

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

# **ДОСЛІДНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

## **НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня  
спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
з курсів  
«Технологія функціональних та наноповерхонь»,  
«Спецкурс за напрямком магістерської роботи»

Затверджено  
на засіданні вченої ради  
Протокол № 5 від 28.12.2023

Краматорськ  
ДДМА  
2023

УДК 621.658.512  
Д70

Рецензенти:

*Колосов Д.Л.*, д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

*Новіков Ф.В.*, д-р техн. наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця.

Д70 Дослідний лабораторний практикум : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 «Прикладна механіка» з курсів «Технологія функціональних та наноповерхонь», «Спецкурс за напрямком магістерської роботи» / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук. – Краматорськ : ДДМА, 2023. – 140 с.

ISBN

Посібник написано відповідно до навчального плану та навчальної програми для студентів спеціальності «Прикладна механіка», що вивчають прогресивні та високо-ефективні методи обробки робочих поверхонь деталей машин. Дано загальні відомості щодо методів обробки та проектування сучасних ресурсозберігаючих технологічних процесів. Призначено для студентів, які навчаються за освітніми програмами із спеціальності 131 «Прикладна механіка» і може бути використано працівниками машинобудівних підприємств, інженерами та викладачами навчальних закладів.

УДК 621.658.512

© С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов,  
С. Г. Онищук, 2023.

© ДДМА, 2023.

ISBN

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
<i>1 Лабораторна робота 1. Дослідження впливу технологічних режимів на якість виробів при електроімпульсній обробці .....</i>	<i>6</i>
<i>2 Лабораторна робота 2. Дослідження впливу комбінованого вигладжування на зміцнення і якість деталей машин .....</i>	<i>11</i>
<i>3 Лабораторна робота 3. Аналіз технологічних можливостей методу фрикційно-зміцнювальної обробки .....</i>	<i>18</i>
<i>4 Лабораторна робота 4. Дослідження впливу технологічних режимів на якість виробів при електромеханічному чистовому точінні із застосуванням імпульсних струмів .....</i>	<i>24</i>
<i>5 Лабораторна робота 5. Дослідження впливу наповнювачів при електромагнітно-абразивній обробці .....</i>	<i>29</i>
<i>6 Лабораторна робота 6. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на формування залишкових напружень в деталях машин .....</i>	<i>35</i>
<i>7 Лабораторна робота 7. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на стабілізацію залишкових напружень в деталях машин .....</i>	<i>40</i>
<i>8 Лабораторна робота 8. Дослідження впливу резонансних коливань та поверхнево-активних речовин на зміцнення деталей машин .....</i>	<i>47</i>
<i>9 Лабораторна робота 9. Дослідження впливу вібраційної обробки на якісні показники деталей машин .....</i>	<i>54</i>
<i>10 Лабораторна робота 10. Дослідження впливу резонансних коливань у пружному середовищі на зміцнення деталей машин .....</i>	<i>60</i>
<i>11 Лабораторна робота 11. Дослідження способу зміцнення деталей з використанням методу СВС-реакцій .....</i>	<i>66</i>
<i>12 Лабораторна робота 12. Дослідження електрохімічного способу зміцнення деталей машин із використанням імпульсних струмів .....</i>	<i>69</i>
<i>13 Лабораторна робота 13. Дослідження методу підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин на основі електронно-іонної імплантації міді.....</i>	<i>76</i>
<i>14 Лабораторна робота 14. Дослідження методу підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин на основі електронно-іонної імплантації алюмінію .....</i>	<i>82</i>

<i>15</i> <i>Лабораторна робота 15.</i> Дослідження технологічних можливостей формування наноструктурних покриттів деталей у середовищі коронного розряду .....	88
<i>16</i> <i>Лабораторна робота 16.</i> Дослідження області ефективного використання технологічного інструменту перспективних конструкцій.....	92
<i>17</i> <i>Лабораторна робота 17.</i> Дослідження стабільності різальних властивостей непереточуваних пластин.....	97
<i>18</i> <i>Лабораторна робота 18.</i> Дослідження стабільності різальних властивостей шліфувальних кругів .....	100
<i>19</i> <i>Лабораторна робота 19.</i> Дослідження можливостей діагностики якості технологічної системи на основі комплексної оцінки параметрів шорсткості обробки.....	107
Додаток А. Каталоги фірм-виробників різального інструменту.....	111

## ВСТУП

Машинобудування, як галузь промислового виробництва, визначає в цілому рівень розвитку промисловості.

Ефективність підприємств в умовах високої конкуренції при посиленні чинників глобалізації виробництва і збуту продукції визначається, в першу чергу, такими показниками їх діяльності, як:

- продуктивність праці;
- конкурентоспроможність продукції;
- якість росту і розвитку.

Ці показники характеризуються ступенем інноваційності технологічної бази та відповідністю виробничих систем необхідним стандартам їхнього розвитку.

Поліпшення цих показників є сьогодні ключовим завдання керівників підприємств, бо саме їхня сукупність визначає поточну позицію підприємства на ринку і можливості та перспективи його успішного і стабільного розвитку. Низьке значення хоча б одного з них робить становище підприємства в кращому випадку нестійким, а перспективи розвитку – невизначеними.

У зв'язку із цим запропоновані заходи щодо удосконалення структури технологічних процесів і операцій механічної обробки деталей важкого машинобудування на основі системної зміни технологічних процесів як сукупності спеціальних методів зміни якості виробу і навколишнього його середовища – технологічної системи. Таке рішення є актуальним і має як наукове, так і практичне значення для виробництва.

У цьому посібнику зібрані вказівки до виконання лабораторних робіт дослідницького спрямування. Усі вони є результатом наукових теоретичних і експериментальних робіт авторів за участю магістрантів кафедри ІТУ (ТМ).

# 1 Лабораторна робота 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ ПРИ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ

**Мета роботи:** вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості та шорсткості поверхні після електроімпульсного вигладжування.

### Теоретичні відомості

Найважливішою проблемою сучасного машинобудування є підвищення якості продукції, її надійності та довговічності. Вирішення цієї проблеми забезпечується управлінням технологічними процесами виготовлення деталей машин.

Відомо, що експлуатаційні властивості деталей залежать не тільки від фізико-механічних характеристик матеріалу, з якого вони виготовлені, а й стану поверхневого шару. При цьому встановлено, що виготовлення деталей із того самого матеріалу, але за різною технологією і з різними режимами обробки призводить до різкої зміни властивостей поверхневого шару. Довговічність таких деталей різна.

На сьогоднішній день широкого поширення набула технологія утворення регулярних мікрорельєфів різними методами поверхневого пластичного деформування (ППД). ППД забезпечує підвищення зносостійкості, опору втомі, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20...50 %, а в деяких випадках – у 2...3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу та призначення оптимальних режимів обробки). Одним з найперспективніших методів ППД є метод зміцнення деталей машин електроімпульсним вигладжуванням.

Електроімпульсне вигладжування – високоефективна технологія поверхневого зміцнення концентрованими потоками енергії, заснована на комплексному термодформаційному впливі при пропусканні електричного струму великої щільності ( $108...109 \text{ A/m}^2$ ) та низької напруги (2...6 В) через зону контакту деталі і деформуючого електрода-

інструмента (індентора), що рухаються у взаємно перпендикулярних напрямках зі швидкістю  $V$  та подачею  $S$ .

При цьому в результаті виділення великої кількості джоулевого тепла відбувається високошвидкісне ( $106\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ) нагрівання локального мікрооб'єму поверхні з одночасним її пластичним деформуванням і подальше інтенсивне охолодження ( $105\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ) за рахунок відведення тепла вглиб металу. У результаті потужного теплового «удару» на поверхні матеріалу формується зміцнений «білий шар» – унікальна мартенситна структура (гарденіт, наноструктурний мартенсит), що має високу міцність і зносостійкість.

Застосовуючи електроімпульсне вигладжування, можна отримувати деталі з високими експлуатаційними властивостями в поверхневих шарах унаслідок високої чистоти поверхні, а також великого механічного зміцнення. Регулярний рельєф, який отримується в результаті такої обробки, є високоефективним способом підвищення зносостійкості рухомих сполучень. Така регулярна структура може бути отримана в результаті імпульсного температурно-силового впливу на локальні об'єми поверхневого шару металу, який технологічно може бути реалізований електромеханічною обробкою, сутність якої полягає в тому, що в процесі обробки деталей через місце контакту інструменту з деталлю пропускають струм великої сили і низької напруги. Виникає сильне нагрівання поверхневого шару металу, знижується його міцність і твердість. Тиском інструменту забезпечують деформацію та згладжування поверхні, а поверхневий шар металу зміцнюється. Технологія ЕМО [1] заснована на поєднанні термічного та силового впливу, що призводить до зміни фізико-механічних та мікрогеометричних показників поверхневого шару (підвищення твердості та міцності, зниження висотних параметрів шорсткості тощо), дозволяє підвищити експлуатаційні показники оброблених деталей (зносостійкість, контактна жорсткість, міцність і теплостійкість). Технологічне оснащення, що складається з вигладжувача, закріпленого в різцетримачі, та засобів комутації, дозволяє використовувати технологію ЕМО мобільно в сукупності з будь-яким токарним верстатом.

Сучасні тенденції у розвитку матеріалознавства та технологій модифікування поверхневих шарів спрямовані на отримання заданих фізико-механічних параметрів з урахуванням умов експлуатації деталей [2]. Це відіграє роль під час вирішення завдань забезпечення експлуатаційних показ-

ників. Правильне їх вирішення засноване не лише на обґрунтованому виборі режимів та методів технологічного впливу (нанесення покриттів, хіміко-термічній обробці та ін.), а й на можливостях достовірної оцінки та прогнозування такого впливу.

Електроімпульсну обробку застосовують для зміцнення та оздоблювальної обробки робочих поверхонь широкої номенклатури деталей, що працюють у різних умовах тертя і зношування, зокрема для осей валів і штоків; шийок ступінчастих валів; циліндрів насосів; підшипників ковзання та ін.

### **Обладнання та інструмент**

1. Токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625.
2. Генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_i = 0 \dots 100$  кГц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 0 \dots 10$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 0 \dots 2$  мс; щільність струму  $j = 10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>; форма імпульсу – прямокутна.
3. Вигладжувач із твердого сплаву Т15К6.
4. Прилад для вимірювання твердості ЕТМ-01.
5. Зразки шорсткості еталонні.
6. Заготовка зі сталі 45 ГОСТ 1050-74, Ø46 мм, твердість 180НВ, шорсткість  $R_a = 3,2$  мкм.

### **Порядок проведення роботи**

Для виконання роботи використовується установка, схема якої наведена на рисунку 1.1.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів, тобто обирається їхня випадкова послідовність.

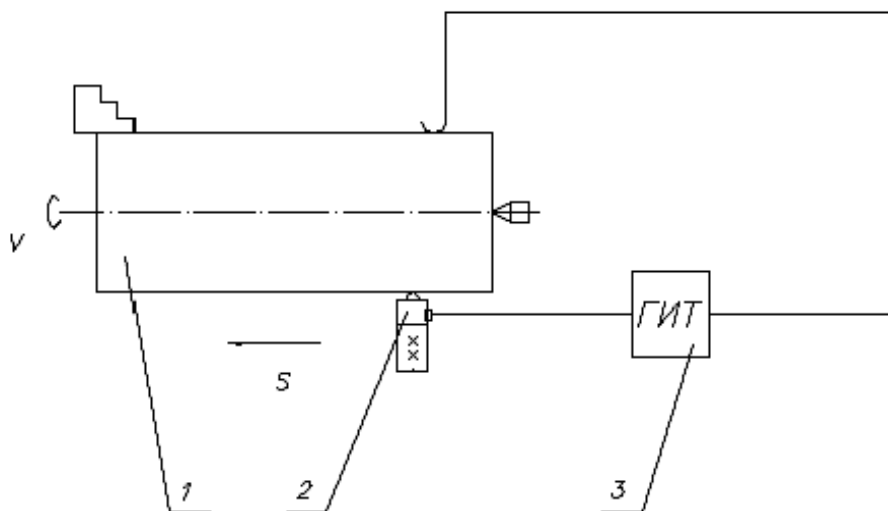
Обробка виконується на наступних режимах:

- частота обертання  $50$  хв<sup>-1</sup>;
- швидкість обробки  $7,2$  м/хв;
- поздовжня подача інструменту  $0,7$  мм/об;
- сила струму  $200$  А.

Послідовність проведення експерименту наступна:



1. Заготовка встановлюється та закріплюється у трикулачковому патроні та задньому центрі верстата.
2. Встановлюються режими обробки.
3. Задається певне зусилля, частота струму та скважність.
4. Обробляється заготовка в один робочий хід, вимірюються показники твердості та шорсткості поверхні після кожного робочого ходу.
5. Змінюються зусилля, частота струму, скважність і повторюється п.4.
6. Результати експерименту заносяться до таблиці 1.1.



1 – заготовка; 2 – вигладжувач; 3 – генератор імпульсних струмів

Рисунок 1.1 – Схема експериментальної установки

Таблиця 1.1 – Таблиця результатів

Зусилля навантаження F, Н	Частота струму f, Гц	Скважність q, %	Твердість НВ	Шорсткість Ra, мкм
200	200	20		
300	500	20		
400	700	20		
200	200	50		
300	500	50		
400	700	50		
200	200	80		
300	500	80		
400	700	80		

За отриманими даними побудувати графічні залежності:

$Ra = f(F)$ ,  $Ra = f(f)$ ,  $Ra = f(q)$ ,  $HV = f(F)$ ,  $HV = f(f)$ ,  $HV = f(q)$ .

### **Зміст звіту**

1. Назва, мета роботи
2. Таблиця даних
3. Графічні залежності
4. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. У чому полягає суть електромеханічної обробки?
2. Перелічити фактори, що впливають на твердість та шорсткість поверхні в процесі зміцнення.
3. Що таке «білий шар»?
4. Назвати сфери застосування технології ЕМО.
5. Які основні переваги методу електроімпульсної обробки?

## 2 Лабораторна робота 2

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ НА ЗМІЦНЕННЯ І ЯКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Мета роботи:** дослідити особливості впливу комбінованого вигладжування на твердість і шорсткість поверхонь деталей машин.

### Теоретичні відомості

На експлуатаційні властивості деталей машин істотно впливає шорсткість обробленої поверхні, але не у всіх випадках чисто оброблена поверхня є найбільш зносостійкою, тому що утримання мастила на поверхні деталей при різних умовах тертя (у залежності від навантаження, швидкості, матеріалу сполучених деталей та ін.) залежить від мікронерівності поверхонь. Тому в залежності від конкретних умов тертя встановлюють оптимальну шорсткість поверхні.

На зносостійкість поверхні впливають опір поверхневого шару руйнування і макрогеометричні відхилення, тобто відхилення від геометричної форми, які призводять до нерівномірного зносу окремих ділянок.

Хвилястість призводить до збільшення питомого тиску, тому що поверхні, що труться, стикаються з виступами хвиль; те саме відбувається і при мікронерівності поверхонь, причому виступи мікронерівностей можуть деформуватися – м'яти або навіть зрізати при русі однієї поверхні відносно іншої. Вершини мікронерівностей можуть викликати розриви масляної плівки, унаслідок чого в місцях розривів створюється сухе тертя [1].

У багатьох випадках міцність деталей машин залежить також від чистоти обробки. Установлено, що наявність рисок, глибоких і гострих подряпин створює осередки концентрації внутрішніх напружень, які в подальшому призводять до руйнування деталі. Такими осередками можуть бути також западини між гребінцями мікронерівності. Це не відноситься до деталей, які виготовляються з чавунів і кольорових сплавів, у яких концентрація напруг можлива в меншому ступені.

Міцність пресових з'єднань також залежить від шорсткості й особливо від висоти мікронерівностей; при запресовуванні однієї деталі в іншу

фактична величина натягу залежить від шорсткості поверхні і відрізняється від величини натягу при запресовуванні деталей із гладкими поверхнями для тих же діаметрів.

Від шорсткості поверхні залежить також стійкість поверхні проти корозії. Чим менше шорсткість поверхні, тим менше площа зіткнення з корелюючим середовищем, тим менше вплив середовища. Чим глибші западини мікронерівностей і чим різкіше вони окреслені, тим більше руйнівна дія корозії, спрямована вглиб металу.

Для виготовлення вигладжувачів використовують природні та синтетичні алмази.

Стійкість природних і штучних алмазів приблизно однакова.

Інструмент зі сферичною (а) формою заточки дозволяє обробляти зовнішні, внутрішні і плоскі поверхні як методом вигладжування, так і вібровигладжуванням.

На рисунку 2.1 зображено схеми установок вигладжувачів при обробці циліндричних поверхонь. Циліндричну форму (б) застосовують тільки для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь. Тороїдальна форма (в) широкого застосування не знайшла через відсутність природних і синтетичних алмазів великого розміру. Конічний вигладжувач (г) працює великою поверхнею конуса.

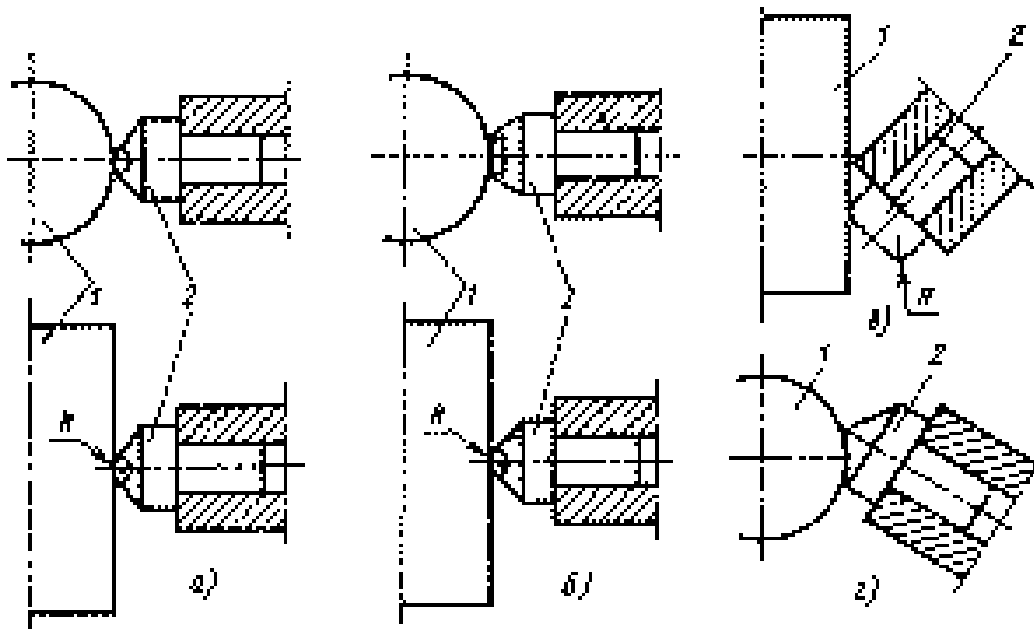


Рисунок 2.1 – Схема установок вигладжувачів під час обробки циліндричної поверхні

Застосування: алмазним вигладжуванням можна обробляти майже всі метали і сплави, які застосовуються в промисловості, за винятком титану, цирконію і ніобію, так як вони налипають на робочу частину вигладжувача.

Деталі: усі види поверхонь (зовнішні, внутрішні, плоскі, профільні) валів, штоків, циліндрів, поршневих пальців і т. ін.

Не можна використовувати для деталей, які мають нерівномірну твердість.

### Обладнання та інструмент

Обладнання: верстат, котушка, індентор, генератор струму.

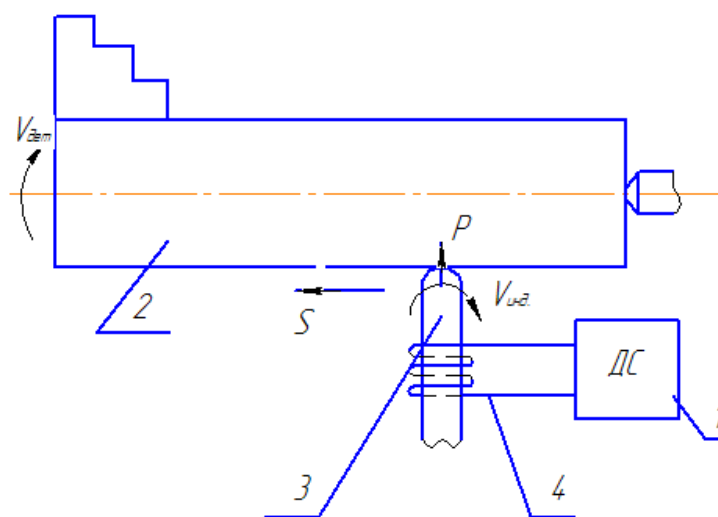
Вимірювальний інструмент: профілометр, твердомір ЕТМ-01.

Заготовки: зразки з вуглецевої і легованої сталей, довжиною 300 мм і діаметром 45 мм.

### Порядок проведення роботи

Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості і шорсткості після звичайного вигладжування і вигладжування з прокрученням.

Експериментальна установка для проведення обробки зразків наведена на рисунку 2.2.



1 – генератор струму; 2 – експериментальна заготовка; 3 – індентор;  
4 – котушка

Рисунок 2.2 – Експериментальна установка

Послідовність проведення експерименту:

1. Вивчити методичні вказівки.
2. Накреслити принципову схему проведення роботи (рисунок 2.2).
3. Установити заготовку (із вуглецевої сталі) на верстат, закріпити.

Установити зусилля різання на  $P = 8 \text{ Н}$ .

4. Провести обробку заготовки при режимах  $V = 5 \text{ м/хв}$ ,  $S = 0,1 \text{ мм/об}$  без струму, з частотою струму 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц.

5. Змінити подачу на  $S = 0,2 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 4.

6. Змінити подачу на  $S = 0,3 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 4.

7. Провести обробку заготовки при режимах  $V = 10 \text{ м/хв}$ ,  $S = 0,1 \text{ мм/об}$  зі струмом частотою 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц.

8. Змінити подачу на  $S = 0,2 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 7.

9. Змінити подачу на  $S = 0,3 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 7.

10. Провести обробку заготовки при режимах  $V = 15 \text{ м/хв}$ ,  $S = 0,1 \text{ мм/об}$  зі струмом частотою 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц.

11. Змінити подачу на  $S = 0,2 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 10.

12. Змінити подачу на  $S = 0,3 \text{ мм/об}$ , повторити пункт 10.

13. Повторити пп. 4...12 для зусиль різання  $P = 10 \text{ Н}$  та  $P = 20 \text{ Н}$ .

14. Зняти деталь. Провести вимірювання шорсткості та твердості оброблених ділянок.

15. Установити наступну заготовку (з легованої сталі) на верстат, закріпити. Установити зусилля різання на  $P = 8 \text{ Н}$  та повторити пп. 4...14.

16. Показання вимірювань, отримані в результаті досліджень, занести до таблиць 2.1 та 2.2.

### **Зміст звіту**

1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Принципова схема проведення роботи
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежностей твердості та шорсткості матеріалу від частоти коливань індентора (рисунок 2.3)
5. Висновки

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань твердості та шорсткості для низьколегованої сталі після вигладжування

№	V, м/хв	S, мм/об	f, Гц	P = 8 Н		P = 10 Н		P = 20 Н	
				Ra, мкм	НВ	Ra, мкм	НВ	Ra, мкм	НВ
1	5	0,1	-						
2			50						
3			100						
4			150						
5		0,2	-						
6			50						
7			100						
8			150						
9		0,3	-						
10			50						
11			100						
12			150						
13	10	0,1	-						
14			50						
15			100						
16			150						
17		0,2	-						
18			50						
19			100						
20			150						
21		0,3	-						
22			50						
23			100						
24			150						
25	15		-						
26			50						
27			100						
28			150						
29			-						
30			50						
31			100						
32			150						
33			-						
34			50						
35			100						
36			150						

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань твердості та шорсткості для високолегованої сталі після вигладжування

№	V, м/хв	S, мм/об	f, Гц	P = 8 Н		P = 10 Н		P = 20 Н	
				Ra, мкм	HB	Ra, мкм	HB	Ra, мкм	HB
1	5	0,1	-						
2			50						
3			100						
4			150						
5		0,2	-						
6			50						
7			100						
8			150						
9	10	0,3	-						
10			50						
11			100						
12			150						
13	10	0,1	-						
14			50						
15			100						
16			150						
17		0,2	-						
18			50						
19			100						
20			150						
21	0,3	-							
22		50							
23		100							
24		150							
25	15	0,1	-						
26			50						
27			100						
28			150						
29	15	0,2	-						
30			50						
31			100						
32			150						
33		0,3	-						
34			50						
35			100						
36			150						



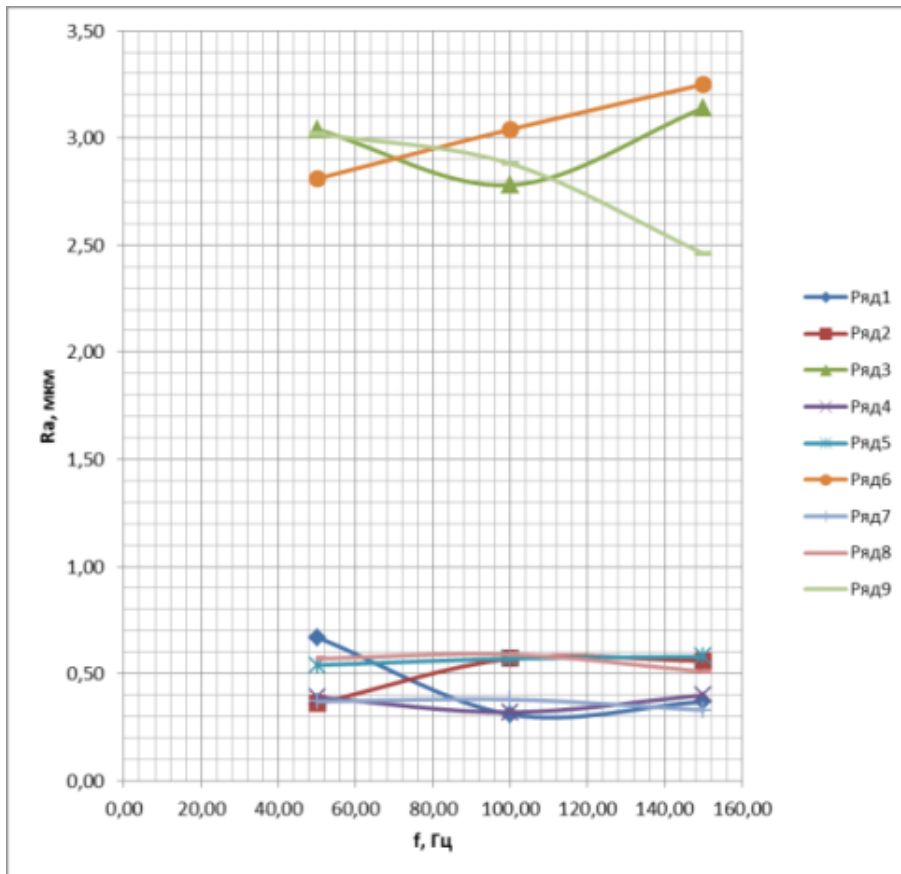


Рисунок 2.3 – Приклад побудови графічних залежностей

### Контрольні запитання

1. Що таке якість поверхні і від чого вона залежить?
2. Що таке вигладжування?
3. Назвіть області застосування комбінованого вигладжування.
4. Назвіть переваги комбінованого вигладжування.

### 3 Лабораторна робота 3

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ФРИКЦІЙНО-ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

**Мета роботи:** вивчити особливості та дослідити технологічні можливості фрикційно-зміцнювальної обробки.

### Теоретичні відомості

Підвищення вимог до експлуатаційних властивостей та надійності деталей машин призводить до необхідності підвищення ефективності та якості процесів механічної обробки, вимагає створення нових та вдосконалення існуючих технологічних методів. Перспективними є методи, що впливають на зміну в структурі, напружено-деформованому стані, фазовому та хімічному складі поверхневого шару металу.

Останнім часом набувають широкого застосування методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Сутність цих методів полягає в тому, що на відносно невеликі об'єми металу діють з великими швидкостями концентровані потоки енергії високої інтенсивності з подальшим швидким охолодженням металу. Такі умови обробки дозволяють отримувати задані фізико-економічні, корозійні та експлуатаційні характеристики поверхневих шарів деталей машин та елементів конструкцій.

До даних технологічних методів відноситься фрикційно-зміцнювальна обробка. Висококонцентрований потік енергії при фрикційно-зміцнювальній обробці утворюється в зоні контакту за рахунок високошвидкісного тертя інструменту – фрикційного диска по оброблюваній деталі. Для збільшення концентрації потоку енергії до деталі та інструменту підводять струми (у цій роботі – імпульсні струми). При цьому відбувається інтенсивна швидкісна деформація зсуву поверхневих шарів. Швидкість нагрівання досягає  $10^5 \dots 10^6$  К/с. За короткий час поверхневі шари металу нагріваються до температур, вищих за точку фазових перетворень ( $A_{c3}$ ). Оскільки товщина нагрітого шару невелика, його охолодження відбувається з великою швидкістю за рахунок відведення теплоти вглиб матеріалу.

У результаті обробки в поверхневому шарі деталі формується специфічний структурно-напружений стан металу – білий шар. Структура білого шару є високоміцною структурою дрібнодисперсного мартенситу.

Фрикційно-зміцнювальна обробка застосовується для зміцнення тіл обертання, плоских деталей, шліців, зубців муфт, різного профілю деталей, у тому числі різі, із різних матеріалів. Можна проводити обробку на токарно-гвинторізних, круглошліфувальних, плоскошліфувальних, заточувальних, стругальних, фрезерних та інших верстатах.

Переваги фрикційно-зміцнювальної обробки:

1. Проста та дешева конструкція пристосування та інструменту.
2. Універсальність, тобто проста кінематика та можливість реалізації на універсальному обладнанні.
3. Можливість застосування на різних технологічних операціях та для різних матеріалів заготовок.
4. Відсутня необхідність розробляти спеціальну технологію застосування даного пристосування у промислових умовах.
5. Не вимагає тривалого перенавчання верстатників.
6. Висока продуктивність обробки.
7. Економічність із погляду споживання енергоресурсів.
8. Безвідходність та екологічність.

### **Обладнання та інструмент**

1. Токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625.
2. Генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_i = 20 \dots 8000$  Гц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 2 \dots 6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 108 \dots 109$  А/м<sup>2</sup>; регулювання скважності 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна.
3. Електронний твердомір ЕТМ-01.
4. Електронний тестер TR-100 (для вимірювання шорсткості).
5. Пристрій для встановлення фрикційного диска.
6. Фрикційний диск Ø100 мм, Р6М5.

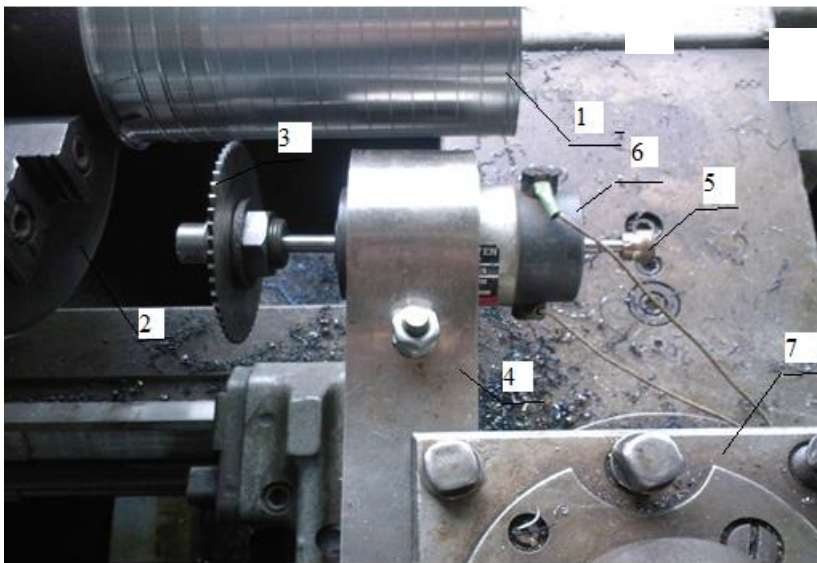
## Порядок проведення роботи

Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості та шорсткості після фрикційно-зміцнювальної обробки із застосуванням імпульсних струмів.

Експериментальна установка для проведення фрикційно-зміцнювальної обробки представлена на рисунку 3.1.

Експериментальна установка закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата мод. 1К625.

Для подачі на заготовку та інструмент імпульсних струмів використовується генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_i = 20 \dots 8\,000$  Гц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 2 \dots 6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 108 \dots 109$  А/м<sup>2</sup>; регулювання скважності 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна.



- 1 – заготовка (сталь 50Г2); 2 – патрон 630 ГОСТ 2675–80;  
3 – фрикційний диск (Р6М5); 4 – двигун постійного струму (ДПС);  
5 – бронзова втулка; 6 – тримач; 7 – різцетримач*

*Рисунок 3.1 – Експериментальна установка для проведення фрикційно-зміцнювальної обробки*

План експерименту представлений у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – План експерименту

Номер дослідю	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	+	-	-	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>
2	+	+	-	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>
3	+	-	+	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>
4	+	+	+	Y <sub>14</sub>	Y <sub>24</sub>

Експеримент проводиться на заготовках: сталь 50Г2 та чавун СЧ 20–41.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- частота обертання диска 2 000 об/хв;
- подача 0,17 мм/об;
- частота імпульсних струмів 1 000 Гц;
- скважність 50 %.

Фактори, що змінюються:

- сила струму 125...200 А;
- швидкість лінійна 785...974 м/хв.

Послідовність проведення експерименту:

1. Установити та закріпити заготовку в трикулачковому патроні.
2. Установити режими зміцнення.
3. Змінюючи силу струму та лінійну швидкість, провести зміцнення.
4. Виміряти показники твердості та шорсткості поверхневого шару після кожної зміни.
5. Результати експерименту звести до таблиць 3.2, 3.3.

У якості зміцнювального інструмента – фрикційного диска – застосовується дискова фреза Ø100 мм, Р6М5.

Для проведення першого експерименту використовується заготовка зі сталі 50Г2 ГОСТ 4543-71, Ø110 мм, твердість 305 НВ, шорсткість Ra = 6,3 мкм.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів, тобто обирається їх випадкова послідовність.

Дослідження проводиться тричі.

Для проведення другого експерименту використовується заготовка з чавуну СЧ 20-41 ГОСТ 1412-79, Ø 100 мм, твердість 228 НВ, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів.

*Таблиця 3.2 – Результати серії дослідів для сталі 50Г2*

Сила струму $I, A$	Швидкість лінійна $V_{\Sigma}$ , м/хв	Твердість, НВ			Шорсткість $R_a$ , мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
125	800,7						
200							
125	973,4						
200							

*Таблиця 3.3 – Результати серії дослідів для чавуну СЧ 20-41*

Сила струму $I, A$	Швидкість лінійна $V_{\Sigma}$ , м/хв	Твердість, НВ			Шорсткість $R_a$ , мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
125	785						
200							
125	942						
200							

6. За отриманими даними побудувати графічні залежності:

$$HB = f(I), HB = f(V_{\Sigma}); Ra = f(V_{\Sigma}), Ra = f(I).$$

7. На підставі аналізу отриманих залежностей зробити висновки про технологічні можливості фрикційно-зміцнювальної обробки.

### **Зміст звіту**

1. Назва роботи
2. Мета роботи
3. Обладнання, прилади, пристрої, інструмент
4. Експериментальне устаткування для проведення фрикційно-зміцнювальної обробки

5. План експерименту
6. Умови проведення експерименту (характеристики заготовки, що обробляється, режими обробки, результати дослідів)
7. Графічні залежності
8. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. Сутність фрикційно-зміцнювальної обробки.
2. Для зміцнення яких деталей застосовується фрикційно-зміцнювальна обробка?
3. Переваги цього методу зміцнення?
4. Принцип експериментальної установки для проведення фрикційно-зміцнювальної обробки.
5. Що таке план експериментів та яка його роль?
6. Який змінний фактор більшою мірою впливає на показники твердості та шорсткості?

### **Список рекомендованої літератури**

1. **Hurey I., Gurey V.** Influence of Surface Hardened Nanocrystalline Layers on the Resistance of Contact Fatigue Destruction. – Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. – 2020. – P. 483–491.

## **4 Лабораторна робота 4**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ ПРИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ**

**Мета роботи:** вивчити особливості електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів та дослідити вплив технологічних режимів на якість виробів після обробки.

#### **Теоретичні відомості**

Найбільш актуальними та ефективними поряд із традиційно застосовуваними технологіями є нові чи вдосконалені технології, які спрямовані на структурні та фазові перетворення, зміцнення матеріалів, зміну найважливіших експлуатаційних параметрів, параметрів якості. Сутністю цих методів є обробка поверхонь концентрованими потоками енергії, які забезпечують підвищену інтенсивність технологічного впливу на матеріал, заснованих на використанні потужних джерел енергії.

До таких нових технологічних процесів відносять імпульсну технологію, здатну багаторазово підвищити продуктивність праці, ефективність використання ресурсів, а також знизити матеріаломісткість та енергоємність виробництва за рахунок раціонального розподілу зон технологічного впливу.

Різновидом імпульсної технології є електромеханічне чистове точіння (ЕМЧТ) з використанням імпульсних струмів, яке набуло розвитку завдяки поєднанню спеціального струму та електромеханічного вигладжування, замість ролика (вигладжувача) застосовується різець з твердосплавною пластиною.

Головним завданням ЕМЧТ є не тільки утворення мікрорельєфів із високооднорідними за формою та розмірами, регулярно розташованими мікронерівностями, а й забезпечення структурних та фазових змін, напруженого стану та властивостей металу поверхневих шарів деталей.



Сутністю цього методу є прикладення високої питомої енергії за допомогою генератора імпульсних струмів, у результаті якого відбувається виділення великої кількості тепла, що призводить до високошвидкісного нагрівання локального мікрооб'єму поверхні деталі з одночасним його пластичним деформуванням і подальшим інтенсивним охолодженням за рахунок відведення тепла вглиб матеріалу. У результаті такого потужного теплового «удару» на поверхні матеріалу формується зміцнений «білий шар» (БШ) – високоміцна структура дрібнодисперсного мартенситу.

Отримана структура має підвищену твердість, що різко відрізняється від структури вихідного металу, а також нетравленість звичайними реактивами.

У зв'язку з тим, що ця структура має низку цінних фізико-механічних та електрохімічних властивостей, виникає питання про можливість використання властивостей цих шарів – твердості, поганої травленості – для підвищення деяких експлуатаційних характеристик деталей машин.

### **Обладнання та інструмент**

1. Токарно-револьверний верстат мод. 1П365
2. Генератор імпульсних струмів із структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_i = 20 \dots 8000$  Гц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 2 \dots 6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 108 \dots 109$  А/м<sup>2</sup>; регулювання скважності 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна
3. Електронний твердомір ЕТМ-01
4. Електронний тестер TR-100 (для вимірювання шорсткості)
5. Різець із СМП, Т15К6

### **Порядок проведення роботи**

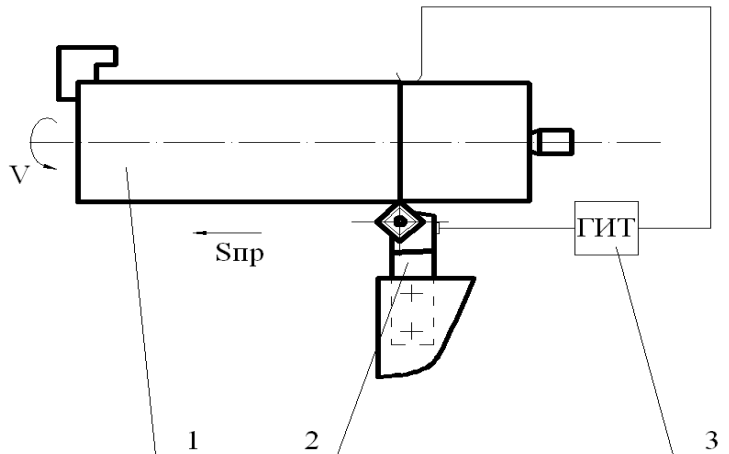
Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості та шорсткості після електромеханічного чистового точіння із застосуванням імпульсних струмів.

Фактори, що змінюються:

- сила струму 50...200 А;
- частота імпульсних струмів 300...700 Гц.

Експериментальна установка (рисунок 4.1) складається з наступного обладнання:

- токарно-револьверний верстат мод. 1П365;
- генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_i = 20 \dots 8000$  Гц; сила струму  $I = 0 \dots 200$  А; напруга  $U = 2 \dots 6$  В; тривалість імпульсів  $\tau_i = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; щільність струму  $j = 10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>; регулювання скважності 20...80 %; форма імпульсу – прямокутна.



1 – заготовка; 2 – різець; 3 – генератор імпульсних струмів (ГІС)

Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки

План експерименту представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – План експерименту

Номер досліджу	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$Y_1$	$Y_2$
1	+	0	0	$Y_{11}$	$Y_{21}$
2	+	-	-	$Y_{12}$	$Y_{22}$
3	+	0	+	$Y_{13}$	$Y_{23}$
4	+	-	0	$Y_{14}$	$Y_{24}$
5	+	+	0	$Y_{15}$	$Y_{25}$
6	+	-	+	$Y_{16}$	$Y_{26}$
7	+	0	-	$Y_{17}$	$Y_{27}$
8	+	+	-	$Y_{18}$	$Y_{28}$
9	+	+	+	$Y_{19}$	$Y_{29}$

Послідовність проведення експерименту:

1. Установити та закріпити заготовку в трикулачковому патроні та задньому центрі.

2. Установити режими обробки.

3. Змінюючи частоту імпульсного струму та силу струму, обробити заготовку в один робочий хід.

4. Виміряти показники твердості та шорсткості поверхні після кожної зміни.

5. Результати експерименту звести до таблиць 4.2, 4.3.

Як різальний інструмент застосовується різець із СМП, Т15К6.

Експеримент проводиться на заготовках матеріалів: сталь 45 та 50Г2.

Для проведення першого експерименту використовується заготовка зі сталі 45 ГОСТ 1050-88, Ø72 мм, твердість 228 НВ, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- глибина різання 0,3 мм;
- поздовжня подача інструменту 0,12 мм/об;
- швидкість обробки 119,8 м/хв;
- частота обертання  $530 \text{ хв}^{-1}$ ;
- шпаруватість 50 %;

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів.

Таблиця 4.2 – Результати дослідів

Частота імпульсного струму $f$ , Гц	Сила струму $I$ , А	Твердість, НВ	Шорсткість $R_a$ , мкм
300	50		
500			
700			
300	125		
500			
700			
300	200		
500			
700			

Для проведення другого експерименту використовується заготовка зі сталі 50Г2 ГОСТ 4543-71, Ø114 мм, твердість 305 НВ, шорсткість  $R_a = 6,3$  мкм.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- глибина різання 0,3 мм;
- поздовжня подача інструменту 0,12 мм/об;
- швидкість обробки 137,8 м/хв;
- частота обертання 385 об/хв;
- скважність 50 %.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів.

*Таблиця 4.3 – Результати серії дослідів*

Частота імпульсного струму $f$ , Гц	Сила струму $I$ , А	Твердість, НВ	Шорсткість $R_a$ , мкм
300	50		
500			
700			
300	125		
500			
700			
300	200		
500			
700			

6. За отриманими даними побудувати графічні залежності:

$$HВ = f(I), HВ = f(f); R_a = f(f), R_a = f(I).$$

7. На підставі аналізу отриманих залежностей зробити висновки щодо впливу технологічних режимів на якість виробів після обробки.

### **Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи
2. Обладнання, інструменти, прилади
3. Схема експериментальної установки
4. План експерименту

5. Умови проведення експерименту (характеристики заготовки, що обробляється, режими, результати дослідів)
6. Графічні залежності
7. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. Сутність електромеханічного чистового точіння з використанням імпульсних струмів.
2. У чому полягає цінність одержаного зміцненого шару?
3. Навіщо перед проведенням експерименту проводять рандомізацію дослідів?

## **5 Лабораторна робота 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАПОВНЮВАЧІВ ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ**

**Мета роботи:** вивчити особливості електромагнітно-абразивної обробки та дослідити вплив наповнювачів на показники твердості та шорсткості поверхні після обробки.

### **Теоретичні відомості**

Основною метою технологічних процесів сучасного машинобудування є забезпечення формоутворення деталей із високою точністю, низькою шорсткістю робочих поверхонь, особливими та достатніми характеристиками міцності, зносостійкості. При цьому особливого значення набувають технології фінішної обробки, які безпосередньо впливають на комплекс фізико-механічних властивостей поверхні деталей. Однією з найпоширеніших на за-

ключних стадіях технологічних процесів виготовлення деталей є абразивна обробка, одним із різновидів якої є магнітно-абразивна обробка (МАО) [1].

МАО – абразивна обробка, що здійснюється при русі заготовки та абразивних зерен відносно один одного в магнітному полі (ГОСТ 23505-79). Сутність МАО полягає у видаленні припуску абразивним способом (порошковою феромагнітною абразивною масою) зі створенням магнітного поля безпосередньо в зоні різання.

Магнітно-абразивним способом можна успішно обробляти поверхні: циліндричні зовнішні та внутрішні, плоскі, тіла обертання з криволінійною твірною, гвинтові та ін. Областю застосування МАО є зниження шорсткості на оброблюваних поверхнях з одночасним підвищенням якісних характеристик поверхневого шару.

Сутність електромагнітно-абразивної обробки полягає в тому, що абразивне знімання матеріалу заготовки здійснюється магнітно-абразивним порошком із додаванням алюмінієвої пудри в постійному електричному полі. Алюміній, що входить до складу абразивного порошку, під дією струму розплавляється й утворює на поверхні деталі зносостійке покриття.

Електромагнітно-абразивна обробка застосовується для:

- полірування поверхонь з метою зниження мікронерівностей;
- нанесення металевих покриттів із метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

Переваги:

- формується поверхневий шар із мінімумом дефектів структури;
- екологічна чистота;
- економічність;
- можливість реалізації на універсальному верстаті;
- проста та дешева конструкція пристосування та інструменту;
- не вимагає тривалого перенавчання верстатників.

Показники ефективності:

- зниження шорсткості у 2,2...4,6 рази;
- зміцнення поверхневого шару у 1,1...1,4 рази;
- зниження трудомісткості на операції у 8...10 разів;
- економія енергоресурсів до 100 %.

## **Обладнання та інструмент**

1. Токарно-гвинторізний верстат мод. 1К625

2. Блок живлення зі структурними характеристиками: сила струму  $I = 0 \dots 2,5$  А; напруга  $U = 0 \dots 30$  В
3. Електронний твердомір ЕТМ-01
4. Електронний тестер TR-100 (для вимірювання шорсткості)
5. Пристрій для встановлення барабана з магнітом
6. Барабан із магнітом  $\varnothing 75$  мм
7. Пудра алюмінієва ТАП ГОСТ 2494-71
8. Феромагнітний абразивний порошок

### **Порядок проведення роботи**

Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості та шорсткості після електромагнітно-абразивної обробки.

Експериментальна установка щодо електромагнітно-абразивної обробки представлена на рисунку 5.1.

Експериментальна установка закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата мод. 1К625.

Для подачі на заготовку та інструмент постійного струму використовують блок живлення зі структурними характеристиками: сила струму  $I = 0 \dots 2,5$  А; напруга  $U = 0 \dots 30$  В.

Експеримент проводиться на заготовках: сталь 40Х та сталь 05кп.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- частота обертання деталі  $100 \text{ хв}^{-1}$ ;
- частота обертання барабана з магнітом  $800 \text{ хв}^{-1}$ ;
- сила струму  $I = 2$  А.

Прийmemo такі фактори, що змінюються:

- час обробки  $5 \dots 15$  хв;
- відсотковий вміст алюмінієвої пудри ПАП ГОСТ 2494-71  $10 \dots 50$  %.



1 – заготовка; 2 – патрон ГОСТ 2675-80; 3 – барабан з магнітом Ø75мм;  
 4 – двигун постійного струму (ДПС); 5 – струмоміряч; 6 – тримач;  
 7 – різцетримач; 8 – тара з абразивом та Al порошком  
 Рисунок 5.1 – Експериментальна установка для проведення  
 електромагнітно-абразивної обробки

Послідовність проведення експерименту:

1. Установити та закріпити заготовку в трикулачковому патроні та задньому центрі.
2. Установити режими обробки.
3. Змінюючи вміст алюмінію та час обробки, обробити поясok заготовки.
4. Виміряти показники твердості та шорсткості поверхні після кожної зміни.
5. Результати експерименту звести до таблиць 5.1, 5.2.

Як інструмент застосовується барабан із магнітом Ø75 мм.

Для проведення першого експерименту використовується заготовка зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71, Ø40 мм, твердість 215 НВ, шорсткість Ra 3,2 мкм.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів.

Для проведення другого експерименту використовується заготовка зі сталі 05кп ГОСТ 7417-75, Ø40 мм, твердість 130 НВ, шорсткість Ra 3,2 мкм.

Перед проведенням експерименту проводиться рандомізація дослідів.

6. За отриманими даними побудувати графічні залежності:

$$\text{HB} = f(\% \text{ Al}), \text{HB} = f(t); \text{Ra} = f(\% \text{ Al}), \text{Ra} = f(t).$$

7. На підставі аналізу отриманих залежностей зробити висновки щодо впливу технологічних режимів на якість виробів після обробки.



Таблиця 5.1 – Результати серії дослідів для сталі 40Х

Вміст Al, %	Час обробки t, хв	Твердість, НВ			Шорсткість Ra, мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
10	5						
20							
30							
40							
50							
10	10						
20							
30							
40							
50							
10	15						
20							
30							
40							
50							

Таблиця 5.2 – Результати серії дослідів для сталі 05кп

Вміст Al, %	Час обробки t, хв	Твердість, НВ			Шорсткість Ra, мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	3	1	2	3
10	5						
20							
30							
40							
50							
10	10						
20							
30							
40							
50							

Продовження таблиці 5.2

Вміст Al, %	Час обробки t, хв	Твердість, НВ			Шорсткість Ra, мкм		
		Серія дослідів			Серія дослідів		
		1	2	1	2	1	2
10	15						
20							
30							
40							
50							

**Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи
2. Обладнання, прилади, пристрої, інструмент
3. Експериментальна установка для проведення електромагнітно-абразивної обробки
4. Умови проведення експерименту (характеристики заготовки, що обробляється, режими, результати дослідів)
5. Графічні залежності
6. Висновки

**Контрольні запитання**

1. Сутність електромагнітно-абразивної обробки.
2. Для зміцнення яких деталей застосовується електромагнітно-абразивна обробка?
3. Які переваги даного методу зміцнення?
4. Принцип експериментальної установки щодо електромагнітно-абразивної обробки.
5. Який фактор, що змінюється, більшою мірою впливає на показники твердості та шорсткості?

**Список рекомендованої літератури**

1. **Майборода, В.С.** Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: Дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2001. – 404 с.

## **6 Лабораторна робота 6**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ДЕТАЛЯХ МАШИН**

**Мета роботи:** дослідити особливості формування залишкових напружень у деталях машин та способи їх зміни.

#### **Теоретичні відомості**

При механічній обробці можуть виникати значні залишкові напруження (точіння, фрезерування, шліфування та ін.).

Особливість цих залишкових напружень полягає в тому, що вони діють практично тільки в поверхневих шарах глибиною в кілька десятих міліметра. Однак, як показує досвід експлуатації, залишкові напруження в поверхневому шарі можуть вплинути на міцність всієї деталі, особливо при дії змінних напружень.

Два основних фактори, що викликають виникнення залишкових напружень – пластична деформація при силовому впливі та нагрівання поверхневих шарів.

На рисунку 6.1 показано схему пластичної деформації поверхневого шару заготовки при різанні. Біля вершини різця при силовому впливі виникає пластична деформація розтягування, і після зняття зусилля в поверхневому шарі утворюються залишкові напруження стиснення.

Наявність пластичної деформації в поверхневому шарі під час різання підтверджується вимірюванням мікротвердості.

Виділення тепла в процесі різання (унаслідок роботи деформації та тертя) призводить до великих температурних градієнтів і температурних напружень, що перевищують межу плинності матеріалу. Пластична деформація стиснення, що виникла після встановлення нормальної температури в деталі, викликає появу розтягувальних залишкових напружень.



*Рисунок 6.1 – Пластична деформація поверхневого шару під час різання*

Величина залишкових напружень визначається насамперед щільністю однорідних дислокацій. Знак напружень залежить від характеру розташування однорідних дислокацій відносно поверхні деталі.

Таким чином, два основних фактори при різанні – силовий та температурний – діють у протилежні сторони, що й пояснює суттєву залежність величини та знаку залишкових напружень від технологічного режиму обробки.

Напруження 1-го роду – макронапруження, що охоплюють області, сумірні з розмірами деталі; ці напруження мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі; напруження 2-го роду – мікронапруження, що поширюються на окремі зерна металу чи групу зерен; напруження 3-го роду – субмікроскопічні, що стосуються спотворень атомних ґраток.

Оскільки залишкові макронапруження не завжди сприяють підвищенню експлуатаційних властивостей деталей, то в практиці машинобудування застосовують наступні методи, що дозволяють знімати залишкові напруження – термічна обробка і пластичне точіння. Також можливе регулювання залишкових напружень поверхневим пластичним деформуванням.

Уперше явище адсорбційного впливу середовища на механічні властивості та структуру твердих тіл – ефект Ребіндера – було відкрито академіком Петром Олександровичем Ребіндером у 1928 році. Сутність цього явища полягає у полегшенні деформування та руйнування твердих тіл і мимовільному перебігу в них структурних змін у результаті зниження їх вільної поверхневої енергії при контакті із середовищем, що містить речовини, здатні до адсорбції на міжфазній поверхні.

Це стало основою застосування ПАР в механічній обробці. Коло прикладних завдань, у яких ефекти зниження міцності та пластичності надають корисну дію, охоплює різноманітні процеси механічної обробки матеріалів. Використання речовин, що знижують міцність, дозволяє тимчасово змінити механічні властивості твердого тіла так, що його обробка помітно полегшується; після видалення цих речовин із поверхні обробленої деталі вихідні механічні властивості цього матеріалу повністю відновлюються.

Поверхнево-активні речовини (ПАР) – це речовини з асиметричною молекулярною структурою, молекули яких містять одну або кілька гідروفільних груп та один або кілька гідрофобних радикалів.

Однак різноманітність застосувань ПАР робить їх оцінку особливо складною. До цього часу немає уніфікованих методів оцінки ефективності навіть якоїсь однієї дії, наприклад емульгування чи піноутворення. Потреба ж у єдиній характеристиці ПАР насущна, оскільки застосування ПАР у механічній обробці металів різноманітне [1].

Виділяють два великі класи ПАР, що відрізняються характером адсорбції та механізмом стабілізації дисперсних систем.

До першого класу відносяться низькомолекулярні сполуки дифільного характеру, тобто сполуки, що мають гідروفільну «голову» та гідрофобний «хвіст».

До другого класу відносяться високомолекулярні ПАР, в яких чергуються гідروفільні та гідрофобні групи, рівномірно розподілені по всій довжині полімерного ланцюга, тобто для них характерна лінійна структура ланцюга.

*Таблиця 6.1 – Вихідні дані*

№	Вид ПАР	Значення навантаження Р, Н
1	1	0,3
2	1	0,5
3	1	0,7
4	2	0,3
5	2	0,5
6	2	0,7
7	3	0,3
8	3	0,5
9	3	0,7

У таблиці 6.1 використані наступні позначення ПАР:

1 – емульсол 2;

2 – Піонер 1;

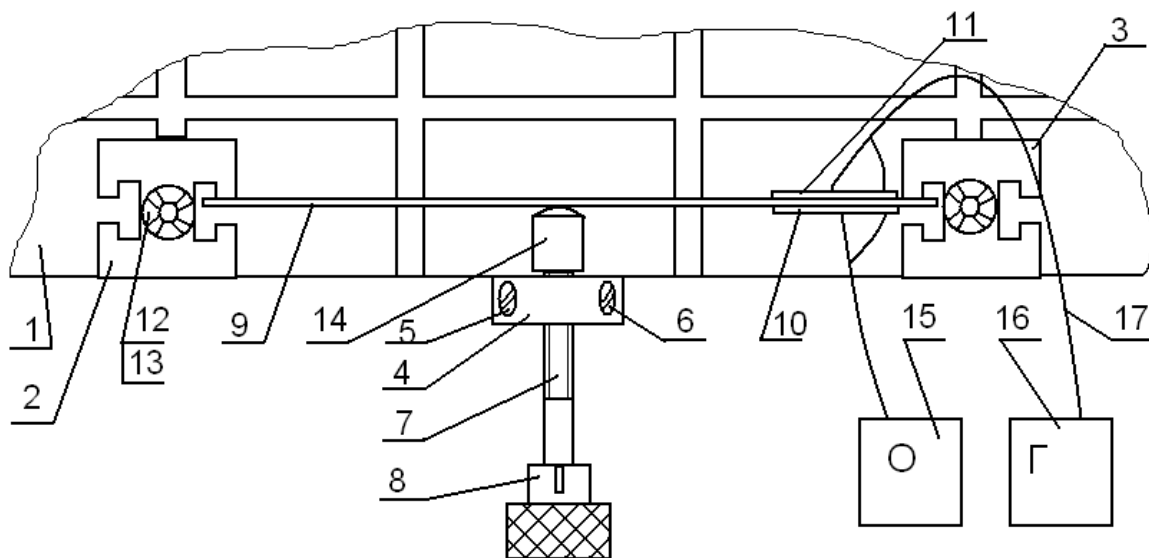
3 – натрієва сіль моно- та діалкілфосфатів на основі ПЖС фракції С6-С12.

Таблиця 6.2 – Результати експериментальних даних резонансних частот  $f$ , Гц

Вид ПАР	Навантаження Р, Н	Значення часу $t$ , хв		
		0	20	60
	0,3			
	0,5			
	0,7			

Таблиця 6.3 – Результати експериментальних даних резонансних амплітуд  $A$ , мВ

Вид ПАР	Навантаження Р, Н	Значення часу $t$ , хв		
		0	20	60
	0,3			
	0,5			
	0,7			



- 1 – плита; 2, 3 – стійка; 4 – стійка; 5, 6 – гвинт кріпильний;  
 7 – гвинт натискний; 8 – люфт; 9 – експериментальний зразок;  
 10, 11 – п'єзоелементи; 12 – штифт; 13 – гайка; 14 – сферичний наконечник;  
 15 – осцилограф; 16 – генератор звуковий; 17 – сполучні дроти

Рисунок 6.2 – Схема експериментальної установки

## Обладнання та інструмент

Обладнання: універсальний збірний пристрій, генератор звуковий ЛЗ0, осцилограф С1-112А.

Матеріали: ПАР Піонер – 1, ПАР Емульсол – 2, ПАР Натрієва сіль моно- та діалкілфосфатів на основі первинних жирних спиртів фракції С6-С12.

Заготовки: зразки зі сталі 20 розмірами: довжиною 200 мм, заввишки 50 мм, товщиною 1 мм із листового прокату.

## Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та індивідуальним завданням.

2. Накреслити схему експериментальної установки (рисунок 6.2), вивчити її складові.

3. Здійснити підготовку експериментальних зразків до досліду:  
- за допомогою ацетону зробити знежирення поверхні зразків;  
- провести короткочасне травлення зразка в 10 % розчині гідроксидної хлориду HCL (2...3 хв);  
– промити зразок у дистильованій воді;  
– висушити зразок у сушильній камері.

4. За допомогою м'якого клею приклеїти до кожної поверхні зразка 9 п'єзоелементи 10, один навпроти одного.

5. Установити зразок 9 в універсальний збірний пристрій на стойках 2 і 3, закріплених на плиті 1.

6. Виконати навантаження зразка силою  $F_1 = 0,3$  Н за допомогою натискного гвинта 7, закріпленого на стойці 4, розташованій на плиті 1.

7. Нанести на одну з поверхонь зразка поверхнево-активну речовину.

8. За допомогою звукового генератора 16 і осцилографа 15 зробити вимірювання зміни резонансних частот через 0, 20, 60 хв після нанесення ПАР.

9. Очистити поверхню зразка від ПАР.

10. Здійснити навантаження зразка силою  $F_2=0,5$  Н. Повторити п. 7, 8, 9.

11. Здійснити навантаження зразка силою  $F_3=0,7$  Н. Повторити п. 7, 8, 9.

12. Результати вимірювань занести до таблиць 6.2, 6.3.

## Зміст звіту

1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Схема експериментальної установки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежностей  $f(P, t)$ ,  $A(P, t)$
5. Висновки

## Контрольні запитання

1. Які причини виникнення технологічних залишкових напружень?
2. Назвіть види поверхнево-активних речовин та області їхнього застосування.
3. Які методи зняття залишкових напружень існують у промислових технологічних процесах виготовлення деталей машин?
4. У чому сутність ефекту Ребіндера?

## 7 Лабораторна робота 7

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА СТАБІЛІЗАЦІЮ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

**Мета роботи:** дослідити особливості формування залишкових напружень у деталях машин та способи їх стабілізації.

## Теоретичні відомості

Технологічними залишковими напруженнями називають механічні напруження, що існують у поверхневому шарі деталі машини за відсутності зовнішніх силових, теплових та інших впливів, що є результатом нерівномірного пластичного деформування поверхневого шару матеріалу в технологічному процесі виготовлення деталі.



Залишкові напруження на поверхні формуються в процесі виготовлення деталей за допомогою різних технологічних процесів. Причиною утворення залишкових напружень є виникнення зон із різним ступенем деформації, наприклад через різновтовщинність виробів, неоднорідність хімічного складу матеріалу, неоднорідність нагрівання при обробці. Виділяють два основних фактори, що викликають виникнення залишкових напружень – пластична деформація при силовому впливі та нагрівання поверхневих шарів. Відіграють роль і величина, і знак, і глибина залягання, і характер розподілу цих напружень по глибині поверхневого шару.

Технологічні залишкові напруження часто впливають на експлуатаційні властивості деталей машин, насамперед на втомну міцність, зносостійкість, контактну жорсткість, корозійну стійкість, а також на точність їх розмірів і форми.

До відомих методів регулювання залишкових напружень відносять: низькотемпературний відпал, поверхнєве пластичне деформування, акустомеханічні способи обробки, термоциклічну обробку, які є енергоємними технологічними процесами, вимагають великих виробничих площ і, крім того, є неекологічними процесами. Зазначених недоліків позбавлений такий метод зняття залишкових напружень, як нанесення на оброблену поверхню деталі поверхнево-активних речовин.

Поверхнево-активними називають такі речовини, які адсорбуються на поверхні розділу фаз і зменшують надмірну поверхнєву вільну енергію. Як правило, поверхнево-активні речовини мають дифільну будову молекул, тобто містять фрагменти молекул, що мають гідрофільні (хороша взаємодія з водою) та гідрофобні (погана розчинність у воді, слабка взаємодія) властивості .

### **Обладнання та інструмент**

Обладнання: установча конструкція, генератор звуковий ЛЗ0, осцилограф С1-112А.

Матеріали: 1 – поверхнево-активна речовина «Ферробетол»; 2 – поверхнево-активна речовина «Натрієва сіль монофосфатів та діалкілфосфатів на основі первинних жирних спиртів після дистиляції»; 3 – поверхнево-активна речовина «Неонол».

Заготовки: зразки з матеріалів: 1 – Ст3; 2 – Сталь 45, 3 – Сталь 12Х18Н10Т довжиною 110 мм, висотою 20 мм, товщиною 0,7...1,2 мм із листового прокату.

Принцип проведення роботи схематично можна зобразити у вигляді трьох етапів (рисунок 7.1, 7.2, 7.3):

1) пластина матеріалу характеризується наявністю власної частоти коливань  $f_0$ ;

2) після навантаження пластини певним зусиллям  $F$  вона знаходиться у напруженому стані з власною частотою коливань  $f_1$ ;

3) на поверхню пластини в напруженому стані наноситься поверхнево-активна речовина, і власна частота коливань  $f_1$  змінюється на частоту  $f_2$ .

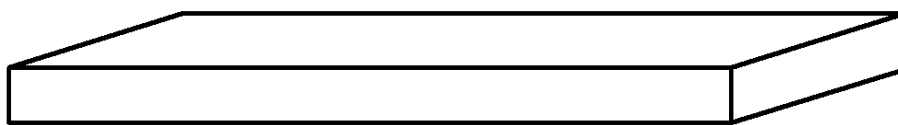


Рисунок 7.1 – Пластина матеріалу з власною частотою коливань  $f_0$

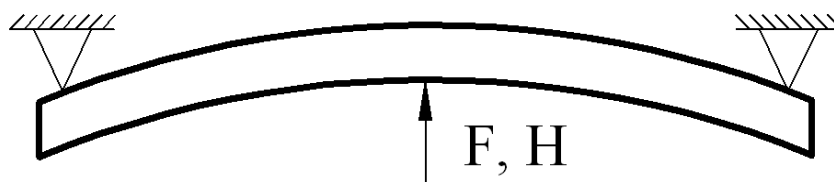


Рисунок 7.2 – Пластина матеріалу в напруженому стані з частотою коливань  $f_1$

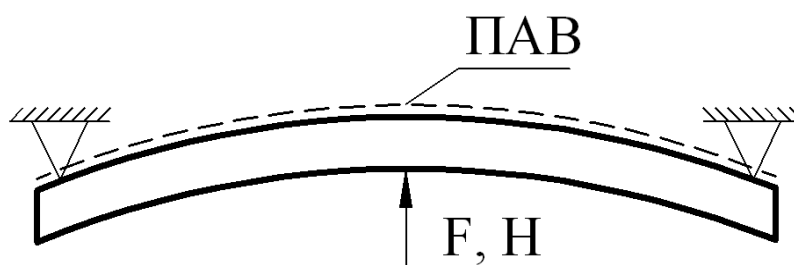
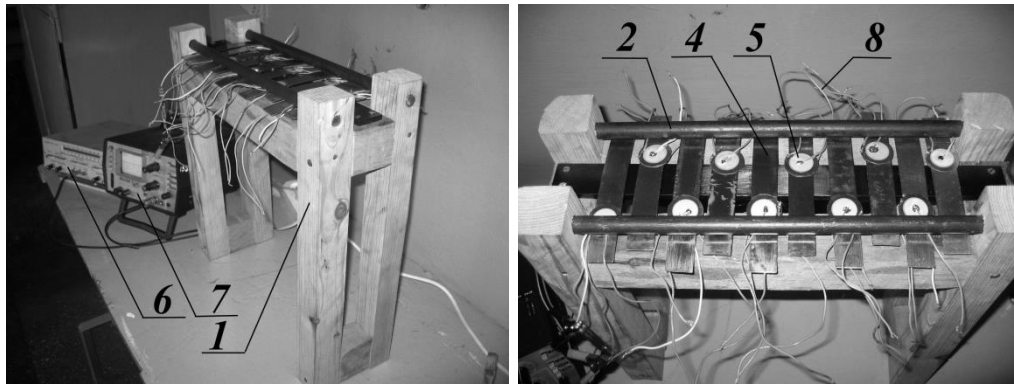
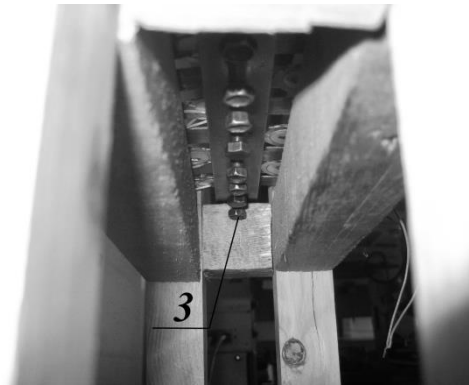


Рисунок 7.3 – Пластина матеріалу в напруженому стані з частотою коливань  $f_2$



а)

б)



в)

а) загальний вигляд: 1 – установка конструкція; б – генератор звуковий ЛЗ0; 7 – осцилограф С1-112А; б) вид зверху: 2 – пруток діаметром 15 мм; 4 – зразки; 5 – п'єзоелементи; 8 – сполучні дроти; в) вид знизу: 3 – болти М8-6gx25.58 (S13) ГОСТ 7798-70

Рисунок 7.4 – Експериментальна установка

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

Сталь 45			Сталь 12X18Н10Т			Ст3		
№	Вид ПАР	Стріла прогину, мм	№	Вид ПАР	Стріла прогину, мм	№	Вид ПАР	Стріла прогину, мм
1	1	0,625	7	1	0,625	13	1	0,625
2	1	1,25	8	1	1,25	14	1	1,25
3	2	0,625	9	2	0,625	15	2	0,625
4	2	1,25	10	2	1,25	16	2	1,25
5	3	0,625	11	3	0,625	17	3	0,625
6	3	1,25	12	3	1,25	18	3	1,25

Позначення у таблиці: 1 – ферробетон; 2 – натрієва сіль; 3 – неонол.

## Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Накреслити принципову схему проведення роботи (рисунки 7.1...7.3), вивчити складові експериментальної установки (рисунок 7.4).
3. Здійснити підготовку експериментальних зразків до досліду:
  - за допомогою ацетону зробити знежирення поверхні зразків;
  - промити зразки у дистильованій воді;
  - висушити зразки в сушильній камері.
4. За допомогою м'якого клею марки «Момент» приклеїти до кожної поверхні зразків 4 п'єзоелементи 5 один навпроти одного.
5. Установити зразки 4 в установчу конструкцію.
6. Здійснити навантаження зразків зі стрілою прогину 0,625 мм за допомогою болтів 3.
7. За допомогою звукового генератора 6 та осцилографа 7 зробити замірювання зміни резонансних частот.
8. Нанести на одну з поверхонь зразків поверхнево-активну речовину.
9. За допомогою звукового генератора 6 і осцилографа 7 зробити вимірювання зміни резонансних частот через 20, 40, 60 хв після нанесення поверхнево-активної речовини.
10. Очистити поверхню зразка від поверхнево-активної речовини.
11. Зробити навантаження зразка зі стрілою прогину 1,25 мм. Повторити пункти 8, 9, 10.
12. Результати вимірювань занести до таблиць 7.2, 7.3.

## Зміст звіту

1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Принципова схема експериментальної установки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежностей  $f(P, t)$  (рисунок 7.5)
5. Висновки

Таблиця 7.2 – Результати експериментальних даних резонансних частот  $f$ , кГц, для зразків із шорсткістю поверхні  $Ra$  6,3 мкм

Матеріал пластини	Вид ПАР	Стріла прогину пластини, мм	Час дії ПАР, хв			
			0	20	40	60
Ст3, $Ra$ 6,3 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				
12X18H10T, $Ra$ 6,3 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				
Сталь 45, $Ra$ 6,3 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				

Таблиця 7.3 – Результати експериментальних даних резонансних частот  $f$ , кГц для зразків із шорсткістю поверхні  $Ra$  3,2 мкм

Матеріал пластини	Вид ПАР	Стріла прогину пластини, мм	Час дії ПАР, хв			
			0	20	40	60
<i>1</i>	2	3	4	5	6	7
Ст3, $Ra$ 3,2 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4	5	6	7
12X18H10T, Ra 3,2 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				
Сталь 45, Ra 3,2 мкм	1	0,625				
	1	1,25				
	2	0,625				
	2	1,25				
	3	0,625				
	3	1,25				

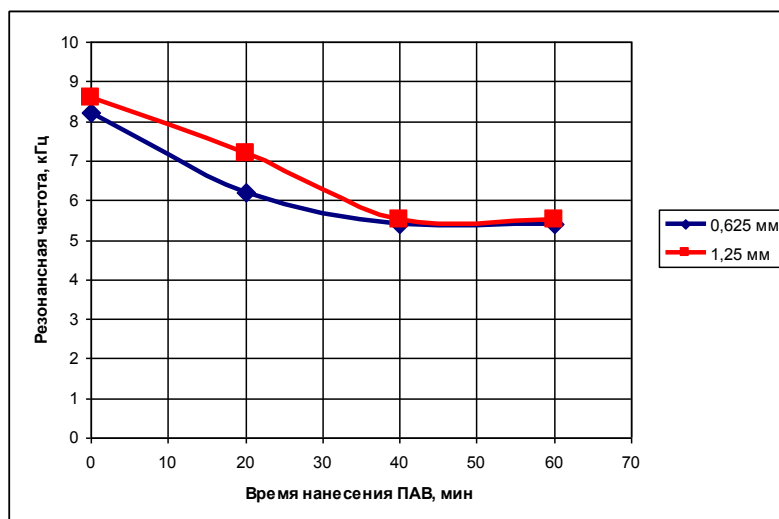


Рисунок 7.5 – Приклад побудови графічних залежностей

### Контрольні запитання

1. Поняття залишкових напружень. Які причини виникнення технологічних залишкових напружень?
2. Назвіть класифікацію залишкових напружень за ознаками довжини силового поля.
3. Які існують методи регулювання залишкових напружень?
4. Що таке поверхнево-активна речовина?

## **8 Лабораторна робота 8**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ТА ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Мета роботи:** дослідити особливості зміцнення поверхонь деталей машин та способи їх стабілізації.

#### **Теоретичні відомості**

Експлуатаційна надійність машин визначається здебільшого якісним станом робочих поверхонь деталей, що формуються на фінішних операціях технологічних процесів (напружено-деформований стан поверхневого шару, технологічні залишкові напруження, динаміка навантаження, фізико-механічні властивості матеріалу, макро- та мікрогеометрія). Наприклад, підвищення твердості деталей машин здійснюється різними відомими технологічними методами, але вони надто енергоємні та не завжди призводять до бажаного результату.

За допомогою віброобробки та створення на робочих поверхнях прецизійних деталей композиційних покриттів з поверхнево-активних речовин підвищується несуча здатність і, відповідно, експлуатаційна надійність деталей. Застосування таких покриттів і методу віброобробки є дуже перспективним напрямом, який відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями контактуючих поверхонь, а також підвищує продуктивність праці, знижує енерговитрати і покращує якість продукції, роблячи її більш конкурентоспроможною на світовому ринку.

Поняття «вібраційна технологія» з'явилося порівняно нещодавно, в 60-ті роки, як наслідок розвитку процесів, які використовують вібраційну дію. Виникло це поняття серед фахівців, які працюють у галузі технологічного використання низькочастотного спектру коливань. Воно відображає процеси, засновані на використанні коливань, що впливають на об'єкт обробки як безпосередньо, так і (частіше) на оброблювальні середовища та інструменти різних характеристик.

Вібраційна технологія ґрунтується на таких фундаментальних розділах фізики, як акустика, удар та ударні явища, коливання та хвилі, молекулярна акустика.

Сучасне виробництво, транспорт, будівництво, побут, медицину, екологію та інші галузі важко уявити без створеного до цього часу різноманіття вібраційних технологій, машин, верстатів, апаратів, приладів та інструментів.

При загальній оцінці вібраційна обробка є складним комплексом механо-фізико-хімічних явищ, що істотно впливають на стан, перш за все поверхні і поверхневого шару оброблюваної деталі або середовища, а за певних умов – і всього об'єму. Фізична сутність процесу характеризується комплексним впливом на оброблювані деталі та їх поверхню ряду факторів, викликаних вібрацією, та наявністю робочого середовища відповідної характеристики:

- безліч мікроударів частинок робочого середовища в різних напрямках, що забезпечують рівномірний та всебічний вплив на предмети, деталі, матеріали. Залежно від характеристики частинок середовища та її складу створюються умови для процесів мікрорізання, багаторазового пружно-пластичного деформування;

- змінні прискорення, що викликають ударно-хвильові процеси, згинальні напруження;

- хімічно активні та поверхнево-активні речовини, що викликають фізико-хімічні процеси;

- інтенсивне спрямоване переміщення робочого середовища, оброблюваних деталей, транспортваних матеріалів.

Особливу роль у коливальних процесах відіграє явище резонансу – різкого зростання амплітуди вимушених коливань, що настає при наближенні частоти зовнішнього впливу до деяких значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи.

Збільшення амплітуди – це лише наслідок резонансу, а причина – збіг зовнішньої (збуджуючої) частоти з внутрішньою (власною) частотою коливальної системи. За допомогою явища резонансу можна виділити та/або посилити навіть дуже слабкі періодичні коливання. Резонанс – явище, яке полягає в тому, що при певній частоті змущувальної сили коливальна система виявляється особливо чутливою до дії цієї сили.



Поверхнево-активними (ПАР) називаються такі речовини, які адсорбуються на поверхні розділу фаз і зменшують надлишкову поверхневу вільну енергію. Як правило, поверхнево-активні речовини мають дифільну будову молекул, тобто містять фрагменти молекул, що мають гідрофільні (хороша взаємодія з водою) та гідрофобні (погана розчинність у воді, слабка взаємодія) властивості.

Гідрофільна група може бути носієм іоногенних властивостей або являти собою неіоногенний ланцюжок, що включає атоми кисню, азоту, сірки й фосфору. Гідрофобна частина найчастіше складається з вуглеводневого радикалу, який, можливо, включає бензольний або нафталіновий цикл. Ця частина молекули може бути утворена фтор-вуглецевим радикалом. У гідрофобній частині молекул поверхнево-активних речовин атоми водню частково або повністю можуть бути заміщені фтором або хлором, що підвищує гідрофобність молекул і надає їм особливих властивостей, унаслідок чого такі речовини здатні знижувати поверхневий натяг не тільки води, але й багатьох вуглеводневих рідин.

ПАР широко застосовуються у всіх галузях промисловості, народного господарства та біології у якості миючих засобів, для стабілізації дисперсних систем – емульсій, пін, суспензій, зниження міцності оброблюваних матеріалів, покриття поверхонь тощо.

Поверхнево-активні речовини знайшли широке застосування в галузі механічної обробки металів:

- операції металообробки. Підвищення швидкостей різання, шліфування, фрезерування, стругання, хонінгування, економія різального інструменту, підвищення класу точності операцій за рахунок ефекту адсорбційного зниження міцності, ефективного тепловідведення від зони взаємодії інструменту з матеріалом при застосуванні поверхнево-активних речовин у складі мастильно-охолоджувальних речовин;

- очищення металу після механічної обробки. Підвищення якості та покращення зовнішнього вигляду виробів, оздоровлення умов праці завдяки застосуванню водних розчинів технічних миючих засобів на основі поверхнево-активних речовин;

- підготовка поверхні металів під лакофарбове покриття. Поліпшення якості, антикорозійної стійкості лакофарбових покриттів металевих виробів

завдяки ефективному очищенню та знежиренню поверхні водними розчинами миючих композицій, що містять поверхнево-активні речовини;

- очищення поверхні після розконсервації. Підвищення продуктивності складальних операцій та оздоровлення умов праці завдяки використанню водних та водоемульсійних розчинів технічних миючих засобів замість гасу, бензину та інших нафтопродуктів при відмиванні деталей та виробів від консерваційних мастил;

- обробка поверхонь готових виробів для покращення якості та зовнішнього вигляду готових виробів унаслідок застосування водних розчинів поверхнево-активних речовин та миючих композицій на їх основі;

- забарвлення поверхні. Збільшення продуктивності та підвищення якості ремонтних робіт унаслідок створення оптимальних умов фарбування вологих та мокрих поверхонь шляхом модифікування лакофарбових матеріалів за допомогою поверхнево-активних речовин;

- нанесення гальванічних покриттів. Поліпшення якості покриттів завдяки ефективному очищенню та електрохімічному знежиренню.

### **Обладнання та інструмент**

Обладнання: установка, генератор звуковий ЛЗ0, ЕОМ.

Матеріали: ПАР № 1, ПАР № 2, ПАР № 3.

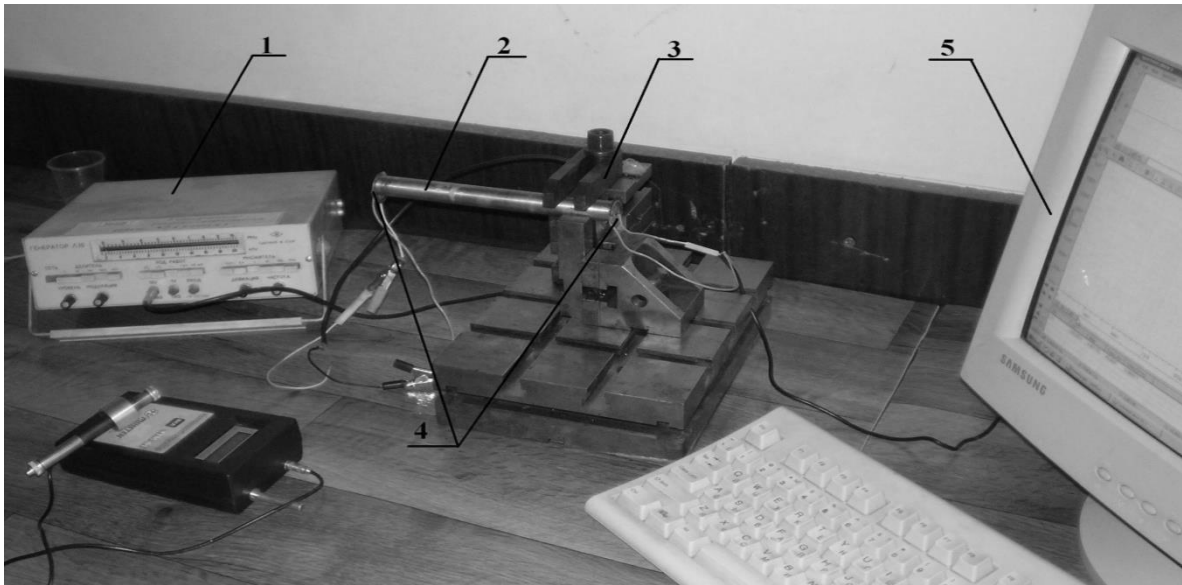
Заготовки: зразки з низьковуглецевої, середньовуглецевої та високовуглецевої сталей, довжиною 200 мм та діаметром 20 мм.

### **Порядок проведення роботи**

Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості після резонансної обробки з застосуванням ПАР.

Експериментальна установка для проведення зміцнювальної обробки зразків представлена рисунку 8.1.

Твердість зразків із середньовуглецевої сталі за Брінелем становить від 170 НВ до 250 НВ, нижче 170 НВ – низьковуглецева сталь, вище 255 НВ – високовуглецева сталь.



*1 – генератор звуковий ЛЗ0; 2 – експериментальний зразок; 3 – прихват;  
4 – п'єзодатчики; 5 – ЕОМ*

*Рисунок 8.1 – Експериментальна установка*

Порядок проведення роботи:

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Накреслити принципову схему проведення роботи (рисунок 8.1).
3. Здійснити підготовку експериментальних зразків до досліджу:
  - а) за допомогою ацетону знежирити поверхні зразків;
  - б) промити зразки в дистильованій воді;
  - в) висушити зразки в сушильній камері.
4. Установити зразок (із низьковуглецевої сталі) 2 на установчу конструкцію, затиснути прихватом 3.
5. За допомогою м'якого клею приклеїти до торців зразка 2 п'єзоеlementи 4.
6. За допомогою звукового генератора 1 та ЕОМ 5 зробити замірювання зміни резонансних частот.
7. Простим олівцем розмітити зразок на 3 частини. На кожен частину відповідно нанести ПАР № 1, ПАР № 2, ПАР № 3.
8. Зробити обробку зразка на резонансних частотах 2, 5, 8 хвилин.
9. Після кожного часу обробки зняти приладом показання твердості, попередньо очистивши поверхню зразка від поверхнево-активних речовин.

10. Повторити пункти 4...9 для середньовуглецевої та високовуглецевої сталей.

11. Результати вимірювань занести до таблиць 8.1...8.3.

*Таблиця 8.1 – Результати вимірювання мікротвердості для низьковуглецевої сталі після обробки на резонансних частотах, НВ*

ПАР	Час нанесення ПАР, хв			
	0	2	5	8
ПАР № 1				
Середні значення				
ПАР № 2				
Середні значення				
ПАР № 3				
Середні значення				

*Таблиця 8.2 – Результати вимірювань мікротвердості для середньовуглецевої сталі після обробки на резонансних частотах, НВ*

ПАР	Час нанесення ПАР, хв			
	0	2	5	8
ПАР № 1				
Середні значення				
ПАР № 2				
Середні значення				
ПАР № 3				
Середні значення				

Таблиця 8.3 – Результати вимірювання мікротвердості для високовуглецевої сталі після обробки на резонансних частотах, НВ

ПАР	Час нанесення ПАР, хв			
	0	2	5	8
ПАР № 1				
Середні значення				
ПАР № 2				
Середні значення				
ПАР № 3				
Середні значення				

### Зміст звіту

1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Принципова схема експериментальної установки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежності твердості матеріалу від часу резонансної обробки (рисунок 8.2)
5. Висновки

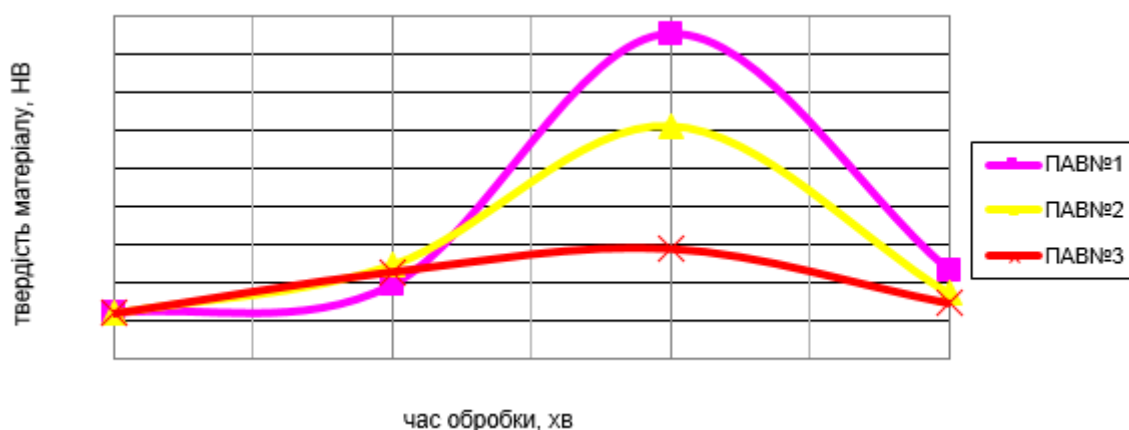


Рисунок 8.2 – Приклад побудови графічних залежностей

## Контрольні запитання

1. Що таке вібраційна обробка? Коли й унаслідок чого вона виникла?
2. Поясніть явище резонансу.
3. Назвіть сфери застосування вібраційних технологій.
4. Що таке поверхнево-активна речовина?
5. У чому сутність ефекту Ребіндера?
6. Назвіть два основних класи поверхнево-активних речовин.
7. Розкажіть про застосування ПАР у галузі механічної обробки металів.

## 9 Лабораторна робота 9 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Мета роботи:** дослідити особливості зміни параметрів твердості та шорсткості поверхонь деталей машин у результаті застосування методу вібраційної обробки та використання поверхнево-активних речовин.

### Теоретичні відомості

Основною метою технологічних процесів сучасного машинобудування є забезпечення формоутворення деталей з високою точністю, низькою шорсткістю робочих поверхонь, високими параметрами міцності та зносостійкості. До того ж постійно зростаючий рівень конкуренції в галузі машинобудування вимагає випуску високоякісної продукції з найменшою собівартістю.

Одним з основних шляхів вирішення цього завдання є використання методів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

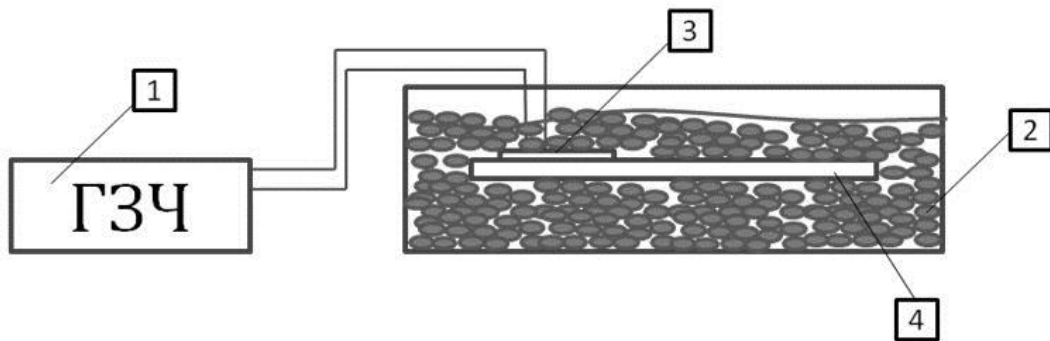
Вібродарна обробка – метод, здійснюваний зіткненням часток оброблювального середовища з поверхнею оброблюваних деталей [1].

Вібродарна обробка здійснюється в результаті безлічі мікродарів і відносного ковзання з певним тиском робочих тіл по поверхні оброблюваної деталі. Робочі тіла рухаються зі змінним прискоренням, що забезпечує

їх велику рухливість. Унаслідок високої відносної рухливості робочі тіла добре вписуються у фасонну поверхню деталей, за рахунок чого цим методом можна зміцнювати як зовнішні, так і внутрішні поверхні складних деталей різних розмірів.

При віброударній обробці робочій камері надаються низькочастотні коливання, унаслідок вібрацій робоче середовище і оброблювані деталі мають змінні за знаком прискорення і знаходяться в інтенсивному відносному переміщенні, здійснюючи два види рухів: коливання з частотою, залежною від частоти коливань робочої камери, і кругові переміщення усієї маси завантаження. Напрямок відносних переміщень деталі і робочих тіл постійно змінюється, унаслідок чого між ними виникають зіткнення і посилене тертя.

Характерною відмінністю даного виду обробки є те, що коливання надаються не контейнеру з робочим середовищем, а безпосередньо зразку, що оброблюється (рисунок 9.1).



*1 – генератор ЛЗ0; 2 – резервуар з робочим середовищем для вібраційної обробки; 3 – п'єзоелектричний датчик; 4 – зразок*

*Рисунок 9.1 – Принципова схема обробки*

Віброударне зміцнення має ряд переваг: поверхня зміцнюється не поетапно, а вся одночасно; може бути забезпечена рівномірність зміцнення по поверхні; інструмент (кульки) практично не зношується; процес не здійснює тепловий вплив. Однією з важливих переваг є простота обладнання та інструменту. Крім того, на відміну від інших методів ППД, при віброударній обробці практично виключений перенаклеп оброблюваної поверхні, пов'язаний із кратністю додаткового навантаження.

Але область застосування методу обмежують його недоліки, до яких відносяться обмежені технологічні та динамічні можливості, складності управління процесом, необхідність вібраційного і шумового захисту.

Одночасно з поверхневою пластичною деформацією (зміцненням) при віброударній обробці часто досягають значного зниження шорсткості поверхні, округлення гострих кромки, отримання визначеної мікрогеометрії і т. ін.

Для вібраційної ударної обробки використовують робочі тіла з різних матеріалів і рідкі робочі середовища. Для зміцнення потрібний кулястий і міцний дріб. Щоб уникнути деформації дробу у момент удару, твердість його має бути вища за твердість оброблюваного матеріалу.

### **Обладнання та інструмент**

Обладнання: генератор звукових частот ЛЗ0, п'єзоелектричний датчик, електронний твердомір малогабаритний ЕТМ-01, профілограф-профілометр TR200.

Матеріали: чавунний дріб, ПАР.

Заготовки: зразки – пластини 150x30x2 мм, виготовлені з матеріалу сталь 40 ГОСТ 1050-88.

### **Порядок проведення роботи**

Методика досліджень передбачає вивчення впливу таких факторів, як час обробки, об'єм робочого середовища та частота коливань на показники твердості та шорсткості поверхонь у результаті використання для їх обробки методу вібраційної обробки.

Етапи виконання роботи:

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Накреслити принципову схему обробки (рисунок 9.1).
3. Визначити частоту резонансу зразків.
4. Змішати дріб із водою в об'ємі  $V = 150$  мл.
5. Установити частоту  $n = 175$  Гц на генераторі.
6. П'єзоелемент закріпити на зразку, зразок помістити в суміш і провести обробку протягом 2, 5 та 10 хвилин.



7. Виставити на генераторі частоту  $n = 250$  Гц (резонансна частота) і повторити п. 4.
8. Повторити п. 3...5 при об'ємі робочого середовища  $V = 200$  мл.
9. Повторити п. 3...5 при об'ємі робочого середовища  $V = 300$  мл.
10. Повторити серію досліджень у робочому середовищі, що містить ПАР.
11. Після кожного етапу обробки виконати замірювання показників шорсткості і твердості.
12. Результати експерименту занести до таблиці 9.1.

*Таблиця 9.1 – Результати експерименту*

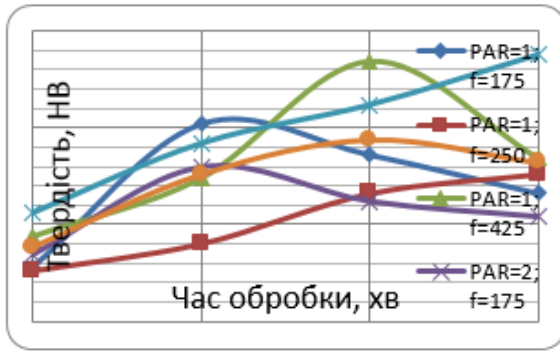
№	Вхідні дані			Вихідні дані	
	V, мл	f, Гц	t, хв	HВ <sub>сер</sub>	Ra, мкм
1	2	3	4	5	6
1	150	175	0		
2	150	175	2		
3	150	175	5		
4	150	175	10		
5	150	250	0		
6	150	250	2		
7	150	250	5		
8	150	250	10		
9	150	425	0		
10	150	425	2		
11	150	425	5		
12	150	425	10		
13	200	175	0		
14	200	175	2		
15	200	175	5		
16	200	175	10		
17	200	250	0		
18	200	250	2		
19	200	250	5		
20	200	250	10		

*Продовження таблиці 9.1*

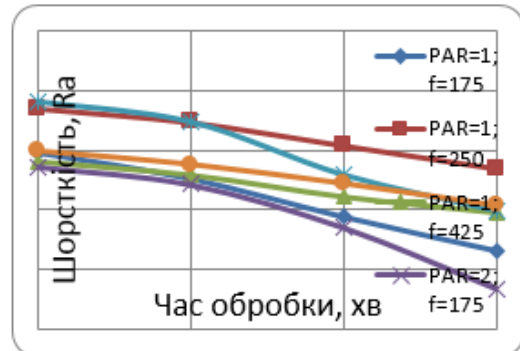
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
21	200	425	0		
22	200	425	2		
23	200	425	5		
24	200	425	10		
25	300	175	0		
26	300	175	2		
27	300	175	5		
28	300	175	10		
29	300	250	0		
30	300	250	2		
31	300	250	5		
32	300	250	10		
33	300	425	0		
34	300	425	2		
35	300	425	5		
36	300	425	10		

**Зміст звіту**

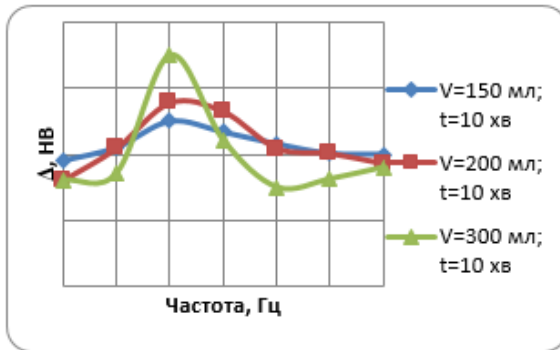
1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Принципова схема обробки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежностей твердості та шорсткості від частоти коливань, об'єму робочого середовища та часу обробки (рисунок 9.2)
5. Висновки



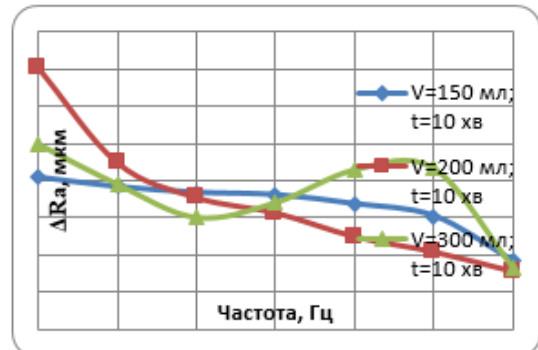
Залежність твердості поверхні від часу обробки при  $V = 150$  мл



Залежність шорсткості поверхні від часу обробки при  $V = 150$  мл



Залежність збільшення твердості поверхні від частоти



Залежність зменшення шорсткості поверхні від частоти

Рисунок 9.2 – Приклад побудови графічних залежностей

### Контрольні запитання

1. Що таке віброударна обробка? У чому полягає її суть?
2. Які інструменти використовують для віброударної обробки?
3. Переваги та недоліки віброобробки.
4. У чому полягає відмінність методу, який розглядається у цій роботі?
5. Які деталі можливо обробляти даним методом?
6. Яких результатів досягають при віброударній обробці?

### Список рекомендованої літератури

1. Серeda, Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів : монографія / Б.П. Серeda, Н.Є. Калініна, І.В. Кругляк. – Запоріжжя : Вид-во Запорізької державної інженерної академії, 2004. – 230 с.

## 10 Лабораторна робота 10

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Мета роботи:** дослідити особливості зміцнення поверхонь деталей машин та способи їх стабілізації.

### Теоретичні відомості

Експлуатаційна надійність машин визначається в основному якісним станом робочих поверхонь деталей, що формуються на фінішних операціях технологічних процесів (напружено-деформований стан поверхневого шару, технологічні залишкові напруження, динаміка навантаження, фізико-механічні властивості матеріалу, макро- та мікрогеометрія). Наприклад, підвищення твердості деталей машин здійснюється різними відомими технологічними методами, але вони надто енергоємні та не завжди призводять до бажаного результату.

За допомогою віброобробки в пружному середовищі підвищується несуча здатність і, відповідно, експлуатаційна надійність деталей. Застосування методу віброобробки є дуже перспективним напрямом, який відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями контактуючих поверхонь, а також підвищує продуктивність праці, знижує енерговитрати й покращує якість продукції, роблячи її більш конкурентоспроможною на світовому ринку.

Поняття «вібраційна технологія» з'явилося порівняно нещодавно, у 60-ті роки, як наслідок розвитку процесів, які використовують вібраційну дію. Виникло це поняття серед фахівців, які працюють у галузі технологічного використання низькочастотного спектру коливань. Воно відображає процеси, засновані на використанні коливань, що впливають на об'єкт обробки як безпосередньо, так і (частіше) на оброблювальні середовища та інструменти різних характеристик.

Вібраційна технологія ґрунтується на таких фундаментальних розділах фізики, як акустика, удар та ударні явища, коливання та хвилі, молекулярна акустика [1].

Сучасне виробництво, транспорт, будівництво, побут, медицину, екологію та інші галузі важко уявити без створеного до цього часу різноманіття вібраційних технологій, машин, верстатів, апаратів, приладів та інструментів.

При загальній оцінці вібраційна обробка є складним комплексом механо-фізико-хімічних явищ, що мають істотний вплив на стан, насамперед поверхні і поверхневого шару оброблюваної деталі або середовища, а за певних умов – і всього обсягу. Фізична сутність процесу характеризується комплексним впливом на оброблювані деталі та їхню поверхню ряду факторів, викликаних вібрацією, та наявністю робочого середовища відповідної характеристики:

- безліч мікроударів частинок робочого середовища в різних напрямках, що забезпечують рівномірний та всебічний вплив на предмети, деталі, матеріали;
- змінні прискорення, що викликають ударно-хвильові процеси, згинальні напруги;
- інтенсивне спрямоване переміщення робочого середовища.

Освоєння вібраційної технології є одним із найперспективніших напрямів науково-технічного процесу. Заміна традиційної техніки та технології на вібраційну дозволяє за певних умов підвищити ефективність технологічного процесу та продуктивність обладнання, зменшити його габарити, знизити енерговитрати, виключити багато несприятливих явищ. Основний атрибут вібраційної техніки – збудження коливань.

Особливу роль у коливальних процесах відіграє явище резонансу – різкого зростання амплітуди вимушених коливань, що настає при наближенні частоти зовнішнього впливу до деяких значень (резонансних частот), що визначаються властивостями системи.

Збільшення амплітуди – це лише наслідок резонансу, а причина – збіг зовнішньої (збуджуючої) частоти з внутрішньою (власною) частотою коливальної системи. За допомогою явища резонансу можна виділити та/або посилити навіть дуже слабкі періодичні коливання. Резонанс – явище, яке полягає в тому, що при певній частоті змушувальної сили коливальна система виявляється особливо чутливою до дії цієї сили.

Як різновид ППД широкого поширення набули вібраційні методи обробки деталей, що відрізняються високою ефективністю. Вібраційна складова

сприяє інтенсифікації різних технологічних процесів, підвищує рівень механізації та автоматизації. Підвищення ефективності зміцнювальної технології здійснюється шляхом управління станом поверхневого шару, вибором оптимальних режимів вібраційної обробки. Технологічні можливості вібраційної обробки роблять її перспективним методом зміцнювальної обробки.

Сутність зміцнювальної віброобробки в пружному середовищі наступна: деталь знаходиться у в'язкій рідині і здійснює гармонічні коливання в пружному середовищі, впливаючи на частинки середовища, що прилягають до поверхні, змушує їх виконувати вимушені коливання. Середовище поблизу тіла коливається, деформується, і у ньому виникають пружні сили. Поступово всі частинки середовища залучаються до коливального руху. Під ударами робочого середовища шорсткість поверхні деталі пластично деформується, заповнюються западини на поверхні, що сприяє підвищенню твердості поверхневого шару. У поверхневому шарі виникають стискаючі напруження, що сприяє підвищенню втомної міцності і зносостійкості, значно знижується шорсткість поверхні обробленої деталі.

Дія безлічі мікроударів частинок пружного робочого середовища, викликаних дією спрямованих вібрацій на поверхню деталей, створює передумови для зміни фізико-механічних властивостей їх поверхневого шару, викликає руйнування нерівностей на поверхні, змінює її мікрогеометрію, а також створює на поверхні рівномірний наклеп. Перевага зміцнювальної віброобробки в пружному середовищі – реалізація її коливальною установкою без складного обладнання.

Особливість методу полягає в тому, що робоче середовище легко набуває форми оброблюваної поверхні, що забезпечує відносну рівномірність обробки та можливість зміцнювати деталі складної форми.

### **Обладнання та інструмент**

Обладнання: установка, генератор звуковий ЛЗ0, ЕОМ.

Матеріали: пружне середовище (масло+дріб).

Заготовки: пластини довжиною 150 мм, шириною 30 мм, товщиною 3 мм. Матеріал – дюралюміній. Зразки виконані з різною шорсткістю (одні були оброблені абразивною шкіркою із зерен великої фракції, інші – абразивною шкіркою із зерен дрібної фракції).

## Порядок проведення роботи

Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості після резонансної обробки в пружному середовищі.

Експериментальна установка щодо зміцнювальної обробки представлена на рисунку 10.1.



1 – посудина з пружним середовищем; 2 – експериментальний зразок;  
3 – п'єзоелемент; 4 – сполучні дроти; 5 – генератор звуковий ЛЗ0;  
6 – твердомір; 7 – профілометр; 8 – ЕОМ

Рисунок 10.1 – Експериментальна установка

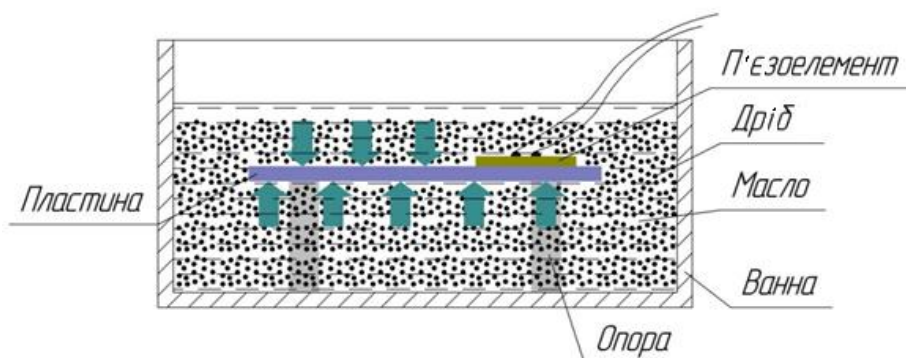


Рисунок 10.2 – Схема встановлення пластини в пружному середовищі при віброобробці

Твердість зразків із дюралюмінію становить 90...100 НВ.

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Накреслити принципову схему проведення роботи (рисунок 10.2).

3. Здійснити підготовку експериментальних зразків до досліду:
  - за допомогою ацетону знежирити поверхні зразків;
  - промити зразки у дистильованій воді;
  - висушити зразки.
4. Прикріпити по центру поверхні кожного зразка п'єзоелемент.
5. Виміряти резонансні частоти пластин.
6. Помістити зразок у посудину з пружним середовищем.
7. По черзі обробляти зразки протягом 2, 5 і 10 хвилин при частоті власних коливань, при частоті на 30 % нижче власних коливань, а також при частоті на 50 % вище власних коливань пластини.
8. Після кожного часу обробки зняти приладом показання твердості, попередньо очистивши поверхню зразка.
9. Результати вимірювань занести до таблиць 10.1 та 10.2.

*Таблиця 10.1 – Результати вимірювань твердості пластин після обробки в пружному середовищі, НВ*

Номер досліду	Об'єм мастила, мл	Частота, Гц	Час дії резонансної частоти, хв			
			0	2	5	10
1	150					
2						
3						
4	200					
5						
6						
7	300					
8						
9						

*Таблиця 10.2 – Результати вимірювань шорсткості поверхні пластин після обробки в пружному середовищі, мкм*

Номер досліду	Об'єм мастила, мл	Частота, Гц	Час дії резонансної частоти, хв			
			0	2	5	10
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	150					
2						
3						



*Продовження табл. 10.2*

1	2	3	4	5	6	7
4	200					
5						
6						
7	300					
8						
9						

### **Зміст звіту**

1. Назва, мета та короткий зміст роботи
2. Принципова схема експериментальної установки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Графіки залежностей твердості та шорсткості від частоти коливань при різних об'ємах пружного середовища
5. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. Що таке вібраційна обробка? Коли й унаслідок чого вона виникла?
2. Поясніть явище резонансу.
3. Назвіть сфери застосування вібраційних технологій.
4. Поясніть особливість методу зміцнення в пружному середовищі.
5. Розкажіть про застосування пружних середовищ у галузі механічної обробки металів.

### **Список рекомендованої літератури**

1. **Серета, Б.П.** Поверхнєве зміцнення матеріалів : монографія / Б.П. Серета, Н.Є. Калініна, І.В. Кругляк. – Запоріжжя : Вид-во Запорізької державної інженерної академії, 2004. – 230 с.

## 11 Лабораторна робота 11

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СВС-РЕАКЦІЙ

**Мета роботи:** дослідити, як внаслідок зміни режимів обробки при використанні СВС-реагентів змінюється твердість зразків, вибрати оптимальні режими процесу.

#### Теоретичні відомості

Об'єктом досліджень є процес впровадження металевих сумішей у поверхневі шари сталевих валів і вплив зміни структури поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин. Основними змінними факторами є режими обробки і склади металевих сумішей. У системі, яка складається із суміші порошків хімічних елементів, локально зніціюється екзотермічна реакція синтезу. Виділене в результаті реакції тепло завдяки теплопередачі нагріває сусідні шари речовини, збуджує в них реакцію і призводить до виникнення процесу, що саморозповсюджується. СВС – це процес переміщення хвилі хімічної реакції по суміші реагентів з утворенням твердих кінцевих продуктів, що проводиться з метою синтезу речовин матеріалів. СВС являє собою режим протікання сильної екзотермічної реакції (реакції горіння), у якому тепловиділення локалізовано в шарі й передається від шару до шару шляхом теплопередачі. У зазначених процесах відбувається безвідхідний хімічний синтез тугоплавких сполук (боридів, карбідів, силіцидів та ін.), які складають основу широкого класу сучасних неорганічних матеріалів, здатних працювати в екстремальних умовах (жаро- і вогнестійкі, надтверді, зносостійкі, вогнетривкі та ін.). Умови підбору компонентів СВС-системи:

- екзотермічність взаємодії реагентів;
- утворення корисних твердих продуктів;
- технічна та економічна доцільність.

Для ініціації СВС-процесів необхідний нагрів суміші до високої температури (залежно від складу інгредієнтів від 600 °С до 1 000 °С і вище).

У такому процесі хімічна реакція протікає у вузькій зоні, мимовільно переміщається по речовині з певною лінійною швидкістю. Висока

температура, необхідна для швидкого перебігу реакції, створюється в результаті звільнення хімічної енергії, запасеної у вихідній системі. Протікання реакції супроводжується яскравим світінням.

### **Обладнання та інструмент**

1. Токарно-гвинторізний верстат мод.1К625.
2. Валок зі сталі 40Х діаметром  $d = 40$  мм і різною шорсткістю пасків.
3. Порошкові сполуки металів:  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , С, Cu.
4. Ацетон технічний  $CH_3COCH_3$ , рідке скло, крохмаль.
5. Автотрансформатор.
6. Високовольтна установка.
7. Тара для змішування та зберігання матеріалів.
8. Електрод мідний.
9. Твердомір ЕТМ-01.
10. Мікроскоп цифровий.
11. Прилад для вимірювання твердості.

### **Порядок проведення роботи**

Зразок піддається попередній токарній обробці на токарно-гвинторізному верстаті мод.1К625 різцем прохідним із твердого сплаву Т5К10.

Після цього на валок наносяться попередньо приготовані суміші СВС+вуглець і СВС+мідь рівномірним шаром товщиною 1 і 2 мм. Установлюється на верстат, підводиться електрод і проводиться обробка вала в середовищі коронного розряду. Установлюються режими різання  $S = 0,08; 0,2$  і  $0,3$  мм/об і  $n = 40$  об/хв. Вмикається спочатку шпиндель (деталь обертається), потім автоматична подача. Попередньо мідний електрод установлений у різцетримач і виставлений так, щоб між ним і деталлю залишався зазор в  $0,08...0,3$  мм. До електроду підведений промисловий струм через автотрансформатор.

У процесі переміщення електрода уздовж обробленої заготовки виникає коронний розряд, енергія якого й ініціює процес горіння суміші. У процесі горіння елементи суміші взаємодіють, і виділяється кисень, який цей процес підтримує. У процесі горіння металеві елементи сумішею

впроваджуються в поверхневі шари заготовок. Це тягне за собою зміну металеві структури (зміна решітки), міцності властивостей зразків (твердість), а також є поверхневим легуванням.

Після обробки зразок знімається з верстата, і проводяться вимірювання, які заносяться в таблиці 11.1, 11.2.

*Таблиця 11.1 – Результати експерименту СВС + вуглець*

№	t, мм	z, мм	S, мм/об	Ra 2	HB 2
1	1	5	0,08		
2	1	3	0,2		
3	1	1	0,3		
4	1	5	0,3		
5	1	3	0,2		
6	1	1	0,08		
7	2	5	0,08		
8	2	3	0,2		
9	2	1	0,3		
10	2	5	0,3		
11	2	3	0,2		
12	2	1	0,08		

*Таблиця 11.2 – Результати експерименту СВС + мідь*

№	t, мм	z, мм	S, мм/об	Ra 2	HB 2
1	1	5	0,08		
2	1	3	0,2		
3	1	1	0,3		
4	1	5	0,3		
5	1	3	0,2		
6	1	1	0,08		
7	2	5	0,08		
8	2	3	0,2		
9	2	1	0,3		
10	2	5	0,3		
11	2	3	0,2		
12	2	1	0,08		

За отриманими даними побудувати графіки залежності  $HV = S$  (поясок). Визначити найефективніші режими обробки, пояснити чому.

### Зміст звіту

1. Назва та мета роботи
2. Таблиці з результатами вимірювань
3. Графічні залежності
4. Висновки

### Контрольні запитання

1. Які основні характерні риси СВС-реакції?
2. Умови підбору СВС-реагентів.
3. До якого виду реакцій належить реакція СВС і чому?
4. Яка температура ініціації процесу твердополум'яного горіння?

## 12 Лабораторна робота 12

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

**Мета роботи:** вивчити особливості електрохімічного способу зміцнення деталей із використанням імпульсних струмів, дослідити вплив технологічних режимів на твердість поверхні виробів після обробки та вибрати оптимальні режими обробки.

### Теоретичні відомості

Для отримання необхідних експлуатаційних характеристик, збільшення запасу міцності в сучасному виробництві застосовують такі види термічної та хіміко-термічної обробки, як: гартування, відпуск, відпал, цементація, ціанування, нітроцементація, азотування, що призводять

до значних викривлень, появи тріщин та припалів. Крім того, застосовують і інші методи зміцнення, такі як гартування ТВЧ, електроімпульсна, плазмова, електрохімічна обробка і т. ін., які в порівнянні з традиційними методами зміцнення менш енергоємні і більш продуктивні [1].

Найбільш актуальними та ефективними поряд із традиційно застосовуваними технологіями є нові чи вдосконалені технології, які спрямовані на структурні та фазові перетворення, зміцнення матеріалів, зміну найважливіших експлуатаційних параметрів, параметрів якості. Сутністю цих методів є обробка поверхонь концентрованими потоками енергії, які забезпечують підвищену інтенсивність технологічного впливу на матеріал, заснованого на використанні потужних джерел енергії.

До таких нових технологічних процесів відносять імпульсну технологію, здатну багаторазово підвищити продуктивність праці, ефективність використання ресурсів, а також знизити матеріаломісткість та енергоємність виробництва за рахунок раціонального розподілу зон технологічного впливу.

Об'єктом цієї роботи є процес впровадження порошкових сумішей під впливом електрохімічного впливу в поверхневі шари сталевих валів із використанням імпульсних струмів і вплив зміни структури поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин. Основними змінними факторами є склади металевих та неметалічних сумішей.

Основною відмінністю представленого методу зміцнення від існуючих є поєднання електрохімічної дії речовин та імпульсної технології.

Сутністю даного методу є проникнення однієї речовини в іншу під час електролітичної дисоціації із застосуванням високої питомої енергії у вигляді генератора імпульсних струмів. У результаті чого відбувається насичення поверхні деталі зміцнювальним компонентом, а застосування імпульсних струмів сприяє більш глибокому проникненню цих речовин у поверхневі шари металу.

Унаслідок такого насичення на поверхні матеріалу формується зміцнений шар. Отримана структура має підвищену твердість, що різко відрізняється від структури вихідного металу.

У зв'язку з тим, що ця структура має низку цінних фізико-механічних та електрохімічних властивостей, виникає питання можливості використання

властивостей із метою підвищення деяких експлуатаційних характеристик деталей машин.

Важливою перевагою представленого методу зміцнення є значне скорочення витрат енергоресурсів (газу, електроенергії, твердого палива та ін.), що впливає на собівартість виготовлення продукції.

### **Обладнання та інструмент**

1. Генератор імпульсних струмів зі структурними характеристиками: діапазон частот імпульсів  $F_1 = 20 \dots 8000$  Гц; напруга  $U = 3 \dots 9$  В; тривалість імпульсів  $\tau_1 = 10^{-6} \dots 10^{-2}$  с; регулювання скважності 20 ... 80 %; форма імпульсу – прямокутна.

2. Валки зі сталі 40ХН діаметром 11 мм та довжиною 15 мм із вихідною твердістю поверхні 230 НВ.

3. Матеріали: дистильована вода, хромовий ангідрид  $\text{CrO}_3$ , борна кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , сульфат марганцю  $\text{MnSO}_4$ .

4. Ацетон технічний  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ .

5. Електронний твердомір ЕТМ-01.

6. Електрод свинцевий.

7. Тара для змішування та зберігання матеріалів (скляна).

### **Порядок проведення роботи**

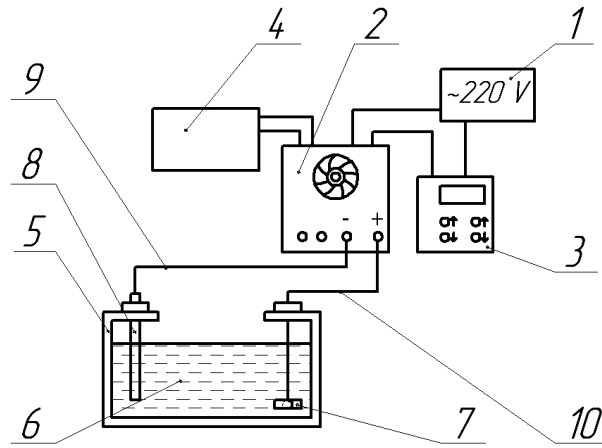
Методика досліджень передбачає вивчення впливу технологічних режимів на показники твердості після електрохімічної дії із застосуванням імпульсних струмів.

На кінцеві результати експерименту впливатимуть такі змінні фактори:

- сила струму 4...25 А;

- частота струму 1 000...5 000 Гц.

Із метою проведення електрохімічного зміцнення під час використання імпульсних струмів необхідно зібрати експериментальну установку, представлена на рисунку 12.1.



1 – джерело постійного струму; 2 – генератор імпульсних струмів;  
 3 – блок управління генератором; 4 – блок конденсаторів; 5 – ванна;  
 6 – розчин електроліту; 7 – деталь; 8 – електрод-анод; 9 – дрiт,  
 що з'єднує анод із джерелом струму; 10 – дрiт, що з'єднує деталь  
 із джерелом струму

Рисунок 12.1 – Схема експериментальної установки

1. Приготувати розчин електроліту.
2. Здійснити підготовку експериментальних зразків до досліді:
  - за допомогою ацетону знежирити поверхні зразків;
  - промити зразки в дистильованій воді;
  - висушити зразки.
3. Установити зразки в установчу конструкцію.
4. Установити режими обробки.
5. Змінюючи силу струму і його частоту, обробляти поверхню зразків при використанні першого зміцнювального матеріалу протягом 25 хвилин.
6. Виміряти твердість поверхні після кожної зміни.
7. Те ж саме повторити для двох інших зміцнювальних матеріалів.
8. Результати експерименту звести до таблиць 12.1, 12.2, 12.3.

Для проведення експерименту з насичення поверхні хромом необхідно приготувати наступний розчин: до 300 мл дистильованої води додати 50 грам хромового ангідриду  $\text{CrO}_3$ . Компоненти розмішати до розчинення. Це співвідношення хромового ангідриду та води було обрано таким, виходячи з його розчинності у воді.



Обробка ведеться за наступних режимів:

- сила струму  $I_1 = 15 \text{ A}$ ,  $I_2 = 25 \text{ A}$ ;
- частота струму  $f_1 = 1\,000 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 3\,000 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 5\,000 \text{ Гц}$ ;
- скважність 50 %.

Таблиця 12.1 – Результати експерименту

Сила струму I, А	Частота імпульсного струму f, Гц	Твердість НВ			
		1	2	3	Середнє значення
15	1 000				
	3 000				
	5 000				
25	1 000				
	3 000				
	5 000				

Для проведення експерименту з насичення поверхні бором приготувати наступний розчин: до 300 мл дистильованої води додати 30 г борної кислоти  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Компоненти розмішати до розчинення. Це співвідношення борної кислоти та води було обрано таким, виходячи з її розчинності у воді.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- сила струму  $I_1 = 4 \text{ A}$ ,  $I_2 = 8 \text{ A}$ ;
- частота струму  $f_1 = 1\,000 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 3\,000 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 5\,000 \text{ Гц}$ ;
- скважність 50 %.

Таблиця 12.2 – Результати експерименту

Сила струму I, А	Частота імпульсного струму f, Гц	Твердість НВ			
		1	2	3	Середнє значення
4	1 000				
	3 000				
	5 000				
8	1 000				
	3 000				
	5 000				

Для проведення експерименту з насичення поверхні марганцем приготувати наступний розчин: до 100 мл дистильованої води додати 10 г сульфату марганцю  $MnSO_4$ . Це співвідношення сульфату марганцю та води було обрано таким, виходячи з його розчинності у воді.

Обробка ведеться за наступних режимів:

- сила струму  $I_1 = 8 \text{ А}$ ,  $I_2 = 16 \text{ А}$ ;
- частота струму  $f_1 = 1\ 000 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 3\ 000 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 5\ 000 \text{ Гц}$ ;
- скважність 50 %.

Таблиця 12.3 – Результати експерименту

Сила струму I, А	Частота імпульсного струму f, Гц	Твердість НВ			
		1	2	3	Середнє значення
8	1 000				
	3 000				
	5 000				
16	1 000				
	3 000				
	5 000				

Примітка: сила струму визначається за такою формулою:

$$I = \frac{U}{R'}$$

де  $U$  – напруга, яку створював генератор імпульсних струмів на виході;

$R$  – опір розчину, Ом.

Опір розчину хромового ангідриду проходженню електричного струму становить  $R_{\text{хром.анг.}} = 360 \text{ мОм}$ .

Опір розчину борної кислоти проходженню електричного струму становить  $R_{\text{борн.кисл.}} = 1125 \text{ Ом}$ .

Опір розчину марганцю сульфату проходженню електричного струму становить  $R_{\text{сульф. марг.}} = 600 \text{ мОм}$ .

9. За отриманими даними кожного випадку побудувати графічні залежності  $HV = f(I)$  при різних силах струму.

10. З аналізу отриманих залежностей зробити висновки про вплив технологічних режимів на твердість поверхневого шару виробів після обробки.

### **Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи
2. Обладнання, заготовки, прилади, матеріали
3. Схема експериментальної установки
4. Умови проведення експерименту (характеристики оброблюваної заготовки, режимна частина, результати дослідів)
5. Графічні залежності
6. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. Які існують методи поверхневого зміцнення деталей машин (традиційні та інноваційні)?
2. Сутність електрохімічного методу зміцнення з використанням імпульсних струмів.
3. Які переваги та недоліки має представлений метод зміцнення?
4. У чому полягає цінність одержаного зміцненого шару?

### 13 Лабораторна робота 13

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ МІДІ

**Мета роботи:** дослідити вплив напруги в мережі та тривалості обробки електронно-іонної імплантації на мікротвердість та шорсткість поверхні при насиченні міді.

### Теоретичні відомості

У наш час стає досить актуальним упровадження прогресивних методів обробки деталей у механічних цехах сучасних машинобудівних заводів. При проєктуванні будь-якого виробу його прагнуть зробити практичним, технологічним і довговічним. Це досягається і правильним вибором матеріалу, і підвищенням точності виготовлення. Однак навантажені деталі або ті, що працюють в умовах агресивних середовищ, зазнають при своїй роботі дії руйнівних сил тертя й хімічної корозії, у зв'язку з чим постає питання й захисту поверхонь виробу.

Модифікування поверхневого шару деталі застосовується для підвищення працездатності поверхонь деталей машин, прес-форм, приладів і інструменту, широко застосовується в сучасному машинобудуванні. Одним зі способів підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин є запропонований спосіб насичення іонами будь-яких металів на основі електронно-іонної імплантації [1].

Отже в цій лабораторній роботі розглянуто спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин на основі електронно-іонної імплантації за допомогою нанесення міді.

Запропонований спосіб поверхневого насичення деталей машин утворений комбінуванням вище описаних способів і подальшим їхнім удосконаленням. Спосіб електронно-іонної імплантації полягає в обробці деталей у середовищі, у якому міститься електричний дуговий розряд, що і вводиться в елемент (поверхня деталі, яка підлягає обробці).

Це забезпечує перенос іонів у потоці електричного струму високої щільності, де у якості провідника слугує шнур коронного розряду.

Для цього шнура характерні властивості складного провідника з високим розрядженням (до 10...14 Па) середовища внутрішньої частини шнура з узгодженням полярності струму, який і переносить формуючий потік іонів матеріалу електрода, який імплантується.

Перевагою цього способу є те, що обробку поверхонь можна робити безпосередньо на верстаті, де встановлена оброблювана деталь. Це виключає проблеми використання складного й дорогого вакуумного обладнання, спрощує введення й виведення оброблюваного матеріалу із зони обробки, і, відповідно, очікуються невисокі експлуатаційні витрати.

Наші експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні про підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей за допомогою електронно-іонної імплантації. Дослідженню так само підлягає якість поверхні, отриманої в результаті обробки.

Реалізація способу насичення шляхом електронно-іонної імплантації проводиться в такий спосіб.

Деталь, яка підлягає обробці (тіло обертання), установлюється в центрах експериментальної установки. Від джерела струму високої напруги створюється потік електричного струму коронного розряду, який впливає на поверхню оброблюваної деталі. У тіло шнура підводиться електрод струму високої напруги з узгодженням полярності високовольтного шнура. Електрод, який установлюється в тримач із текстоліту, забезпечує виникнення коронного розряду. Деталь отримує обертовий рух. У результаті здійснюється обробка робочої поверхні деталі.

Використання методу нейромережевого моделювання дозволяє науково обґрунтувати експериментальні дослідження, на основі чого можна дати об'єктивну оцінку результатів експерименту. Нейромережеве моделювання використовується для вирішення слабо формалізованих задач із неповною інформацією при великій кількості вхідних факторів, відсутності єдиного підходу до їх отримання.

Основу кожної штучної нейронної мережі складають відносно прості, у більшості випадків – однотипні елементи (комірки), що імітують роботу нейронів мозку.

Безліч усіх нейронів штучної нейронної мережі можна поділити на підмножини – шари. Взаємодія нейронів відбувається пошарово. Шар

штучної нейронної мережі – це безліч нейронів, на які в кожен такт часу паралельно надходять сигнали від інших нейронів цієї мережі.

Основне завдання нейромережевого моделювання результатів експериментальних досліджень – виявлення залежності впливу режимів та тривалості обробки електронно-іонною імплантацією на мікротвердість та якість обробленої поверхні.

На основі використаного набору параметрів (тобто результатів експерименту з відомими вхідними і вихідними факторами) здійснено навчання нейронної мережі. Навчена нейронна мережа за допомогою відповідного математичного апарату набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними і вихідними факторами технічної системи та являє собою модель явища, за допомогою якої можна проводити цілеспрямовані дослідження.

Середні значення експериментальних даних використовуються у якості вхідних для побудови математичної моделі. За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro-0.25 будуватиметься математична модель на основі нейромережевого моделювання, де вхідними симптомами були значення встановленого зазору між поверхнею деталі та електродом і значення тривалості обробки ( $h$ ,  $t$ ), а кінцевими синдромами – значення мікротвердостей та шорсткості поверхні при наявності дуги та без наявності дуги.

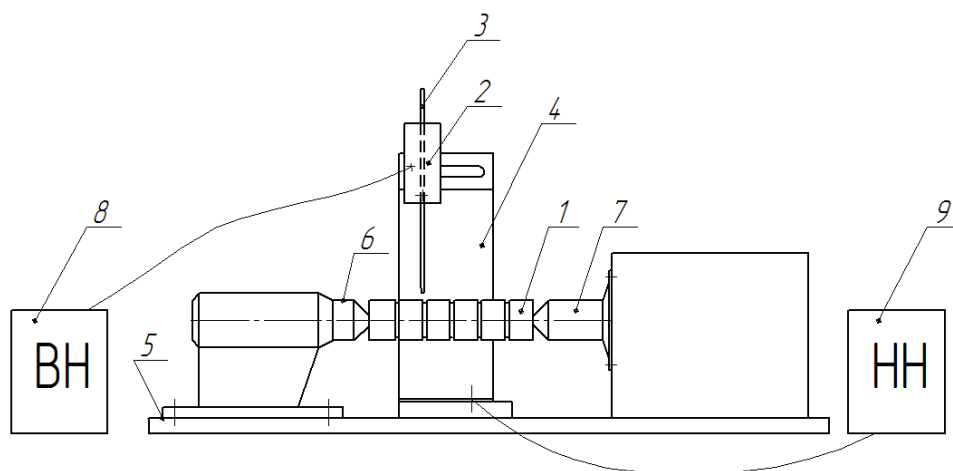
### **Обладнання та інструмент**

1. Мідний електрод
2. Установка для електронно-іонної імплантації
3. Дослідний зразок
4. Вольтметр
5. Амперметр
6. Набір металевих шаблонів (1; 1,5; 2 та 4 мм)
7. Програмне забезпечення NeuroPro-0.25

### **Порядок проведення роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Установити деталь 1 в центрах 6 та 7 лабораторної установки (рисунк 13.1), електрод 3 установити у текстолітовий тримач 2. Установити необхідний зазор між поверхнею деталі, що підлягає обробці, та електродом

і встановити відповідну напругу в ланцюзі 9, використовуючи тарувальний графік на рисунку 13.2. На графіку відзначені точки під номерами 1...8, які відповідають порядковому номеру експерименту.



1 – деталь (дослідний зразок); 2 – тримач електрода; 3 – електрод;  
4 – планка; 5 – основа; 6 – нерухомий задній центр; 7 – рухомий передній центр; 8 – джерело високої напруги; 9 – джерело низької напруги

Рисунок 13.1 – Схема лабораторної установки

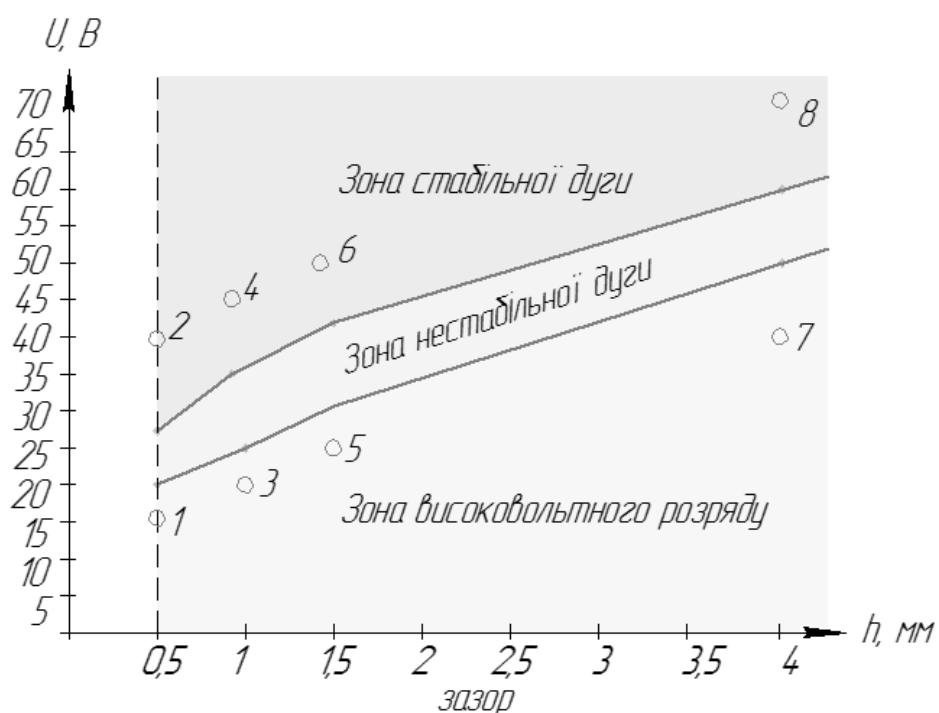


Рисунок 13.2 – Тарувальний графік залежності величини напруги від зазору

3. Налаштувавши установку на обробку високовольтним розрядом (без дуги), провести обробку за прямої полярності (електрод – «плюс», деталь – «мінус»).

4. Обробку провести протягом 5, 10 та 15 хвилин.

5. Налаштувати установку на обробку дуговим розрядом та провести обробку протягом 1, 2 та 3 хвилин.

6. Також провести ряд обробок, але при різних значеннях зазорів.

7. Для дослідження роботи даного методу провести обробку зі зворотною полярністю (електрод – «мінус», деталь – «плюс») за різні проміжки часу.

8. Дослідити отриману поверхню (виміряти шорсткість, мікротвердість та визначити глибину імплантації).

9. Результати вимірів звести у таблиці 13.1 і 13.2. Отримані результати обробити у програмному пакеті NeuroPro-0.25: створити нейронну мережу, побудувати математичну модель та графік значущості входів.

10. Зробити висновки про вплив режимів обробки електронно-іонної імплантації на мікротвердість та якість отриманої поверхні.

### **Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи
2. Таблиці з вимірними значенням мікротвердості та шорсткості обробленої поверхні
3. Математичні моделі залежності мікротвердості та шорсткості обробленої поверхні
4. Графіки залежності мікротвердості та шорсткості обробленої поверхні від тривалості обробки при різних значеннях напруги
5. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. З якою метою здійснюється модифікування робочих поверхонь деталей машин?
2. У чому полягає спосіб електронно-іонної імплантації? Які його переваги та недоліки?



3. З якою метою використовується тарувальний графік?
4. Що таке нейронні мережі?
5. З якою метою використовується математичне моделювання?
6. Як впливають напруга та тривалість обробки електронно-іонної імплантації на якість обробленої поверхні та її мікротвердість (без дуги та при її появі)?

### Список рекомендованої літератури

1. **Погребна, Н.Е.** Способи зміцнення металів : навчальний посібник / Н. Е. Погребна, В. З. Куцова, Т. В. Котова – Дніпро : НМетАУ, 2021. – 89 с.

*Таблиця 13.1 – Результати експерименту. Залежність мікротвердості від режимів обробки*

Зазор h, мм	Час t, мм	Мікротвердість, МПа							
		Без дуги				З дугою			
		1	2	3	Σ	1	2	3	Σ
0,5	5								
	10								
	15								
1	5								
	10								
	15								
1,5	5								
	10								
	15								
4	5								
	10								
	15								

Таблиця 13.2 – Результати експерименту. Залежність шорсткості від режимів обробки

Зазор h, мм	Час t, хв	Ra, мкм з дугою			
		1	2	3	Σ
0,5	5				
	10				
	15				
1	5				
	10				
	15				
1,5	5				
	10				
	15				
4	5				
	10				
	15				

#### 14 Лабораторна робота 14

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ АЛЮМІНІЮ

**Мета роботи:** збільшення експлуатаційних показників поверхневого шару, що має складну криволінійну форму, методом електронно-іонної імплантації в середовищі поверхнево-активних речовин.

#### Теоретичні відомості

У сучасному виробництві виникає необхідність збільшення довговічності, зносостійкості та надійності робочих поверхонь відповідальних деталей, що працюють при високих температурах та навантаженнях, робоча поверхня яких має складну криволінійну форму. Усі ці завдання можуть

бути виконані як за рахунок виробництва нових спеціальних матеріалів, так і за рахунок розвитку у виробництві новітніх методів зміцнення, насичення та нанесення захисних покриттів на поверхню. Одним з таких способів поверхневого насичення поверхонь деталей машин є метод електронно-іонної імплантації в середовищі поверхнево-активних активних речовин.

Модифікація поверхневого шару деталі застосовується для підвищення працездатності поверхонь деталей машин, прес-форм, приладів та інструменту, широко застосовується в сучасному машинобудуванні. Іонно-плазмову обробку застосовують для підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах адгезійного та дифузійного зношування при високих температурах навколишнього середовища; виконують її переважно у вакуумних установках.

Найбільш перспективним методом отримання твердих та зносостійких модифікованих покриттів є іонна імплантація, яка дозволяє отримувати захисні покриття у нанокристалічному стані, що характеризується високими фізичними та технологічними властивостями.

Електронно-іонна імплантація – це впровадження у поверхню твердого тіла практично будь-якого іона, попередньо розігнаного в електромагнітному полі. Ці іони впроваджуються у матеріал на глибину від 0,01 до кількох десятків мікрометрів, створюючи у поверхневому шарі особливий структурний стан. Товщина модифікованого шару залежить від енергії іонів, їхньої маси та маси атомів мішені. Енергія іонів може змінюватися в широких межах (залежно від властивостей матеріалів комбінації іон-мішень – від 1 кеВ до декількох мегаелектронвольт (МеВ)). Крім того, впровадження іона в поверхню мішені відбувається без дотримання законів класичної термодинаміки, що визначає рівноважні процеси, наприклад дифузію.

Тож у цій лабораторній роботі розглянуто спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин на основі електронно-іонної імплантації серед поверхнево-активних речовин за допомогою нанесення алюмінію.

Поверхнево-активні речовини – це хімічні сполуки, які, концентруючись на поверхні розділу фаз, викликають зниження поверхневого натягу. За допомогою ПАР можна впливати на енергетичний стан та структуру

між фазами поверхні та через неї регулювати властивості гетерогенних систем [1].

Запропонований спосіб електронно-іонної імплантації полягає в насиченні іонами будь-якого металу поверхневого шару деталі за рахунок бомбардування його високоенергетичними іонами. Ці іони імплантуються у матеріал на глибину від 0,01 до кількох десятків мікрметрів. Вони створюють у поверхневому шарі особливий структурний стан. Іонне бомбардування призводить до нагрівання металу. Температура нагрівання залежить від щільності іонного струму, енергії іонів та теплофізичних характеристик матеріалу деталі, що обробляється.

Деталь знаходиться у звичайному виробничому середовищі з введенням поверхнево-активних речовин (можуть бути застосовані як катіонні, так і іонні ПАР, вибір яких залежить від матеріалу та властивостей електрода та оброблюваної деталі).

ПАР формують на поверхні шар орієнтованих молекул, які зміцнюють його, що запобігає потраплянню кисню в зону насичення, тому не відбувається вигорання вуглецю, також шар ПАР дає безперервний контакт середовища між електродом та робочою поверхнею, яку обробляють.

У якості провідника застосовують частину шнура коронного розряду за узгодженням полярності та фази імпульсного струму, що переносить сформований потік іонів електрода, який використовується для імплантування.

Наші експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні про підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей за допомогою електронно-іонної імплантації серед поверхнево-активних речовин. Дослідженню також підлягає якість поверхні, отриманої в результаті обробки.

Використання методу нейромережевого моделювання дозволяє науково обґрунтувати експериментальні дослідження, з урахуванням чого можна дати об'єктивну оцінку результатів експерименту.

Нейромережеве моделювання використовується для розв'язання слабо формалізованих завдань із неповною інформацією за великої кількості вхідних факторів, відсутності єдиного підходу до їх отримання.

Основне завдання нейромережевого моделювання – створення системи контролю, яка дозволить відстежувати процес контролю параметрів пластин у реальних умовах.

На основі використаного набору параметрів (тобто результатів експерименту з відомими вхідними та вихідними факторами) здійснено навчання нейронної мережі. Наукова нейронна мережа за допомогою відповідного математичного апарату набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними та вихідними факторами технічної системи та являє собою модель явища, за допомогою якої можна проводити цілеспрямовані дослідження.

Середні значення експериментальних даних використовуються в якості вхідних для побудови математичної моделі.

За результатами експерименту за допомогою програмного забезпечення NeuroPro 0.25 будується математична модель на основі нейромережевого моделювання, де вхідними симптомами були матеріал імплантованого електрода та значення тривалості обробки ( $m$ ,  $t$ ), а кінцевими синдромами – значення мікротвердості при застосуванні високовольтного розряду та прискореного потенціалу і значення шорсткості поверхні.

### **Обладнання та інструмент**

1. Електроди (Cu, Al, W)
2. Установа для електронно-іонної імплантації
3. Дослідний зразок
4. Розчин поверхнево-активних речовин
5. Програмне забезпечення NeuroPro-0,25

### **Порядок проведення роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Установити заготовку та покрити шаром ПАР. Закріпити на заготовці заземлення за допомогою хомути.
3. Закріпити електрод у текстолітовому утримувачі, який має з обох боків два отвори під гвинти. В отвори встановити гвинти, один з яких закручується до дотику з електродом, а інший закручується так, щоб залишився зазор між електродом і гвинтом.
4. Установити тримач із електродом на штатив над деталлю.

5. За допомогою щупа встановити зазор між електродом та заготовкою. До гвинтів приєднати дроти, які з'єднати з високовольтним генератором та іншими елементами ланцюга.

6. Установити напругу  $U = 100 \text{ В}$ .

7. Виконати обробку заготовки з прискореним потенціалом.

8. Заміряти показники мікротвердості та шорсткості.

9. Отримані результати звести в таблицю 14.1.

*Таблиця 14.1 – Параметри процесу імплантації із застосуванням прискореного потенціалу*

Електрод	Час $t$ , хв	Мікротвердість МПа				$R_a$ , мкм
		1	2	3	Середнє	
Cu	5					
	10					
	15					
Al	5					
	10					
	15					
W	5					
	10					
	15					

10. Змінюючи час імплантації та електроди, виготовлені з різних матеріалів (Cu, Al, W), повторити п. 3...8.

11. Змінити імплантацію з прискореним потенціалом на імплантацію із застосуванням високовольтного розряду.

12. Виконуємо п. 3...8,10,11.

13. Отримані результати звести у табл. 14.2.

14. Зробити висновки про вплив матеріалу імплантованого електрода та тривалість імплантації на мікротвердість і шорсткість.

Таблиця 14.2 – Параметри процесу імплантації з високовольтного розряду

Електрод	Час t, хв	Мікротвердість МПа				Ra, мкм
		1	2	3	Середнє	
Cu	1					
Al	1					
W	1					

### Зміст звіту

1. Назва та мета роботи
2. Таблиці параметрів імплантації із застосуванням прискореного потенціалу та високовольтного розряду
3. Математична модель та графіки залежності мікротвердості та шорсткості від матеріалу та часу імплантації для прискореного потенціалу і високовольтного розряду
4. Висновки

### Контрольні запитання

1. Що таке електронно-іонна імплантація?
2. Що дає застосування середовища поверхнево-активних речовин?
3. Від чого залежить вибір середовища ПАР?
4. Назвіть параметри, які мають найбільший вплив на мікротвердість та шорсткість поверхневого шару?
5. Що являють собою нейронні мережі?

### Список рекомендованої літератури

1. **Погребна, Н.Е.** Способи зміцнення металів : навчальний посібник / Н. Е. Погребна, В. З. Куцова, Т. В. Котова – Дніпро : НМетАУ, 2021. – 89 с.

## 15 Лабораторна робота 15

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ У СЕРЕДОВИЩІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ

**Мета роботи:** дослідити спосіб електронно-іонного сканування, підібрати оптимальні режими сканування в умовах реального виробництва.

### Теоретичні відомості

У наш час для того, щоб підприємство залишалось конкурентоспроможним на ринку, необхідно знижувати ціну й покращувати якість товару, щоб зацікавити покупця. Одним зі способів зниження вартості товару є скорочення витрат на зміцнення робочих поверхонь [1]. Одним зі способів є збільшення фізичних і хімічних властивостей поверхні. У цій лабораторній роботі розглянуто спосіб покращення фізичних властивостей – спосіб електронно-іонного сканування.

Здавалося б, що такого в коронному розряді? Візьмемо для прикладу опис коронного розряду в підручнику для 9-го класу: «При атмосферному тиску в сильно неоднорідних електричних полях спостерігається розряд, область світіння якого часто нагадує корону. Тому його і назвали коронним. Щільність заряду на поверхні провідника тим більше, чим більше його кривизна. На вістрі щільність заряду максимальна. Тому біля вістря виникає сильне електричне поле. Коли його напруженість перевищить  $3 \cdot 10^6$  В/м, настає розряд. У міру віддалення від поверхні провідника напруженість швидко спадає. Тому іонізація і пов'язане з нею світіння газу спостерігається в обмеженій області простору. З коронним розрядом доводиться рахуватися, маючи справу з високою напругою. За наявності виступаючих частин або дуже тонких проводів може початися коронний розряд».

Дослідження в цій області показали, що унікальні властивості коронного розряду дають можливість здійснення різноманітних технологічних рішень, таких як електроочищення газу та води, електрографія, генерація озону, дефектоскопія, активація порошкових матеріалів, створення наноматеріалів, контроль металевих виробів, зміцнення та ін. Для реалізації конкретного технологічного процесу необхідно управляти



енергетичними характеристиками коронного розряду. У більшості випадків це зводиться до практично єдиного способу – зміни величини напруги в розрядному контурі, у тому числі – в умовах навколишнього середовища (за відсутності вакууму).

Використання методу нейромережевого моделювання дозволяє обробити експериментальні дані, на основі чого можна давати об'єктивну оцінку процесу сканування. Нейромережеве моделювання використовується для вирішення слабо формалізованих завдань із неповною інформацією при великій кількості вхідних факторів, відсутності єдиного підходу до їх отримання.

Основу кожної штучної нейронної мережі складають відносно прості, у більшості випадків – однотипні, нейроноподібні елементи (комірочки). Безліч усіх нейронів штучної нейронної мережі можна розділити на підмножини – шари. Взаємодія нейронів відбувається пошарово. Шар штучної нейронної мережі – це безліч нейронів, на які в кожен такт часу паралельно надходять сигнали від інших нейронів цієї мережі. Основне завдання нейромережного моделювання – створення системи контролю, яка дозволить відстежувати процес електронно-іонного сканування в реальних умовах.

На основі даних про оброблені пластини методом сканування проводиться навчання нейронної мережі. Навчена нейронна мережа набуває здатність будувати асоціативні зв'язки між вхідними та вихідними факторами технічної системи і являє собою модель явища, за допомогою якої можна проводити цілеспрямовані дослідження.

### **Обладнання та інструмент**

1. Набір попередньо оброблених пластин 150мм×20мм×3мм (4 шт.)
2. Штатив
3. Набір електродів (мідний, алюмінієвий, вольфрамовий)
4. Акумулятор
5. Реостат
6. Генератор частоти
7. Індуктори (4 шт.)
8. ЛАТР
9. Помножувач

10. Набір провідників
11. Набір стандартного кріплення
12. Прилад для вимірювання шорсткості
13. Прилад для вимірювання твердості
14. Мікроінтерферометр
15. Фотоапарат
16. Профілограф
17. Комп'ютер
18. Програмне забезпечення NeuroPro-0.25

### **Порядок проведення роботи**

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Скласти матрицю експерименту (таблиця 15.1).
3. Зібрати лабораторну установку за схемою (рисунок 15.1).

*Таблиця 15.1 – Матриця експерименту*

$\omega$ , кГц	h, мм	t, хв	Ra	НВ	t, мкм
4	3	0,5			
1	7	1			
4	5	1,5			
2	7	0,5			
1	5	1			
2	3	1,5			
4	7	1,5			
1	3	0,5			
2	5	1			

4. Провести розмітку пластин.
5. На лабораторній установці закріпити пластину. Виставити режими обробки згідно з матрицею експерименту. Увімкнути установку в мережу. Провести обробку поверхні пластини електронно-іонним скануванням. Повторити дослідження для всіх пластин за допомогою різних електродів.
6. Отримані результати занести в таблицю згідно з матрицею експерименту.

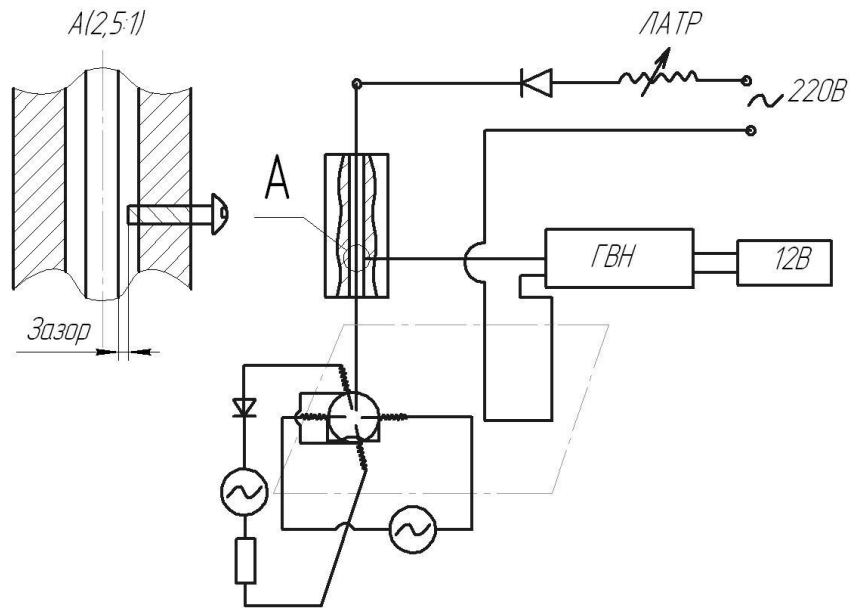


Рисунок 15.1 – Схема лабораторної установки

7. За допомогою програми NeuroPro-0.25 створити нейронну мережу, побудувати математичну модель та графік значущості входів.
8. Зробити висновки щодо режимів обробки, прийняти оптимальні.

### Зміст звіту

1. Назва та мета роботи
2. Таблиці з характеристиками оброблених поверхонь
3. Математична модель та графік значущості входів
4. Висновки про зміну фізичних властивостей дослідних зразків
5. Висновки

### Контрольні запитання

1. Які вчення лежать в основі методу електронно-іонного сканування?
2. З якою метою застосовують метод електронно-іонного сканування?
3. Чому можливе збільшення твердості поверхні після обробки методом сканування?
4. Чому можливе зменшення шорсткості поверхні після обробки методом сканування?

5. Що являють собою нейронні мережі?
6. З якою метою проводять нейромережеве моделювання процесу сканування?

### **Список рекомендованої літератури**

1. **Погребна, Н.Е.** Способи зміцнення металів : навчальний посібник / Н. Е. Погребна, В. З. Куцова, Т. В. Котова – Дніпро : НМетАУ, 2021. – 89 с.

## **16 Лабораторна робота 16 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Мета роботи:** системний аналіз технологічних характеристик матеріалів різального інструменту токарної групи для підвищення ефективності застосування різального інструменту різних фірм-виробників.

### **Теоретичні відомості**

Як відомо, різальний інструмент є тим засобом, без якого неможливо реалізувати закладені у верстатах технологічні можливості та досягти високих техніко-економічних показників обробки деталей. Створено нові високоефективні інструментальні матеріали, розширено номенклатуру та випуск багатогранних непереточуваних пластин, у тому числі зі зносостійким покриттям, розроблено більш досконалі конструкції інструментів із механічним кріпленням пластин тощо.

У розпорядженні технолога сьогодні великий вибір різального інструменту, що має різні технологічні можливості та різальні властивості. Поряд з інструментом загального призначення стандартизовані та випускаються інструменти для обробки деталей зі сталей і сплавів, що важко обробляються, і легких сплавів, освоєно випуск цільнотвердосплавних

кінцевих інструментів, різців і фрез, оснащених різальними пластинами з твердого сплаву, мінералокераміки та надтвердих матеріалів.

В цих умовах перед молодим технологом виникає складне завдання: правильно вибрати і якнайкраще застосувати той чи інший інструмент у конкретних виробничих умовах обробки деталі.

Існує безліч фірм, що пропонують свої новітні розробки в галузі обробки матеріалів різанням, як, наприклад, компанії: Pramet, Hanita, Walter, Sandvik Coromant, Hertel, Seco, Tizit Plansee, Krupp Widia, Dijet та багато інших фірм (додаток А).

Нова класифікація матеріалів різальних інструментів та їх конструкцій на основі запропонованих у роботі правил дозволяє запропонувати ефективний інженерний інструмент, що узагальнює рекомендації щодо раціонального застосування марок інструментальних матеріалів з урахуванням основних умов експлуатації інструменту: марки оброблюваного матеріалу, операції, стану поверхні заготовки, режимів різання, якості одержуваної поверхні.

Нейронні мережі (Neural Networks) – це моделі біологічних нейронних мереж мозку, у яких нейрони імітуються простими, часто однотипними елементами (штучними нейронами).

Серед сфер застосування нейронних мереж – автоматизація процесів розпізнавання образів, прогнозування, адаптивне управління, створення експертних систем, організація асоціативної пам'яті, обробка аналогових та цифрових сигналів, синтез та ідентифікація електронних ланцюгів та систем.

Можна виділити дві базові архітектури – шаруваті та повнозв'язкові.

Ключовим у шаруватих мережах є поняття шару.

Шар – один або кілька нейронів, на входи яких подається той самий загальний сигнал. Шаруваті нейронні мережі – нейронні мережі, у яких нейрони розбиті на окремі групи (шари), отже обробка інформації здійснюється пошарово.

У межах одного шару дані обробляються паралельно, а в масштабах всієї мережі обробка ведеться послідовно – від шару до шару. До шаруватих нейронних мереж відносяться, наприклад, багатошарові перцептрони, мережі радіальних базисних функцій, когнітрон, неокогнітрон, мережі асоціативної пам'яті.

Одна з можливих класифікацій нейронних мереж – за спрямованістю зв'язків. Нейронні мережі бувають зі зворотними зв'язками та без зворотних зв'язків. Мережі зі зворотним розповсюдженням помилки характеризуються фіксованою структурою, ітераційним навчанням, коригуванням ваг помилок.

Перевагами мереж без зворотних зв'язків є простота їхньої реалізації та гарантоване отримання відповіді після проходження даних по шарах.

Недоліком цього виду мереж вважається мінімізація розмірів мережі – нейрони часто беруть участь у обробці даних.

Менший об'єм мережі полегшує процес навчання.

Мережі зі зворотними зв'язками:

- мережі Хопфілда (завдання асоціативної пам'яті);
- мережі Кохонена (завдання кластерного аналізу).

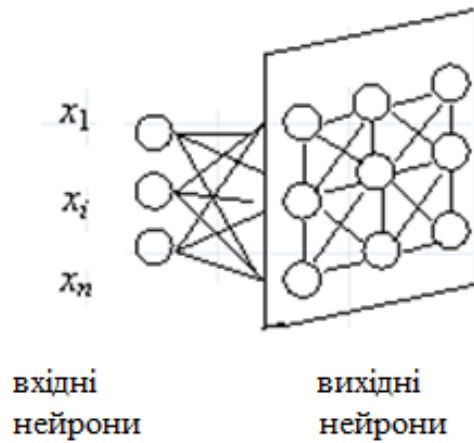
Перевагами мереж зі зворотними зв'язками є складність навчання, викликана великою кількістю нейронів для алгоритмів одного й того ж рівня складності.

Недоліки цього виду мереж – потрібні особливі умови, що гарантують збіжність обчислень.

Мережі, що зветься картами Кохонена, – це один із різновидів нейронних мереж, проте вони принципово відрізняються від розглянутих вище, оскільки використовують неконтрольоване навчання [1]. Нагадаємо, що при такому навчанні навчальна множина складається лише зі значень вхідних змінних, у процесі навчання немає порівнювання виходів нейронів з еталонними значеннями. Можна сказати, що така мережа вчиться розуміти структуру даних.

Карти, що самоорганізуються, можуть використовуватися для вирішення таких завдань, як моделювання, прогнозування, пошук закономірностей у великих масивах даних, виявлення наборів незалежних ознак і стиснення інформації.

Найбільш поширене застосування мереж Кохонена – вирішення завдання класифікації без учителя, тобто кластеризації. Мережа Кохонена, на відміну від багат шарової нейронної мережі, дуже проста; вона являє собою два шари: вхідний та вихідний. Її також називають картою, що самоорганізується. Елементи карти розташовуються в деякому просторі, як правило, двовимірному. Мережа Кохонена зображена на рисунку 16.1



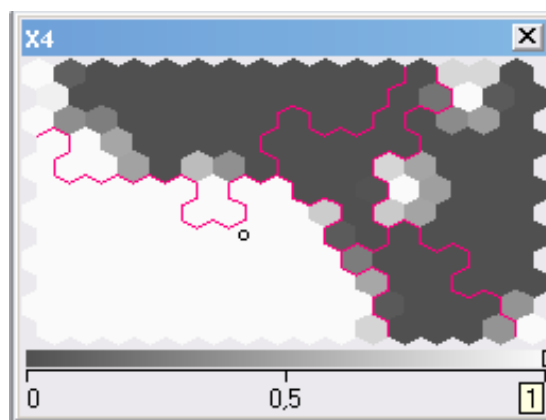
*Рисунок 16.1 – Мережа Кохонена*

Мережа Кохонена навчається шляхом послідовних наближень. У процесі навчання таких мереж на входи подаються дані, але мережа при цьому підлаштовується не під еталонне значення виходу, а під закономірності у вхідних даних. Починається навчання з обраного випадковим чином вихідного розташування центрів.

Унікальність методу самоорганізованих карт полягає у перетворенні  $n$ -вимірного простору на двовимірний. Застосування двовимірних сіток пов'язане з тим, що є проблема відображення просторових структур більшої розмірності. Маючи таке подання даних, можна візуально визначити наявність або відсутність взаємозв'язку у вхідних даних.

Нейрони карти Кохонена розташовують у вигляді двовимірної матриці, розфарбовують цю матрицю залежно від аналізованих параметрів нейронів.

На рисунку 16.2 наведено приклад карти Кохонена.



*Рисунок 16.2 – Приклад карти Кохонена*

Інтенсивність кольору в певній точці карти визначається даними, які туди потрапили: комірки з мінімальними значеннями зображуються чорним кольором, комірки з максимальними значеннями – білим.

У результаті роботи алгоритму можна отримати такі карти:

- карта входів нейронів;
- карта виходів нейронів;
- спеціальні карти.

### **Обладнання та інструмент**

1. Комп'ютер
2. Каталоги фірм-виробників різального інструменту
3. Пакет програм Deductor 5.1

### **Порядок проведення роботи**

1 З представлених каталогів зробити випадкову вибірку 50 пластин двох різних фірм.

2 Вибрати основні показники, представлені в каталогах (параметри пластини, тип обробки, умови обробки тощо).

3 Здійснити оцінку характеристик кожної обраної пластини. Оцінку 1 присвоїти пластинам, що володіють цим показником.

4 Підготувати вхідні дані для обробки у Deductor 5.1.

5 Побудувати карти Кохонена за допомогою Deductor 5.1.

6 Зробити висновки.

### **Контрольні запитання**

1 Які проблеми вирішує класифікація нових матеріалів різальних інструментів?

2 Що являють собою нейронні мережі?

3 Назвіть сфери застосування нейронних мереж.

4 Назвіть переваги та недоліки мереж без зворотного зв'язку.

5 Що таке карти Кохонена?



## Зміст звіту

1. Назва, мета роботи
2. Таблиця отриманих даних
3. Карти Кохонена
4. Висновки

### 17 Лабораторна робота 17 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПЛАСТИН

**Мета роботи:** дослідити спосіб підбору груп пластин для фрез методом селективного складання на основі акустичної діагностики.

#### Теоретичні відомості

У теперішній час для того, щоб підприємство залишалося конкурентоспроможним на ринку, необхідно знижувати ціну та покращувати якість товару, щоб зацікавити покупця. Одним зі способів зниження вартості товару є скорочення витрат на різальний інструмент. Але як скоротити ці витрати без шкоди для якості продукції? Одним зі способів є збільшення стійкості різальних інструментів. У цій лабораторній роботі розглянуто спосіб збільшення стійкості фрези за допомогою селективного складання методом акустичного контролю.

Групу пластин на фрезі змінюють тоді, коли хоча б одна з пластин групи досягає критичного зносу. Таким чином, комплект пластин змінюють, навіть якщо вони ще не повністю зношені. Завданням цієї лабораторної роботи є досягнення такого комплектування пластин фрези, при якому пластини зношуватимуться практично однаково і тим самим збільшуватиметься стійкість фрези в цілому.

Одним зі способів відбору ідентичних за своїми властивостями пластин є метод акустичного контролю. Це досягається тим, що в пластині порушуються власні коливання та записуються у файл. Отримані дані обробляються, й у результаті формуються групи пластин для фрез з подібними амплітудно-частотними параметрами.

Для формування групи схожих пластин у лабораторній роботі використовується програма NeuroPro-0.25 для визначення значущих входів, тобто діапазонів частот, які будуть мати вирішальне значення при відборі пластин, а також програма Deductor, необхідна для побудови карт Кохонена, на яких можна наочно побачити, як найбільш раціонально розбити пластини на групи.

Використання методу нейромережевого моделювання дозволяє обробити експериментальні дані, на основі чого можна давати об'єктивну оцінку пластин. Нейромережеве моделювання використовується для вирішення слабо формалізованих завдань із неповною інформацією за великої кількості вхідних факторів, відсутності єдиного підходу до їх отримання.

Основне завдання нейромережевого моделювання – створення системи контролю, яка дозволить відстежувати процес контролю параметрів пластин у реальних умовах.

На основі даних про спектр власних коливань пластин, представлені спектром (АЧХ), проводиться навчання нейронної мережі. Навчена нейронна мережа набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними та вихідними факторами технічної системи і є моделлю явища, за допомогою якої можна проводити цілеспрямовані дії з групування, для чого використовуються карти Кохонена.

Самоорганізована карта Кохонена (англ. Self-organizing map – SOM) – змагальна нейронна мережа з навчанням без вчителя, що виконує завдання візуалізації та кластеризації. Вона є методом проектування багатовимірного простору в простір із нижчою розмірністю (найчастіше двовимірний) і застосовується для вирішення завдань моделювання, прогнозування та ін. Карти Кохонена є однією з версій нейронних мереж Кохонена.

## **Обладнання та інструмент**

1. Набір непереточувальних пластин (20 шт)

2. Штатив
3. Збуджувач власних коливань
4. Звукознімач
5. Комп'ютер
6. Програмне забезпечення SpectraPlus, NeuroPro-0,25, Deductor Academic

### **Порядок проведення роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. На лабораторній установці закріпити пластину фрези. Виконати по ній три удари ударником, а отриманий звук записати за допомогою наданого програмного забезпечення. Повторити дослід для всіх двадцяти пластин.
3. Використовуючи програму SpectraPlus, одержати інтегральні характеристики кожної пластини. У текстовому файлі зберегти таблицю, у якій записані амплітуди та відповідні частоти. Розбити частоти на діапазони 1 000 Гц кожен. Амплітуди, що потрапили в один діапазон, підсумувати для визначення інтегральної площі спектра піддіапазону. Щоб уникнути помилки, дані по кожному трьом вимірюванням усереднити. Отримані дані необхідно записати в таблицю, де кожен стовпчик відповідає певному діапазону, а кожен рядок – певній пластині.
4. Нормалізувати отриману таблицю за пропорцією, прийнявши максимальне значення кожного рядка за 1, а мінімальне – за 0.
5. За допомогою програми NeuroPro-0.25 створити нейронну мережу, побудувати математичну модель та графік значущості входів.
6. За допомогою програми Deductor побудувати карти Кохонена для всіх значущих входів.
7. Зробити висновки про розбиття пластин на групи для встановлення на фрези.

### **Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи
2. Таблиці з нормалізованими інтегральними характеристиками пластин

3. Математична модель та графік значущості входів
4. Карти Кохонена
5. Список пластин за групами
6. Висновки

### **Контрольні запитання**

1. З якою метою відбувається відбір пластин для фрез?
2. Чому можливе збільшення стійкості фрези при селективному методі її складання?
3. Що являють собою нейронні мережі?
4. Що таке карти Кохонена?
5. З якою метою виконується побудова карт Кохонена?

## **18 Лабораторна робота 18 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ**

**Мета роботи:** дослідити метод підвищення стабільності технологічного процесу на основі обґрунтування та вибору показників діагностики абразивних кругів.

### **Теоретичні відомості**

Стабільність технологічного процесу характеризує здатність зберігати значення показників якості у заданих межах із часом. Вона, як відомо, характеризується такими виробничими умовами виготовлення партії різальних інструментів, у яких гарантується незмінність поля розсіювання розмірів і навіть правильне і стійке положення центру групування [1].

Зношування та стійкість, а отже і стабільність роботи різального інструменту на автоматичних лініях визначається комплексом факторів: якістю різального інструменту в стані поставки на автоматичні лінії; точністю розміру, форми та властивостями оброблюваного матеріалу заготовок; ро-

ботою механізмів та датчиків автоматичної лінії; експлуатаційними властивостями допоміжного інструменту та ін. [3].

Зношування робочої поверхні круга при шліфуванні є складним фізико-хімічним і механічним процесом, перебіг якого залежить від усіх умов обробки: характеристики кола, властивостей оброблюваного матеріалу, режиму різання та ін. Залежно від властивостей шліфувальних кругів і умов обробки круги можуть працювати із самозаточуванням і з затупленням. Затуплення кола настає в результаті обламування невігідно розташованих шліфуючих зерен, послідовного їх розщеплення й утворення майданчиків зносу, коли зерна втрачають свої різальні властивості. Самозаточування кола полягає в тому, що в міру затуплення шліфуючих зерен збільшений опір різання викидає зерна зі зв'язки, яка викрашується; у роботу вступають нові зерна, унаслідок чого робоча поверхня кола безперервно оновлюється [1].

Залежно від умов шліфування розрізняють такі основні види зносу (рисунок 18.1):

1. Стирання різальних елементів шліфуючих зерен з утворенням на них майданчиків із більшою чи меншою шорсткістю (рисунок 18.1, *а*).

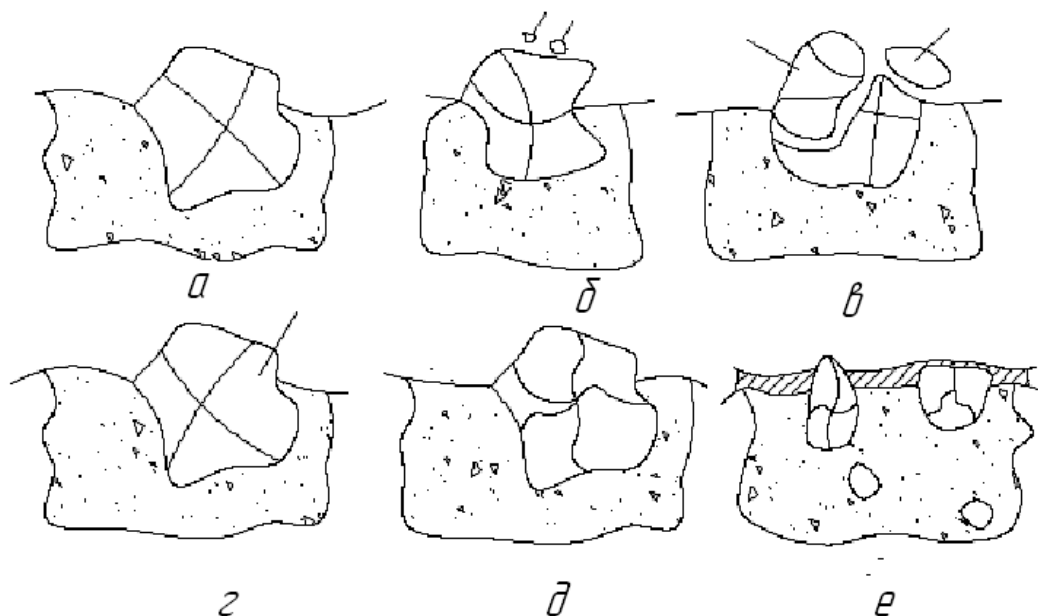
2. Мікроруйнування зерен із відокремленням від них невеликих частинок (рисунок 18.1, *б*).

3. Руйнування зерен із відокремленням від них невеликих частинок, порівнянних із розміром зерна (рисунок 18.1, *в*).

4. Повне виривання зерен зі зв'язки (рисунок 18.1, *г*).

5. Руйнування в результаті протікання хімічних реакцій у зоні контакту зерна з оброблюваним матеріалом при високих температурах, що розвиваються в зоні шліфування (рисунок 18.1, *д*).

6. Забивання проміжків між зернами стружкою та продуктами зношування (рисунок 18.1, *е*).



*Рисунок 18.1 – Основні види зносу шліфувального круга*

Визначити звуковий індекс (ознаку) діагностики на основі аналізу спектра абразивних кругів краще акустичним методом.

Акустичний метод заснований на реєстрації коливань, які збуджуються або виникають в об'єкті, що контролюється. Його застосовують для виявлення поверхневих та внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, дефектів склеювання, зварювання тощо) у деталях та виробах, виготовлених із різних матеріалів. Він дозволяє контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів та металовиробів без їх руйнування [2].

Методи неруйнівного акустичного контролю широко застосовують завдяки низці їх переваг: хвилі легко вводяться в об'єкт контролю, добре поширюються на металах, бетоні та інших матеріалах; ефективні при виявленні дефектів із малим розкриттям, чутливі до зміни структури та фізико-механічних властивостей матеріалів, не становлять небезпеки для персоналу. Використання різних типів хвиль (поздовжніх, поперечних, поверхневих, нормальних та інших) розширює можливості акустичних методів неруйнівного контролю.

## Обладнання та інструмент

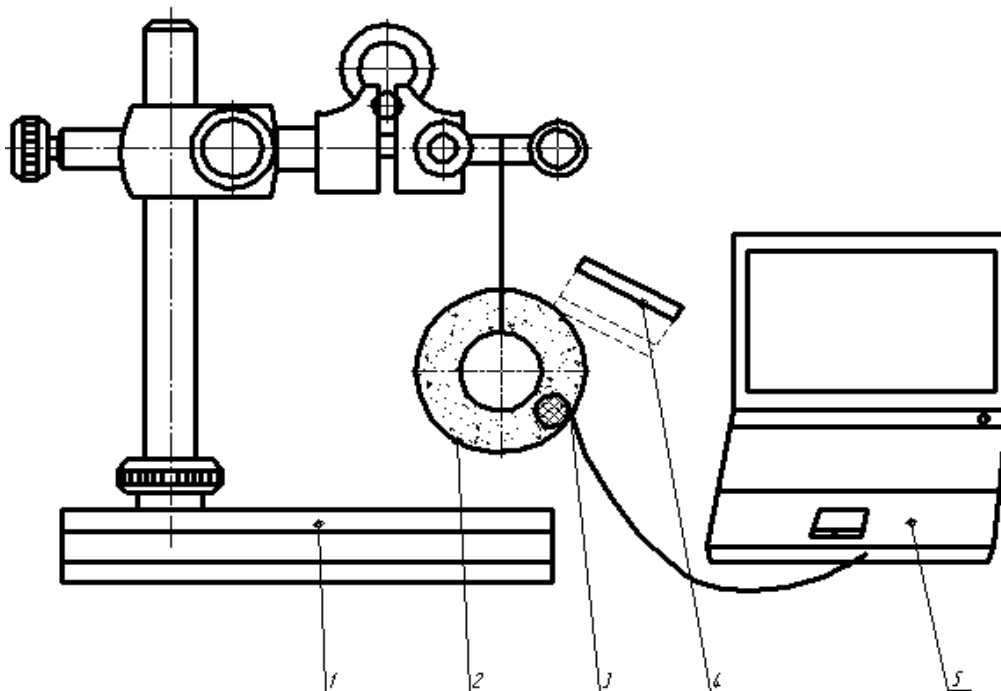
Обладнання: токарно-гвинторізний верстат мод. 1ДО625, зварна конструкція трубчастої форми, комп'ютер, п'єзоелемент, збуджувач власних коливань (ударник), штатив типу Ш-1, гумка.

Матеріали: 3 шліфувальні круги марки ПП 80x20x20 14А 8-Н СТ2 Б 35 ГОСТ 2424-83, 10 загартованих кульок.

## Порядок проведення роботи

Методика досліджень передбачає виявлення звукового індексу експериментальних зразків та групування їх за подібними ознаками .

Експериментальна установка для проведення досліджень представлена на рисунку 18.2.



*1 – штатив; 2 – шліфувальний круг; 3 – п'єзоелемент;  
4 – збуджувач власних коливань (ударник); 5 – ноутбук*

*Рисунок 18.2 – Експериментальна установка*

Далі проводилися дослідження, пов'язані зі зносом шліфувальних кругів. Експериментальна установка, яка представлена на рисунку 18.3, складається з токарно-гвинторізного верстата мод. 1К625 (1), на якому в оправці

закріплений досліджуваний зразок (2), а саме зношення проводиться за рахунок закріпленої в різцетримачі зварної конструкції трубчастої форми (3), усередині якої поміщається пружина із загартованою кулькою.

Принцип дії цієї експериментальної установки: під час роботи верстата  $n = 1\ 000\ \text{хв}^{-1}$  і обертання шліфувального круга до нього за допомогою ручної поперечної подачі впроваджується загартована кулька, висуванню якої сприяла пружина, і виконується зношення круга.



*Рисунок 18.3 – Установка для зношення шліфувального круга*

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. На зразки нанести маркером номери.
3. Підвісити експериментальний зразок на штативі.
4. Прикріпити п'єзоелемент до зразка гумкою.
5. За допомогою збуджувача власних коливань здійснити удар по шліфувальному кругу у восьми різних точках.
6. Записати удари на ноутбук за допомогою програмного забезпечення SpektraPLUS 5.0.
7. Здійснити зношення шліфувальних кругів на токарно-гвинторізному верстаті.



8. Повторити п. 3...6 для зразків, що зазнали зношування.
9. Побудувати таблиці даних.
10. Обробити дані в програмах NeuroPro-0.25 та Deductor Studio Academic (таблиця 18.1).
11. Зробити висновки.

Таблиця 18.1 – Результати вимірювань, значення інтегральних показників

Значення інтегральних показників										
	(0-...) Гц									
Номер шліф. круга	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1										
2										
...										
24										

Примітка: 0 – до зношення, 1 – після зношення.

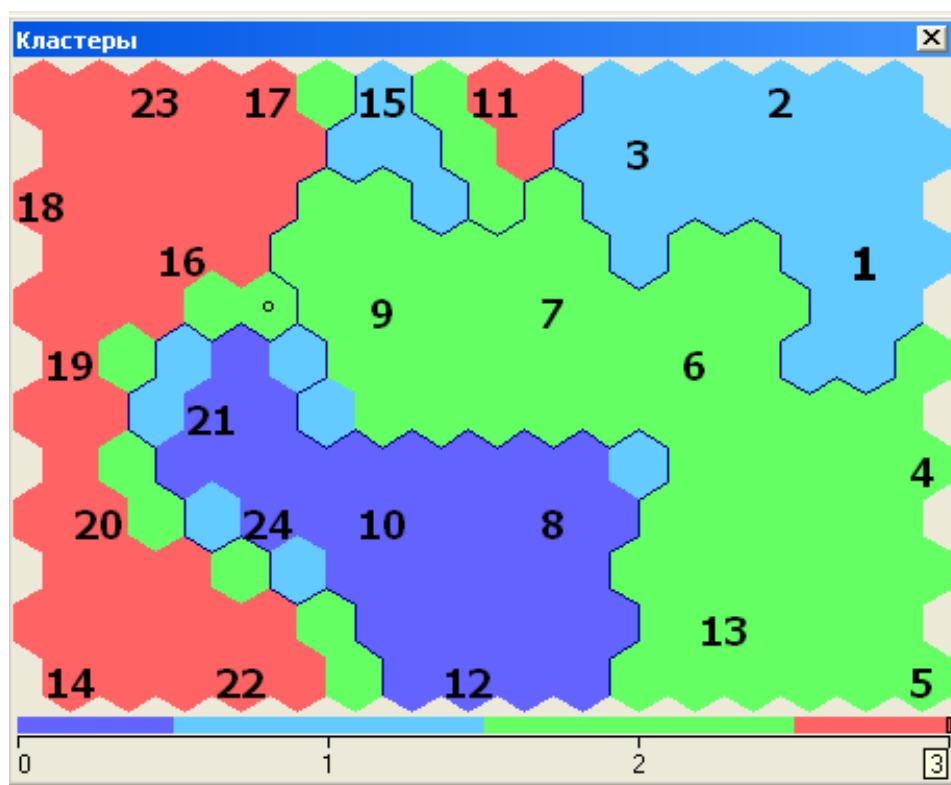


Рисунок 18.4 – Приклад карти Кохонена

## Зміст звіту

1. Назва та мета роботи
2. Схема експериментальної установки
3. Таблиці з результатами експерименту
4. Таблиця результатів обробки даних у програмах NeuroPro-0.25 та Deductor Studio Academic
5. Висновки

## Контрольні запитання

1. Що розуміють під стабільністю технологічного процесу?
2. Що впливає на стабільність технологічного процесу?
3. Види зносу шліфувальних кругів.
4. Акустичний метод контролю. Переваги та недоліки.
5. Принципи роботи в NeuroPro-0.25 та Deductor Studio Academic.

## 19 Лабораторна робота 19

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ДІАГНОСТИКИ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ОБРОБКИ

**Мета роботи:** дослідити метод діагностики якості технологічної системи на основі комплексної оцінки параметрів шорсткості обробки.

## Теоретичні відомості

Техніко-економічні результати роботи машинобудівних підприємств значною мірою залежать від ефективності роботи технологічного устаткування, надійності всіх елементів технологічної системи, одним з яких є різальний інструмент. Досвід експлуатації технологічних систем показує, що різальний інструмент є найменш надійним елементом. Розсіювання стійкості інструменту, непередбачені відмови призводять до зниження продуктивності праці, виникнення браку основного виробництва, підвищеної витрати інструменту, що є дестабілізуючим фактором механообробного процесу.

Підвищене зношування інструменту може мати місце внаслідок незнання або неправильної оцінки режимів різання в конкретних технологічних умовах. У такому разі рекомендується накопичення та використання банку даних щодо застосування інструменту, у якому враховувалися б умови експлуатації та стійкість інструменту конкретного виду, матеріалу, від конкретного постачальника при застосуванні його за різними матеріалами, з різними режимами різання, різними ЗОТЗ.

Надалі, у міру накопичення статистичного матеріалу, можливе застосування примусової заміни інструменту, не чекаючи його катастрофічного зношування або надмірного впливу на точність і стабільність поверхонь, що обробляються.

Загалом, щодо зниження інтенсивності поступових відмов інструменту, необхідний всебічний аналіз та обґрунтоване прийняття рішень щодо режимів різання, щоб забезпечити з одного боку довговічність інструменту, з іншого – необхідну продуктивність.

У якості об'єктів дослідження було обрано вуглецеву конструкційну сталь 45 і сталь 20. Обробка проводилася на верстаті 1К625. Заготовки зі сталі 45 і сталі 20 оброблялися на різних режимах трьома різними пластинами. Фіксувалася величина зношування інструменту і переводилася у відносне зношування (мкм/км). Пластини були представлені фірмами Sandvik Coromant, Vandurit та Seco:

- 1 – Sandvik Coromant CNMG 120408 PF, сплав 4015;
- 2 – Vandurit CNMG 120408-4D V122, сплав P20;
- 3 – SECO CNMG 120408 PF, сплав 4015.

Режими різання:  $V_1 = 80$  м/хв,  $V_2 = 130$  м/хв,  $S_1 = 0,2$  мм/об,  $S_2 = 0,4$  мм/об,  $t_1 = 0,25$  мм,  $t_2 = 1$  мм.

Досліджується 48 зразків. Для вимірювання шорсткості обробки вздовж сліду інструменту з кожного зразка потрібно зробити зліпок.

Після проведення експерименту проводиться аналіз профілограм. При аналізі профілограм необхідно побудувати графіки спектральної щільності – спектрограми. Спектральна щільність є функцією, що описує розподіл дисперсії нерівностей за частотами. Вона показує, які нерівності переважають у цьому профілі.

Функція спектральної щільності дозволяє виконати гармонічний аналіз і виявити найінтенсивніші складові у профілограмі. Ця залежність дає можливість виявити фактори, що діють із певною періодичністю у процесі формування шорсткості поверхні, та скоригувати (за потреби) параметри процесу різання.

Для створення математичної моделі в лабораторній роботі використовується програма NeuroPro-0.25 для визначення значущих входів, тобто діапазонів частот, які будуть вирішувати при діагностиці величини зносу різального інструменту.

Використання методу нейромережевого моделювання дозволяє обробити експериментальні дані, на основі чого можна давати об'єктивну оцінку пластин. Нейромережеве моделювання використовується для вирішення слабо формалізованих завдань із неповною інформацією за великої кількості вхідних факторів, відсутності єдиного підходу до їх отримання.

### **Обладнання та інструмент**

1. Оброблені зразки
2. Пістолет для силіконового клею
3. Профілометр TR200
4. Комп'ютер
5. Програмне забезпечення Excel, NeuroPro-0.25

## Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.
2. Зняти силіконовий зліпок із кожного зразка. Зліпок робиться так: на папір наноситься невеликий шар силіконового клею, зразок прокочується по цьому шару, застиглий клей утворює на папері зліпок гарної якості.
3. Зняти профілограму з кожного зразка за допомогою профілометра TR200.
4. З кожної профілограми виділити по 32 точки ординати з дискретністю 0,01 мм і занести дані до Excel.
5. Провести перетворення Фур'є над отриманим рядом та побудувати спектрограму.
6. За допомогою програми NeuroPro-0.25 створити нейронну мережу, побудувати математичну модель та графік значущості входів.
7. Зробити висновки про значущість вхідних даних для контролю відносного зношення.

## Зміст звіту

1. Назва та мета роботи
2. Профілограми зразків
3. Спектрограми побудовані в Excel
4. Математична модель та графік значущості входів
5. Висновки

## Контрольні запитання

1. З якою метою проводять діагностику стану різального інструменту?
2. Чому для діагностики використовується шорсткість вздовж сліду інструменту?
3. Що являють собою нейронні мережі?
4. Що таке спектр?
5. Через що може спостерігатися підвищене зношування різального інструменту?

**Додаток А**  
**Каталоги фірм-виробників різального інструменту**

**Пластини фірми Pramet**

Здійснено оцінку характеристик кожної обраної пластини. Оцінку 1 отримали пластини, що мають вихідний показник. Результати зведені до таблиць А.1, А.2.

*Таблиця А.1 – Оцінка ознак різальних пластин токарної групи фірми Pramet*

Номер пласт.	Тип обробки								Умови обробки			
	Зовн. обробка	Внутр. обробка	Чист. обробка	На-пі-вч.обробка	Чорн. обробка	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	ap min, мм	ap max, мм	fn min, мм/об	fn max, мм/об
У1	Х1	Х2	Х3	Х4	Х5	Х6	Х7	Х8	Х9	Х10	Х11	Х12
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	4	0,22	0,44
2	1	1	1	1	0	1	1	1	0,8	2	0,14	0,3
3	0	1	1	0	0	0	1	1	0,5	3	0,08	0,25
4	1	1	1	0	0	0	1	1	0,4	2	0,08	0,3

Продовження таблиці А.1

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
5	1	1	1	0	0	0	0	1	1,5	3	0,1	0,3
6	1	1	1	0	0	1	0	1	0,8	4	0,1	0,4
7	1	1	1	1	0	0	1	1	1	8	0,2	0,6
8	0	1	1	0	0	1	0	0	0,2	4,2	0,05	0,15
9	1	0	0	0	1	1	0	0	1,6	12,7	0,1	0,9
10	1	0	1	0	0	0	1	1	0,5	3	0,08	0,3
11	1	0	1	1	0	0	1	1	1	6	0,15	0,6
12	1	0	0	1	1	1	0	1	2	6	0,25	0,7
13	1	0	1	1	0	0	1	1	1	7	0,15	0,6
14	1	0	1	0	0	0	0	1	0,8	4,4	0,15	0,6
15	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	5	0,2	0,3
16	1	0	1	1	0	0	1	1	2,5	9	0,3	0,85
17	1	0	0	0	1	1	0	1	5	13,3	0,5	1,4
18	1	0	1	1	0	0	1	1	1,2	8,4	0,25	0,8
19	1	0	0	0	1	0	1	1	1,5	9,5	0,35	0,65
20	1	0	0	0	1	0	0	1	3	10	0,35	0,9
21	1	1	1	0	0	0	1	1	0,5	3	0,08	0,18
22	1	1	1	0	0	0	1	1	1	3,3	0,1	0,36
23	0	1	1	0	0	0	1	1	0,8	3,3	0,1	0,36
24	1	1	1	1	0	1	0	0	0,8	2,9	0,05	0,35
25	1	1	1	1	0	1	0	0	0,8	3,9	0,1	0,48
26	1	1	1	1	0	0	1	1	1	4,5	0,15	0,48
27	1	1	1	0	0	0	1	1	0,5	3	0,08	0,24
28	1	1	1	1	0	1	0	1	0,8	4,5	0,15	0,48
29	1	1	0	1	1	0	0	1	2	4,5	0,25	0,7

Продовження таблиці А.1

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
30	1	1	1	1	0	0	1	1	0,8	3,3	0,2	0,24
31	1	1	1	1	0	0	1	1	0,8	3,3	0,2	0,48
32	0	1	1	1	0	0	1	1	2,5	4,5	0,3	0,48
33	1	0	1	1	0	0	1	1	1	4,5	0,25	0,48
34	1	0	0	0	1	0	1	1	0,8	4,5	0,28	0,48
35	1	0	0	0	1	0	1	1	2	4,5	0,25	0,48
36	1	0	1	1	0	0	1	1	0,5	4	0,15	0,23
37	1	0	1	1	0	1	0	0	0,5	4,8	0,2	0,3
38	1	0	1	1	0	0	1	1	1,5	4,8	0,3	0,7
39	1	0	1	1	0	0	1	1	0,5	5,7	0,2	0,3
40	0	1	1	0	0	1	0	1	0,5	3	0,08	0,25
41	1	1	0	0	1	0	1	1	4	16	0,45	1,7
42	1	1	0	0	1	0	1	1	3	16	0,6	1,8
43	1	1	1	0	0	1	0	0	0,4	0,45	0,05	0,4
44	1	0	1	1	0	0	1	1	1	7	0,15	0,6
45	1	0	1	1	0	0	0	1	0,8	6	0,15	0,6
46	1	0	1	1	0	0	1	1	2,5	9	0,3	0,85
47	1	0	1	1	0	0	1	1	1	8,4	0,25	0,68
48	1	0	0	0	1	0	1	1	3	10	0,35	1
49	1	0	0	0	1	0	1	1	5	16	0,7	1,6
50	1	1	1	0	0	0	1	1	0,4	1,6	0,08	0,24
51	0	1	1	1	0	0	1	1	0,4	1,6	0,08	0,12
52	1	1	1	0	0	0	1	1	0,8	3	0,08	0,48
53	1	1	1	0	0	1	0	1	1	4	0,15	0,4



Продовження таблиці А.1

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
54	1	1	1	0	0	1	0	0	0,4	4,8	0,05	0,24
55	1	1	1	0	0	1	0	0	0,8	4,8	0,1	0,4
56	1	0	1	0	0	0	1	1	0,5	3	0,08	0,24
57	1	0	1	1	0	1	0	1	0,8	6	0,15	0,48
58	1	0	1	0	0	0	1	1	0,8	5	0,2	0,48
59	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	5	0,2	0,48
60	1	0	1	1	0	0	1	1	2,5	7,3	0,3	0,85
61	1	0	0	0	1	0	1	1	0,8	7,3	0,25	0,48
62	1	0	0	0	1	0	1	1	2	6	0,3	0,48
63	1	1	1	0	0	1	1	1	0,5	3	0,08	0,2
64	0	1	1	0	0	1	1	1	0,5	4	0,09	2
65	0	1	1	0	0	0	1	1	0,8	4	0,1	0,4
66	1	0	1	0	0	1	0	1	0,5	3	0,08	0,2
67	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	3	0,15	0,4
68	1	1	1	0	0	0	1	1	0,8	3	0,08	0,25
69	1	1	1	0	0	0	1	1	0,8	3	0,15	0,3
70	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	5,6	0,15	0,6
71	1	0	0	1	1	0	1	1	2	5,6	0,25	0,07
72	1	0	1	0	0	0	0	1	0,4	4,4	0,15	0,3
73	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	3	0,15	0,6
74	1	0	1	1	0	1	1	1	0,8	5	0,2	0,3
75	0	1	1	1	0	0	1	1	2,5	7	0,3	0,6
76	1	0	0	0	1	0	1	1	1,5	5	0,28	0,7
77	1	1	0	0	1	0	1	1	2	5,6	0,32	0,7

*Продовження таблиці А.1*

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
78	1	1	1	1	0	0	1	1	1	5,6	0,25	0,6
79	1	0	1	1	0	0	1	1	1	5,6	0,15	0,6
80	1	0	1	0	0	0	1	1	0,8	3	0,08	0,35
81	1	1	1	1	0	0	1	1	0,8	4	0,1	0,4
82	0	1	1	1	0	0	1	1	1,2	5,6	0,2	0,7
83	1	0	1	0	0	0	0	1	0,5	3	0,08	0,3
84	1	0	1	1	0	0	1	1	0,8	5,6	0,15	0,6
85	1	0	0	1	1	0	1	1	2	5,6	0,25	0,6

Таблиця А.2 – Оцінка ознак різальних пластин фрезерної групи фірми Pramet

Номер пласт.	Тип обробки									Умови обробки		
	Оброб. пазів і уступів	Торц. фрезер.	Проф. фрезер.	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	Стійкі умови різання	Нестійкі умови різання	Погані умови врізання	ap max, мм	fn min, мм/об	fn max, мм/об
У1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	10	0,2	0,3
2	1	0	0	1	0	1	1	0	0	13	0,15	0,3
3	1	0	0	1	0	1	1	0	0	12	0,1	0,35
4	0	1	0	0	1	1	1	0	0	12	0,2	0,4
5	1	0	0	1	1	1	1	0	0	9	0,05	0,3
6	1	0	0	1	1	1	1	0	0	9	0,1	0,25
7	1	0	0	0	1	1	0	1	0	13	0,2	0,35
8	1	0	0	1	1	1	1	0	0	9	0,05	0,12
9	1	0	0	1	1	0	0	0	1	9	0,1	0,25
10	1	0	0	1	0	1	1	0	0	13	0,1	0,2
11	1	0	0	1	1	0	0	0	1	13	0,15	0,3
12	1	0	0	1	1	1	1	0	0	13	0,25	0,5
13	1	0	0	0	1	1	0	1	0	13	0,15	0,3
14	1	0	0	1	1	0	0	0	1	нд	0,1	0,15

\*нд – дані в каталозі відсутні

Продовження таблиці А.2

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
15	0	0	1	1	1	0	0	0	1	11	0,1	0,3
16	1	0	0	0	1	1	0	1	0	нд	0,1	0,5
17	0	0	1	0	1	1	0	1	0	14	0,2	0,4
18	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1,3	0,05	0,15
19	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2	0,08	0,25
20	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2	0,08	0,3
21	0	1	0	1	0	1	1	0	0	8,6	0,15	0,45
22	0	1	0	1	0	1	1	0	0	7,3	0,12	0,4
23	0	1	0	1	1	0	0	0	1	8,6	0,15	0,45
24	0	0	1	0	1	1	0	1	0	2,5	0,1	0,3
25	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2,5	0,1	0,35
26	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4	0,22	0,4
27	0	0	1	1	1	1	0	0	1	2	0,1	0,2
28	0	0	1	1	1	1	1	0	0	2	0,1	0,2
29	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1,5	0,05	0,15
30	0	0	1	0	1	1	1	0	0	2	0,1	0,17
31	0	1	0	0	1	1	1	0	0	3,5	0,12	0,5
32	0	1	0	1	1	1	1	0	0	3	0,12	0,4
33	0	1	0	0	1	1	1	0	0	3,5	0,15	0,5

\*нд – дані в каталозі відсутні

Продовження таблиці А.2

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
34	0	1	0	1	1	0	0	0	1	3	0,1	0,4
35	0	1	0	1	1	1	1	0	0	3	0,12	0,4
36	0	1	0	0	0	1	1	0	0	15	0,35	0,8
37	0	0	1	1	1	0	0	0	1	4,5	0,1	0,3
38	0	0	1	1	1	0	0	0	1	4,5	0,1	0,3
39	1	0	0	0	1	1	0	1	0	10	0,1	0,25
40	0	1	0	1	1	0	0	0	1	6,5	0,2	0,4
41	0	1	0	1	0	1	1	0	0	6,5	0,2	0,4
42	0	1	0	1	1	1	1	0	0	4,5	0,05	0,4
43	0	1	0	1	0	1	1	0	0	6,5	0,2	0,35
44	0	1	0	0	1	1	1	0	0	4,5	0,12	0,35
45	0	1	0	1	0	1	1	0	0	4,5	0,12	0,35
46	1	0	0	1	1	0	0	0	1	нд	0,2	0,5
47	1	0	0	0	1	1	0	1	0	нд	0,2	0,4
48	0	1	0	1	0	1	1	0	0	6,5	0,15	0,5
49	0	1	0	1	1	1	1	0	0	6,5	0,18	0,5
50	1	0	0	1	1	1	1	0	0	8	0,08	0,35
51	1	0	0	0	1	1	1	0	0	8	0,08	0,35
52	0	1	0	1	1	0	0	0	1	12	0,12	0,4

\*нд – дані в каталозі відсутні

Продовження таблиці А.2

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
53	0	1	0	1	1	1	1	0	0	12	0,17	0,4
54	0	1	0	1	1	0	0	0	1	12	0,12	0,4
55	0	1	0	0	1	1	0	1	0	6	0,1	0,25
56	0	1	0	1	1	1	1	0	0	13	0,1	0,35
57	0	1	0	1	1	1	1	0	0	9	0,15	0,3
58	0	1	0	1	0	1	1	0	0	9	0,15	0,3
59	0	1	0	1	1	1	1	0	0	9	0,05	0,3
60	0	1	0	1	0	1	1	0	0	12,7	0,12	0,18
61	0	1	0	1	0	0	0	0	1	9	0,1	0,3
62	1	0	0	0	0	1	1	0	0	18	0,4	0,6
63	0	0	1	1	1	1	1	0	0	18	0,1	0,25
64	0	0	1	1	1	0	0	0	1	нд	0,1	0,25
65	1	0	0	1	0	1	1	0	0	6	0,1	0,4
66	1	0	0	1	1	1	1	0	0	16	0,12	0,25
67	1	0	0	1	1	1	1	0	0	16	0,1	0,2
68	1	0	0	0	1	1	0	1	0	22	0,1	0,4
69	0	1	0	1	1	1	1	0	0	16	0,05	0,25
70	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0,05	0,35
71	1	0	0	1	1	0	0	0	1	нд	0,1	0,5

\*нд – дані в каталозі відсутні

*Продовження таблиці А.2*

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
72	1	0	0	1	1	1	1	0	0	15	0,05	0,3
73	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0,3	2
74	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1,6	0,5	3
75	1	0	0	1	1	1	1	0	0	11	0,1	0,15

## Пластини фірми Seco

Здійснено оцінку характеристик кожної обраної пластини. Оцінку 1 отримали пластини, що мають вихідний показник. Результати зведені до таблиць А.3, А.4.

Таблиця А.3 – Оцінка ознак різальних пластин токарної групи фірми Seco

Номер-пласт.	Тип обробки								Умови обробки			
	Зовн. обробка	Внутр. обробка	Чист. обробка	Напівч. обробка	Чорн. обробка	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	ap min, мм	ap max, мм	f min, мм/об	f max, мм/об
Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0,2	3	0,1	0,5
2	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	2	0,05	0,3
3	1	1	1	0	0	0	1	1	0,2	3	0,1	0,5
4	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
5	1	1	1	1	0	0	1	1	0,8	5	0,15	0,4
6	1	1	1	1	0	0	0	1	0,8	5	0,15	0,4
7	1	1	1	0	0	0	1	0	0,3	4	0,15	0,4
8	1	0	1	1	0	1	1	0	0,2	3,5	0,08	0,3



Продовження таблиці А.3

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
9	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,4
10	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,08	0,3
11	1	1	1	0	0	0	1	0	0,2	3,5	0,08	0,3
12	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,4
13	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,4
14	1	1	0	0	1	0	1	1	1	4	0,2	0,4
15	1	0	1	1	1	0	1	1	0,2	3	0,1	0,5
16	1	0	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
17	1	1	0	0	1	0	1	1	1,5	7	0,3	0,7
18	1	1	0	0	1	0	1	0	1,5	7	0,2	0,6
19	1	1	0	0	1	0	0	1	1,5	7	0,35	0,9
20	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
21	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
22	1	1	0	1	0	0	0	1	2	12	0,3	1
23	0	1	0	1	0	0	1	1	2	10	0,3	1
24	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
25	1	1	0	0	1	0	1	1	2	12	0,35	0,8
26	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,3	1
27	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,45	1,1
28	1	1	1	0	0	0	1	0	0,2	3	0,1	0,5
29	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	2	0,05	0,3

Продовження таблиці А.3

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
30	1	1	1	0	0	0	1	1	0,2	3	0,1	0,5
31	1	1	1	1	0	0	0	1	0,8	5	0,15	0,4
32	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
33	1	1	1	1	0	0	1	1	0,2	3,5	0,08	0,3
34	1	1	0	1	1	0	1	0	1,5	7	0,2	0,6
35	1	1	0	1	1	1	0	0	1,5	7	0,35	0,9
36	1	1	1	1	0	1	1	0	0,2	3,5	0,08	0,3
37	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,4
38	1	1	0	1	0	0	1	1	1	4	0,2	0,4
39	1	1	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
40	1	1	0	0	1	0	1	1	1,5	7	0,3	0,7
41	1	1	0	1	1	0	1	1	1,5	7	0,35	0,9
42	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
43	1	1	0	1	0	0	1	1	2	10	0,3	1
44	1	1	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
45	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
46	1	1	0	1	0	0	1	1	2	10	0,3	1
47	1	0	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
48	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
49	1	1	1	1	0	0	0	1	0,8	5	0,15	0,4
50	1	1	1	1	0	0	1	0	0,2	3,5	0,08	0,3

Продовження таблиці А.3

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
51	1	1	1	0	0	0	1	1	0,2	3	0,1	0,4
52	1	0	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
53	1	1	0	0	1	0	0	1	1,5	7	0,3	0,7
54	1	1	0	0	1	0	1	0	1,5	7	0,2	0,6
55	1	1	0	1	1	0	0	1	1,5	7	0,35	0,9
56	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
57	1	1	0	1	0	0	0	1	2	12	0,3	1
58	1	1	0	1	0	0	1	1	2	12	0,4	1
59	1	1	0	1	0	0	0	1	2	12	0,4	1
60	1	1	0	1	0	0	1	1	2	12	0,35	0,8
61	1	1	0	0	1	0	1	1	2	12	0,3	1
62	1	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,45	1,1
63	0	1	1	0	0	0	1	0	0,2	3	0,1	0,5
64	1	1	0	1	0	0	1	0	1	6	0,2	0,4
65	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
66	1	1	1	0	0	0	0	1	0,8	5	0,15	0,4
67	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
68	1	1	1	1	0	0	1	1	0,2	3,5	0,08	0,3
69	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,4
70	1	1	1	1	0	0	1	0	1	4	0,2	0,4
71	1	0	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5

Продовження таблиці А.3

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
72	1	1	0	0	1	0	0	1	1,5	7	0,3	0,7
73	1	1	0	1	1	0	1	1	1,5	7	0,35	0,9
74	0	1	0	0	1	0	0	1	2	12	0,4	1
75	1	1	0	1	0	0	1	1	2	10	0,3	1
76	1	0	1	1	1	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
77	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
78	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
79	1	1	1	0	0	0	1	1	0,8	5	0,15	0,4
80	1	1	1	1	0	0	1	1	0,2	3,5	0,08	0,3
81	0	1	1	0	0	0	0	1	0,2	2	0,05	0,3
82	1	1	1	0	0	0	0	1	0,2	3	0,1	0,5
83	1	1	0	1	0	0	0	1	2	12	0,4	1
84	1	1	0	1	0	0	1	1	1	4	0,2	0,4
85	1	1	0	0	1	0	0	1	1,5	7	0,3	0,7

Таблиця А.4 – Оцінка ознак різальних пластин фрезерної групи фірми Seco

Номер пласт.	Тип обробки									Умови обробки		
	Оброб. пазів і уступів	Торц. фрезер.	Проф. фрезер.	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	Чорн. обробка	Напівч. обробка	Чист. обробка	ap max, мм	fn min, мм/об	fn max, мм/об
Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	6	0,09	0,16
3	1	0	0	1	0	1	1	1	0	12	0,3	0,17
4	1	0	0	0	1	1	1	0	0	10	0,25	0,5
5	1	0	0	1	0	1	1	1	0	12	0,3	0,7
6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	7	0,15	0,33
7	1	0	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
8	1	0	1	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
9	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2,5	0,5	3
10	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
11	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
12	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
13	1	0	0	0	1	1	0	0	0	12	0,25	0,5
14	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
15	0	1	0	0	1	1	0	1	1	3,5	0,06	0,09
16	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
17	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16

Продовження таблиці А.4

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
18	0	1	0	0	0	1	1	0	1	6	0,09	0,16
19	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
20	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
21	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
22	0	1	0	1	0	0	0	0	0	7	0,15	0,35
23	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
24	0	1	0	0	0	1	0	1	1	3,5	0,06	0,09
25	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
26	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
27	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
28	0	1	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
29	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
30	1	0	0	0	1	0	0	0	0	12	0,25	0,5
31	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
32	1	0	0	0	1	0	0	0	0	12	0,25	0,5
33	1	0	0	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
34	1	0	0	0	1	0	0	1	1	5	0,1	0,2
35	1	0	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
36	1	0	0	0	1	1	0	0	0	12	0,25	0,5
37	1	0	1	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
38	1	0	1	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
39	0	1	0	1	0	0	0	0	0	7	0,15	0,35
40	0	1	0	0	1	1	0	1	1	3,5	0,06	0,09

Продовження таблиці А.4

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
41	0	1	0	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
42	0	1	0	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
43	0	1	0	0	1	1	0	0	0	12	0,25	0,5
44	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
45	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
46	0	1	0	0	1	1	0	1	0	12	0,25	0,5
47	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
48	0	1	0	1	0	0	0	1	0	7	0,15	0,35
49	0	1	0	0	1	1	1	0	0	12	0,25	0,5
50	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
51	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
52	0	1	0	0	1	1	0	0	0	12	0,25	0,5
53	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
54	0	1	0	1	1	0	1	1	0	12	0,3	0,7
55	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
56	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	2	6
57	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	6
58	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	6
59	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
60	1	0	0	1	0	0	0	1	0	7	0,15	0,35
61	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16

Продовження таблиці А.4

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
62	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
63	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
64	0	1	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
65	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	6
66	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6	0,09	0,16
67	1	0	0	0	1	1	1	0	0	2,5	0,5	3
68	0	1	0	0	1	0	0	0	1	7	0,1	0,25
69	0	1	0	0	1	0	0	0	1	7	0,1	0,25
70	1	0	0	1	1	0	1	0	1	6	0,1	0,2
71	0	1	0	1	1	0	1	0	1	6	0,1	0,2
72	0	1	0	1	1	0	1	0	1	6	0,1	0,2
73	1	0	0	1	1	0	1	0	1	6	0,1	0,2
74	0	1	0	1	1	0	1	0	1	6	0,1	0,2
75	0	1	0	1	1	0	1	0	1	5	0,1	0,25



## Пластини фірми Sandvik Coromant

Здійснено оцінку характеристик кожної обраної пластини. Оцінку 1 отримали пластини, що мають вихідний показник. Результати зведені у таблиці А.5, А.6.

*Таблиця А.5 – Оцінка ознак різальних пластин токарної групи фірми Sandvik Coromant*

Номер пласт.	Тип обробки								Умови обробки			
	Зовн. обробка	Внутр. обробка	Чист. обробка	Напівч. обробка	Чорн. обробка	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	ap min, мм	ap max, мм	fn min, мм/об	fn max, мм/об
Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1	1	1	1	0	0	0	0	1	0,3	4	0,1	0,5
2	1	1	1	0	0	0	1	0	0,5	1,5	0,1	0,45
3	1	1	1	0	0	1	0	0	0,2	2	0,1	0,3
4	1	1	0	1	0	0	0	1	0,7	6,5	0,2	0,7
5	1	1	0	1	0	0	1	0	0,5	7,2	0,15	0,6
6	1	1	0	1	0	1	0	0	0,3	6	0,15	0,6
7	1	1	0	0	1	0	0	1	1,4	6	0,46	1,2
8	1	1	0	0	1	0	0	1	2	15	0,4	1
9	1	1	0	0	1	1	0	0	1	9,3	0,3	0,85

Продовження таблиці А.5

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
10	1	1	1	0	0	0	0	1	0,5	6	0,2	0,8
11	1	1	1	0	0	0	1	0	0,5	6,4	0,15	0,6
12	1	1	1	0	0	1	0	0	0,2	5	0,15	0,5
13	1	1	0	1	0	0	0	1	1,5	6	0,3	0,75
14	1	1	0	1	0	0	1	0	0,5	4,4	0,15	0,6
15	1	1	0	1	0	1	0	0	0,3	5	0,15	0,6
16	1	1	0	0	1	0	0	1	1,5	6	0,3	0,75
17	1	1	0	0	1	0	1	0	2	6	0,25	0,7
18	1	1	0	0	1	1	0	0	0,4	7	0,17	0,47
19	1	1	1	0	0	0	0	1	0,4	1,5	0,15	0,5
20	1	1	1	0	0	0	1	0	0,5	4	0,15	0,5
21	1	1	0	1	0	0	0	1	0,5	6	0,15	0,5
22	1	1	0	1	0	0	1	0	0,5	8	0,15	0,5
23	1	1	0	1	0	1	0	0	0,3	9	0,15	0,6
24	1	1	0	0	1	0	0	1	0,5	6	0,15	0,5
25	1	1	0	0	1	0	1	0	2	12	0,35	0,9
26	1	1	0	0	1	0	1	0	0,9	8,8	0,3	0,85
27	1	1	0	1	0	1	0	0	0,5	5	0,15	0,6
28	1	1	0	1	0	0	0	1	0,8	6,6	0,18	0,6
29	1	1	0	1	0	0	1	0	0,5	4,8	0,15	0,6

Продовження таблиці А.5

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
30	1	1	0	0	1	0	0	1	1	5	0,4	1,1
31	1	1	0	0	1	0	1	0	2	8	0,35	0,75
32	1	1	1	0	0	0	0	1	0,3	1,5	0,1	0,4
33	1	1	1	0	0	0	1	0	0,5	4	0,1	0,3
34	1	1	0	1	0	0	0	1	0,5	4	0,15	0,5
35	1	1	0	1	0	1	0	0	0,3	3,5	0,15	0,5
36	1	1	1	0	0	0	0	1	0,3	3,5	0,15	0,5
37	1	1	1	0	0	0	0	1	0,5	1,5	0,1	0,45
38	1	1	0	1	0	0	0	1	0,8	4	0,18	0,6
39	1	1	0	1	0	0	1	0	0,5	3	0,15	0,6
40	1	1	0	0	1	0	0	1	1	5	0,25	0,7
41	1	1	0	0	1	0	1	0	1,5	5	0,35	0,55
42	1	0	1	0	0	0	0	1	0,3	3	0,12	0,35
43	1	0	1	0	0	0	0	1	0,08	2	0,04	0,15
44	1	0	1	0	1	0	1	0	0,2	2	0,08	0,3
45	1	0	0	1	0	0	0	1	0,7	4	0,15	0,5
46	1	0	0	1	0	0	0	1	0,5	3	0,1	0,3
47	1	0	0	1	0	0	1	0	0,3	3,6	0,09	0,27
48	1	0	0	1	0	1	0	0	0,5	3	0,1	0,3
49	1	0	0	0	1	0	0	1	1,4	4,8	0,17	0,5

Продовження таблиці А.5

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
50	1	0	0	0	1	1	0	0	1,2	4	0,14	0,42
51	1	0	1	0	0	0	0	1	0,3	3	0,12	0,35
52	1	0	1	0	0	0	0	1	0,08	2	0,04	0,15
53	1	0	1	0	0	0	1	0	0,08	1,5	0,05	0,17
54	1	0	0	1	0	0	0	1	0,3	3	0,12	0,35
55	1	0	0	1	0	0	1	0	0,5	3	0,1	0,3
56	1	0	0	1	0	0	1	0	0,5	3	0,1	0,3
57	1	0	0	1	0	1	0	0	0,5	3	0,1	0,3
58	1	0	0	0	1	0	0	1	1,2	4	0,14	0,42
59	1	0	0	0	1	0	1	0	1,2	4	0,14	0,42
60	1	0	0	0	1	1	0	0	1,2	4	0,14	0,42
61	1	0	1	0	0	0	0	1	0,2	2	0,06	0,3
62	1	0	1	0	0	0	1	0	0,2	2	0,08	0,3
63	1	0	0	1	0	0	0	1	0,6	3,6	0,12	0,36
64	1	0	0	1	0	0	1	0	0,6	3,6	0,12	0,36
65	1	0	0	1	0	1	0	0	0,5	3	0,1	0,3
66	1	0	0	0	1	0	0	1	1,2	4,8	0,14	0,42
67	1	0	0	0	1	0	1	0	1,4	4,8	0,17	0,5
68	1	0	0	0	1	1	0	0	0,5	3	0,1	0,3
69	1	0	1	0	0	0	0	1	0,3	3	0,12	0,35

Продовження таблиці А.5

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
70	1	0	1	0	0	0	1	0	0,2	1,5	0,05	0,3
71	1	0	1	0	0	1	0	0	0,08	1,5	0,05	0,17
72	1	0	0	1	0	0	0	1	0,5	4	0,15	0,5
73	1	0	0	1	0	0	1	0	0,4	2,5	0,09	0,26
74	1	0	0	1	0	1	0	0	0,5	3	0,1	0,3
75	1	0	1	0	1	0	0	1	1,2	4	0,14	0,42
76	1	0	0	0	1	1	0	0	1,2	4	0,14	0,42
77	1	0	1	0	0	0	0	1	0,1	1,8	0,07	0,27
78	1	0	0	1	0	0	1	0	0,5	2,7	0,09	0,27
79	1	0	0	0	1	0	0	1	0,9	3,6	0,11	0,32
80	0	1	1	0	0	0	0	1	0,1	1,5	0,04	0,18
81	0	1	0	1	0	0	1	0	0,6	2,4	0,12	0,29
82	0	1	0	1	0	0	0	1	0,4	3	0,12	0,3
83	0	1	1	0	0	0	1	0	0,1	1,5	0,05	0,2
84	0	1	0	1	0	0	0	1	0,6	2,6	0,13	0,33
85	0	1	1	0	0	0	1	0	0,06	0,9	0,03	0,1

Таблиця А.6 – Оцінка ознак різальних пластин фрезерної групи фірми Sandvik Coromant

Номер пласт.	Тип обробки									Умови обробки		
	Оброб. пазів і уступів	Торц. фрезер.	Проф. фрезер.	Матер. гр. К	Матер. гр. М	Матер. гр. Р	Чорн. обробка	Напівч. обробка	Чист. обробка	ap max, мм	fn min, мм/об	fn max, мм/об
Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	6	0,08	0,21
2	0	1	0	0	0	1	1	1	0	10	0,1	0,28
3	0	1	0	1	0	0	1	1	0	6	0,1	0,3
4	0	1	0	0	0	1	1	1	0	6	0,1	0,42
5	1	0	0	1	0	0	0	0	1	12	0,1	0,4
6	0	1	0	0	0	1	1	1	0	12	0,1	0,4
7	1	1	0	0	0	1	0	0	1	10,7	0,05	0,09
8	1	1	0	0	1	0	0	0	1	10,7	0,1	0,2
9	1	1	0	1	0	0	0	0	1	10,7	0,1	0,3
10	0	1	0	1	0	0	1	0	0	6	0,1	0,42
11	1	0	0	0	1	0	0	1	0	10	0,05	0,15
12	1	0	0	0	0	1	0	1	0	10	0,08	0,15

Продовження таблиці А.6

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
13	1	0	0	1	0	0	0	1	0	10	0,12	0,22
14	1	0	0	1	0	0	1	0	0	15,7	0,08	0,15
15	1	0	0	0	1	0	1	0	0	15,7	0,08	0,2
16	1	0	0	0	0	1	1	0	0	15,7	0,1	0,25
17	0	0	1	0	1	0	1	0	0	8	0,5	3
18	0	0	1	0	0	1	1	0	0	13	0,5	3
19	1	0	1	0	0	1	1	1	0	8,6	0,05	0,18
20	1	0	1	0	1	0	1	1	0	17,9	0,08	0,18
21	1	0	1	1	0	0	1	1	0	14,4	0,05	0,15
22	1	0	1	0	1	0	1	1	0	8	0,07	0,57
23	1	0	1	1	0	0	1	1	0	4	0,05	0,28
24	1	0	1	0	1	0	1	1	0	8	0,07	0,35
25	1	0	1	1	0	0	1	1	0	5	0,07	0,42
26	1	1	0	0	0	1	1	0	0	10	0,07	0,17
27	1	1	0	0	1	0	1	0	0	6	0,1	0,28
28	1	1	0	1	0	0	1	0	0	8	0,1	0,42
29	1	1	0	1	0	0	1	0	0	6	0,1	0,42
30	1	0	0	0	0	1	1	0	0	20,5	0,03	0,5
31	1	0	0	0	1	0	1	0	0	15	0,03	0,15
32	1	0	0	0	0	1	1	0	0	10	0,03	0,15

Продовження таблиці А.6

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
33	1	0	0	1	0	0	1	0	0	8	0,04	0,18
34	1	0	0	0	0	1	0	1	0	5,1	0,02	0,14
35	1	0	0	1	0	0	0	1	0	6,1	0,02	0,14
36	1	0	0	0	1	0	0	1	0	5,1	0,02	0,14
37	1	1	0	0	1	0	1	0	0	12	0,1	1
38	1	1	0	1	0	0	1	0	0	12	0,1	0,2
39	1	1	0	0	1	0	1	0	0	12	0,1	0,2
40	1	1	0	0	1	0	1	0	0	10	0,08	0,15
41	1	1	0	0	1	0	1	0	0	15	0,1	0,2
42	1	1	0	0	0	1	1	0	0	9	0,08	0,15
43	1	1	0	1	0	0	1	0	0	8	0,08	0,21
44	1	0	0	0	0	1	0	0	1	4	0,01	0,06
45	0	1	0	0	0	1	1	0	0	6	0,08	0,21
46	0	1	0	1	0	0	1	0	0	6	0,1	0,28
47	0	1	0	0	0	1	1	0	0	6	0,1	0,7
48	0	1	0	0	1	0	1	0	0	6	0,1	0,42
49	0	1	0	1	0	0	1	0	0	6	0,1	0,7
50	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0,08	0,21
51	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0,08	0,21
52	1	0	0	1	0	0	0	0	1	8	0,1	0,3



Продовження таблиці А.6

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
53	1	0	0	1	0	0	0	0	1	8	0,1	0,3
54	1	0	0	0	0	1	0	0	1	8	0,1	0,3
55	0	1	0	1	0	0	1	1	0	6	0,08	0,21
56	0	1	0	0	1	0	1	1	0	6	0,1	0,28
57	0	1	0	1	0	0	1	1	0	6	0,1	0,42
58	1	1	0	1	0	0	0	0	1	10,7	0,05	0,15
59	1	1	0	0	0	1	0	0	1	10,7	0,1	0,2
60	1	1	0	0	0	1	0	0	1	10,7	0,1	0,3
61	1	1	0	1	0	0	0	0	1	6,5	0,05	0,15
62	0	1	0	0	0	1	1	0	0	6	0,1	0,42
63	1	1	0	1	0	0	1	0	0	15,7	0,08	0,15
64	1	1	0	1	0	0	1	0	0	15,7	0,12	0,2
65	1	1	0	0	0	1	1	0	0	15,7	0,15	0,35
66	1	1	0	0	1	0	1	0	0	15,7	0,05	0,19
67	1	1	0	0	1	0	1	0	0	15,7	0,08	0,3
68	1	1	0	0	0	1	0	1	0	10	0,1	0,25
69	0	0	1	1	0	0	1	0	0	13	0,5	3
70	0	0	1	0	1	0	1	0	0	8	0,5	3
71	1	0	1	0	1	0	1	1	0	26	0,05	0,2
72	1	0	1	0	0	1	1	1	0	28	0,08	0,2

*Продовження таблиці А.6*

Y1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
73	1	0	1	0	0	1	1	1	0	8	0,07	0,57
74	1	0	1	1	0	0	1	1	0	5	0,07	0,42
75	1	0	1	1	0	0	1	1	0	6	0,07	0,42

*Навчальне видання*

**КОВАЛЕВСЬКИЙ Сергій Вадимович,  
ТУЛУПОВ Володимир Іванович,  
ОНИЩУК Сергій Григорович**

**ДОСЛІДНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ  
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня  
спеціальності 131 Прикладна механіка  
з курсів  
«Технологія функціональних та наноповерхонь»,  
«Спецкурс за напрямком магістерської роботи»

Технічний переклад: Ю. В. Лупа, А. В. Чернокол

Редактор О. О. Дудченко

5/2022. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 8,14.  
Обл.-вид. арк. 6,36. Тираж пр. Зам. №

Видавець і виготівник  
«Донбаська державна машинобудівна академія»  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1633 від 24.12.2003