувальною стрічкою з наждачного паперу та нетканого абразивного матеріалу кути, розташовані уздовж руху стрічки, мали необроблений катет 3...5 мм, внаслідок наявності гарантованого зазору між інструментом і бічною стінкою каналу (рис. 3.2, д). Цей зазор є необхідним для недопущення зарізів від стрічки та подряпин від відомого ролика. Кути

каналу при поліруванні стрічкою з боку ролика мали необроблені ділянки з катетом 7...9 мм. Серед всіх досліджуваних інструментів найкращі результати обробки всіх ділянок (А...D) (рис. 3.1) навколошовної зони, в тому числі важкодоступних, показала йоржикова ПАЩ.



а



б

Рис. 3.3. Якість поверхні каналу хвилеводу з АД0 (а) і Л96 (б) при обробленні інструментом типу I

Таблиця 3.1

**Результати дослідження оброблення кутів прямокутного профілю**

Тип інструменту	Розмір необробленого катета, мм	Радіус інструменту, мм
I	6...7	7
II	9...12	15
III	4...6	17
IV	2...3	12,5
V	3...5	8
VI	3...5	9

На зразках, вирізаних з широкої та вузької стінок навколошовної зони досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів (рис. 2.1) було проведено вимір шорсткості за методикою п. 2.2.1 в поздовжньому ( $Ra_{новз}$ ) і поперечному ( $Ra_{non}$ ) перерізах каналу (табл. 3.2). Приклади профілограм цих поверхонь та зображення мікропрофілю наведено на рис. 3.4-3.13.

Аналіз вимірної шорсткості показав, що при поліруванні каналу

хвилеводів з АД0 та Л96 отримано схожі залежності шорсткості від типу інструменту.

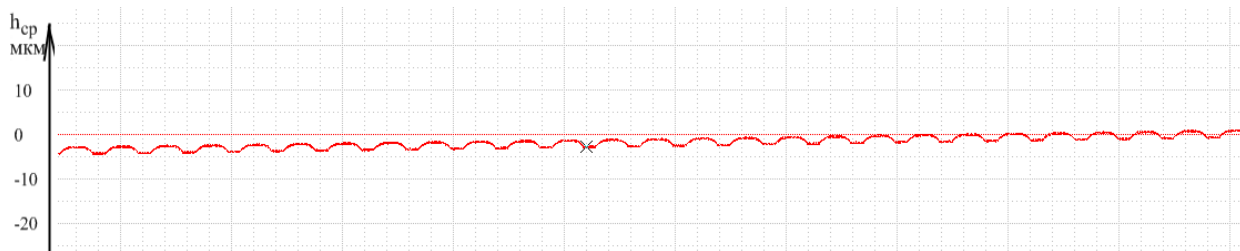


Рис. 3.4. Профілограма поверхні еталона для налаштування приладу ( $Ra=0,69$  мкм)

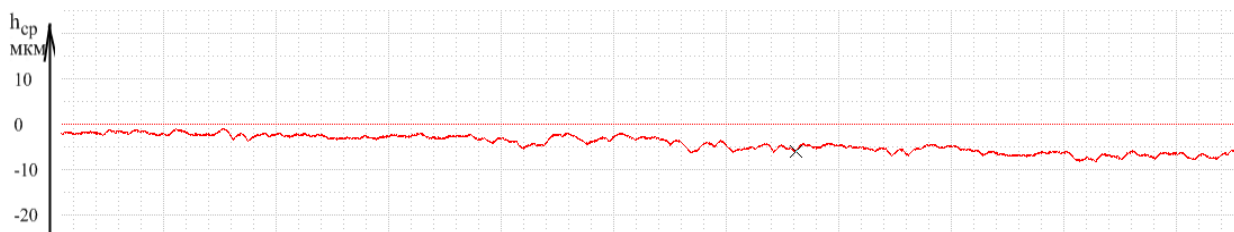


Рис. 3.5. Профілограма поверхні каналу хвилеводної труби ( $Ra_{non}=0,45$  мкм)

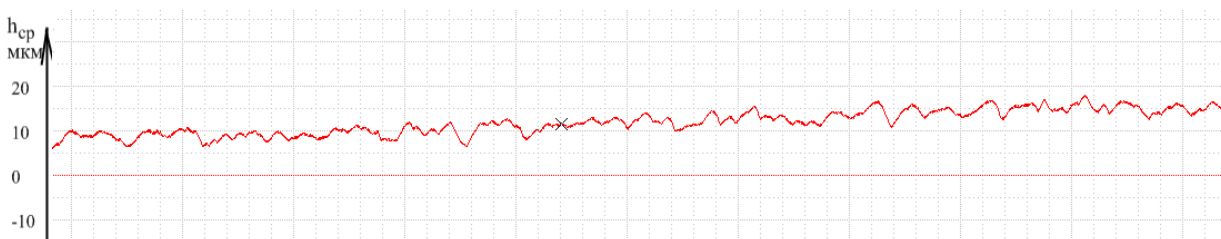


Рис. 3.6. Профілограма поверхні каналу після оброблення ПАЩ;  
зернистість P180 ( $Ra_{non}=0,87$  мкм)

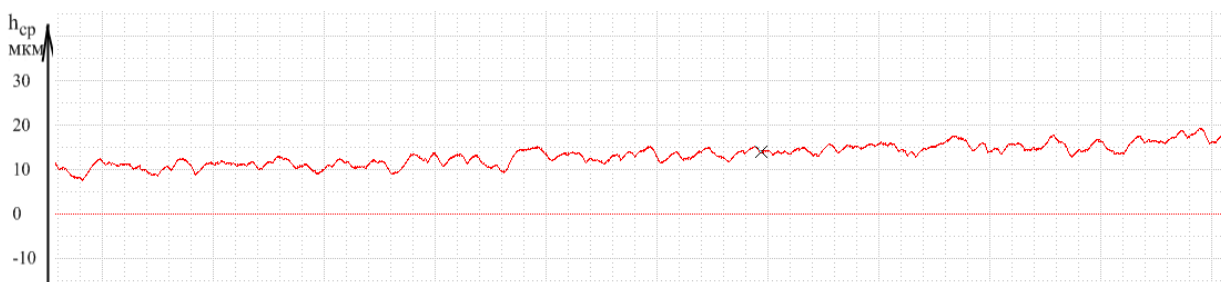


Рис. 3.7. Профілограма поверхні каналу після оброблення наждачним папером на оправці; зернистість P180 ( $Ra_{non}=1,05$  мкм)

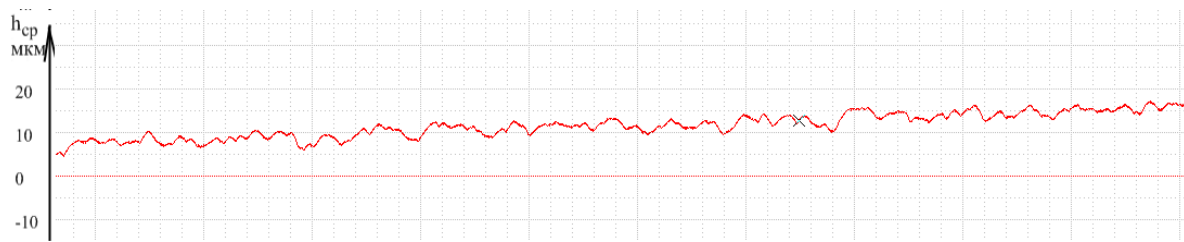


Рис. 3.8. Профілограма поверхні після оброблення ПАЦ;  
зернистість P120 ( $Ra_{non}=1,03$  мкм)

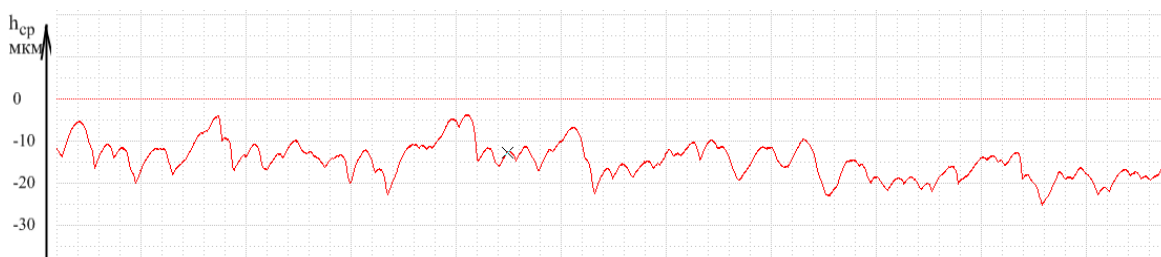


Рис.

3.9. Профілограма поверхні каналу після оброблення наждачним папером на оправці; зернистість P120 ( $Ra_{non}=2,01$  мкм)

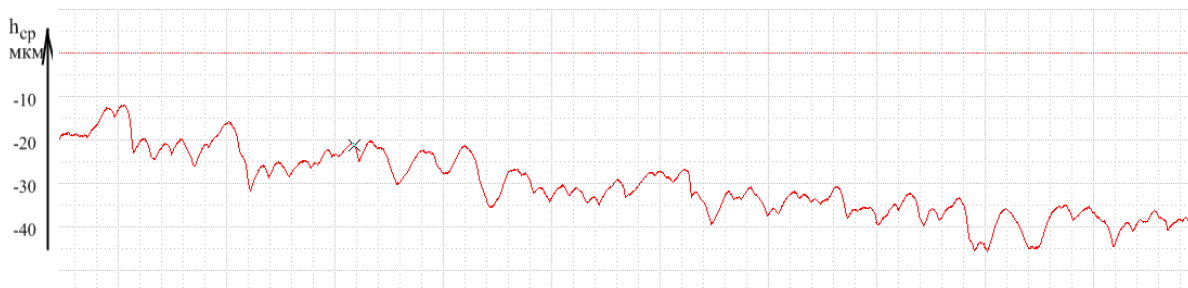


Рис. 3.10. Профілограма поверхні після оброблення ПАЦ;  
зернистість P80 ( $Ra_{non}=1,71$  мкм)

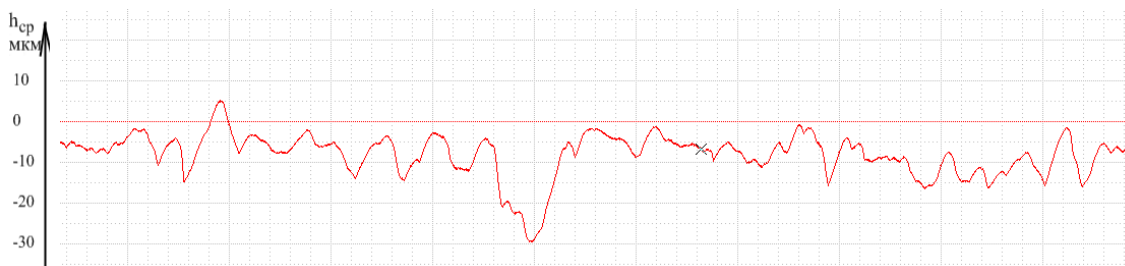
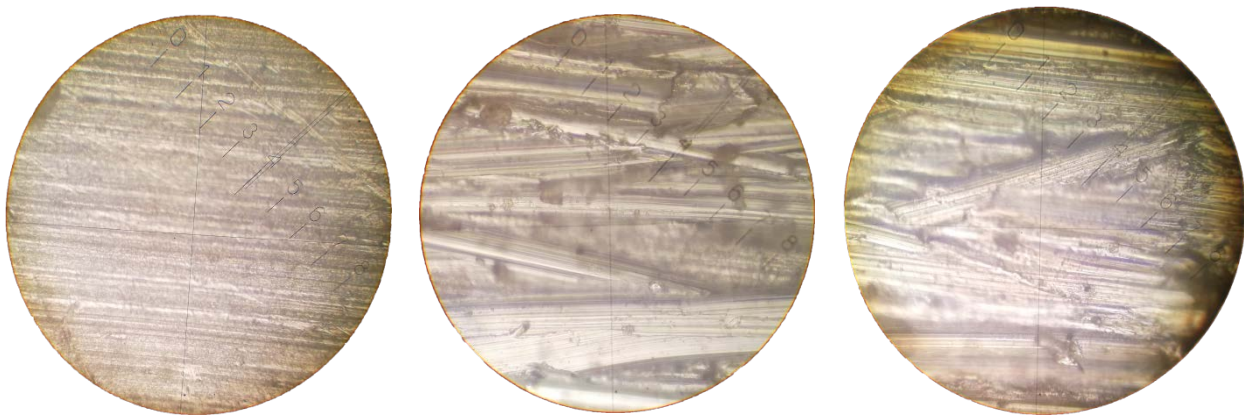


Рис. 3.11. Профілограма поверхні після оброблення наждачним папером на оправці; зернистість P80 ( $Ra_{non}=2,83$  мкм)

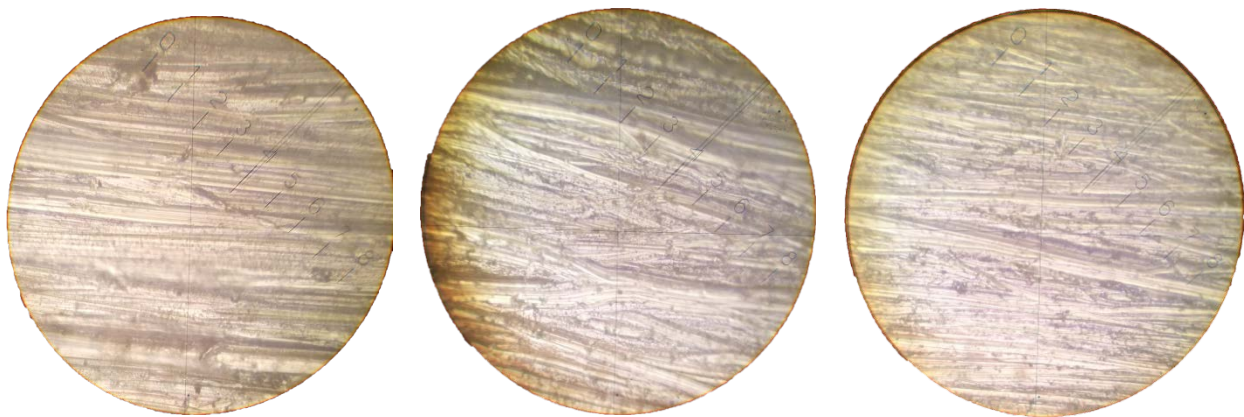


а

б

в

Рис. 3.12. Зображення поверхні: а – вихідної хвилеводної труби; б – після оброблення наждачним папером зернистістю Р80; в – після оброблення наждачним папером зернистістю Р120 (×32,5)



а

б

в

Рис. 3.13. Зображення поверхні: а – після оброблення наждачним папером зернистістю Р180; б – після оброблення ПАЩ зернистістю Р120; в – після оброблення шліфувальною голівкою з нетканого абразивного матеріалу зернистістю Р180 (×32,5)

Таблиця 3.2

**Шорсткість при обробленні конструктивних елементів хвилеводів з АДО**

Тип інструменту	Швидкість оброблення $V$ , м/с	Шорсткість, мкм					
		$Ra_{новз}$	$Ra_{нон}$	$Ra_{новз}$	$Ra_{нон}$	$Ra_{новз}$	$Ra_{нон}$
		Зернистість P80		Зернистість P120		Зернистість P180	
I	2	2,83	2,32	2,21	2,01	1,41	1,30
	13	2,62	2,21	2,11	1,92	1,35	1,26
	19	2,41	2,03	2,01	1,81	1,25	1,15
II	5	2,63	2,23	2,12	1,85	1,35	1,21
	16	2,42	2,12	2,02	1,75	1,32	1,10
	22	2,23	1,95	1,92	1,72	1,22	1,04
III	4	1,85	1,67	1,38	1,27	1,17	0,99
	13	1,77	1,55	1,27	1,16	1,08	0,91
	18	1,57	1,32	1,18	1,06	1,03	0,87
IV	6	1,71	1,53	1,21	1,10	0,93	0,81
	18	1,55	1,41	1,10	1,01	0,86	0,77
	25	1,41	1,25	1,03	0,94	0,80	0,71
V	5	2,27	2,55	1,95	2,17	1,25	1,47
	15	2,17	2,48	1,85	2,06	1,18	1,37
	25	1,92	2,35	1,75	1,96	1,07	1,27
VI	5	1,65	1,81	1,22	1,40	0,98	1,15
	15	1,53	1,75	1,12	1,26	0,89	1,05
	25	1,30	1,55	1,01	1,16	0,85	0,99

Кращі результати якості оброблення було отримано на раціональних режимах ( $V=15\dots 20$  м/с) (рис. 3.14, 3.15).

Оброблення наждачним папером на оправці (тип I) та у вигляді нескінченної стрічки (тип V) залишило найгіршу шорсткість в порівнянні з іншими інструментами при тих самих режимах оброблення. Це викликано

тим, що наждачний папір мав опору з найбільшою жорсткістю, що сприяло глибшому проникненню абразивних зерен у оброблювану поверхню, отриманню глибших рисок. Також під час полірування зерна постійно відривались від основи та потрапляли в зону оброблення, погіршуючи тим самим якість поверхневого шару та шаржуючи його. До того ж, ці інструменти сильно засалювались продуктами полірування, через що мали дуже низьку стійкість та вимагали регулярної заміни, що суттєво знижувало продуктивність оброблення.

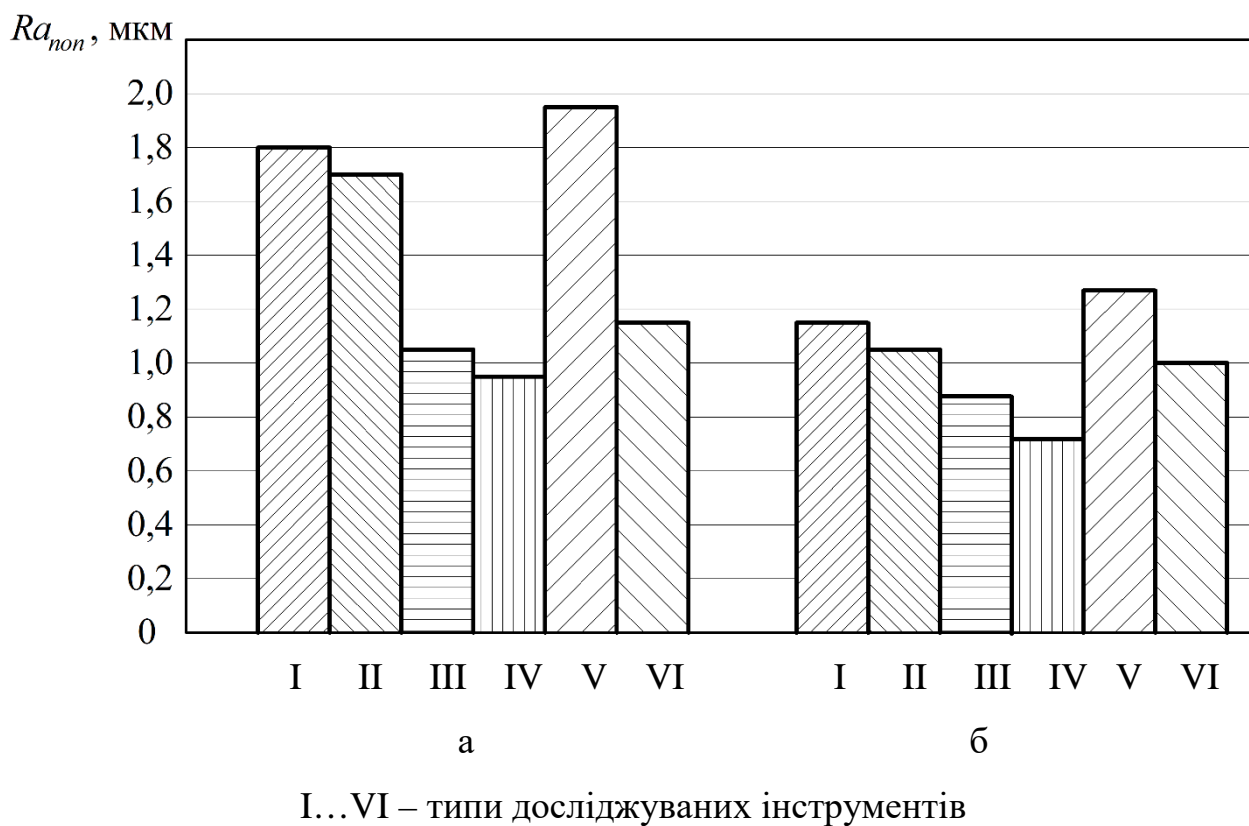


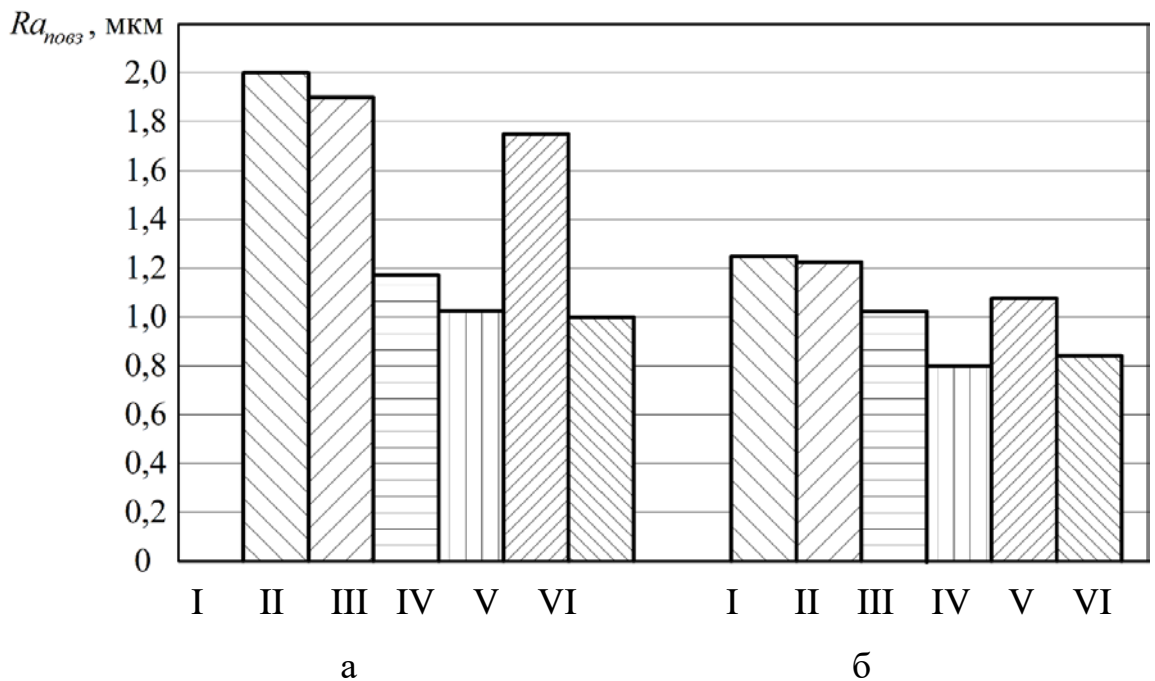
Рис. 3.14. Шорсткість ( $Ra_{non}$ ), виміряна в поперечному перерізі каналу після оброблення інструментом з зернистістю P120 (а) і P180 (б) зразків з АД0

Трохи меншу висоту мікронерівностей, в порівнянні з поліруванням наждачним папером на оправці, забезпечило оброблення наждачним папером у вигляді пелюсткових кругів (тип II) (рис. 3.4, 3.5). Вони так само були достатньо жорсткими, швидко засалювались, але при відриві абразивних зерен

основа стиралась і в роботу вступали нові зерна, розташовані радіально ближче до осі обертання. В процесі зношення пелюсткового круга зменшувалась швидкість оброблення, що в свою чергу поступово знижувало продуктивність процесу.

Полірування шліфувальною голівкою (тип III) та нескінченною стрічкою (тип VI) з нетканого абразивного матеріалу забезпечило кращий результат шорсткості в порівнянні з наждачним папером (тип III і V). Це пов'язано з наступними чинниками:

- матеріал основи м'який, що не дає можливість абразивним зернам глибоко вдавлюватись в оброблюваний матеріал;
- при вириванні абразивних зерен основа поступово стирається, відкриваючи нові зерна;
- низьке засалювання інструменту через пористу структуру.



I...VI – типи досліджуваних інструментів

Рис. 3.15. Шорсткість ( $Ra_{новз}$ ), виміряна в повздовжньому перерізі каналу після оброблення інструментом з зернистістю P120 (а) і P180 (б) зразків з

АД0

Оброблення йоржиковою ПАЩ (тип IV) забезпечило поверхню з найменшою висотою мікронерівностей. Отримана шорсткість  $Ra=0,71\dots0,93$  мкм була меншою за допустиму ( $Ra=1,6\dots3,2$  мкм) та максимально наближеною до розрахункової ( $Ra=0,4\dots0,8$  мкм). Це пояснювалось тим, що конструкція щітки сприяла виведенню із зони оброблення продуктів полірування, волокна практично не засалювались. Також через гнучкість волокон абразивні зерна не створювали глибокі мікроподряпини на оброблюваній поверхні, в порівнянні з іншими інструментами тієї ж самої зернистості.

При проведенні експериментів було встановлено, що шорсткість в напрямку обертання інструменту була до 20 % меншою в порівнянні зі значеннями шорсткості, виміряними в перпендикулярному до обертання напрямку.

При поліруванні одним і тим самим інструментом на однакових режимах більш твердого матеріалу – латуні Л96, поверхня виходила в середньому на клас вище (рис. 3.16) в порівнянні з АД0. Це свідчить про те, що крім режимів оброблення, параметрів інструменту та його зношення на шорсткість поверхні також впливали механічні властивості, хімічний склад і структура оброблюваного матеріалу. Тому можна рекомендувати для підвищення продуктивності фінішного оброблення латунних хвилеводів застосування інструменту з більшим розміром зерна абразиву.

Досліджуваний інструмент наводив, після виправлення більш грубої вихідної шорсткості, власну характерну шорсткість, яка в значній мірі залежала від його зернистості. За результатами проведених дослідів очікувано встановлено, що чим меншу зернистість мав досліджуваний інструмент, тим меншу висоту мікронерівностей він утворював на оброблюваній поверхні (рис. 3.17); на рисунку кожна зернистість – заштрихована область – відповідає певному діапазону значень величини абразивних зерен  $z$ . Така залежність спостерігалась для досліджуваних конструктивних елементів хвилеводів як з АД0, так і з Л96.

Було встановлено, що при обробленні наждачним папером шорсткість поверхні також залежала від ступеня його зношення: чим він був вищим, тим нижчу висоту мікронерівностей було отримано, але при цьому різко знижувалась продуктивність оброблення.

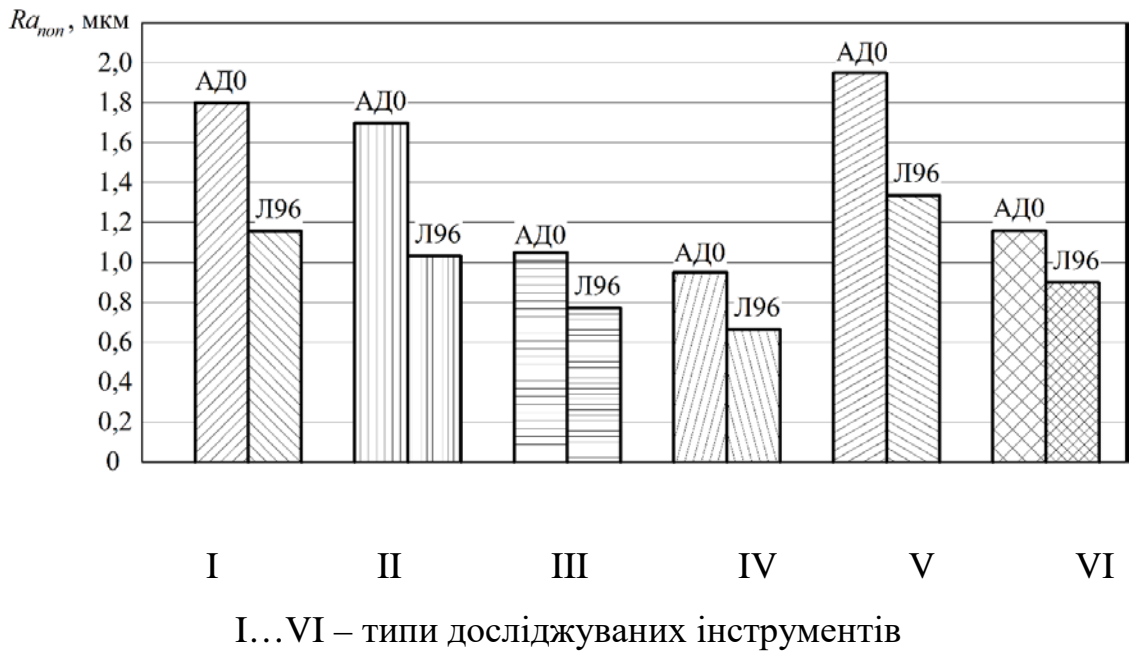


Рис. 3.16. Шорсткість ( $Ra_{non}$ ), виміряна в поперечному перерізі каналу після оброблення інструментом з зернистістю P120 на зразках з АД0 та Л96

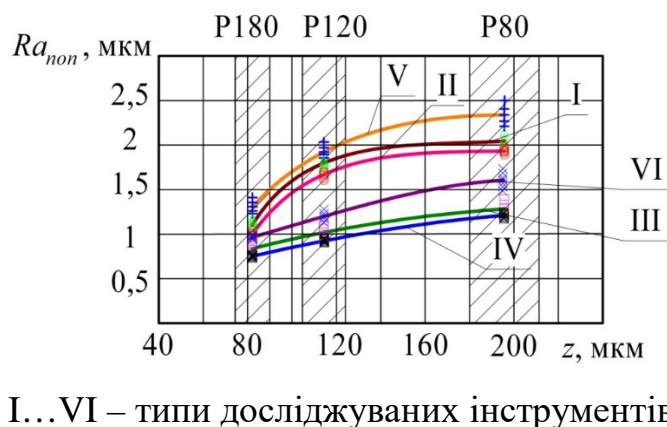


Рис. 3.17. Залежність шорсткості від зернисті інструменту при оптимальних режимах оброблення на зразках з АД0

Висота мікронерівностей поверхонь каналу при поліруванні також залежала від режимів та параметрів інструменту. Результати замірів

шорсткості при поліруванні різними інструментами показали, що зі збільшенням швидкості оброблення від 2 до 25 м/с висота мікронерівностей зменшувалась (рис. 3.18), дана залежність спостерігалась при обробленні конструктивних елементів хвилеводів з АД0 та Л96. Це викликано тим, що зі збільшенням швидкості оброблення збільшувалась кількість контактів абразивних зерен з оброблюваною поверхнею в одиницю часу при незмінній величині подачі.

Полірування досліджуваними інструментами на низькій швидкості супроводжувалось утворенням мікронаросту на ріжучих крайках абразивних зерен, який проявлявся у металевому блищанні їх вершин і сприяв утворенню гіршої шорсткості. При збільшенні швидкості до  $V=13...15$  м/с величина мікронаросту зменшувалася, через що шорсткість поверхні покращувалась. Подальше збільшення швидкості оброблення до  $V=22...25$  м/с несуттєво зменшувало шорсткість.

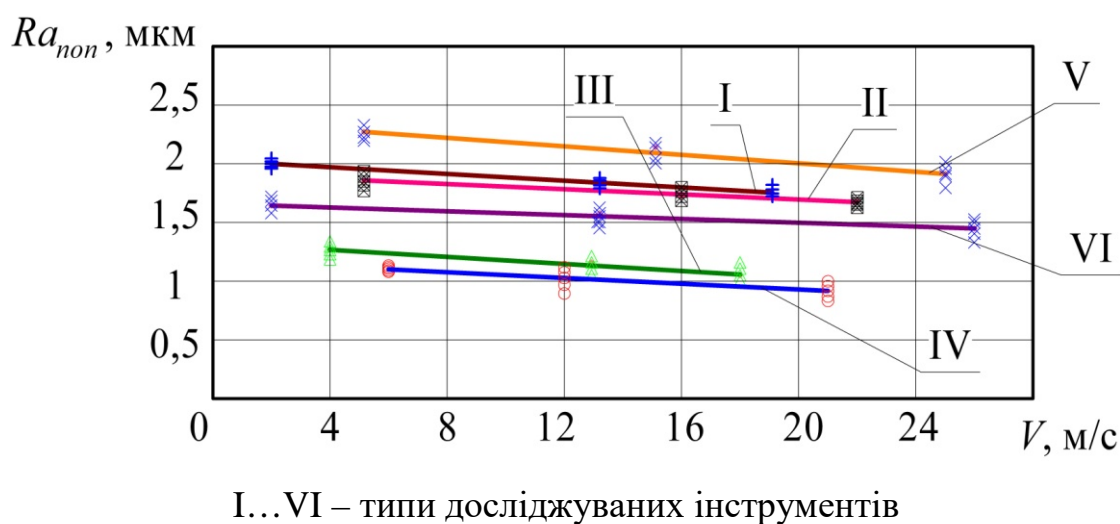


Рис. 3.18. Залежність шорсткості від швидкості оброблення для інструментів зернистістю Р120 на зразках з АД0

Слід зазначити, що при зменшенні зернисті різко знижується продуктивність обробки, що призводить до зростання собівартості

оброблення. При проведенні серій експериментів було встановлено, що на продуктивність оброблення комплексно впливали тип і параметри інструменту, режими оброблення, інтенсивність зношення та засалювання інструменту. На рис. 3.19 зображено залежність середнього часу оброблення від зернистості інструменту при поліруванні однакових ділянок каналу конструктивних елементів хвилеводу з АД0.

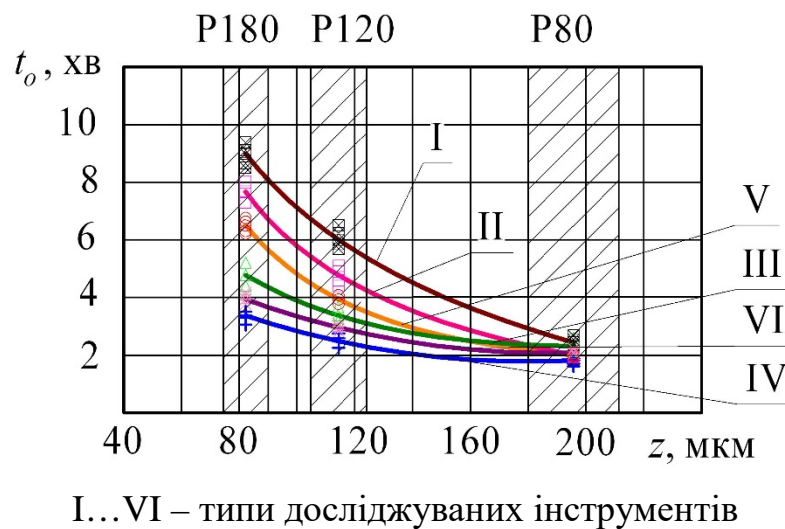


Рис. 3.19. Залежність часу оброблення від зернистості інструменту

При обробленні електрохімічним поліруванням було отримано поверхні із специфічним мікрорельєфом із згладженими мікрорельєфами регулярної будови, обумовленої впливом електричного струму, з утворенням мікророннок в місцях удару розрядів, переважно на вершинах мікрорельєфу. Мікрорельєф поверхонь після електрохімічного полірування істотно залежав від початкової мікрогеометрії, яка визначалась режимами і параметрами інструменту при попередньому поліруванні. Воно дозволило в середньому збільшити на один клас (на 14...16 %) шорсткість оброблюваних поверхонь (табл. 3.3) після попереднього полірування інструментами з зернистістю P120. Але було встановлено, що зі збільшенням довжини каналу від фланця інтенсивність електрохімічного полірування зменшувалась. Це обумовлено

екрануванням стінок каналу і відсутністю течії електроліту через складну конструкцію хвилеводів. Після полірування інструментом, який забезпечував необхідну шорсткість (йоржикова ПАЩ), додаткове електрохімічне полірування каналу несуттєво зменшувало висоту мікронерівностей (8...12 %), але значно збільшувало собівартість фінішного оброблення.

Таблиця 3.3

**Шорсткість зразків з АД0 після електрохімічного полірування**

Тип інструменту	Швидкість оброблення $V$ , м/с	Шорсткість до електрохімічного полірування, мкм		Шорсткість після електрохімічного полірування, мкм	
		$Ra_{новз}$	$Ra_{non}$	$Ra_{новз}$	$Ra_{non}$
I	13	2,11	1,92	1,81	1,63
II	16	2,02	1,75	1,75	1,49
III	13	1,27	1,16	1,20	1,05
IV	18	1,10	0,93	1,03	0,90
V	15	1,85	2,06	1,58	1,78
VI	15	1,12	1,26	1,05	1,08

Згідно проведених досліджень можливо зробити висновок, що для досліджуваних матеріалів полірування йоржиковою ПАЩ забезпечило найкращу і достатню шорсткість струмопровідних поверхонь конструктивних елементів хвилеводів та високу продуктивність в порівнянні з іншими інструментами і методами. При застосуванні інструменту з різним напрямком обертання відносно каналу (вздовж або поперек) було отримано на оброблюваних поверхнях спрямовану шорсткість, при цьому висота мікронерівностей в перпендикулярних напрямках суттєво відрізнялась.

Також необхідно зазначити, що оброблення слюсарним методом досліджуваних конструктивних елементів створило в каналі ділянки з різною

шорсткістю (навколошовні зони з шорсткістю, характерною певному інструменту, решта – ділянки з вихідною шорсткістю хвилеводної труби) та різною спрямованістю мікронерівностей.

Дослідження електрохімічного полірування конструктивних елементів хвилеводів показало несуттєве зниження шорсткості в порівнянні зі збільшенням собівартості обробки. Також в процесі електрохімічного полірування електроліт просочувався в мікротріщини швів та випаровується з часом, створював навколо них оксидні нашарування, які знижують електропровідність поверхневого шару каналу, тому застосування цього методу для даних виробів було визнано нераціональним.

### **3.1.2 Аналіз існуючих математичних залежностей визначення шорсткості при абразивному обробленні**

Полірування являє собою процес масового мікрорізання окремими абразивними зернами. У свою чергу шорсткість обробленої поверхні формується сукупністю зерен як ріжучих, так і вдавлюючих. Незалежно від початкового стану поверхні в процесі оброблення формується досяжна шорсткість, параметри якої залежать від умов оброблення і властивостей оброблюваного матеріалу. Якщо шорсткість поверхні до оброблення була менше досяжної, то в процесі оброблення вона збільшувалася; якщо більше, то зменшувалася до значення досяжної.

Для спрощення при розробці математичної залежності формування мікрорельєфу поверхні в роботі [65] в якості моделі одиничного абразивного зерна автором запропоновано використовувати конус із закругленою по радіусу вершиною. А весь ріжучий мікрорельєф абразивного інструменту, за даними, представленими в роботі [66], може бути описаний у вигляді випадкового стаціонарного процесу з нормальним розподілом. При впровадженні абразивних зерен під кутом до поверхні попереду них буде

утворюватися валик напливу (рис. 3.20), який за певних умов може переходити в стружку. Пластично відтиснутий матеріал, огинаючи абразивне зерно без відділення від основної маси, утворюватиме також наплив по його бічних сторонах.

При абразивному обробленні шорсткість поверхні формується в результаті масового накладення і перекриття проекцій абразивних зерен на оброблювану поверхню. Чим більше абразивних зерен бере участь в процесі мікрорізання, тим більше перекриттів проекцій зерен і менше максимальна висота мікронерівностей обробленої поверхні.

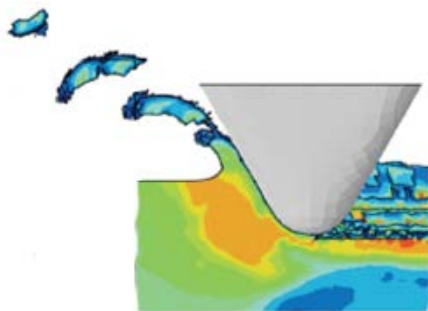


Рис. 3.20. Модель різання абразивним зерном у вигляді конуса [65]

В роботі [67] було запропоновано розрахунок шорсткості поверхні проводити в залежності від величини абразивного зерна. Для цього абразивні зерна було змодельовано у формі сфери. Профіль проекції зерна на площину оброблюваного зразка описувався колом з радіусом  $R$ . Найглибша западина мікропрофілю відповідала  $y=0$ , а найбільший виступ мікропрофілю  $y=R_{max}$ . При цьому шорсткість поверхні  $Ra$  визначалась залежністю:

$$Ra = 2 \int_a^{R_{max}} \Phi(y) dy = 2 \int_a^{R_{max}} e^{\frac{2Rn}{B}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{y}{R}\right)^2} dy, \text{ мкм} \quad (3.1)$$

де  $R$  – радіус профілю проекції абразивного зерна, мм;

$B$  – ширина оброблюваного зразку, мм;

$n$  – кількість проекцій зерен на вертикальну площину.

В роботі [68] для визначення параметра шорсткості поверхні при абразивному обробленні було використано вірогідну функцію невидаленого металу по глибині поверхневого шару оброблюваної деталі, яка визначалась координатою  $y$  впровадження абразивного зерна в оброблювану поверхню:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{tg(\gamma)n}{B}y}, \quad (3.2)$$

де  $\gamma$  – кут при вершині конусоподібного ріжучого зерна;  
 $n$  – сумарна кількість абразивних зерен, які беруть участь у формуванні шорсткості оброблюваної поверхні;  
 $B$  – ширина абразивного інструменту, мм.

Потенціуючи дану функцію було отримано залежність для шорсткості:

$$R_{max} = -\frac{\ln(\Phi_0)V_{дет}}{2tg(\gamma)kBV_{кр}}, \text{ мкм} \quad (3.3)$$

де  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – швидкість круга та деталі при обробленні, м/с;  
 $k$  – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхні круга.

В роботі [69] для визначення шорсткості, отриманої обробленням шліфувальними кругами з нетканого абразивного матеріалу, запропоновано, відповідно до теорії ймовірності, визначення глибини  $\gamma$  впровадження абразивних зерен виконувати з урахуванням сил різання згідно формули:

$$(\Gamma^{0,802} - \gamma + 0,97)^{0,895} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}} = \frac{P_y}{9.0149Kr^2n^2(0)BL} \quad (3.4)$$

де  $P_y$  – повна нормальна складова сили, Н;  
 $K$  – межа плинності на зрушення, МПа;  
 $r$  – математичне очікування радіуса середньої приведеної кривизни всіх

вершин;

$B$  – ширина круга, мм;

$n(0)$  – параметр мікрорельєфу.

В той же час, експериментальні залежності шорсткості від параметрів оброблення автором [69] були апроксимовані формулою виду:

$$Ra = b_1 \Delta y^2 + b_2 V^2 + b_3 \Delta y + b_4 V + b_5 \Delta y V + b_6, \text{ мкм} \quad (3.5)$$

де  $V$  – швидкість різання, м/с;

$\Delta y$  – деформація шліфувального круга, мм;

$b_1 \dots b_6$  – коефіцієнти, що відповідають конкретному типу інструменту.

Виходячи з вище сказаного, можливо зробити висновок, що зазначені залежності досить складні в розрахунках, не є універсальними, їх неможливо використати для щіткових інструментів. Більшість залежностей по визначенню шорсткості засновані на використанні теорії ймовірності. Тому найбільш доцільним методом формулювання залежності шорсткості при обробленні каналу хвилеводів від параметрів оброблення є статистичний з апроксимацією експериментальних даних.

### **3.1.3 Статистичний аналіз експериментальних даних залежності шорсткості від параметрів оброблення**

Для аналізу впливу параметрів оброблення на шорсткість були обрані експериментальні значення, виміряні в поперечному перерізі каналу. Тому що більшість токів НВЧ розповсюджуються в поверхневому шарі поперек каналу, і для того, щоб не викликати загасання радіохвиль, напрям мікронерівностей повинен співпадати з напрямком токів.

Під час побудови залежності шорсткості полірованої поверхні каналу хвилеводу від параметрів оброблення було використано регресійне рівняння. У функціональному вираженні залежність зміни шорсткості поверхні від основних факторів мала вигляд:

$$Ra_{\text{поп}} = f(HB, \sigma_B, K_{\text{ін}}, C, K_{\text{об}}, V), \text{ мкм} \quad (3.6)$$

де  $HB$  – твердість оброблюваного матеріалу, МПа;

$\sigma_B$  – межа міцності оброблюваного матеріалу, МПа;

$K_{\text{ін}}$  – коефіцієнт, що характеризує тип інструменту;

$C$  – жорсткість інструменту, Н/мм<sup>2</sup>·м;

$K_3$  – концентрація абразивних зерен у інструменті, %;

$P$  – зернистість інструменту;

$K_{\text{об}}$  – коефіцієнт, що характеризує напрямок обертання інструменту;

$V$  – швидкість оброблення, м/с.

А регресійне рівняння залежності шорсткості (формула цільової функції) мало вигляд:

$$Ra_{\text{поп}} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5, \text{ мкм} \quad (3.7)$$

де  $x_1...x_5$  – кодовані значення факторів;

$b_0, b_1...b_5$  – коефіцієнти моделі.

Для побудови математичної залежності шорсткості від параметрів оброблення були використані максимальні експериментальні її значення в залежності від обраного інструменту. Щоб оцінити ступінь впливу кожного з факторів оброблення на значення шорсткості  $Ra_{\text{нон}}$  було проведено кореляційний аналіз. Розглядали три групи факторів:

- властивості оброблюваного матеріалу (твердість, межа міцності);
- параметри інструменту (тип інструменту, зернистість, концентрація

абразивних зерен, жорсткість інструменту);

- режими оброблення (швидкість, напрямок обертання).

Для розрахунку кореляції всіх факторів оброблення було використане програмне забезпечення «Statistica». Отримана матриця парних коефіцієнтів кореляції (рис. 3.21) свідчить про те, що не всі фактори чинили значний вплив на значення шорсткості. Фактор «твердість» і «межа міцності» оброблюваного матеріалу мали тісний зв'язок між собою ( $>0,7$ ), були рівнозначними, через що для подальшого аналізу була виключена з розгляду межа міцності  $\sigma_B$ .

Так само мультикалініарними були чинники «тип інструменту», «концентрація абразивних зерен», «напрямок обертання» і «жорсткість інструменту». Тому були виключені чинники «жорсткість інструменту», «концентрація абразивних зерен», «напрямок обертання» вони характеризували конкретний тип інструменту і для нього були постійними. Серед решти парних коефіцієнтів кореляції не було факторів, які корелюють між собою. Перевірка  $p$ -рівня значущості для факторів отриманої моделі показала, що всі фактори мали рівень значущості менше 0,05, отже вони всі є значимими.

Variable	Correlations (3.11 sta)								
	твердість матеріалу	межа міцності матеріалу	концентрація абразивних зерен	жорсткість інструменту	тип інструменту	напрямок обертання інструменту	швидкість оброблення	зернистість	шорсткість поперек каналу
твердість матеріалу	1,000000								
межа міцності матеріалу	1,000000	1,000000							
концентрація абразивних зерен	-0,000000	-0,000000	1,000000						
пружність інструменту	-0,000000	-0,000000	1,000000	1,000000	0,943880	0,000000	-0,169526	-0,000000	0,454979
тип інструменту	-0,000000	-0,000000	0,943880	0,943880	1,000000	0,000000	-0,189868	-0,000000	0,478522
напрямок обертання інструменту	-0,000000	-0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,000000	-0,000000	-0,000000	-0,164778
швидкість оброблення	-0,000000	-0,000000	-0,169526	-0,169526	-0,189868	-0,000000	1,000000	0,000000	-0,193776
зернистість	-0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	-0,000000	0,000000	1,000000	-0,549981
шорсткість поперек каналу	-0,551842	-0,551842	0,454979	0,454979	0,478522	-0,164778	-0,193776	-0,549981	1,000000

Рис. 3.21. Матриця парних коефіцієнтів кореляції

Для оцінки адекватності регресійної моделі було побудовано графіки. На гістограмі регресійних залишків (рис. 3.12, а), видно, що залишки розподілені досить симетрично, відносно графіка нормального розподілу, отже ця гіпотеза нормального розподілу не відкидається.

На графіку (рис. 3.22, б) видно, що системних відхилень фактичних даних від теоретичної нормальної прямої не спостерігається, отже залишки розподілено нормально. Обрана регресійна модель добре описує справжню залежність, залишки є незалежними і нормально розподіленими випадковими величинами, і в їх значеннях відсутній тренд. Аналіз регресійних залишків показав, що модель досить якісна. Рівень значущості моделі менше 0,05, отже можна стверджувати, що модель є прийнятною.

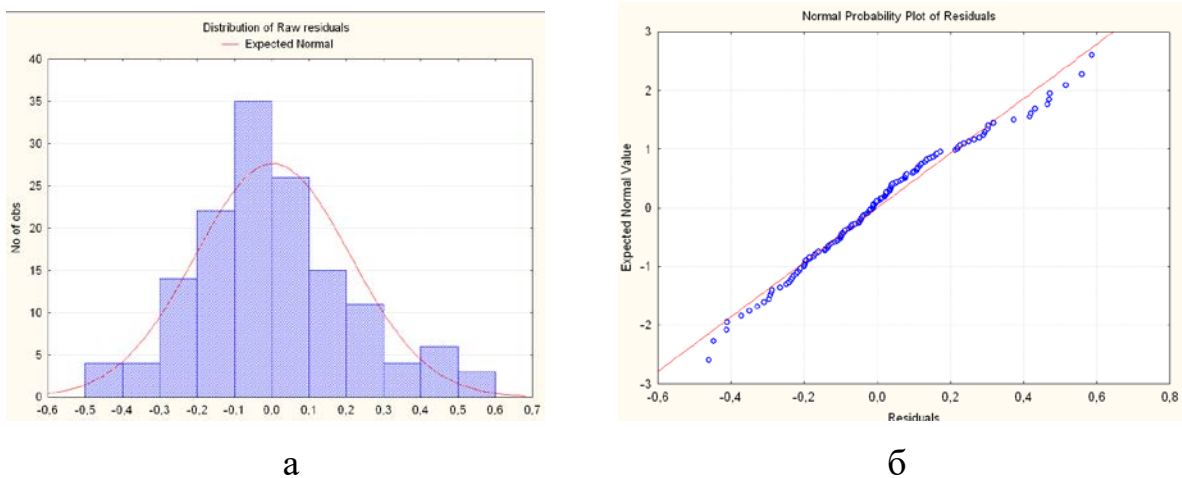


Рис. 3.22. Гістограма залишків (а) і відхилення залишків від нормальної прямої (б)

Загальний вигляд рівняння лінійної регресії залежності шорсткості поверхні каналу від параметрів оброблення має вигляд:

$$Ra_{\text{поп}} = -19.55 - 0.017HB + 0.22K_{\text{ін}} - 0,008V - 0.007P, \text{ мкм} \quad (3.8)$$

Отримана математична модель формування шорсткості обробленої поверхні повністю корелює з експериментальними даними. Але має наступні діапазони обмеження щодо застосування:

- матеріал деталі – АД0 або Л96;
- твердість матеріалу деталі –  $HB=20\dots60$  МПа;
- зернистість інструмента – P80...P180;

- швидкість оброблення –  $V=2\dots25$  м/с;

- коефіцієнт, що характеризує тип інструменту, для йоржикової ПАЩ  $K_{in}=100,4$ ; для шліфувальної голівки з нетканого абразивного матеріалу  $K_{in}=100,7$ ; для наждачного паперу на оправці  $K_{in}=103$ ; для шліфувального пелюсткового круга  $K_{in}=102,7$ ; для нескінченної стрічки з наждачного паперу  $K_{in}=103,9$  та з нетканого абразивного матеріалу  $K_{in}=101,4$ .

Коефіцієнт кореляції даної залежності  $R=0,86$ . Похибка після перевірки з контрольною партією не перевищувала 7 %.

### 3.1.4 Дослідження наклепу поверхневого шару каналу

При обробленні дослідних конструктивних елементів хвилеводів кожен з інструментів наводив певний ступінь наклепу [70]. В роботі [71] при дослідженні мікротвердості на монокристалі алюмінію, варіюючи величиною навантаження, було встановлено, що під час полірування шліфа мав місце сильний наклеп поверхневого шару. Наклеп викликав значне підвищення мікротвердості при малих навантаженнях і малих глибинах вдавлення індентора: при діагоналі відбитка  $5\dots20$  мкм наклеп становив  $28\dots40$  %.

Дослідження наклепу  $S_H$  після фінішного оброблення на раціональних режимах різними інструментами каналу алюмінієвих та латунних хвилеводів показало (табл. 3.4, 3.5), що зі збільшенням абразивних зерен інструменту, зростала мікротвердість  $H_\mu$ , а відповідно і  $S_H$ , обробленої поверхні (рис. 3.23, 3.24), через більш інтенсивну мікродеформацію поверхневих шарів. Величина вдавлення алмазної піраміди становила  $2\dots8$  мкм.

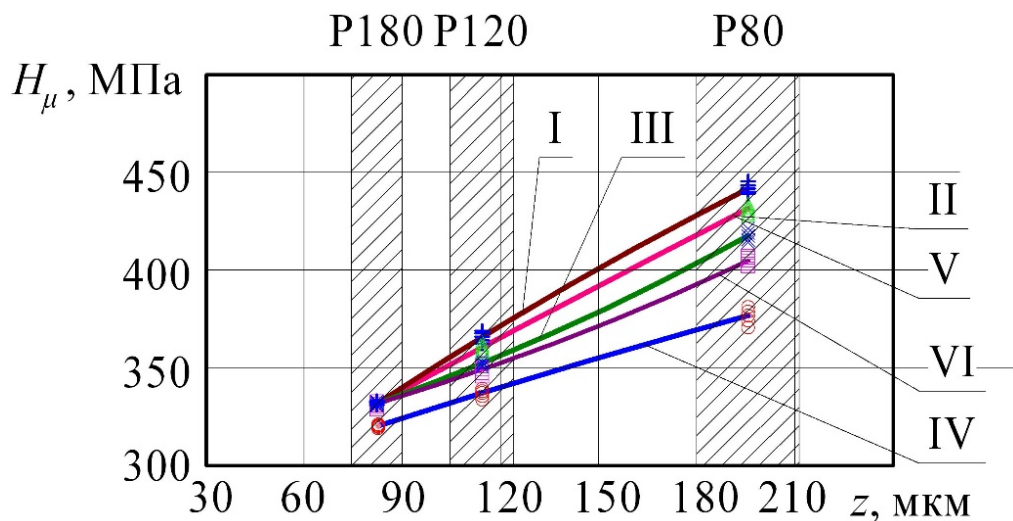
Встановлено, що величина поверхневого наклепу (рис. 3.25) при обробці йоржиковою ПАЩ була мінімальною і становила  $8\dots36$  %. Це викликано пружними властивостями волокон щітки, що амортизували частину енергії удару та розрідженим розміщенням їх в інструменті. В той же час при

обробленні наждачним папером на оправці було отримано наклеп до 57 %. Це пов'язано з жорсткою конструкцією інструменту, значним його засалюванням, що викликало більше зминання поверхневих шарів.

Таблиця 3.4

**Середні значення мікротвердості та поверхневого наклепу зразків з АД0**

Тип інструменту	Мікротвердість $H_{\mu}$ , МПа			Наклеп $S_H$ , %		
	Зернистість абразиву інструментів					
	P80	P120	P180	P80	P120	P180
I	440	380	320	57	36	14
II	430	370	320	53	32	14
III	410	360	320	46	29	14
IV	380	350	315	36	25	13
V	430	370	320	53	32	14
VI	400	360	320	43	29	14



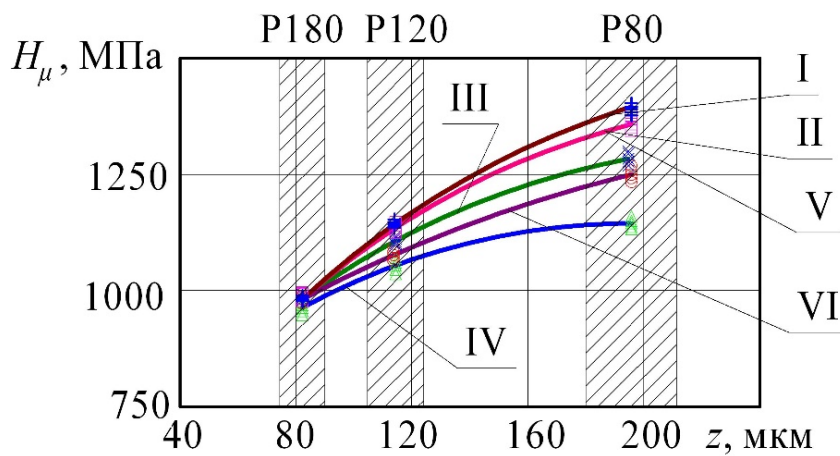
I...VI – тип інструменту

Рис. 3.23. Залежність мікротвердості поверхонь каналу хвилеводів з АД0 від типу використаного інструменту та його зернистості

Таблиця 3.5

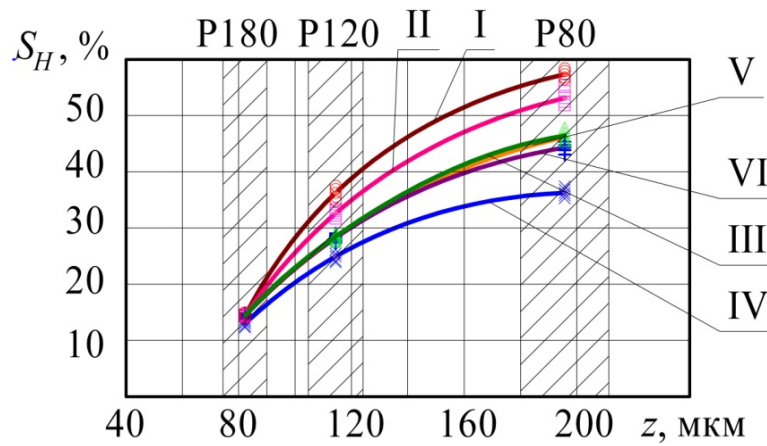
## Середнє значення мікротвердості та поверхневого наклепу зразків з Л96

Тип інструменту	Мікротвердість $H_\mu$ , МПа			Наклеп $S_H$ , %		
	Зернистість абразиву інструментів					
	P80	P120	P180	P80	P120	P180
I	1350	1140	990	48	25	9
II	1320	1130	990	45	24	9
III	1260	1080	990	39	19	9
IV	1160	1055	980	27	16	8
V	1320	1120	990	45	24	9
VI	1230	1070	990	39	19	9

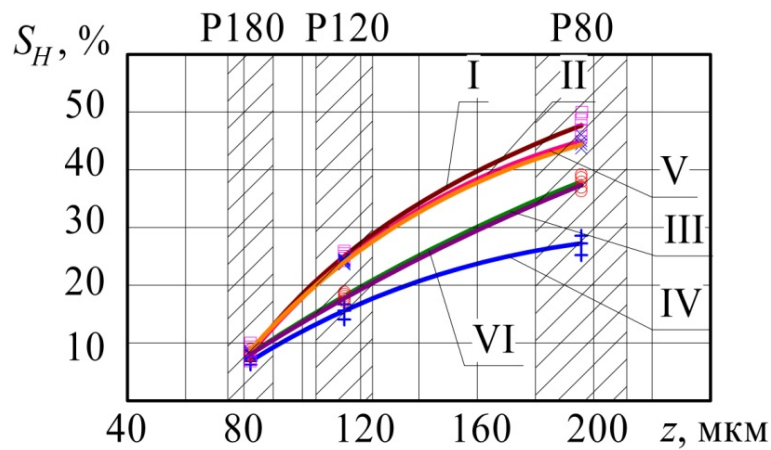


I...VI – тип інструменту

Рис. 3.24. Залежність мікротвердості поверхонь каналу хвилеводів з Л96 від зернистості інструментів



а



б

I...VI – тип інструменту

Рис. 3.25. Залежність наклепу від зернистості інструменту для зразків з АД0 (а) та Л96 (б)

### 3.1.5 Оцінка впливу фінішного оброблення на електропровідність стінок хвилеводу

При фінішному обробленні можлива деформація поверхневого шару, яка супроводжується перерозподілом легуючих елементів [72], а також нерівномірним локальним ущільненням тонкого поверхневого шару. Такі зміни можуть впливати на його механічні та фізичні властивості, такі,

наприклад, як модуль пружності та електроопір. Відомо, що електроопір провідників залежить як від шорсткості [73], так і від наклепу струмопровідної поверхні. При наклепі більшості чистих металів він зростає на 2...6 %, а для сплавів – до 25 % [74]. В той же час, електропровідність міді спочатку незначно збільшується після наклепу до 35 % і знову починає падати з ростом рівня деформації [75]. Електропровідність сплаву на основі нікелю IN718 [76] у міру збільшення твердості спочатку падає, а потім починає збільшуватись.

За результатами вимірювання електропровідності  $\sigma_e$  дослідних конструктивних елементів (табл. 3.6) хвилеводів з АД0 та Л96, було встановлено, що оброблення наждачним папером на оправці викликало зменшення електропровідності на 2,3...3,9 %, в той час, як полірування йоржиковою ПАЩ на 0,6...1,9 % (рис. 3.26, 3.27).

Таблиця 3.6

**Результати дослідження електропровідності (МСм/м)**

Тип інструменту	АД0			Л96		
	Зернистість абразиву інструментів					
	P80	P120	P180	P80	P120	P180
1	2	3	4	5	6	7
I	32,92	33,19	33,41	22,45	22,60	22,71
II	32,93	33,17	33,40	22,46	22,62	22,72
III	33,25	33,63	33,81	22,71	22,86	22,99

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7
IV	33,58	33,85	33,97	23,01	23,06	23,11
V	32,90	33,17	33,38	22,42	22,57	22,68
VI	33,23	33,60	33,82	22,73	22,83	22,96
До оброблення	34,25	34,25	34,25	23,26	23,26	23,26

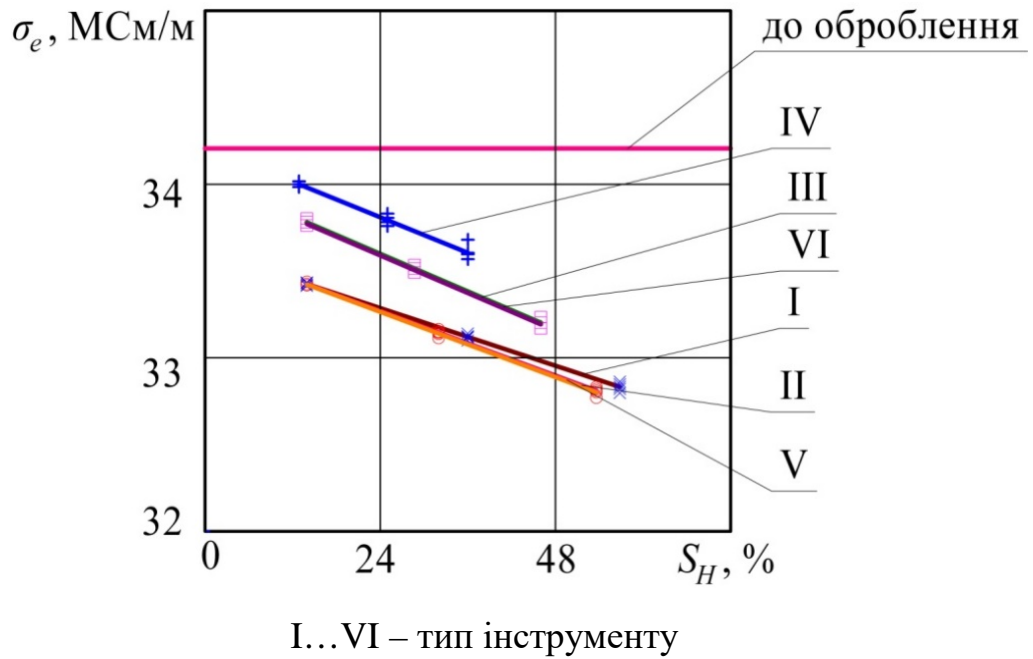


Рис. 3.26. Залежність електропровідності від значення наклепу (АД0)

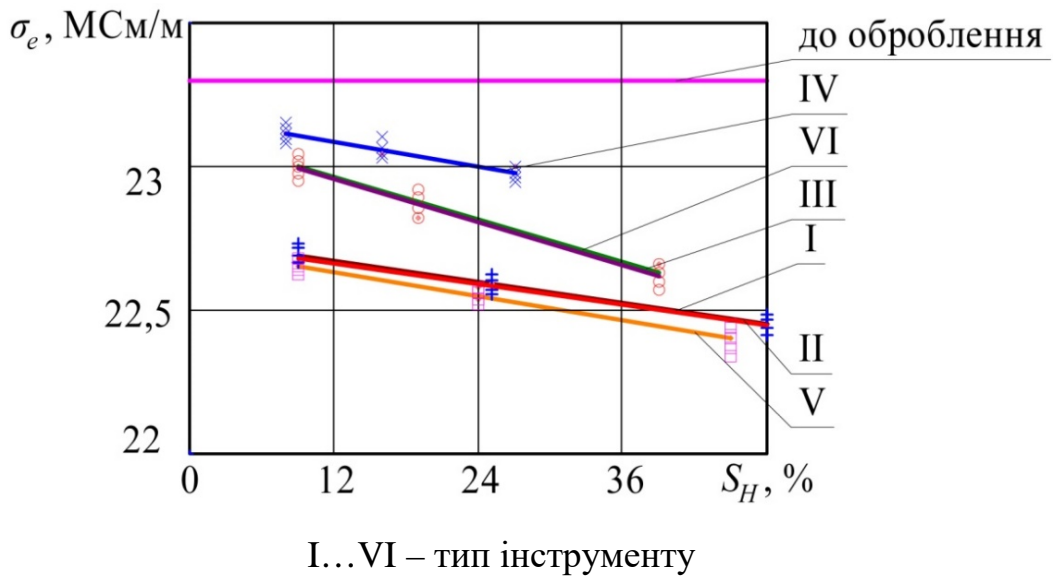


Рис. 3.27. Залежність електропровідності від значення наклепу (Л96)

Зменшення електропровідності струмопровідної поверхні на 5 %, не враховуючі інші чинники, згідно формули (1.1), призводить в середньому до збільшення коефіцієнту загасання на 3 %.

### **3.2 Оцінка впливу якості струмопровідного шару прямокутного кутового хвилеводу, отриманої фінішним обробленням різними інструментами, на його електричні параметри**

Важливу роль при проектуванні і виготовленні хвилеводів грає вплив шорсткості їх струмопровідних поверхонь, отриманої на фінішних операціях, на експлуатаційні електричні параметри. Матеріал струмопровідних поверхонь хвилеводу має низку специфічних властивостей, зумовлених явищами поверхневого ефекту, поляризації і гіромагнітного ефекту [7]. Поширення електромагнітних хвиль в хвилеводі призводить до появи електричного струму провідності на внутрішніх поверхнях стінок. Велика щільність струму високої частоти в поверхневому шарі каналу вимагає високої якості оброблення струмопровідних поверхонь.

В процесі проведення експериментів було досліджено вплив фінішного оброблення різними інструментами каналу хвилеводу в місцях зварювання або паяння на значення електропараметрів. Згідно з раніше розробленим планом (п. 2.3) було досліджено по 6 хвилеводів п'яти типів. Для створення направленості шорсткості в каналі хвилеводу при обробленні було використано два засоби малої механізації, які дозволяли обертати інструмент уздовж або поперек каналу: пряма шліфмашинка і механічний напилек. Інструмент використовували різної зернистості, що дозволило отримати різну висоту мікронерівностей і оцінити її вплив на електропараметри в діапазоні робочих частот. Оброблення проводили на раціональних режимах, характерних кожному методу, для отримання високої якості поверхні і продуктивності оброблення.

### 3.2.1 Оцінка впливу фінішного оброблення на значення КСХН прямокутних кутових хвилеводів

Відомо, що ослаблення енергетичних значень хвилі є можливим через збільшення значення КСХН. Тому при виготовленні хвилеводів прагнуть отримати мінімальне значення  $КСХН=1$ , але за рахунок похибок виготовлення та складної конструкції кутових хвилеводів значення  $КСХН>1$ . Це пояснюється тим, що у хвилеводі присутні відбиті хвилі, середнє квадратичне значення струму більше, ніж при наявності в ній тільки біжучої хвилі. Складання біжучої та відбитої хвиль призводить до появи стоячих хвиль, через що зростають омичні втрати електромагнітної хвилі. Наприклад, якщо значення КСХН дорівнює 1,1 втрати потужності складають 0,23 % і 1,7 % при  $КСХН=1,3$ . Також будь-які порушення однорідності каналу хвилеводу (повороти, з'єднання, відгалуження) призводять до відбиття хвиль, в результаті чого збільшується КСХН, зростають втрати і зменшується ККД хвилеводу.

Результати досліджень впливу полірування різними інструментами фінішного оброблення хвилеводів свідчать, що на обраних режимах і параметрах інструменту отримано КСХН менший за граничне допустиме значення ( $КСХН=1,1 \dots 1,2$ ). Після полірування наждачним папером на оправці (тип I) та йоржиковою ПАЩ (тип IV) результати дослідження представлено у табл. 3.7. Встановлено, що значення КСХН при поліруванні йоржиковою ПАЩ були на 5...10% меншими ніж при поліруванні наждачним папером на оправці.

Варіювання типом інструмента з різним напрямом обертання відносно каналу при поліруванні хвилеводів не чинило значного впливу на зміну значень КСХН.

До істотної зміни значень КСХН хвилеводу, навіть значного перевищення граничних значень, може призвести наявність неплоскостності

або неперпендикулярність фланцю та дефектів поверхонь каналу: сходинок в з'єднанні секцій, напливів припою, проварів стінок тощо. На досліджуваних хвилеводах таких дефектів не спостерігалось, тому були отримані стабільні результати.

Таблиця 3.7

**Результати дослідження значень КСХН після фінішного оброблення інструментами типів I та IV**

Тип хви-ду	Тип з'єднан-ня секцій хвилеводу	Номер досліду	Зернистість інструменту	Значення КСХН		
				Згідно техніч-них умов (ТУ)	Експериментальні	
					Тип I	Тип IV
1	2	3	4	5	6	7
1	Паяння	1	P80	1,1	1,09	1,031
		2	P120		1,085	1,037
		3	P180		1,092	1,036
2	Паяння	1	P80	1,12	1,10	1,05
		2	P120		1,11	1,05
		3	P180		1,095	1,06
3	Зварювання	1	P80	1,1	1,092	1,01
		2	P120		1,095	1,01
		3	P180		1,096	1,01
4	Зварювання	1	P80	1,15	1,135	1,04
		2	P120		1,14	1,04
		3	P180		1,13	1,05
5	Зварювання	1	P80	1,2	1,195	1,15
		2	P120		1,185	1,12
		3	P180		1,187	1,11

### 3.2.2 Оцінка впливу фінішного оброблення на значення коефіцієнту загасання

При обробленні хвилеводів різними інструментами з однією і тією ж зернистістю було отримано різні значення коефіцієнта загасання (табл. 3.8). Це пояснюється перш за все тим, що інструменти формували на поверхні різну шорсткість, яка в свою чергу впливала на довжину шляху струмів в поверхневому шарі. Оброблення йоржиковою ПАЩ в порівнянні з іншими інструментами показало кращий результат щодо коефіцієнта загасання (рис. 3.28) через сприятливу сукупність наведених властивостей поверхневого шару.

Таблиця 3.8

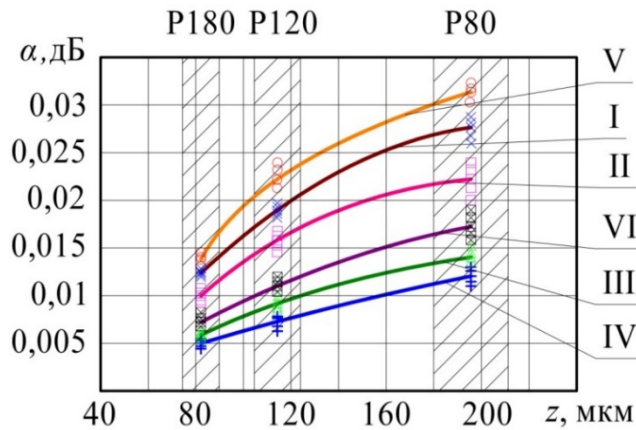
#### Середній коефіцієнт загасання $\alpha$ (дБ) досліджуваних хвилеводів при поліруванні різними інструментами

Тип хвилеводу	Зернистість	Тип інструменту					
		I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6	7	8
1	P80	0,031	0,03	0,016	0,015	0,03	0,019
	P120	0,022	0,022	0,011	0,009	0,025	0,015
	P180	0,015	0,012	0,008	0,006	0,015	0,009
2	P80	0,042	0,03	0,021	0,017	0,048	0,022
	P120	0,031	0,029	0,015	0,012	0,032	0,015
	P180	0,016	0,014	0,011	0,008	0,018	0,012
3	P80	0,027	0,022	0,014	0,012	0,031	0,017
	P120	0,019	0,016	0,009	0,007	0,022	0,011
	P180	0,012	0,01	0,006	0,005	0,014	0,007
4	P80	0,055	0,052	0,03	0,023	0,065	0,031
	P120	0,042	0,042	0,018	0,018	0,045	0,025
	P180	0,024	0,021	0,013	0,01	0,024	0,017
5	P80	0,06	0,045	0,028	0,026	0,07	0,039

Продовження табл. 3.8

1	2	3	4	5	6	7	8
5	P120	0,048	0,037	0,024	0,015	0,05	0,028
	P180	0,028	0,019	0,016	0,011	0,026	0,018

Для одного з типів хвилеводів, варіюючи зернистістю досліджуваних інструментів, в каналі отримано різну висоту мікронерівностей. Встановлено, що зі збільшенням шорсткості поверхні каналу значення коефіцієнта загасання  $\alpha$  збільшувалось у геометричній прогресії (табл. 3.9).



I...VI – типи досліджуваних інструментів

Рис. 3.28. Залежність коефіцієнта загасання від зернистості інструменту при обробленні хвилеводу типу №3

Таблиця 3.9

**Залежність коефіцієнту загасання  $\alpha$  від шорсткості при поліруванні хвилеводу типу №3**

Зер- нис- тість	Тип інструменту											
	I		II		III		IV		V		VI	
	$\alpha$ , дБ	$Ra_{non}$	$\alpha$ , дБ	$Ra_{non}$	$\alpha$ , дБ	$Ra_{non}$	$\alpha$ , дБ	$Ra_{non}$	$\alpha$ , дБ	$Ra_{поп}$	$\alpha$ , дБ	$Ra_{поп}$
P80	0,027	2,1	0,022	1,9	0,014	1,3	0,012	1,2	0,031	2,3	0,017	1,5
P120	0,019	1,75	0,016	1,65	0,009	1,1	0,007	0,95	0,022	1,9	0,011	1,2
P180	0,012	1,2	0,01	1,1	0,006	0,9	0,005	0,75	0,014	1,3	0,007	1,0

Так після полірування наждачним папером на оправці при збільшенні шорсткості з  $Ra=1$  мкм до  $Ra=2$  мкм коефіцієнт загасання зростає в 2...4 рази (рис. 3.29).

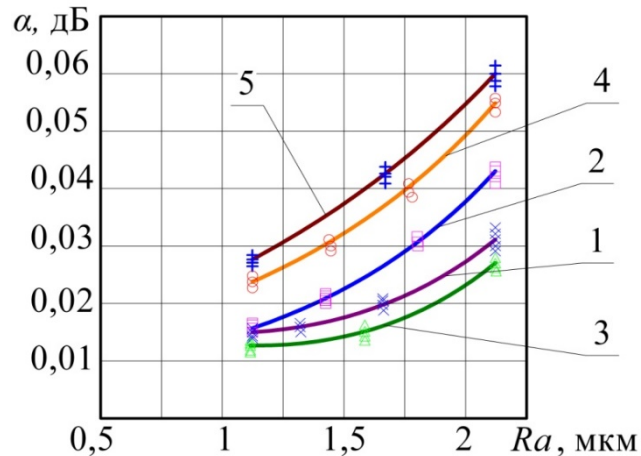
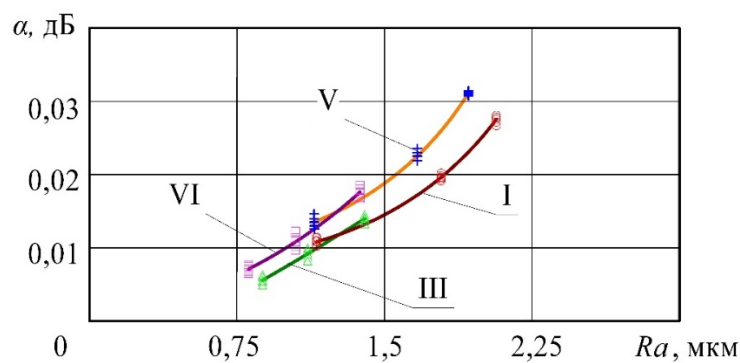


Рис. 3.29. Залежність величини коефіцієнта загасання від шорсткості для хвильоводів п'яти типів при поліруванні наждачним папером на оправці

Слід зазначити, що різні значення коефіцієнта загасання для різних типів хвильоводів (рис. 3.19) при постійних параметрах полірування обумовлені конструкційними особливостями: довжиною каналу та різною площею полірованих поверхонь.

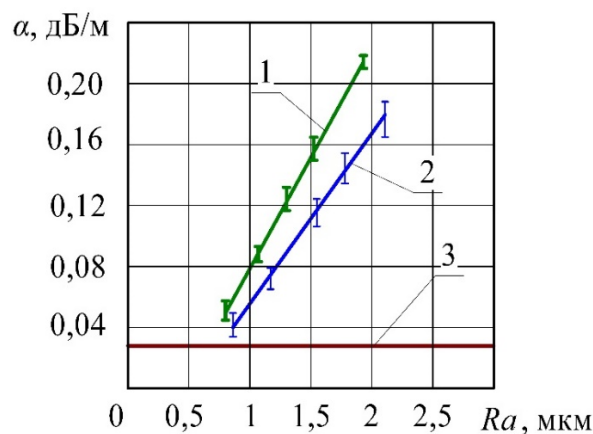
При обробленні одним і тим самим інструментальним матеріалом (наждачний папір; нетканий абразивний матеріал), але при різному напрямку обертання відносно каналу, було отримано спрямованість мікронерівностей в поперечному ( $Ra_{non} < Ra_{повз}$ ), інструментами типів I, III, або повздовжньому ( $Ra_{поп} > Ra_{повз}$ ), інструментами типів V, VI, перерізах. Встановлено, що при рівних значеннях шорсткості  $Ra_{повз}$ , отриманої інструментами V, VI, та  $Ra_{non}$ , отриманої інструментами I, III, коефіцієнт загасання у другому випадку [77] при спрямованості ліній рисок мікронерівностей поверхні в поперечному перерізі каналу хвильоводу був менше на 20...50 % (рис. 3.30). Через це поперечна направленість шорсткості в каналі хвильоводу є більш сприятливою.

Експериментальні значення коефіцієнту загасання досліджуваних хвильоводів були перераховані у погонні втрати на метр та усереднені (рис. 3.31). Порівнюючи ці значення коефіцієнту загасання (криві 1, 2) з теоретичним (крива 3), отриманим для ідеально гладких стінок каналу згідно формули (1.1), встановлено істотну їх різницю. Це спричинено тим, що канал досліджуваних хвильоводів мав різнорідну шорсткість: основна поверхня хвильоводної труби залишалась в стані постачання, навколошовні зони відрізнялись фінішним обробленням.



I, III та V, IV – типи досліджуваних інструментів

Рис. 3.30. Вплив напрямку шорсткості на коефіцієнт загасання для хвильоводу типу №3



- 1 – залежність  $\alpha$  від  $Ra_{\text{повз}}$  при спрямованості шорсткості вздовж каналу
- 2 – залежність  $\alpha$  від  $Ra_{\text{non}}$  при спрямованості шорсткості поперек каналу
- 3 – при нульовому значенні шорсткості (згідно формули (1.1))

Рис. 3.31. Залежність коефіцієнта загасання від спрямованості шорсткості

Розмах експериментальних значень (криві 1, 2) (рис. 3.21) отримано внаслідок впливу додаткових факторів оброблення вручну групи хвилеводів.

На підставі проведених експериментів і аналізу існуючих залежностей для прямокутних кутових алюмінієвих хвилеводів S-діапазону з хвилею  $H_{10}$ , виготовлених зварюванням або паянням з хвилеводної труби, було запропоновано коефіцієнт загасання розраховувати з урахуванням площ різнохідної шорсткості [78] за формулою:

$$\alpha = \alpha_{\text{роз}} + \alpha_{\text{шор}}, \text{ дБ/м} \quad (3.9)$$

де  $\alpha_{\text{роз}}$  – коефіцієнт загасання хвилі  $H_{10}$ , обумовлений втратами в ідеально гладких стінках прямокутного хвилеводу, розрахований за формулою (1.1), дБ/м;

$\alpha_{\text{шор}}$  – коефіцієнт загасання, обумовлений втратами в полірованих навколошовних зонах з наведеною шорсткістю, дБ/м.

$$\alpha_{\text{шор}} = \frac{1,1^{(Ra_{\text{пол}}-0,5)}}{\delta^{0,06}} - \left(1 - 0,005 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right), \text{ дБ/м} \quad (3.10)$$

де  $S_1$  – площа полірованої поверхні навколошовних зон,  $\text{м}^2$ ;

$S_2$  – площа всієї поверхні каналу,  $\text{м}^2$ ;

$Ra_{\text{пол}}$  – шорсткість полірованої навколошовної зони, виміряна поперек каналу, мкм;

$\delta$  – глибина проникнення струму НВЧ в стінки каналу хвилеводу, мм.

Отримана математична модель повністю корелює з експериментальними даними ( $R=0,91$ ).

Розрахунки коефіцієнту загасання для досліджуваних хвилеводів було перевірено на контрольних вибірках (табл. 3.10), похибка розрахунків при перевірці не перевищувала 13 %.

Таблиця 3.10

**Порівняння контрольних вибірок з розрахунковими значеннями  
коефіцієнту загасання**

Тип хвиле- воду	Довжина хвилево- ду, м	Співвідно- шення площ поверхонь каналу $S_1/S_2$	Шорсткість полірова- них зон $Ra_{non}$ , мкм	Коефіцієнт загасання $\alpha$ , дБ/м		Похиб- ка, %
				Експеримен- тальний	Розрахо- ваний	
1	0,18	0,9	1,9	0,1666	0,1483	12,4
			1,3	0,0888	0,0863	3,0
			0,9	0,0444	0,0469	5,3
2	0,23	0,8	1,85	0,1347	0,1421	5,2
			1,2	0,0739	0,0755	2,1
			1,0	0,0521	0,0558	6,5
3	0,145	0,9	2,1	0,1862	0,1697	9,7
			1,3	0,0965	0,0863	11,8
			0,75	0,0344	0,0325	5,9
4	0,32	0,7	2,08	0,1718	0,1660	3,5
			0,9	0,0406	0,0453	10,4
			0,75	0,0312	0,0309	1,0
5	0,34	0,6	2,3	0,2058	0,1894	8,7
			1,5	0,1147	0,1043	9,9
			0,95	0,0441	0,0495	10,9

Отримана залежність (формула (3.9)) дає змогу точніше призначати клас шорсткості навколошовних зон при проектуванні кутових прямокутних хвилеводів S-діапазону, опираючись на необхідне значення коефіцієнта загасання та наявні на виробництві технологічні можливості. Але є наступні обмеження щодо застосування її до хвилеводів S-діапазону:

- співвідношенням площі полірованих навколошовних зон до загальної площі каналу –  $S_1/S_2=0,4\dots0,9$ ;
- шорсткість полірованої навколошовної зони в поперечному перерізі –  $Ra_{non}= 0,7\dots2,8$  мкм;
- глибина проникнення струму НВЧ –  $\delta=1,1\dots1,9$  мкм,
- шорсткість хвилеводної труби в стані постачання –  $Ra_{труб}<\delta$ .

### 3.2.3 Оцінка впливу фінішного оброблення на електроміцність

Останнім етапом перевірки впливу методів фінішного оброблення хвилеводів на їх електропараметри було випробування електроміцності (за методикою п. 2.3.3) при рівні потужності 220 кВт протягом 15 хв. Електроміцність характеризувала дотримання всіх вимог при виготовленні хвилеводів та відсутність будь-яких дефектів поверхонь каналу.

Отримані результати свідчать, що варіювання типами і параметрами інструментів, і, як наслідок, величиною і направленістю шорсткості, не впливало на електроміцність хвилеводу в досліджуваному діапазоні частот. Відомо, що до значної втрати електроміцності хвилеводів призводить наявність на струмопровідних поверхнях каналу та фланцю таких дефектів, як сходинок в місцях з'єднання, напливи припою, тріщини зварного шва, гострі крайки тощо. На досліджуваних хвилеводах даних дефектів не спостерігалось, тому на всіх типах досліджуваних хвилеводів було отримано сталі показники електроміцності, які відповідали вимогам конструкторської документації.

### 3.3 Висновки

1. Згідно проведених досліджень можливо зробити висновок, що використання електрополірування нераціонально використовувати для

фінішного оброблення даного типу виробів через те, що для отримання необхідної якості перед ним попередньо слід все одно застосовувати один з методів слюсарного оброблення.

2. Найкращі електропараметри хвилеводів при поліруванні навколошовних зон забезпечила шорсткість, спрямована в поперечному перерізі каналу, отримана обертанням інструменту поперек каналу, як при обробленні в тому числі йоржиковою ПАЩ. Це пов'язано з більшою ймовірністю збігу напрямків мікронерівностей з напрямками рухів струмів НВЧ в стінках хвилеводу. Експериментально встановлено, що коефіцієнт загасання був меншим на 20...50 % при одержанні направленості шорсткості в поперечному перерізі каналу хвилеводу, в порівнянні з тією ж величиною шорсткості, але отриманої уздовж каналу хвилеводу.

3. В ході проведення дослідження встановлено, що наклеп зменшував електропровідність струмопровідного шару стінок хвилеводу. Це призводило до збільшення втрат енергії, спричиненої опором матеріалу стінок каналу. Серед досліджуваних методів і інструментів фінішного оброблення каналу кутових хвилеводів полірування йоржиковою ПАЩ створювало поверхневий наклеп в 1,1...1,8 рази менший за інші інструменти.

4. Розроблено та апробовано формулу визначення коефіцієнту загасання для кутових прямокутних хвилеводів S-діапазону, виготовлених методом зварювання або паяння, для хвилі  $H_{10}$ , які мають поверхні каналу з різною шорсткістю, і враховує співвідношення площ з різною шорсткістю.

5. В результаті проведених досліджень встановлено, що фінішне оброблення навколошовних зон каналу і фланців прямокутних хвилеводів полімерно-абразивними щітковими інструментами обертальної дії є більш продуктивним, забезпечує найвищі характеристики шорсткості і наводить сприятливі властивості струмопровідних поверхонь, що в результаті забезпечує високі показники експлуатаційних властивостей кутових хвилеводів різних типів. У порівнянні з іншими типами інструментів при обробленні ПАЩ значення коефіцієнта загасання були в 1,3...2,7 рази меншими.

## РОЗДІЛ 4

### ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ПАЩ ПРЯМОКУТНИХ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ S-ДІАПАЗОНУ

Абразивний щітковий інструмент використовується для широкого спектру фінішного оброблення деталей і конструкцій: заокруглення гострих крайок, видалення задирок і полірування поверхонь [64], [79]. Все частіше ПАЩ використовують на верстатах з ЧПК, замінюючи застарілі, менш продуктивні, неекологічні методи, наприклад, при видаленні задирок на деталях порошкової металургії [80] замість віброабразивного оброблення; при механічному глазуруванні скла замість піскоструменевого оброблення або хімічного матування [81], [82], [83]. У теперішній час в літературі можна знайти інформацію про виготовлення ПАЩ і області їх застосування [84], [85], залежність якості поверхні від режимів оброблення [86], силовий вплив інструменту на деталь [87], [88], [89], [90] і температурне поле в зоні інструмент-деталь [91], [92], [93], можливості в досягненні високої продуктивності оброблення [94], їх застосування для полірування певних матеріалів або деталей з особливими вимогами поверхні [95].

ПАЩ широко застосовують при фінішному обробленні дисків газотурбінних двигунів (ГТД), аеродинамічних поверхонь лопаток [96], [97], [98], [99], [100]. Зменшення частки ручної праці при видаленні задирок, отриманих після протягування пазів типу «ластівчин хвіст» і притупленні усіх гострих крайок міжпазових виступів дисків стало можливим після застосування автоматизованої установки з ПАЩ [101]. При ремонтних роботах для відновлення деталей ГТД необхідно видаляти нагар, окислений шар або зношене покриття з складнопрофільних поверхонь деталей із збереженням заданої форми і розмірів. Використання ПАЩ [102] для цих цілей дозволило суттєво скоротити час оброблення.

Механізоване видалення задирок після фрезерування зубчастих коліс та після протягування пазів на ободі дисків ГТД за допомогою ПАЩ на спеціальних установках описується в працях [64], [103], [104]. Застосування цього інструменту при виконанні слюсарних операцій дозволяє істотно збільшити продуктивність оброблення, забезпечивши її високу якість і стабільність незалежно від майстерності і рівня кваліфікації робітника [105].

Високу якість та продуктивність показали ПАЩ при зачистці засобами малої механізації виливків, виготовлених литтям під тиском з алюмінієвих сплавів [106]. У статті [107] представлено нову технологію фінішного оброблення симетричних і асиметричних різальних крайок з використанням щіткових інструментів з алмазними зернами, інтегрованими в волокно.

В статтях [108], [109] наведено технічні дані установки для очищення металевих поверхонь від лакофарбових покриттів, легкої іржі, а також інших забруднень без видалення основного шару матеріалу із застосуванням ПАЩ. Розроблена установка дозволяє очищати не лише листовий і профільний метал, але також використовується для очищення облицювальних плит з мармуру, граніту, кераміки, а також деревини.

Для оптимізації технологічного процесу і підвищення безпеки праці в роботах [110], [111] запропоновано використовувати ПАЩ, які здійснюють оброблення поверхні не тільки торцем волокон, а й їх зовнішньою циліндричною поверхнею. Для практичної реалізації технологічних пропозицій спроектована спеціальна установка для токарного оброблення зовнішньої і внутрішньої гвинтової поверхні. Оброблення ПАЩ дає можливість полірувати відразу всю западину гвинтової поверхні, включаючи і бічні грані витків, при робочому й реверсивному ходах інструменту.

У роботах [112], [113] описується використання ПАЩ для підвищення ефективності фінішного оброблення і підвищення довговічності деталей гідромашин після електрофізичних операцій.

Напрявні з загартованого сірого чавуну грають вирішальну роль в

точності і динамічних характеристиках верстатів. Для досягнення необхідних параметрів застосовують високовартісну технологію їх виготовлення, яка передбачає оброблення на фрезерних та шліфувальних верстатах. У статті [114] запропоновано оброблення напрямних фрезеруванням на верстаті з ЧПК з подальшим поліруванням ПАЩ на цьому ж верстаті без зняття деталі. Цей процес забезпечує необхідну точність і якість поверхні напрямних та суттєво скорочує час їх виготовлення.

Одну з переваг даних інструментів – можливість виключити ручну працю і механізувати фінішне оброблення – використовують при впровадженні ПАЩ в напівавтоматичні або повністю автоматизовані установки [115], [116]. Застосування ПАЩ на обробних центрах для фінішного оброблення поверхонь після фрезерування дозволяє зменшити час виготовлення і собівартість продукції [117], [118].

Враховуючи широкі можливості ПАЩ для використання їх в тому числі в автоматичному режимі і те, що крім каналу хвилеводів, необхідно ще обробляти їх фланці, механізація і автоматизація цих операцій з метою підвищення якості, зменшення впливу робітника, забезпечення рівномірності і стабільності отриманих характеристик поверхонь і скорочення тривалості оброблення є актуальними.

#### **4.1 Автоматизація та механізація фінішного оброблення кутових прямокутних хвилеводів**

Базова технологія фінішного оброблення кутових прямокутних хвилеводів в умовах дрібносерійного виробництва передбачає полірування каналу хвилеводу вручну та засобами малої механізації. При цьому використовують наждачний папір, який має низьку стійкість і потребує частої заміни. Полірування для досягнення необхідної шорсткості проводять по черзі

наждачним папером різної зернистості. Хвилевід встановлюють в лещатах і вручну повертають після оброблення кожної сторони. В даний час через складність конструкції, високі вимоги до якості внутрішнього каналу, використання непродуктивних методів полірування, – операції фінішного оброблення кутових прямокутних хвилеводів мають високу трудомісткість та потребують механізації або часткової автоматизації.

Метою удосконалення фінішного оброблення кутових хвилеводів було спрощення, механізування, зменшення тривалості і вартості проведення цього етапу робіт, заміна швидкозношуваного інструменту на ПАЩ і відхід від ручної праці.

#### **4.1.1 Фінішне оброблення прямокутних кутових хвилеводів на верстатах з ЧПК**

Для хвилеводів, що мають один простий прямокутний згин запропоновано замінити слюсарне оброблення наждачним папером різної зернистості (базова технологія) (табл. 4.1) поліруванням ПАЩ на горизонтально-фрезерному верстаті з ЧПК [119]. Полірування каналу та фланців здійснювалось на тому ж верстаті, на якому проходило фрезерне оброблення фланців без зняття хвилеводу. Це дозволило виключити ручне полірування, зменшити загальний час виготовлення та підвищити якість оброблення. Для оброблення кутових хвилеводів типу 1...3 (рис. 2.3) перерізом 72×34 мм, які мають один вигин, виготовлених з алюмінію та латуні, було розроблено технологічні рекомендації щодо полірування та сконструйоване спеціальне пристосування для верстату з ЧПК.

Таблиця 4.1

## Удосконалення фінішного етапу виготовлення хвилеводів

Етапи виготовлення	
за базовою технологією	за технологічними рекомендаціями
Зварювання кутового переходу із секцій труби, рихтування каналу	Зварювання кутового переходу із секцій труби, рихтування каналу
Полірування каналу наждачним папером на оправці	Зварювання фланців
Зварювання фланців	Дорнування каналу зі сторони фланців
Дорнування каналу зі сторони фланців	Оброблення на горизонтально-фрезерному верстаті з ЧПК: - фрезерування площини фланців, канавки, свердлення та розгортання отворів; - полірування фланцю дисковою ПАЩ; - полірування каналу йоржиковою ПАЩ.
Полірування каналу наждачним папером на оправці на довжині 40 мм від фланцю	
Фрезерування площини фланців	
Зачистка після фрезерування	
Свердління отворів у фланцях по кондуктору, розгортання отворів	
Фрезерування канавки на фланцях	
Зачистка після фрезерування	
Полірування фланця вручну наждачним папером	

Оброблення на горизонтально-фрезерному верстаті з ЧПК передбачає встановлення деталі в спеціальне пристосування для фрезерування 1 (рис. 4.1, а). Центрування деталі здійснюється по каналу за допомогою установка 2. Установ 2 на пристосуванні 1 центрується штифтами 5 та фіксується затискачами 6. Хвилевід притискається до упорів 3 і фіксується по фланцю затискачем 4. Установ 2 перед обробленням знімається і деталь

обробляється згідно програми. Після оброблення першого фланцю та каналу здійснюється переналаштування хвилеводу для оброблення наступного фланцю та переходи повторюються знову.

Для практичної реалізації фінішного оброблення на верстаті з ЧПК в магазин було встановлено два типи ПАЩ [120] фірми «Osborn»: дискову та йоржикову (рис. 4.1, б). Послідовне застосування цих ПАЩ (рис. 4.2, а) забезпечило повне видалення дефектів поверхні фланцю та каналу.

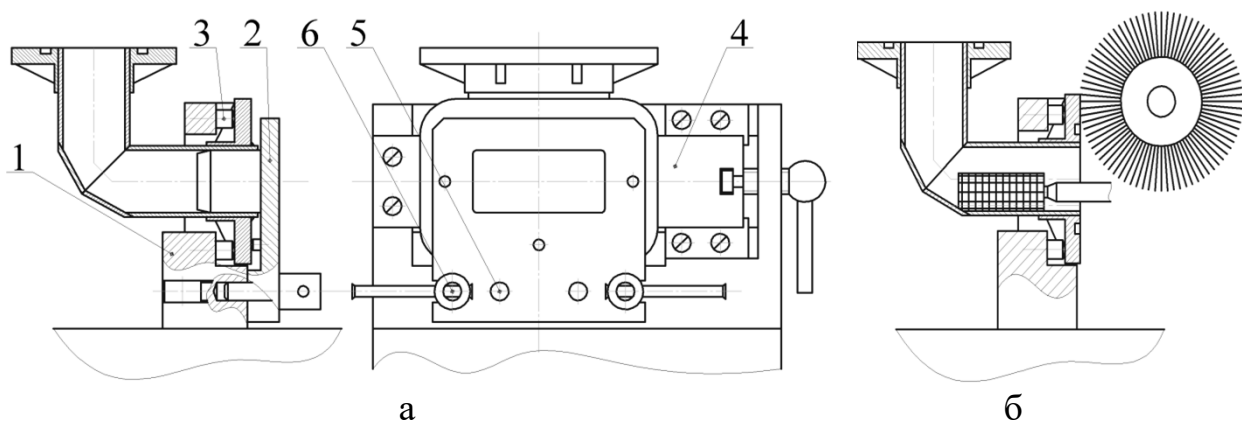
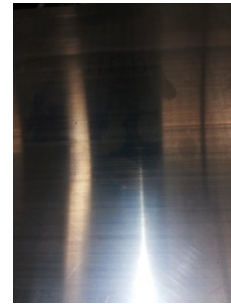


Рис. 4.1. Ескіз пристосування (а) та схема оброблення (б) хвилеводу на верстаті з ЧПК

Автоматичне полірування ПАЩ хвилеводів дозволило скоротити кількість переходів фінішного оброблення, зменшити частку ручної праці, підвищити якість, зменшити тривалість і собівартість оброблення (табл. 4.2). Контроль якості поверхні показав поліпшення шорсткості в 2...3 рази (рис. 4.2, б) в порівнянні з базовою технологією оброблення. Режими різання встановлювали, виходячи з точки зору отримання найбільш сприятливих властивостей поверхні і поверхневого шару та продуктивності (п. 2.3, 3).



а



б

Рис. 4.2. Оброблення ПАЩ хвилеводу на верстаті з ЧПК (а) та поверхня каналу після полірування ПАЩ (б)

Таблиця 4.2

**Результат розрахунку економічної ефективності фінішного оброблення дослідних хвилеводів з одним згином на верстаті з ЧПК**

Параметр	Варіант оброблення хвилеводів	
	Вручну	На верстаті з ЧПК
Основний час оброблення, хв	28	5,14
Допоміжний час, хв	27,2	10,2
Додатковий час, хв	5,52	1,53
Штучний час, хв	60,72	16,87
Витрати на електроенергію, грн	0,59	3,17
Витрати на інструмент, грн	11,36	0,36
Амортизаційні відрахування, грн	16,10	9,38
Заробітна плата, грн	54,08	11,27
Податкові нарахування, грн	21,36	4,45
Премія, грн	10,82	2,25
Собівартість, грн	114,3	30,89

#### **4.1.2 Механізація полірування каналу прямокутних хвилеводів S-діапазону складної конструкції**

Для удосконалення фінішного оброблення і заміни ручної праці на механізовану при поліруванні каналу хвилеводів складної конструкції, які мають більш одного вигину запропоновано замінити операцію послідовного ручного полірування наждачним папером на оправці різної зернистості за допомогою засобів малої механізації поліруванням йоржиковою ПАЩ на спеціальній установці, де рух інструменту забезпечується копіром (рис. 4.3, 4.4).

Механізована установка являє собою конструкцію, яка монтується на верстаку. Хвилевід 6 встановлюється на візок 1 і фіксується гвинтовим затискачем 2. Візок 1 має можливість повздовжнього переміщення по напрямних 3. Це переміщення обмежується упорами 4 з можливістю перезакріплення, для встановлення необхідного переміщення деталі 6 відносно щітки 5. У шпиндель 16 установки встановлюється щітка 5, яка затискається цанговим патроном 7. Деталь 6 на візку 1 переміщується в бік шпинделя 8, в оброблювальний канал входить щітка 5. Обертання шпинделя 8 забезпечує двигун 10 через ремінну передачу 16. Натяг ременів та утримання шпинделя 8 забезпечує важіль 17. Шляхом плавного переміщення ручки 9 у вертикальній і горизонтальній площині по прямокутній траєкторії здійснюються оброблення каналу.

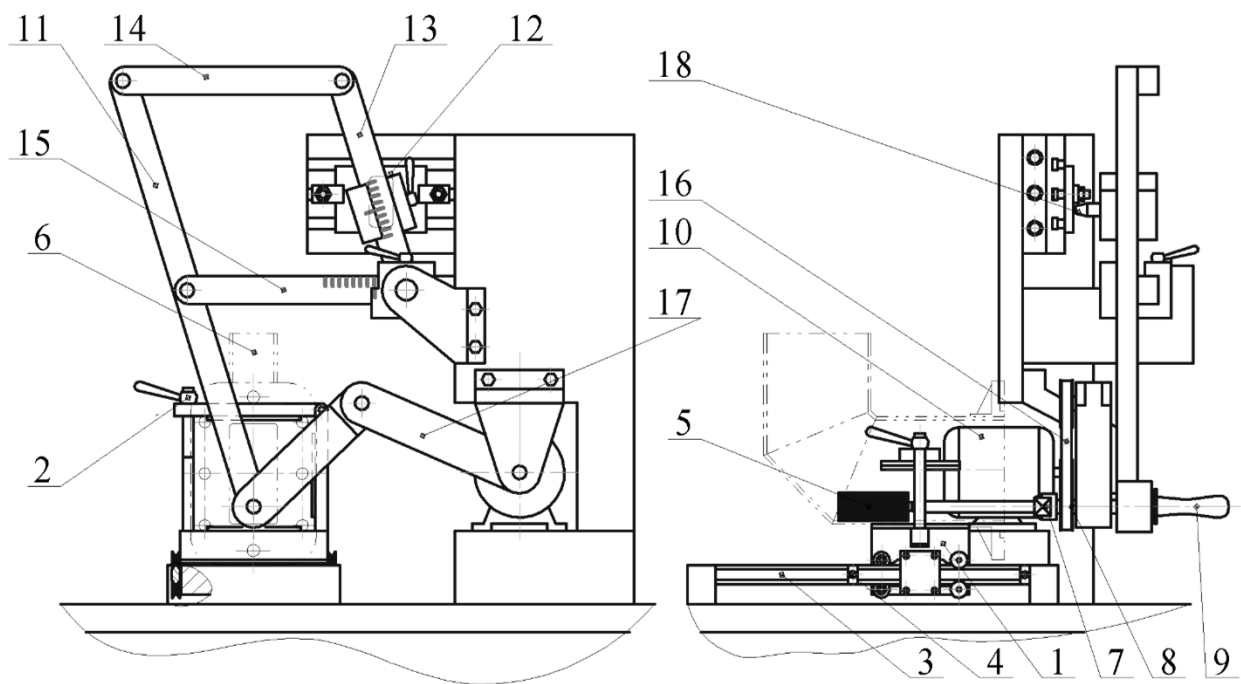


Рис. 4.3. Схематичне зображення спеціальної установки

При необхідності, деталь 6 переміщується на санчатах 1 до шпинделя 8 або від нього для збільшення площі оброблення. Рухи по прямокутному контуру шпинделя 8 обмежуються через важелі 11, 13, 14, 15 копіром 12. Копір 12 являє собою прямокутний отвір з заокругленими кутами, а ролик 18, рухаючись по цьому отвору, імітує рух щітки 5. Шляхом зміни положення рухомих важелів 13, 15 встановлюють необхідний натяг ПАЩ за рахунок збільшення або зменшення траєкторії руху. Кінематика руху механізованої установки схожа з роботою гравіювального копіювально-фрезерного верстата.

Для візуального контролю якості полірування шпиндель зупиняють, хвилевід виводять із зони оброблення і канал оглядають на наявність дефектів.

Ця механізована установка є універсальною для оброблення навколошовних зон каналу всіх типів конструкцій хвилеводів, не тільки прямокутного перерізу, шляхом встановлення необхідного копіру. Вартість виготовлення цієї установки є невисокою, через її достатньо просту конструкцію.



Рис. 4.4. Прототип спеціальної установки, виконаний на базі гравірувального копіювально-фрезерного верстату 6Г463

Техніко-економічний розрахунок фінішного оброблення хвилеводів на прототипі установки (рис. 4.4) показав, що оброблення ПАЩ при забезпеченні кращої якості (табл. 4.3), мало меншу тривалість і значно меншу собівартість в порівнянні з базовою технологією (табл. 4.4).

Таблиця 4.3

**Середнє значення шорсткості при обробленні дослідних хвилеводів**

Варіант оброблення	Шорсткість $Ra$ , мкм	
	Повздожня	Поперечна
Наждачним папером (P120) на оправці засобами малої механізації	2,1	1,9
Йоржиковою ПАЩ (P120) на спеціальній установці	1,1	1,0

Таблиця 4.4

**Результат розрахунку економічної ефективності фінішного оброблення дослідних хвилеводів на спеціальній установці**

Параметр	Варіант оброблення хвилеводів	
	Вручну	На спеціальній установці
1	2	3
Основний час оброблення, хв	28	12,5
Допоміжний час, хв	27,2	7,4
Додатковий час, хв	5,52	1,99
Штучний час, хв	60,72	21,89
Витрати на електроенергію, грн	0,59	0,53
Витрати на інструмент, грн	11,36	0,37
Амортизаційні відрахування, грн	16,10	31,25
Заробітна плата, грн	54,08	14,62
Податкові нарахування, грн	21,36	5,78
Премія, грн	10,82	2,92
Собівартість, грн	114,3	55,47

Для виконання цієї операції також використали режими, визначені в п. 3. Але при інтенсифікації оброблення за рахунок підвищення швидкості обертання  $V$  і збільшення натягу  $i$  ПАЩ, їх зношення стало невпинно прогресувати. Тому з'явилась необхідність в дослідженні зношення цих інструментів, інформації щодо якого в науковій літературі недостатньо.

### 4.1.3 Техніко-економічний розрахунок варіантів виконання полірування каналу прямокутних кутових хвилеводів на верстаті з ЧПК

Розглянемо полірування хвилеводів (полірування двох фланців, двох калібруючих частин на довжині 40...45 мм від фланцю, місце зварювання з двох боків) за трьома варіантами:

1. Полірування вручну наждачним папером різної зернистості каналу за допомогою прямої електричної шліфмашинки та фланцю на верстаку;
2. Полірування йоржиковою та дисковою ПАЩ на верстаті з ЧПК;
3. Полірування йоржиковою та чашковою ПАЩ на спеціальній механізованій установці.

Початкові дані:

- кутовий хвилевід перерізом  $72 \times 34$  мм (рис.4.5);
- зернистість наждачного паперу P120, P180;
- зернистість ПАЩ P120;
- розміри оправки з наждачним папером ( $D=15$  мм;  $L=30$  мм) та листа наждачного паперу для ручного полірування фланцю ( $L=0,5$  м,  $H=0,2$  м);
- розміри йоржикової ПАЩ ( $D=30$  мм;  $L_{р.ч.}=65$  мм,  $d=0,6$  мм);
- розміри дискової ПАЩ ( $D=100$  мм;  $B=15$  мм,  $d=1,2$  мм);
- розміри чашкової ПАЩ ( $D=75$  мм;  $B=8$  мм,  $d=1,2$  мм);
- довжина оброблення калібруючої частини каналу хвилеводу 40...45 мм від фланцю, розмір фланцю –  $90 \times 130$  мм, довжина навколошовної зони – 30...35 мм;
- кількість проходів ПАЩ при обробленні кожної зони каналу та фланцю –  $n=5$ ;
- кількість проходів наждачним папером зернистістю P120 при обробленні кожної зони каналу, фланцю  $n=5$ , для зернистості P180:  $n=3$ ;
- подача ПАЩ для верстата з ЧПК –  $S=1$  м/хв, для оброблення на спеціальній установці та прямою шліфмашинкою – ручна;

- швидкість різання  $V=12$  м/с;
- натяг для ПАЩ –  $i=2$  мм.

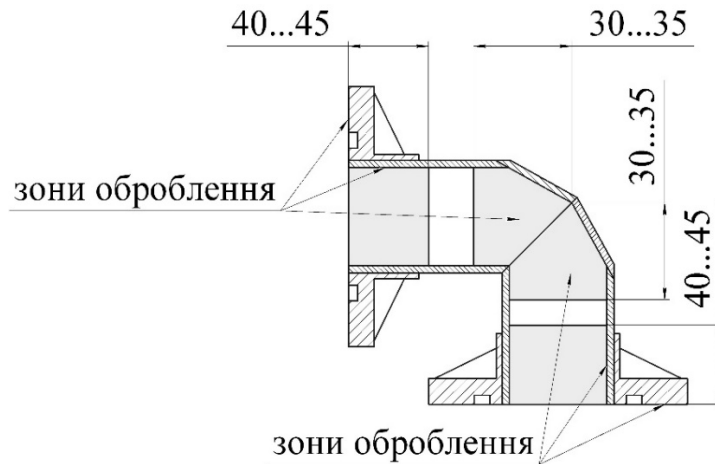


Рис. 4.5. Ескіз кутового хвилеводу

Умова оптимальності варіанту технологічної операції [64]:

$$C = \min(C_1; C_2; C_3), \text{ грн.}, \quad (4.1)$$

де  $C_1 \dots C_3$  – собівартість фінішного оброблення кутового хвилеводу, грн.

Собівартість полірування хвилеводу розраховується за формулою [64]:

$$C = 3 + H + A + E + I + П, \text{ грн.}, \quad (4.2)$$

де  $3$  – заробітна плата робітника, грн;

$H$  – податкові нарахування, складають 39,5% від заробітної плати, грн;

$A$  – амортизаційні відрахування в перерахунку на одну деталь, грн;

$E$  – витрати на електроенергію, грн;

$I$  – витрати на інструмент, грн;

$П$  – премія складає 20% від заробітної плати, грн.

Заробітна плата робітника [64]:

$$Z = C_T \cdot t_{um} / 60, \text{ грн}, \quad (4.3)$$

де  $C_T$  – погодинна ставка працівника, грн/год; для ручного оброблення робітників 6-го розряду 53,44 грн/год; для оброблення на установці слюсареві 4-го розряду та на верстаті з ЧПК оператору 4-го розряду – 40,08 грн/год;

$t_{um}$  – штучний час, хв, розраховується за формулою:

$$t_{um} = t_o + t_{\partial on} + t_{\partial od}, \text{ хв}, \quad (4.4)$$

де  $t_o$  – основний час, що витрачається безпосередньо на оброблення, хв;

$t_{\partial on}$  – допоміжний час, що витрачається на установку, перевстановлення і зняття оброблюваних деталей і допоміжного оснащення, хв;

$t_{\partial od}$  – додатковий час, хв, приймається 10% від суми основного і допоміжного часу.

Середній основний час, виміряний хронометром на п'яти зразках, ручного оброблення хвилеводу послідовно наждачним папером різною зернистістю становив 28 хв, а на спеціальній механізованій установці – 12,5 хв. Для оброблення каналу хвилеводу на верстаті з ЧПК основний час розраховували за формулою:

$$t_o = \frac{L}{S} \cdot n \cdot k, \text{ хв}, \quad (4.5)$$

де  $n$  – кількість проходів інструментом;

$k$  – кількість зон оброблення;

$L_k = 0,072 + 0,034 + 0,072 + 0,034 = 0,212 \text{ м}$  – довжина оброблення калібруючої частини каналу та зони кутового вигину;

$L_\phi = 0,09 \text{ м}$  – довжина оброблення фланцю.

$$t_o = \frac{0,212}{1} \cdot 5 \cdot 4 + \frac{0,09}{1} \cdot 5 \cdot 2 = 5,14, \text{ хв}.$$

Допоміжний час  $t_{\text{доп}}$  залежно від варіанту оброблення розраховується по різному. Для варіантів 2 і 3 розраховується за формулою:

$$t_{\text{доп}} = (t_y + t_{\text{зм}} + t_3) \cdot j, \text{ хв}, \quad (4.6)$$

де  $t_y$  – час встановлення деталі в затискний пристрій, хв;  
 $t_{\text{зм}}$  – час зміни інструменту, хв;  
 $t_3$  – час зняття деталі з затискного пристрою, хв;  
 $j$  – кількість переходів.

Для оброблення наждачним папером допоміжний час  $t_{\text{доп}}$  розраховується за формулою:

$$t_{\text{доп}} = (t_y + q \cdot t_n + i \cdot t_i + t_3) \cdot j + (t_{\text{зм}} + i \cdot t_i) \cdot j, \text{ хв}, \quad (4.7)$$

де  $t_y$  – час встановлення деталі в затискний пристрій, хв;  
 $t_n$  – час переустановлення деталі в затискному пристрої, хв;  
 $q$  – число переустановлень деталі в процесі оброблення, хв;  
 $t_i$  – час заміни зношеного інструменту, хв;  
 $i$  – кількість змін зношеного інструменту, хв;  
 $t_3$  – час зняття деталі із затискного пристрою, хв;  
 $j$  – кількість переходів;  
 $t_{\text{зм}}$  – час зміни інструменту, хв.

Витрати на електроенергію розраховуються за формулою:

$$E = P_{\Sigma} \cdot t_o \cdot E_{\text{СТ}} / 60, \text{ грн} \quad (4.8)$$

де  $E_{\text{СТ}}$  – вартість електроенергії на виробництві, складає 1,68 грн за кВт/год;

$P_{\Sigma}$  – сумарна потужність вживаного електроустаткування, кВт.

Вартість інструменту, що враховується в собівартості деталі,

визначається його видом і кількістю, достатньою для виконання оброблення.

Для ручного оброблення ця вартість розраховується за формулою:

$$I = C_I \cdot t_o / K_D, \text{ грн}, \quad (4.9)$$

де  $C_I$  – вартість одного інструменту (вартість листа наждачного паперу  $23 \times 28$  см дорівнює 5,20 грн для оброблення фланцю, а для оброблення на шліфувальній оправці він розрізається на 28 частин; вартість однієї йоржикової ПАЩ складає 250 грн; вартість однієї чашкової ПАЩ складає 630 грн);  
 $K_D$  – стійкість інструменту, хв.

Амортизаційні відрахування в перерахунку на одну деталь залежать від терміну експлуатації і розраховуються за формулою:

$$A = O_{cm} / (N \cdot M), \text{ грн}, \quad (4.10)$$

де  $O_{cm}$  – вартість обладнання, грн;

$M$  – термін експлуатації, рік;

$N$  – річна програма випуску хвилеводів, шт/рік.

При ручному обробленні використовується пряма шліфмашинка Makita GD0800C, вартість якої дорівнює 10300 грн. Вартість спеціальної установки складає 100000 грн. Оброблення на горизонтально-фрезерному верстаті, виконується на наявному обладнанні, яке використовується для безлічі виготовляємих деталей, в тому числі і фланців, і потребує лише спеціального пристосування, вартість якого складає 30000 грн.

Отримані результати зведено в табл. 4.5.

Економічний ефект від використання запропонованих методів (варіант 2,3) по відношенню до базового (варіант 1) розраховується за формулою:

$$C_e = (C_1 - C_i) \cdot N, \text{ грн}, \quad (4.11)$$

де  $i=1...3$  – варіант оброблення.

Таблиця 4.5

**Розрахунок економічної ефективності варіантів полірування хвилеводів**

Параметр	Позначення	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5
Основний час оброблення, хв	$t_o$	28	5,14	12,5
Час встановлення деталі, хв	$t_y$	1	3	1,2
Час переустановлення деталі, хв	$t_n$	1	0	0
Час зняття деталі, хв	$t_z$	0,4	0,6	0,5
Кількість переустановлень деталі в процесі оброблення	$q$	4	0	0
Час зміни інструменту, хв	$t_{зм}$	2,5	1,5	2
Кількість переходів	$k$	2	2	2
Час заміни зношеного інструменту (оброблення каналу), хв	$t_i$	0,7	0	0
Кількість змін зношеного інструменту (оброблення каналу)	$b$	8	0	0
Час заміни зношеного інструменту (оброблення фланцю), хв	$t_i$	1,5	0	0
Кількість змін зношеного інструменту (оброблення фланцю)	$i$	1	0	0
Допоміжний час, хв	$t_{доп}$	27,2	10,2	7,4
Додатковий час, хв	$t_{дод}$	5,52	1,53	1,99
Штучний час, хв	$t_{шт}$	60,72	16,87	21,89
Сумарна потужність електродвигунів, кВт	$P_{\Sigma}$	0,75	22	1,5
Вартість електроенергії грн за кВт/год	$E_{СТ}$	1,68	1,68	1,68

Продовження табл. 4.5

1	2	3	4	5
Витрати на електроенергію, грн	$E$	0,59	3,17	0,53
Вартість інструменту (оброблення каналу), грн	$Ц_I$	0,18	250	250
Стійкість інструменту (оброблення каналу), хв	$K_D$	3	6000	6000
Вартість інструменту (оброблення фланцю), грн	$Ц_I$	5,2	630	630
Стійкість інструменту (оброблення фланцю), хв	$K_D$	10	10000	10000
Витрати на інструмент, грн	$I$	11,36	0,36	0,37
Вартість устаткування, грн	$O_{CT}$	10300	30000	100000
Термін експлуатації, рік	$M$	1	5	5
Річна програма випуску, шт/рік	$N$	640		
Амортизаційні відрахування, грн	$A$	16,10	9,38	31,25
Погодинна ставка робітника, грн/год	$C_T$	53,44	40,08	40,08
Заробітна плата, грн	$З$	54,08	11,27	14,62
Податкові нарахування, грн	$H$	21,36	4,45	5,78
Премія, грн	$П$	10,82	2,25	2,92
Собівартість, грн	$C$	114,3	30,89	55,47
Економічний ефект, грн	$C_e$	-	53386	37649

#### 4.2 Аналіз проблем виробничого впровадження фінішного оброблення ПАЩ хвилеводів

Аналіз режимів оброблення ПАЩ, рекомендованих такими виробниками інструменту, як «Lessmann», «Abtex», «Хебес», «Osborn»,

«Weiler» згідно каталогам [120], [121], [122], [123], [124], виявив, що максимальні частоти обертання інструменту в перерахунку на швидкість оброблення складають 30...75 м/с. В той же час автори більшості досліджень інструментів на основі полімерно-абразивних волокон рекомендують швидкість оброблення ПАЩ призначати до 20 м/с в залежності від оброблюваного матеріалу [64], [93].

При інтенсифікації виробництва для зменшення часу оброблення і підвищення продуктивності, в діапазоні зазначених виробником інструменту режимів, прагнуть призначити максимальні їх значення, що призводить до різкого зростання зношення волокон.

При використанні ПАЩ на верстатах з ЧПК необхідною умовою є моніторинг зношення полімерно-абразивних (ПА) волокон щітки, яке обмежує міжналаштувальний період оброблення, який потребує періодичного коректування положення інструменту для забезпечення стабільності роботи. Оцінка зносостійкості інструменту дозволяє ефективніше проводити своєчасну піднастройку щіткового інструмента, планову заміну, зменшити кількість бракованих деталей через його зношення. Але до теперішнього часу інтенсивність зношування ПАЩ при обробленні різних матеріалів істотно не вивчено.

Окрім нормального зношення, яке проявляється укороченням волокон, і, відповідно, зменшенням діаметра ПАЩ, іноді несприятливе поєднання граничних режимів оброблення таких як, натяг, швидкість, з критичними значеннями параметрів інструменту (виліт, діаметр волокна) може призводити до руйнування та відриву волокон в місці закріплення (рис. 4.6).

Такий вид зношення згадується в джерелах [84], [125] та поширено у металевих щіток, а у ПАЩ зустрічається вкрай рідко. Одиначне руйнування волокон щітки може призводити до ланцюгової реакції – масового їх виривання. Це є небезпечним для персоналу при обробленні з відкритою робочою зоною, і також приводить до різкого зниження продуктивності та

нестабільного оброблення в автоматичних установках.



Рис. 4.6. Приклади втрати волокон дискової ПАЩ в місці закріплення внаслідок порушення умов експлуатації

Втрата частини волокон означає втрату працездатного стану ПАЩ. Імовірною причиною відриву волокон в закріпленні може бути перевищення температури гранично допустимої для полімерної основи через циклічну деформацію (вигин) або від тепла з зони різання [84]; втомне руйнування [126] в процесі експлуатації. Пошук технологічних обмежень при експлуатації щіткових інструментів, їх чітке визначення є актуальною задачею.

#### **4.3 Технологічні рекомендації вибору параметрів ПАЩ та режимів фінішного оброблення прямокутних кутових хвилеводів**

Величина активних втрат у хвилеводі істотно залежить від якості оброблення (шорсткості) струмопровідних поверхонь, відсутності дефектів поверхні і стабільності форми перерізу. Основним завданням фінішного оброблення прямокутних кутових хвилеводів є полірування навколошовних зон. Новим інструментом для вирішення цих питань є ПАЩ.

За результатами проведених досліджень можливо сформулювати загальні принципи, якими необхідно керуватися при виборі конструкції ПАЩ, умов і режимів оброблення для полірування каналу та фланців хвилеводів в такому порядку:

1) звичайна конструкція ПА йоржикових щіток має гострий металевий кінчик (рис. 4.7, а), що може при слюсарному обробленні кутових хвилеводів призвести до дряпання стінок. Тому необхідно застосовувати спеціальну конструкцію щітки з торцевими волокнами або захисним ковпачком (рис. 4.7, б) із полімерного матеріалу;



Рис. 4.7. Звичайна (а) та модифіковані (б) йоржикові ПАЩ

2) максимальний зовнішній діаметр та довжина робочої частини йоржикової ПАЩ мають стандартизовані значення та визначаються розмірами перерізу каналу хвилеводу. Необхідно застосовувати йоржикові щітки з зовнішнім діаметром меншим, як мінімум, на 3...5 мм за величину вузької стінки та достатнім для якісного оброблення кутів перерізу каналу;

3) зовнішній діаметр дискової ПАЩ призначають в діапазоні 150..200 мм та ширину робочої частини в діапазоні 15...20 мм;

4) матеріал зерен абразивного наповнювача ПА волокон залежить від матеріалу хвилеводів. Для полірування хвилеводів з алюмінію та латуні необхідно використовувати абразивні зерна з карбиду кремнію;

5) оптимальне поєднання достатньої якості і високої продуктивності оброблення каналу алюмінієвих та латунних хвилеводів S-діапазону забезпечує зернистість ПАЩ P120...P180;

6) пружність щітки визначається діаметром  $d_B$  волокон та вилітом  $L_B$ . Ці два параметри залежні один від одного: при збільшенні діаметру волокон бажано збільшувати і їх виліт;

7) натяг  $i$  при обробленні слід призначати в інтервалі 1,5...2 мм і при зношенні волокон має дотримуватись співвідношення  $i_{max} \leq L_B/10$ , яке забезпечує раціональну продуктивність і високу циклічну довговічність інструменту;

8) швидкість різання для полірування хвилеводів з алюмінію та латуні слід застосовувати в діапазоні 15...20 м/с. Через те, що ці матеріали мають високу теплопровідність і швидко виводять тепло із зони оброблення, то застосування охолоджувальних середовищ не є обов'язковим;

9) раціональне значення подачі складає не менше 1 м/хв. Подача нижче цього значення призводить до інтенсивного розігріву зони оброблення і може привести до плавлення волокон щітки.

Дотримання наведених принципів дозволяє забезпечити необхідну шорсткість поверхні і високу стійкість, циклічну довговічність ПАЩ та продуктивність оброблення.

#### 4.4 Висновки

1. Запропоновано вдосконалення фінішного етапу виготовлення хвилеводів з заміною ручної слюсарної операції обробленням на верстаті з ЧПК. Розроблено спеціальне пристосування для встановлення та закріплення хвилеводів на верстаті з ЧПК. Спроектовано механізовану установку для полірування каналу хвилеводів складної просторової форми на основі гравіювально-фрезерного верстата.

2. Автоматизація фінішного оброблення за допомогою ПАЩ на верстаті з ЧПК трьох типів дослідних хвилеводів дозволила скоротити більше, ніж у

5 разів тривалість і в 3,7 рази собівартість в порівнянні з базовою технологією ручного оброблення. А впровадження спеціальної механізованої установки для фінішного оброблення хвилеводів за допомогою ПАЩ скоротило в 2,2 рази час полірування та в 2 рази собівартість, та дозволило виключити з процесу людський вплив на точність і якість оброблення.

3. Автоматичне керування процесом оброблення визиває необхідність дослідження процесу зношення волокон ПАЩ, визначення умов оброблення, які забезпечують стале помірне зношення, та технологічних обмежень, які запобігають відриву волокон в місці закріплення. Це разом здатне зберегти і подовжити працездатний стан ПАЩ, підвищити продуктивність оброблення на верстатах з ЧПК, зменшити число замін щіток.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Федорова Л. А., Гладкий Н. А. Исследование дисперсии и затухания волн в волноводах : методические указания к выполнению лабораторной работы. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2003. 27 с.
2. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства : учеб. пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1974. 304 с.
3. Ушакова С. Е., Сергеев В. С., Ключников А. В., Привалов В. П. : Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов. Москва: Радио и связь, 1986. 256 с.
4. Зверинцева Л. В. Инструмент для абразивного полирования внутренней поверхности волноводов космических аппаратов. *Вестник СибГАУ*. 2008. Т. 1, № 18. С. 162–166.
5. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский и др. ; под общей ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. Москва: Машиностроение, 2014. 1216 с.
6. Доклад по курсу: «Технология РЭС». URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-334085.html> (дата звернення: 18.11.2020).
7. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры / под. ред. Р. Г. Валамов. Москва: Советское радио, 1972. 856 с.
8. Зверинцев В. В., Кочкина Г. В., Чураков Д. В., Банщикова М. Н. Анализ шероховатости и дефектов внутренних поверхностей изогнутых волноводов. *Вестник СибГУ*. 2015. Т. 1. С. 25–28.
9. Зверинцева Д. В., Сысоев А. С., Сысоев С. К., Юнг П. А. Отделка внутренних поверхностей волноводов для космических аппаратов. *Вестник СибГАУ*. 2006. № 4. С. 56–59.
10. Байгурин, А. С. Расчет, конструирование и изготовление волноводных устройств и объемных резанаторов. Москва: ГЭИ, 1963. 320с.

11. Binke H., Qi J. Accurate modeling of conductor rough surfaces in waveguide devices. *Electronics*. 2019. Vol. 8, No 3. P. 269. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8030269>.

12. Popalghat S., Chaudhari A., Patil P. Effect of surface roughness on electromagnetic propagation through waveguides. *Indian journal of pure and applied physics*. 1999. Vol. 37, No 11, P. 848–852. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289391074\\_Effect\\_of\\_surface\\_roughness\\_on\\_electromagnetic\\_propagation\\_through\\_waveguides](https://www.researchgate.net/publication/289391074_Effect_of_surface_roughness_on_electromagnetic_propagation_through_waveguides) (дата звернення: 18.11.2020).

13. Seltzman A.H., Wukitch S.J. RF losses in selective laser melted GRCop-84 copper waveguide for an additively manufactured lower hybrid current drive launcher. *Fusion Engineering and Design*. 2020. Vol. 159. P. 111762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111762>.

14. Wang R., Cu W. A rapid estimation of the conductor loss in the rectangular waveguide with rough surface. *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications : materials 4th IEEE International Symposium* (Beijing, 1-3 Nov. 2011). Beijing, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAPE.2011.6156144>.

15. Lomakin K., Gold G., Helmreich K. Analytical waveguide model precisely predicting loss and delay including surface roughness. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66(6) P. 2649–2662. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2827383>.

16. Chen J., Binke H. Effects of surface roughness on lossy rectangular waveguide. *Applied Computational Electromagnetics Society*. 2012. Vol. 27, No 7. P. 610–619. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289859311\\_Effects\\_of\\_Surface\\_Roughness\\_on\\_Lossy\\_Rectangular\\_Waveguide](https://www.researchgate.net/publication/289859311_Effects_of_Surface_Roughness_on_Lossy_Rectangular_Waveguide) (дата звернення: 18.11.2020).

17. Binke H., Chen J., Jiang W. Effects of surface roughness on TM modes in rectangular waveguide. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2009. Vol. 30, P. 717–726. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-009-9488-4>.

18. Hatano S., Nihei F. Measurement of surface resistance in oversized circular waveguide at millimeter wavelengths. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1976. Vol. 24(11). P. 886–887. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1976.1128987>.

19. Benson F.A. Waveguide attenuation and its correlation with surface roughness. *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering*. 1953. Vol. 100(64). P. 85-90. DOI: <https://doi.org/10.1049/pi-3.1953.0017>.

20. Accurate consideration of metal losses at waveguide junctions using admittance and impedance integral equation formulations / M. Taroncher, et.al. *Radio Science*. 2005. Vol. 40(6). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004RS003225>.

21. Литвиненко Д. С., Дорофеева Е. С., Зверинцева Л. В. Анализ формул определения коэффициента затухания для прямоугольного волновода. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. Т.1, С. 44–46.

22. Бирюков В. В. Расчёт потерь в прямоугольном волноводе с шероховатыми экранирующими поверхностями. *Антенны*. 2016. №7, С. 53–57.

23. Бирюков В. В., Грачев В. А.: Влияние неидеальности (шероховатости) поверхности стенок волновода на его характеристики. *Антенны*. 2018. №1, С. 48–52.

24. Morgan S. P. Effects of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies. *Journal of Applied Physics*. 1949. № 20, P. 352–362. DOI: [10.1063/1.1698368](https://doi.org/10.1063/1.1698368).

25. Якимов А. Н., Назаров С. В. Оценка допустимой шероховатости обработки токонесущих поверхностей на СВЧ *Надёжность и качество : труды международного симпозиума(г. Пенза, 2008 г.)*. Пенза. 2008. Т. 2. С. 112–114.

26. Черенков В. С., Иваницкий А. М. Техническая электродинамика :

конспект лекций. Одесса: ОНАЗ им. А.С. Попова., 2006. 160 с.

27. Семенов Н. А. Техническая электродинамика : учеб. пособие для вузов. Москва: Связь, 1973. 480 с.

28. Тришин П. Р. Проблемы отделочной обработки внутреннего канала алюминиевых волноводов в местах сварки (пайки). *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2019)*: матеріали тез доповідей ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 14–16 трав. 2019 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2019. Т. 1. С. 88–89.

29. Бровка А. В. Проблемы автоматической сварки волноводов радиолокационных станций. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2013. Т. 1. С. 55–54.

30. Вибрационная обработка. Вибрационное полирование. URL: <http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/05/vibracionnoe-polirovanie/> (дата звернення: 18.11.2020).

31. Ультразвуковая полировка металла. URL: <http://solidiron.ru/obrabotka-metalla/polirovka/ultrazvukovaya-polirovka-metalla.html> (дата звернення: 18.11.2020).

32. Зверинцева Л. В. Инструмент для абразивного полирования внутренней поверхности волноводов космических аппаратов. *Вестник СибГАУ*. 2008. Вып 1(18). С. 162–166.

33. Зверинцева Л. В., Сысоев С. К. Абразивное полирование заготовок волноводов эластичным инструментом : монография. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2013. 180 с.

34. Зверинцева Л. В. Уменьшение шероховатости токонесущей поверхности волноводов способом абразивного полирования эластичным инструментом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02. Красноярск, 2009. 19 с.

35. Кочкина В. А., Багаева О. И., Зверинцева Л. В., Кочкина Г. В. Исследование процесса обезжиривания латунных волноводов сложной формы после полирования абразивной средой. *Актуальные проблемы авиации и*

*космонавтики*. 2016. Т. 1. С. 925–927.

36. Темкина Б. Я. Прогрессивная технология нанесения гальванических и химических покрытий. Москва: МАШГИЗ, 1962. 176 с.

37. Стерехова Д. И., Трифанов И. В. Методы обеспечения шероховатости на поверхности каналов волноводов КВЧ-диапазона. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2010. Т. 1. С. 293.

38. Электроплазменная полировка нержавеющей стали URL: <https://steelfactoryrus.com/elektroplazmennaya-polirovka-nerzhaveyushey-stali/> (дата звернения: 19.11.2020)

39. Менухова Ю. Н., Трифанов И. В. Повышение качества поверхности каналов волноводов. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2015. Т. 2 С. 101–102.

40. Оборина Л. И., Менухова Ю. Н., Исмаилов Б. Н., Трифанов И. В. Анодно-абразивное полирование каналов волноводов. *Решетневские чтения*. 2015. Т. 1. С. 473–474.

41. Грачева М. А., Трифанов И. В. Технологическое обеспечение качества поверхности каналов волноводных изгибов анодно-абразивным полированием. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2016. Т. 2. С. 141–143.

42. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А. Отделочно-зачистная обработка деталей. Москва: Машиностроение, 1979. 216 с.

43. Богуслаев В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Д. Финишные технологии обработки деталей ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2009. №1. С. 71–78.

44. Богуслаев В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф., Корневский Е. А. Технология производства авиационных двигателей. Запорожье: Издательский комплекс «Мотор Сич». 2000. 944 с

45. Шманев В. А., Шулепов А. П., Мещеряков А. В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. Москва: Машиностроение, 1995. 142 с.

46. «Вапорбласт». Каталог оборудования для гидроабразивной прокатки

(жидкий напильник) и гидродробементной очистки (бескислотного травления). URL: <http://vaporblast.ru/> (дата звернения: 19.11.2020).

47. Tryshyn, P.R., Honchar N.V., Lahovskyi, O.V. Simulation of processing with abrasive substance of angular rectangular waveguide channel. *Science, engineering and technology: global trends, problems and solutions: international scientific and practical conference (Prague, 12–13 March 2021)*. Wloclawck, 2021. P. 103–106.

48. Левко В. А., Харин Д.О. Абразивно-экструзионная обработка полидисперсной рабочей средой. *Решетневские чтения*. 2013. Т.2. С. 424–425.

49. Сысоева Л. П. Абразивно-экструзионная обработка алюминиевых сплавов *Вестник ЮУрГУ*. 2015. Т. 15. № 2. С. 40–50.

50. Левко В. А., Нуждова Е. О., Харин Д. О. Конструктивные особенности устройств, формирующих характер потока рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке. *Решетневские чтения*. 2009. Т.1. С. 335–336.

51. Зверинцев В. В., Зверинцева Л. В., Сысоев С. К., Чураков Д. В. Устройство для абразивно-экструзионной обработки коротких волноводов сантиметрового диапазона. *Решетневские чтения*. 2014. Т.1. С. 398–400.

52. Приспособление для полирования внутренних поверхностей секционно-изогнутых волноводов при абразивно-экструзионной обработке: пат. 182524U1 РФ: МПК В24В 31/116. №2017132754; заявл. 19.09.2017; опубл. 22.08.2018, Бюл. № 24. 8 с.

53. Кочкина Г. В., Зверинцев В. В., Крушенко Г. Г. Влияние процессов, происходящих при абразивно-экструзионной обработке волноводов нанопорошками на шероховатость поверхности. Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : VI Всероссийская науч.-тех. конф. (г. Омск, 10–11 ноября 2015 г.). Омск, 2015. Т.2. С. 106–109.

54. Зверинцев В. В., Зверинцева Л. В., Кочкина Г. В., Сысоев С. К. Компьютерное моделирование входного давления процесса полирования.

*Решетневские чтения.* 2015. Т.1. С. 460–461.

55. Ярушин С. Г. Технологические процессы в машиностроении : учебник для бакалавров. Москва: Юрайт, 2011. 564 с.

56. Мещеряков А. В., Шулепов А. П. Математическая модель процесса формирования микрорельефа поверхности при струйной гидроабразивной обработке. *Вестник Самарского университета.* 2016. Т. 15, № 4. С. 235–242.

57. Тамаркин М. А., Тихонов А. А. Методика расчета съема металла при гидроабразивной обработке. *Вестник ДГТУ.* 2011. Т. 11, № 3(54). С. 327–332.

58. Способ и устройство для обработки внутренней поверхности волноводов: пат. 2534656С2 Российская Федерация: МПК В24В 31/112. №2012152137/02; заявл. 04.12.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. 7 с.

59. Нетканый абразивный материал. технология производства и сфера применения URL: [http://totflex.ru/stati/netkanyu\\_abrazivnyu\\_material\\_tekhnologiya\\_proizvodstva\\_i\\_sfera\\_primeneniya/](http://totflex.ru/stati/netkanyu_abrazivnyu_material_tekhnologiya_proizvodstva_i_sfera_primeneniya/) (дата звернення: 05.03.2018).

60. 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.

61. Tryshyn P. R., Honchar N. V., Semeryuk T. N., Tereshchenko K. A. Research of quality of a current conductive surface of aluminum waveguides at polishing with various methods. *Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience: international scientific and practical conference (Wloclawck, 27–28 September 2019.).* Wloclawck, 2019. P. 140–143.

62. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот : пер. с англ. Москва: Советское радио, 1965. Т. 1. 784 с.

63. Глазов В. М., Вигдорович В. Н., Микротвердость металлов и полупроводников : 2-е изд. Москва: Металлургия, 1969. 248 с.

64. Степанов Д. М. Технологічні особливості забезпечення якості та продуктивності обробки складнопрофільних і тонкостінних деталей

полімерно-абразивними інструментами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.02.08. Харків, 2019. 23 с.

65. Воронов С.А., Вэйдун М. А. Влияние геометрии абразивного зерна на силы резания при шлифовании. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2017. № 5. С. 52–63.

66. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.

67. Шкурупий В. Г., Новиков Ф. В., Крюк А. Г. Оценка влияния зернистости абразива на шероховатость поверхности при абразивной обработке, *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2014. №44. С. 184–189.

68. Рябенков И. А., Новиков Ф. В., Андилахай А. А. Закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2016. Вип. 32. С. 144–150.

69. Димов Ю. В., Подашев Д. Б. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами. *Вестник ИрГТУ*. 2018. Т. 22. №2. С. 10–25.

70. Тришин П. Р., Гончар Н. В. Вплив наклепу при фінішній обробці на електропровідність робочого шару каналу хвилеводів. *Інженерія поверхності і реновація izdelий*: матеріали 20-я Міжнарод. науч.-тех. конф. (г. Київ, 01–05 червня 2020 г.). Київ, 2020. С. 123–124.

71. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Микротвердость, определяемая методом вдавливания. М.: Изд-во АН СССР, 1943. 60 с.

72. Васильев М. А., Мордюк Б. Н., Павленко Д. В., Яценко Л. Ф. Ультразвуковая ударная обработка поверхностного слоя титана ВТ1-0 в субмикроструктурном состоянии. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2015. Т. 37. № 1, С. 121–134.

73. Tischer F. J. Excess surface resistance due to surface roughness at 35 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974. Vol.

22(5). P. 566–569. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1974.1128285>.

74. Барсуков С. Н. Электромагнитные волны в направляющих структурах : учеб. пособие. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 59 с.

75. Muzibur Rahman, M., Reaz Ahmed, S., Salim Kaiser M.: On the investigation of reuse potential of SnPb-solder affected copper subjected to work-hardening and thermal ageing. *Materials Characterization* 172, 110878 (2021).

76. Nagy, P.B.: Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring. *OR Insight* 52(2), 61–71 (2010).

77. Гончар Н. В., Тришин П. Р. Влияние полученной неоднородной шероховатости при полировании канала прямоугольного волновода на его электропараметры. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2020)* : матеріали тез доповідей X Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 29–30 квітня 2020 р.). Чернігів, 2020. Т. 1. С. 131–132.

78. Honchar N., Tryshyn P., Stepanov D., Khavkina O. Effect of Abrasive Finishing on the Electrical Parameters of S-band Rectangular Waveguides. *Advances in design, simulation and manufacturing IV*. 2021. №2. P. 395–404. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_39).

79. Dimov Yu. V., Podashev D. B. Rounding sharp edges of machine parts with elastic polymer abrasive wheels. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709(2). P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022056>.

80. Fultz D. M. Abrasive filament brush deburring of powdered metal components. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.6713&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення: 21.11.2020).

81. Stary M., Novotny F., Horak M., Stara M. Possibilities of robot application for glass mechanical frosting by an abrasive composite brush. *Procedia CIRP*, 2018. Vol. 77, P. 134–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.251>.

82. Summary of the properties and benefits of glass mechanically frosted with an abrasive brush / Stary M., et. al. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 206, P. 364–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.062>.

83. Novotny F., Horak M., Stary M. Abrasive cylindrical brush behaviour in surface processing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017. Vol. 118–119, P. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.03.006>.

84. Абрашкевич Ю. Д., Мачишин Г. М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки. *Вестник ХНАДУ*. 2016. Вып. 73. С. 59–62.

85. Проволоцкий А. Е., Негруб С. Л. Технологические возможности полимер-абразивного инструмента. *Наук. праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія : машинообладнання*. 2004. № 71. Вип. 1. С. 125–133.

86. Гончар Н. В., Степанов Д. Н., 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.

87. Димов Ю. В., Подашев Д. Б. Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами. *Вестник ИрГТУ*. 2015. № 7(102). С. 47–54.

88. Gonchar N., Kachan O., Stepanov D., Kuchuhurov M., Khavkina O. Measurement of non-rigid tools action force during finishing. *DSMIE-2018 : lecture notes in mechanical engineering / V. Ivanov et al. (Eds.)*. Cham: Springer, 2018. P. 23–32. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_3).

89. Гончар Н. В., Тришин П. Р., Кудрицкая И. А. Силовые исследования при обработке полимерно-абразивными щетками в различных тепловых условиях. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 01–03 лист. 2017 р.)*. Чернігів, 2017. С. 173–174.

90. Тришин П. Р., Плевака К. С., Степанов Д. Н. Разработка двухкомпонентного динамометра для измерения силы резания полимерно-абразивных щеток. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука*

– *виробництво*: матеріали XVI Міжнар. молодіж. наук. конф. (м. Суми, 26–29 жовт. 2016 р.). Суми. 2016. С. 116–117.

91. Мачишин Г. М., Абрашкевич Ю. Д., Човнюк О. В. Математична модель теплових процесів при роботі полімерно-абразивної щітки. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2014. Вып. 33. С. 91–96.

92. Estimation of temperature levels in the area of polishing with polymer-abrasive brushes / Honchar N., et. al. *Advances in design, simulation and manufacturing II*. 2019. №2. P. 95–103. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_10).

93. Устинович Д. Ф.; Голуб В. М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2012. № 3. С. 90–94

94. Uhlmann E., Sommerfeld C. Three-dimensional dynamic contact analysis of abrasive filaments with a multi-body system. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72, P. 615–621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.239>.

95. Raymond N., Soshi M. A study on the effect of abrasive filament tool on performance of sliding guideways for machine tools. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 223–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.169>.

96. 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.

97. Макаров В. Ф., Виноградов А. В., Нуртдинов А. С. Автоматизированное скругление и полирование острых кромок деталей газотурбинных двигателей полимерными абразивными щетками. *СТИН*, 2011. № 11. С. 27–33.

98. Гончар Н. В., Кондратюк Э. В., Степанов Д. Н. Повышение несущей способности дисков компрессоров авиационных ГТД: монография. Запорожье: ЗНТУ, 2016. 170 с.

99. Степанов Д. М. Комплексна фінішна обробка аеродинамічних поверхонь лопаток полімерно-абразивними інструментами. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : тези доповідей XV Всеукраїнської молодіжної наук.-тех. конф. (м. Житомир, 4–7 листопада 2015 р.). Житомир: ЖДТУ, 2015. С. 76–78.

100. Макаров В. Ф., Виноградов А. В. Моделирование и реализация процесса скругления кромок деталей газотурбинного двигателя абразивно-полимерными щетками. *Процессы абразивной обработки, абразивный инструменты и материалы. Шлифабразив-2014* : сборник статей Междунар. науч.-тех. конф. (г. Волгоград, 9–10 сентября 2014). Волгоград : ВолгГАСУ, 2014. С. 172–175.

101. Степанов Д. Н., Кучугуров М. В., Гончар Н. В. Автоматизация слесарной операции удаления заусенцев в пазах типа «ласточкин хвост» лопаточных дисков осевых компрессоров ГТД. *Проблемы энергосбережения и механизации в горно-металлургическом комплексе* : материалы VII Междунар. науч.-тех. конф. молодых ученых (г. Кривой Рог, 26 апреля 2011 г.). Кривой Рог, 2011. С. 155–159.

102. 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 Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Запоріжжя, 07–09 жовтня 2014 р.). Запоріжжя, 2014. С. 57–58.

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

104. Установка для скругления острых кромок пазов дисков турбины газотурбинного двигателя: пат. 79066U1 Российская Федерация: МПК В24В9/00. №2008126653/22; заявл. 30.06.2008; опубл. 20.12.2008.

105. Степанов Д. Н., Кучугуров М. В., Гончар Є. А., Дядя Є. С. Применение полимерно-абразивных инструментов для слесарной обработки торцевых поверхностей зубьев конических зубчатых колес. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок* : тезисы докладов X Междунар. науч.-тех. конф. (г. Алушта, 23–28 сентября 2013 г.). Запорожье: АО «Мотор Сич», 2013. С. 92–94.

106. 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 науч.-тех. конф. (г. Одесса, 22-24 сентября 2014 г.). Киев, 2014. С. 42–43.

107. Bergs T., Schneider S. A. M., Amara M., Ganser P. Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting tools using brushing tools with filament-integrated diamond grits. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93, P. 873–878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.028>.

108. Абрашкевич Ю. Д., Пелевин Л. Е., Мачишин Г. М. Устройство для очистки полимерно-абразивными щетками. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2013. С. 2–5.

109. Абрашкевич Ю. Д., Пелевин Л. Е., Мачишин Г. М. Машина для очищення поверхонь полімерно-абразивними щітками. *Теорія і практика будівництва*. 2013. №11, С. 21–24.

110. Проволоцкий А. Е., Негруб С. Л. Разработка технологии обработки деталей линии гранулирования пластмасс. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*: сборник трудов IX междунар. науч.-тех. конф. (г. Донецк, 17–22 сентября 2002). Донецк: ДонГТУ, 2002. Вып. 19. С. 191–201.

111. Проволоцкий А. Е., Негруб С. Л. Исследования технологических параметров при шлифовании внутренних цилиндрических поверхностей полимер-абразивными кругами-щетками. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*: сборник трудов VIII междунар. науч.-тех. конф.

(г. Донецк, 11–16 сентября 2001). Донецк: ДонГТУ, 2001. Вып. 17. С. 197–202.

112. Проволоцкий А. Е., Негруб С. Л. Повышение эффективности финишной обработки деталей после электрофизических методов обработки. *Вісник Харківського держ. тех. ун-ту сільського господарства*. 2006. Вип.42. С. 147–150.

113. Проволоцкий А. Е., Лапшин С. П., Негруб С. Л. Технологические методы повышения долговечности деталей гидромашин. *Промислова гідроліка і пневматика*. 2004. Вип. 2(4). С. 68–71.

114. Raymond N., Soshi M. Surface polishing of hardened grey cast iron with a compliant abrasive filament tool. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 46, P. 205–208.

115. Fultz D. M. Fiber abrasive finishing systems for end-deburring extruded aluminum profiles. URL: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00680348/49640.pdf> (дата звернення: 21.11.2020).

116. Stango R. J. Filamentary brushing tools for surface finishing applications. *Metal Finishing*, 2002. Vol. 100(1), P. 82–91. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)82007-4](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82007-4).

117. Кравець Н. Г., Семерюк Т. М., Гончар Н. В. Економічна доцільність використання полімерно-абразивних інструментів для фінішної обробки дисків газотурбінних двигунів. *Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XVI Міжнар. молод. наук. конф. (м. Суми, 26–29 жов. 2016 р.)*. Суми : СумДУ, 2016. С. 35–36.

118. Kannan S., Kui L. Experimental investigation of surface integrity during abrasive edge profiling of nickel-based alloy. *Journal of manufacturing processes*. 2019. Vol. 39, P. 40–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.052>.

119. Тришин П. Р., Гончар Н. В., Терещенко К. О. Автоматизація фінішного оброблення прямокутних кутових хвилеводів S-діапазону. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. №6 (166). С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.6.05>

120. Osborn product catalog 2020/21. URL: <https://www.osborn>.

com/file/general/Osborn\_product\_catalog\_2020-21\_en\_web.pdf (дата звернення: 21.11.2020).

121. Lessmann catalogue 2020. URL: <https://www.lessmann.com/index.php/en/content/download/471/7176/file/Katalog%202020%20GB.pdf>. (дата звернення: 21.11.2020).

122. Abtex capabilities & products for brush catalog 2019. URL: [https://www.abtex.com/wp-content/uploads/2019/06/Abtex\\_CapabilitiesProducts-Brush\\_Catalog.pdf](https://www.abtex.com/wp-content/uploads/2019/06/Abtex_CapabilitiesProducts-Brush_Catalog.pdf). (дата звернення: 21.11.2020).

123. Xebec brush product catalog 2014. URL: <https://www.factorymax.co.th/catalogue/pdf/brand/xebec.pdf> (дата звернення: 21.11.2020).

124. Weiler Full line catalog 2019. URL: [https://www.weilerabrasives.com/UserFiles/Resources/Products/WC/24/4\\_/WC244\\_FullLine\\_Catalog\\_D.pdf](https://www.weilerabrasives.com/UserFiles/Resources/Products/WC/24/4_/WC244_FullLine_Catalog_D.pdf) (дата звернення: 21.11.2020).

125. Степанов Д. Н., Тришин П. Р., Кравець Н. Г. Визначення причин відриву полімерно-абразивних волокон дискового щіткового інструменту. *Тиждень науки: матеріали наук.-практ. конф. серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів* (м. Запоріжжя, 18–21 квітня 2017 р.). Запоріжжя, 2017. С.192-193.

126. Бурыкин В. В., Полонский Л. Г. Эластичные инструменты с полимер-абразивной рабочей частью. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2014. №2. С.30–32.

*Наукове видання*

ТРИШИН Павло Романович

ГОНЧАР Наталя Вікторівна

**ФІНІШІНГ КАНАЛУ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ  
ПОЛІРУВАННЯМ  
ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ**

Монографія

Комп'ютерний набір та верстання *Савчук Н. О.*

Підписано до друку 11.11.2022. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,8

Тираж 100 прим. Зам. № 850

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