

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

## Лабораторний практикум

### Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
за освітньою програмою «Технології машинобудування»  
спеціальності 131 Прикладна механіка

**Укладачі: Ю. В. Ключников, В. Л. Дубнюк**

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2024

УДК 621.7 621.9.047/.048(07)

E50

Укладачі: *Ключников Юрій Валентинович*, канд. техн. наук, доцент  
*Дубнюк Віктор Леонідович*

Рецензент: *Кореньков Володимир Миколайович*, канд. техн. наук, доцент,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: *Фролов Володимир Костянтинівич*, канд. техн. наук, доцент,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 7 від 09.05.2024 р.)*

*за поданням Вченої ради Навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту  
(протокол № 9 від 30.04.2024 р.)*

E50 Електрофізичні та електрохімічні методи обробки. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освіт. програмою «Технології машинобудування» спец. 131 Прикладна механіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Ключников, В. Л. Дубнюк. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 148 с.

Навчальний посібник містить лабораторні роботи до освітнього компоненту «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки», що викладається здобувачам вищої освіти першого (бакалаврського) рівня очної або дистанційної форми навчання спеціальності 131 Прикладна механіка КПІ ім. Ігоря Сікорського.

У лабораторних роботах проводяться дослідження та аналіз електроерозійної, ультразвукової, лазерної, електронно-променевої та плазмової обробки матеріалів. Знання саме цих технологій дозволяють значно розширити розуміння здобувачів щодо можливостей сучасного машинобудівного виробництва та краще зрозуміти доцільність їх застосування. У теоретичній частині лабораторних робіт розглянуто фізичні основи кожного з перерахованих методів, визначено основні технологічні особливості та специфіку їх застосування, наведено характеристики та особливості обладнання.

В матеріалах лабораторних робіт містяться індивідуальні завдання до їх виконання, що має забезпечити самостійну роботу здобувачів.

УДК 621.7 621.9.047/.048(07)

Реєстр. № НП 23/24-495. Обсяг 6,7 авт. арк.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## Зміст

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                  | 7  |
| Лабораторна робота № 1. Технологія виготовлення отвору електроерозійним методом обробки.....                | 8  |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                   | 8  |
| 1.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                      | 8  |
| 1.1.1. Призначення електроерозійної обробки .....                                                           | 8  |
| 1.1.2. Принцип електроерозійної обробки .....                                                               | 8  |
| 1.1.3. Принципова схема електроерозійного верстата.....                                                     | 9  |
| 1.1.4. Конструкція та принцип роботи електроерозійного верстата BSM-3 з використанням електроду-дроту.....  | 10 |
| 1.1.5. Визначення потужності та енергії процесу обробки .....                                               | 12 |
| 1.2. Порядок проведення роботи .....                                                                        | 12 |
| 1.3. Зміст звіту .....                                                                                      | 13 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 1 .....                                                         | 14 |
| Лабораторна робота №2. Особливості мікрорельєфу поверхні, що оброблено електроерозійним розрізуванням ..... | 15 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                   | 15 |
| 2.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                      | 15 |
| 2.2. Порядок проведення роботи .....                                                                        | 17 |
| 2.3. Зміст звіту .....                                                                                      | 19 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 2 .....                                                         | 19 |
| Лабораторна робота №3. Визначення електричних параметрів електроерозійної обробки.....                      | 21 |
| 3.1. Теоретичні відомості.....                                                                              | 21 |
| 3.2. Порядок проведення роботи .....                                                                        | 24 |
| 3.3. Зміст звіту .....                                                                                      | 26 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 3 .....                                                         | 26 |
| Лабораторна робота № 4. Визначення техніко-економічних показників електроерозійної обробки.....             | 27 |
| 4.1. Теоретичні відомості.....                                                                              | 27 |
| 4.2. Порядок проведення роботи .....                                                                        | 28 |
| 4.3. Зміст звіту .....                                                                                      | 30 |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 4 .....                                                                                                                                | 30 |
| Лабораторна робота № 5. Визначення продуктивності ультразвукового прошивального верстата.....                                                                                      | 31 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                                                                                          | 31 |
| 5.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                                                                                             | 31 |
| 5.1.1. Призначення ультразвукового прошивального верстата .....                                                                                                                    | 31 |
| 5.1.2. Принцип ультразвукового методу обробки.....                                                                                                                                 | 31 |
| 5.1.3. Опис схеми ультразвукового прошивального верстата .....                                                                                                                     | 33 |
| 5.1.4. Основні вузли верстата 4Д772 .....                                                                                                                                          | 33 |
| 5.2. Порядок проведення роботи .....                                                                                                                                               | 35 |
| 5.3. Зміст звіту .....                                                                                                                                                             | 36 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 5 .....                                                                                                                                | 36 |
| Лабораторна робота № 6. Вивчення особливостей коливальної системи ультразвукових верстатів та визначення змін швидкості робочої подачі інструмента під час прошивання отворів..... | 38 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                                                                                          | 38 |
| 6.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                                                                                             | 39 |
| 6.2. Порядок виконання роботи .....                                                                                                                                                | 44 |
| 6.3. Зміст звіту .....                                                                                                                                                             | 45 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 6 .....                                                                                                                                | 45 |
| Лабораторна робота № 7. Вивчення основних закономірностей вібраційної обробки .....                                                                                                | 47 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                                                                                          | 47 |
| 7.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                                                                                             | 47 |
| 7.2. Характеристики вібраційних установок .....                                                                                                                                    | 48 |
| 7.3. Порядок проведення роботи .....                                                                                                                                               | 56 |
| 7.4. Зміст звіту .....                                                                                                                                                             | 56 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 7 .....                                                                                                                                | 58 |
| Лабораторна робота № 8. Будова та основні елементи твердотілого лазера .....                                                                                                       | 60 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                                                                                          | 60 |
| 8.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                                                                                             | 60 |
| 8.1.1. Особливості лазерного проміння.....                                                                                                                                         | 61 |
| 8.1.2. Механізм руйнування матеріалу ЛП .....                                                                                                                                      | 62 |
| 8.1.3. Активне лазерне середовище .....                                                                                                                                            | 63 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.4. Оптичний резонатор .....                                                                                                      | 65  |
| 8.1.5. Система накачування активного середовища .....                                                                                | 66  |
| 8.1.6. Технологічні особливості ЛО .....                                                                                             | 66  |
| 8.1.7. Типові операції ЛО .....                                                                                                      | 67  |
| 8.1.8. Обладнання для ЛО.....                                                                                                        | 71  |
| 8.1.9. Випромінювач твердотілого технологічного лазера .....                                                                         | 73  |
| 8.1.10. Конструкція генераторної головки твердотілого лазера .....                                                                   | 74  |
| 8.2. Методика обслуговування генераторної головки (квантрона) .....                                                                  | 75  |
| 8.3. Порядок виконання роботи .....                                                                                                  | 75  |
| 8.4. Зміст звіту .....                                                                                                               | 76  |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 8 .....                                                                                  | 76  |
| Лабораторна робота № 9. Аналіз закономірностей лазерної поверхневої термообробки сплавів та вибір режимів лазерного зміцнення .....  | 78  |
| 9.1. Теоретичні відомості.....                                                                                                       | 78  |
| 9.1.1. Сутність процесу .....                                                                                                        | 78  |
| 9.1.2. Технологічні показники технології лазерного зміцнення.....                                                                    | 84  |
| 9.1.3. Вибір режимів зміцнення при імпульсному опроміненні.....                                                                      | 86  |
| 9.1.4. Вибір режимів зміцнення при безперервному опроміненні .....                                                                   | 89  |
| 9.2. Порядок виконання роботи .....                                                                                                  | 91  |
| 9.3. Зміст звіту .....                                                                                                               | 93  |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 9 .....                                                                                  | 93  |
| Лабораторна робота № 10. Визначення основних енергетичних та технологічних параметрів електронно-променевої обробки матеріалів ..... | 96  |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                                            | 96  |
| 10.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                                              | 96  |
| 10.1.1. Механізм руйнування матеріалу.....                                                                                           | 96  |
| 10.1.2. Формування електронного пучка .....                                                                                          | 98  |
| 10.1.3. Технологічні особливості електронно-променевої обробки.....                                                                  | 102 |
| 10.1.4. Типові операції електронно-променевої обробки.....                                                                           | 102 |
| 10.1.5. Обладнання для ЕПО .....                                                                                                     | 104 |
| 10.2. Порядок проведення роботи .....                                                                                                | 105 |
| 10.3. Зміст звіту .....                                                                                                              | 108 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 10 .....                                                     | 108 |
| Лабораторна робота № 11. Дослідження процесу плазмової обробки .....                                     | 110 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                | 110 |
| 11.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                  | 110 |
| 11.1.1. Типові операції плазмової обробки.....                                                           | 111 |
| 11.1.2. Обладнання для плазмової обробки.....                                                            | 114 |
| 11.1.3. Визначення режимів повітряно-плазмового різання.....                                             | 117 |
| 11.2. Порядок проведення роботи .....                                                                    | 122 |
| 11.3. Зміст звіту .....                                                                                  | 124 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 11 .....                                                     | 124 |
| Лабораторна робота № 12. Вивчення конструкції плазмотрона для повітряно-плазмового різання металів ..... | 126 |
| Обладнання, інструменти та матеріали.....                                                                | 126 |
| 12.1. Короткі теоретичні відомості.....                                                                  | 126 |
| 12.1.1. Формування плазмового струменю.....                                                              | 126 |
| 12.1.2. Конструкція плазмотрона для повітряно-плазмового різання.....                                    | 129 |
| 12.2. Порядок проведення роботи .....                                                                    | 131 |
| 12.3. Зміст звіту .....                                                                                  | 131 |
| Контрольні питання до лабораторної роботи № 12 .....                                                     | 136 |
| Вимоги до оформлення протоколів лабораторних робіт та семестрового звіту.....                            | 138 |
| Список рекомендованої літератури.....                                                                    | 144 |
| Перелік посилань.....                                                                                    | 145 |
| Додаток 1. Титульний аркуш звіту.....                                                                    | 146 |
| Додаток 2. Перший аркуш протоколу з лабораторної роботи.....                                             | 147 |
| Додаток 3. Другий аркуш протоколу з лабораторної роботи .....                                            | 148 |

## Вступ

Методи обробки матеріалів, що входять у освітній компонент «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки» з'явилися та активно розповсюджуються порівняно недавно. Більшість з них почали свою історію на початку XX сторіччя та інтенсивно розвиваються знаходячи застосування у передових галузях промисловості – космічній, атомній енергетиці, електронній, приладобудуванні, хімічному машинобудування, інструментальній тощо. Розвиток цих галузей сприяв створенню нових матеріалів, що мають незвичайні фізико-механічні властивості; деталей зі складною конфігурацією; нових конструкцій машин та приладів з тенденцією на мініатюризацію, які важко або навіть неможливо виготовити застосуванням класичних методів обробки.

Саме електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів сприяють вирішенню багатьох проблем сучасного виробництва. В основі цих методів лежить використання різноманітних фізико-хімічних процесів енергетичного впливу на заготовку для формоутворення деталі під час обробки.

Цикл лабораторних робіт з даного освітнього компоненту сприятимуть здобувачам вищої освіти засвоювати теоретичний лекційний матеріал; розуміти сутність процесів, що відбуваються під час обробки заготовок; робити висновки щодо доцільності застосування тієї чи іншої технології під час вирішення конкретного виробничого завдання; отримання базових практичних навичок роботи з обладнанням; обирати та визначати технологічні параметри обробки.

У посібник входить 12 лабораторних робіт з основних технологічних процесів, а саме, електроерозійної, ультразвукової, вібро-абразивної, лазерної, електронно-променевої та плазмової обробок. Лабораторні роботи містять індивідуальні завдання, які здобувачі вищої освіти виконують самостійно.

## Лабораторна робота № 1.

### Технологія виготовлення отвору електроерозійним методом обробки

**Мета роботи:** вивчити сутність процесу електроерозійної обробки, технологію виготовлення отвору в заготовках різними способами.

#### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Електроерозійний верстат.
2. Електроди-інструменти стрижневі, трубчасті та дротяні.
3. Заготовки зі сталевих листа 40×40×1 мм.
4. Набір деталей з різних матеріалів, оброблених на електроерозійному верстаті.

#### 1.1. Короткі теоретичні відомості

##### 1.1.1. Призначення електроерозійної обробки

Цей вид обробки забезпечує великий економічний ефект під час виготовлення деталей складного контуру, криволінійних отворів та отворів складної форми, розрізанні дорогоцінних матеріалів. Електроерозійну обробку широко застосовують для виготовлення ковальських, вирубних, формувальних та інших штампів, прес-форм, фасонного металорізального інструмента, деталей паливної апаратури, газотурбінних двигунів, різних приладів тощо.

##### 1.1.2. Принцип електроерозійної обробки

Електроерозійний спосіб обробки був впроваджений у 1943 р. радянськими вченими Б. Р. Лазаренко та М. І. Лазаренко. Під час електроерозійної обробки змінення форми, розмірів та якості поверхні заготовок відбуваються під дією електричних мікророзрядів, що протікають між електродом-інструментом та заготовкою. Під час електричного розряду

матеріал заготовки у зоні каналу розряду плавиться та випаровується. Видалення металу з заготовки відбувається в середовищі діелектрика – робочої рідини. Зазвичай застосовують промислову та дистильовану воду, технічну оливу, гас, спеціальні діелектричні рідини тощо.

Після кожного мікророзряду на поверхні заготовки утворюється лунка. Таким чином, оброблювана поверхня являє собою сукупність великої кількості лунок.

Один з видів електроерозійної обробки – електроіскрова, що характеризується імпульсами невеликої енергії з дуже короткою тривалістю ( $10^{-5} \dots 10^{-7}$  с). Між заготовкою та інструментом утворюється міжелектродний проміжок, тобто повністю відсутній механічний контакт.

### **1.1.3. Принципова схема електроерозійного верстата**

Електрод-інструмент 1 (рис. 1.1) має розміри та форму, що відповідають заглибленню в оброблюваній заготовці 2. Для здійснення операції розділення заготовок може застосовуватись електрод-інструмент у вигляді дроту, що перемотується з однієї котушки на іншу. Процес обробки відбувається у середовищі рідкого діелектрика, залитого у ванну 3, заготовка встановлюється на ізоляційній підставці 10.

Основний вузол верстата – тиратронний генератор імпульсів, що складається із джерела живлення (ДЖ) 5, генератора імпульсів (ГІ) 6, дроселя 4, тиратрона 7, конденсатора з імпульсним трансформатором 8. Імпульс напруги, що індукується у вторинній обмотці трансформатора, збуджує іскровий розряд між електродом-інструментом та електродом-заготовкою.

Сигнал з міжелектродного проміжку 9 подається на вхід системи спостереження (СК) 11, з виходу якого напруга подається на електродвигун приводу (М) електрода-інструмента 12, привод підтримує потрібну постійну міжелектродну відстань [1].

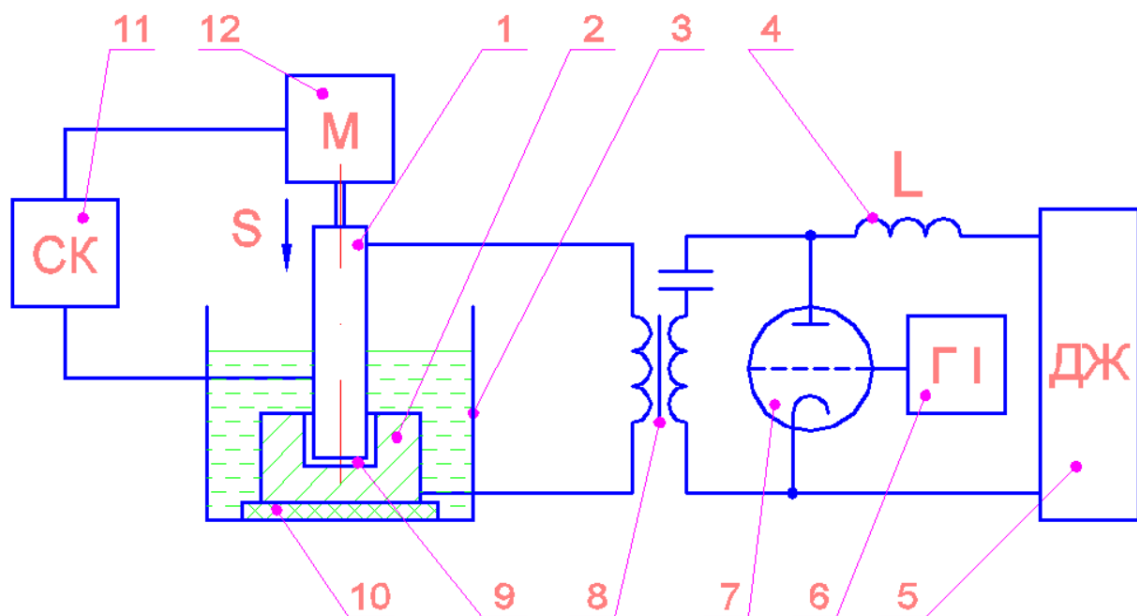


Рис. 1.1. Схема електроерозійного верстата: 1 – електрод-інструмент; 2 – електрод-заготовка; 3 – ванна із робочим середовищем; 4 – дросель; 5 – джерело живлення; 6 – генератор імпульсів; 7 – тиратрон; 8 – імпульсний трансформатор; 9 – міжелектродний проміжок; 10 – ізоляційна підставка; 11 – система контролю величини міжелектродного проміжку; 12 – електродвигун приводу

#### 1.1.4. Конструкція та принцип роботи електроерозійного верстата BSM-3 з використанням електроду-дроту

На корпусі верстата розташовано панель керування 9 (рис. 1.2), блок системи контролю 8, регулятор напруги на електродах 10. На координатному столі 12 встановлено ванну 14, де в рідину занурений предметний столик 13 із закріпленою на ньому заготовкою 15. Координатний стіл 12 може переміщатися у двох горизонтальних взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою двигунів 7 і 11 та повертатися навколо вертикальної осі вручну. Точність переміщення за допомогою електричних приводів становить 0,005 мм. Переміщується стіл вручну або двигуном постійного струму 7 через черв'ячно-зубчастий редуктор.

Дротяний електрод-інструмент 16 подається механізмом головки верстата 4 з котушки 3 через систему напрямних та перемотується механізмом намотування на котушку 2.

У конструкції головки верстата передбачені механізми натягу дроту-

електрода та блокування у випадку обриву.

На корпусі верстата закріплений проєктор 6 з матовим склом 5, що слугує екраном. У камері проєктора встановлено проєкційну оптику та лампу підсвічування. Під окуляр проєктора підкладається кресленик або шаблон оброблюваного контуру заготовки.

Кресленик із зображенням оброблюваного контуру переміщують під проєктором. Оскільки кресленик закріплено на кронштейні, що нерухомо з'єднано з координатним столом 12 верстата, то заготовка також буде переміщуватись відносно електрода за траєкторією, що відповідає кресленику.

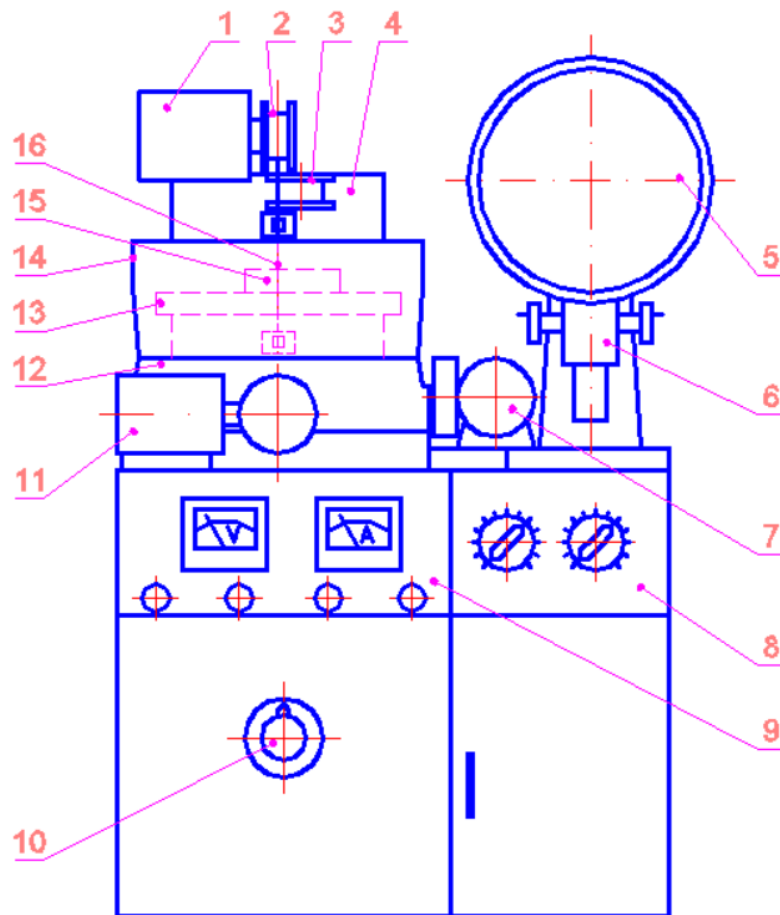


Рис. 1.2. Конструкція електроерозійного верстата: 1 – механізм перемотування електрода-інструмента – дроту; 2 – котушка для прийому дроту; 3 – котушка для подачі дроту; 4 – голівка верстата; 5 – екран; 6 – проєктор; 7 та 11 – двигуни постійного струму горизонтального переміщення столу; – блок системи контролю; 9 – панель керування; 10 – регулятор напруги на електродах; 12 – координатний стіл; 13 – предметний столик; 14 – ванна; 15 – заготовка; 16 – електрод-інструмент

### 1.1.5. Визначення потужності та енергії процесу обробки

Для розуміння електричних явищ, що відбуваються під час електроерозійної обробки, визначимо потужність  $P$ , яка витрачається на проведення даної обробки за формулою

$$P = UI, \quad (1.1)$$

де  $U$  та  $I$  – відповідно, напруга та сила струму під час обробки, які визначаються за показаннями приладів верстата.

Енергія  $E$ , що витрачена на обробку, визначається за формулою

$$E = Pt = UIt, \quad (1.2)$$

де  $t$  – час проведення обробки.

Опір міжелектродного проміжку визначається за формулою

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.3)$$

## 1.2. Порядок проведення роботи

1. Вивчити пристрій та принцип роботи електроерозійного верстата.
2. Навчитись налагоджувати верстат на різні режими роботи за допомогою інженера з навчального процесу.
3. Під керівництвом викладача та інженера студенти мають:
  - на предметному столі верстата встановити заготовку, а в електродотримач – профільований інструмент; провести прошивання заготовки, зафіксувати час та режими обробки; дані занести в табл. 1.1;
  - у тій самій заготовці дрітним електродом вирізати отвір (рис. 1.3), аналогічний за формою та розмірами отриманому в попередньому експерименті, зафіксувати час та режими обробки; дані занести в табл. 1.1;
  - за формулами 1.1 та 1.2 визначити потужність та енергію, які витрачаються для проведення даного виду обробки; за формулою 1.3 – опір міжелектродного проміжку; розраховані дані внести до табл. 1.1;
  - за результатами експерименту зробити висновки про доцільність застосування того чи іншого виду електрода-інструмента в розглянутому

випадку обробки.



а



б

Рис. 1.3. Процес електроерозійного різання: а) нескінченним дротом; б) профільованим електродом-інструментом

Таблиця 1.1

### Результати проведення експерименту

| №<br>п/п | Матеріал<br>заготовки | Глибина<br>отвору,<br>мм | Електрод-<br>інструмент |       | Напруга на<br>генераторі, В | Струм на<br>генераторі, А | Час прошивання<br>отвору, с | Потужність, Вт | Енергія, Дж | Опір<br>міжелектродного<br>проміжку, Ом |
|----------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
|          |                       |                          | матеріал                | форма |                             |                           |                             |                |             |                                         |
| 1        |                       |                          |                         |       |                             |                           |                             |                |             |                                         |
| 2        |                       |                          |                         |       |                             |                           |                             |                |             |                                         |

### 1.3. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Зобразити блок-схему електроерозійного верстата (рис. 1.1).
4. Заповнити табл. 1.1.
5. Зробити висновки за результатами проведених експериментів.

## Контрольні питання до лабораторної роботи № 1

1. Яким чином відбувається змінення форми, розмірів та якості поверхні заготовок під час електроерозійної обробки?
2. Що відбувається з матеріалом заготовки у зоні каналу розряду під час електричного розряду?
3. У якому середовищі відбувається видалення металу з заготовки під час електроерозійної обробки?
4. Які робочі рідини зазвичай застосовують під час електроерозійної обробки?
5. Що являє собою оброблена поверхня внаслідок електроерозійної обробки?
6. Деталі з яких матеріалів обробляються електроерозійним методом обробки?

## Лабораторна робота №2.

### Особливості мікрорельєфу поверхні, що оброблено електроерозійним розрізуванням

**Мета роботи:** вивчити процес електроерозійного розрізання дротяним електродом-інструментом; розглянути особливості формування мікронерівностей на поверхні заготовок з різних металів.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Електроерозійний верстат.
2. Електродний дріт (молібден, латунь).
3. Заготовки із алюмінію, міді, сталі та свинцю.
4. Мікроскоп МБС-9.

### 2.1. Короткі теоретичні відомості

Метал з заготовки видаляється в середовищі рідкого діелектрика під дією тепла, яке виділяється під час електричного мікророзряду, що виникає між електродом-інструментом та електродом-заготовкою. В процесі електроерозійної обробки відбувається зближення електрода-інструмента і заготовки, напруженість  $E$  електричного поля зростає зворотно пропорційно відстані  $L$  між ними:

$$E = \frac{U}{L},$$

де  $U$  – різниця потенціалів між електродом-інструментом та електродом-заготовкою.

Найбільша напруженість електричного поля виникає на ділянці, де міжелектродна відстань найменша. Розташування цієї ділянки залежить від розміру виступів на поверхнях електрода-інструмента та електрода-заготовки, відповідно, шорсткості цих поверхонь (рис. 2.1) [1].

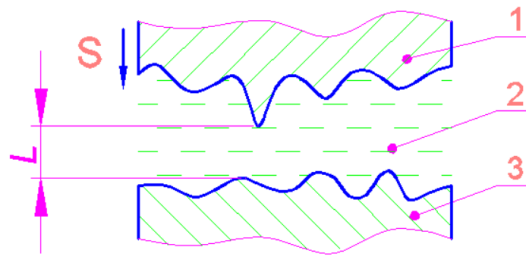


Рис. 2.1. Мікрорельєф у зоні протікання електричного розряду: 1 – електрод-інструмент; 2 – діелектричне робоче середовище; 3 – електрод-заготовка

Під час електроерозійної обробки застосовують пряму полярність підключення електродів до джерела живлення, тому заготовка є анодом, а інструмент – катодом. В бік позитивно зарядженої заготовки прямує потік електронів, які у місці проходження струму розплавляють метал та випаровують його. На заготовці утворюється лунка, яка за формою близька до сферичної. У бік електрода-інструмента – катода рухаються позитивно заряджені іони – більш важкі частинки. Тривалість імпульсів електричного струму обирають так, щоб більшість іонів не встигала досягати поверхні електрода-інструмента та завдавати значні руйнування його поверхні.

Поверхня заготовки під дією великої кількості електричних розрядів набуває форми та вигляду накладених одна на одну довільно розташованих лунок (рис. 2.2).

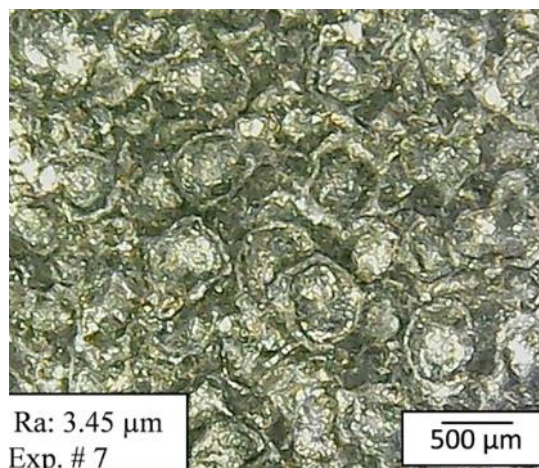


Рис. 2.2. Лунки, що утворились на оброблюваній поверхні електрода-заготовки

Форма та розміри лунок відрізняються одна від одної та залежать від багатьох причин, зокрема, від параметрів електричного розряду,

міжелектродної відстані та фізико-термічних характеристик матеріалу оброблюваної заготовки (рис. 2.3). Розміри лунок збільшуються зі зростанням енергії імпульсів та зменшенням частоти їх слідування. Розміри лунок можна визначити за діаметром утвореного заглиблення  $d_1$  та діаметром умовної сфери  $d_2$ , абсолютною глибиною лунки  $h_1$  та глибиною лунки від початкової поверхні заготовки  $h_2$ , відстанню  $l$  між центрами суміжних лунок. Взаємний вплив імпульсів оцінюється коефіцієнтом перекриття  $k$ :

$$k = \frac{l}{d_2}.$$

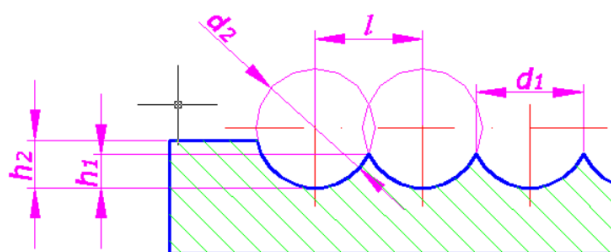


Рис. 2.3. Форма та розміри лунок

Шорсткість поверхні різних металів після електроерозійної обробки знаходиться у межах  $R_a=0,2...40$  мкм. Визначають величину нерівностей, застосовуючи прилади для вимірювання шорсткості – профілометри-профілографи. Завдяки плавному сполученню лунок підвищуються експлуатаційні характеристики деталей, що виготовлені електроерозійним різанням, але важко отримати поверхні з дуже низькою шорсткістю.

## 2.2. Порядок проведення роботи

1. Використовуючи знання, отримані під час проведення лабораторної роботи № 1, налаштувати електроерозійний верстат на режим різання заготовок дрітним електродом-інструментом під керівництвом інженера з навчального процесу.

2. Виготовити зразки зі свинцю, міді, сталі та алюмінію на однакових режимах обробки.

3. За допомогою мікроскопу МБС–9 розглянути оброблені поверхні зразків (рис. 2.4) та розмістити їх у табл. 2.1 за збільшенням величини лунок.

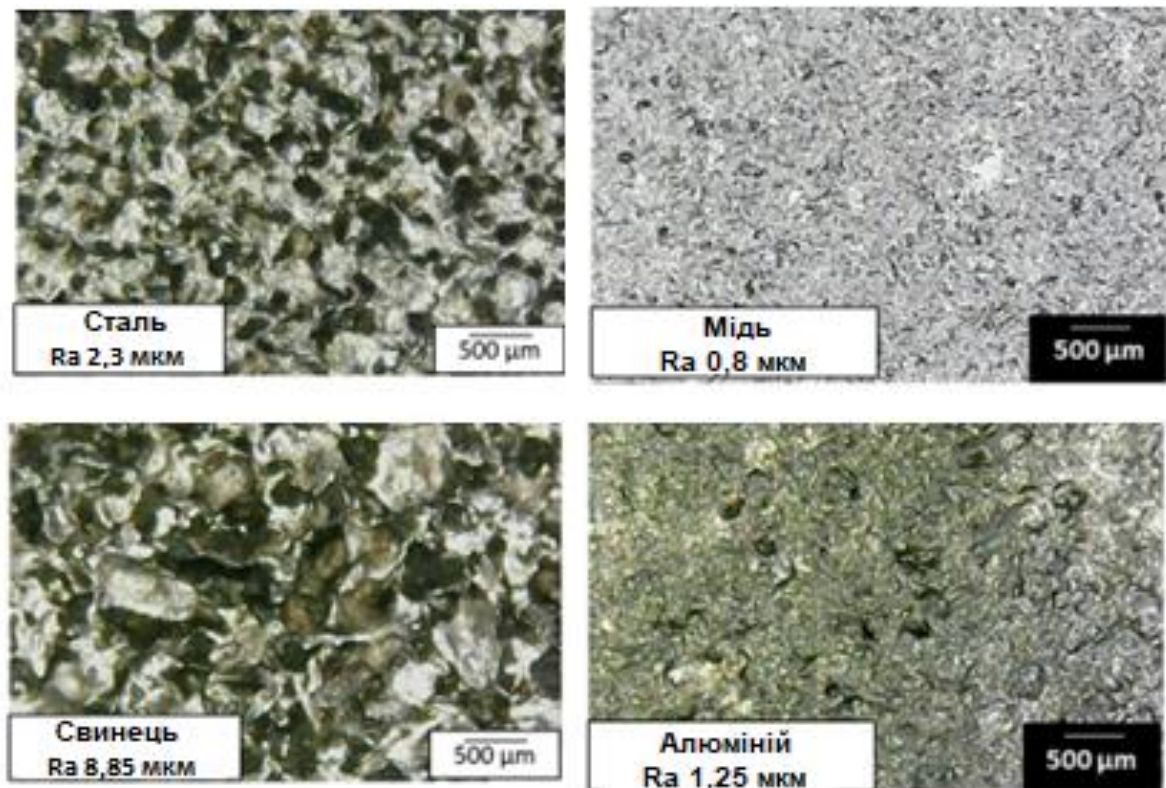


Рис. 2.4. Результати обробки експериментальних зразків

Таблиця 2.1

Результати проведення експерименту

| № зп | Матеріал зразка | Шорсткість $R_a$ , мкм |
|------|-----------------|------------------------|
| 1    |                 |                        |
| 2    |                 |                        |
| 3    |                 |                        |
| 4    |                 |                        |

4. Використовуючи дані табл. 2.2, встановити зв'язок розміру величини лунки з теплофізичними властивостями оброблених металів та зробити відповідні висновки.

Таблиця 2.2

## Теплофізичні властивості оброблюваних металів

| Метал    | Температура плавлення, К | Температура кипіння, К | Теплопровідність, Вт/(м·К) |
|----------|--------------------------|------------------------|----------------------------|
| Алюміній | 933,37                   | 2740                   | 221,1                      |
| Сталь    | 1808                     | 3023                   | 80,4                       |
| Мідь     | 1336                     | 2840                   | 400,0                      |
| Свинець  | 600,5                    | 2013                   | 35,3                       |

**2.3. Зміст звіту**

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Власноруч накреслити рис. 2.1 та 2.3.
4. Заповнити табл. 2.1.
5. Зробити висновки за результатами досліджень.

**Контрольні питання до лабораторної роботи № 2**

1. Під дією чого видаляється матеріал з заготовки в середовищі рідкого діелектрика під час електричного мікророзряду, що виникає між електродом-інструментом та електродом-заготовкою?
2. Як змінюється напруженість електричного поля під час зближення електрода-інструмента та заготовки в процесі електроерозійної обробки?
3. Від чого залежить розташування ділянки між електродом-інструментом та електродом-заготовкою з найбільшою напруженістю електричного поля?
4. Яку полярність підключення електродів до джерела живлення застосовують для здійснення електроерозійної обробки металів?
5. Лунка якої форми утворюється на електроді-заготовці під час проведення електроерозійної обробки металів?
6. З яких міркувань визначається тривалість імпульсів електричного струму, яку необхідно обирати під час проведення електроерозійної обробки металів?

7. Які форму та вигляд набуває поверхня заготовки під час проведення електроерозійної обробки металів?

8. Від чого залежить форма та розміри лунок, які утворюються на поверхні електрода-заготовки під час проведення електроерозійної обробки металів?

9. Як впливає зростання енергії імпульсів на розміри лунок під час проведення електроерозійної обробки металів?

10. У яких межах знаходиться шорсткість поверхні металів після електроерозійної обробки?

11. Яку назву має прилад для вимірювання шорсткості обробленої поверхні?

12. Завдяки чому підвищуються експлуатаційні характеристики деталей після електроерозійної обробки металів?

## Лабораторна робота №3.

### Визначення електричних параметрів електроерозійної обробки

**Мета роботи:** Визначення впливу електричних параметрів електроерозійної обробки на якісні показники та розрахунок режиму електроерозійної обробки.

#### 3.1. Теоретичні відомості

До електричних показників електроерозійної обробки, які визначають результати обробки, відносяться: енергія імпульсів  $E_i$ , частота повторення імпульсів  $f$ , ємність розрядного конденсатора  $C$ , сила струму закорочення  $I_{зк}$ , середнє значення сили струму  $I_c$ , тривалість імпульсів  $\tau_i$ , період повторення імпульсів  $\tau_n$ , шпаруватість імпульсів  $q$ , напруга холостого ходу  $U_{xx}$  та середня напруга пробою  $U_{пр}$ .

Для всіх способів електроерозійної обробки, зокрема й під час застосування дротяного електрода-інструмента, який частіше використовується для обробки заготовок складної конфігурації, розміри елементарних профілів на оброблюваній поверхні визначаються формою та розмірами одиничних лунок, а також величиною їх перекриття.

Важливо, що діаметр  $d_l$  та глибина  $h_l$  лунки (рис. 2.3) залежатимуть від електричних параметрів режиму обробки. Встановивши функціональний зв'язок електричних показників обробки з параметрами шорсткості, можна підібрати такий режим електроерозійної обробки, що забезпечуватимуть задані робочими креслениками деталі значення висотних параметрів шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ), а також визначається товщина дефектного шару  $H$ , що утворився під час обробки.

Задля забезпечення контурного розрізування заготовок, електроерозійний верстат оснащено системою переміщення (рис. 3.1). Заготовку 3 за допомогою затискачів 1 закріплено на робочому столі верстата 2. На даній схемі рух столу 2 відбувається за однією віссю з величиною подачі  $S_1$ , а дротяний електрод-інструмент 5 переміщується у

перпендикулярному напрямі, при чому величина подачі верхнього 4 та нижнього 6 напрямних роликів може відрізнятись. Якщо  $S_2 = S'_2$ , то утворюється вертикальний розріз. У випадку різних величин подачі напрямних роликів  $S_2$  та  $S'_2$ , дротяний електрод-інструмент 5 нахилитиметься, його вісь розташовуватиметься під кутом до вертикальної вісі, що дає можливість утворювати нахилені поверхні розрізу.

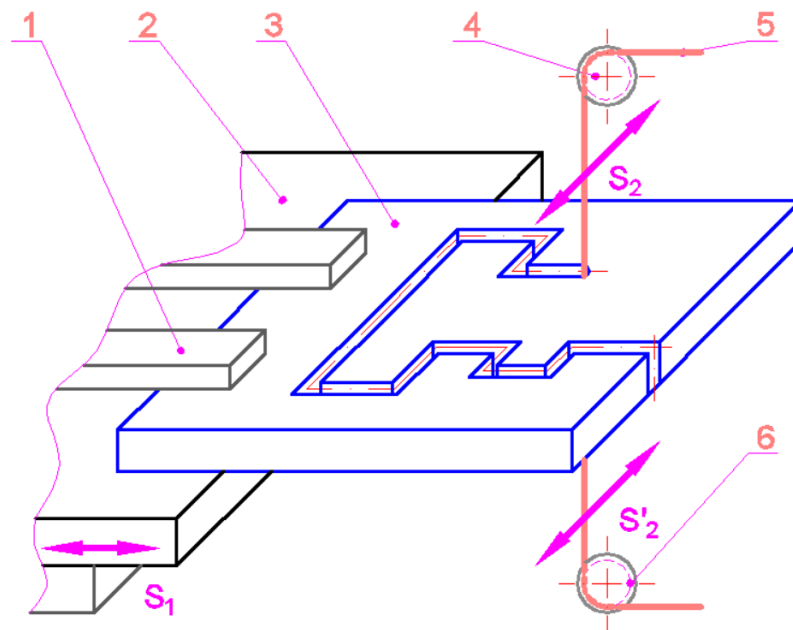


Рис. 3.1. Кінематична схема електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом: 1 – затискач; 2 – робочий стіл електроерозійного верстата; 3 – електрод-заготовка; 4 – верхній напрямний ролик дротяного електроду-інструменту; 5 – дротяний електрод-інструмент; 6 – нижній напрямний ролик дротяного електроду-інструменту;  $S_1$  – рух подачі столу;  $S_2$  та  $S'_2$  – рух подачі дротяного електроду-інструменту (ванну з діелектричною робочою рідиною не показано)

Висоту мікронерівностей за параметром  $R_a$  [мкм] можна визначити за формулою:

$$R_a = 50\beta_1^2 k_m^3 \sqrt{A_i}, \quad (3.1)$$

де  $\beta_1$  – коефіцієнт перекриття лунок;  $k_m$  – експериментальний коефіцієнт, що враховує матеріал оброблюваної заготовки [м/Дж<sup>0,333</sup>];  $A_i$  – енергія імпульсів, [Дж].

Тоді, вирішуючи зворотну задачу, отримаємо залежність для розрахунку енергії імпульсів  $A_i$ :

$$A_i = \left( \frac{R_a}{50\beta_1^2 k_m} \right)^3, \quad (3.2)$$

де  $R_a$  – нормоване значення параметру шорсткості, задане у робочому кресленику деталі [мкм].

З урахуванням того, що більшість розрізних електроерозійних верстатів оснащено релаксаційними генераторами імпульсів, параметри яких залежать від фізичного стану міжелектродного проміжку (МЕП), інші електричні показники процесу електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом слід визначати через ємність  $C$  [Ф] розрядного конденсатора:

$$C = 2A_i U_{\text{пр}}^2; \quad (3.3)$$

де  $U_{\text{пр}}$  – середня напруга пробоя [В]:  $U_{\text{пр}} \approx (0,50 \dots 0,75) \cdot U_{\text{xx}}$ , де  $U_{\text{xx}}$  – напруга холостого ходу [В].

Силу струму закорочення  $I_{\text{зк}}$  [А] через ємність  $C$  [Ф] визначають за формулою:

$$I_{\text{зк}} = 0,2 + 0,8C. \quad (3.4)$$

Середнє значення сили струму:

$$I_c \approx (0,50 \dots 0,75) I_{\text{зк}}. \quad (3.5)$$

Частоту повторення імпульсів  $f$  [Гц] розраховують за залежністю:

$$f = \frac{U_{\text{xx}} I_c}{A_i}. \quad (3.6)$$

Далі розраховують період повторення  $\tau_n$  [с] та тривалість імпульсів  $\tau_i$  [с]:

$$\tau_n = \frac{1}{f}, \quad (3.7)$$

$$\tau_i = \frac{\tau_n}{q}, \quad (3.8)$$

де  $q$  – шпаруватість імпульсів.

Значення енергії імпульсів  $A_i$  [Дж], що задовольняє умові забезпечення нормованого значення  $R_a$ , використовують для визначення товщини дефектного шару  $H$  [мм]:

$$H \approx \frac{3}{4} \beta_1^2 k_m \sqrt[3]{A_t}. \quad (3.9)$$

Величина  $H$  характеризує ймовірність виникнення мікротріщин на обробленій поверхні деталі. Якщо  $H \geq 100$  мкм то, незалежно від матеріалу оброблюваної заготовки, поява мікротріщин неминуха, що в свою чергу може вплинути на міцність та інші експлуатаційні властивості деталі, виготовленої за допомогою електроерозійної обробки.

Таким чином, описана методика розрахунку дозволяє визначити необхідні для забезпечення заданої якості обробленої поверхні деталі показники електричного режиму розмірної електроерозійної обробки, який необхідно задати на генераторі імпульсів верстата.

Таблиця 3.1.

Вихідні дані для проведення розрахунків

| Номер<br>варіанту | $R_a$ , мкм | $\beta_1$ | $k_m$ , м/Дж <sup>0,333</sup> | $q$ | $U_{xx}$ , В | Матеріал<br>заготовки |
|-------------------|-------------|-----------|-------------------------------|-----|--------------|-----------------------|
| 1                 | 2           | 3         | 4                             | 5   | 6            | 7                     |
| 1                 | 6,3         | 1,5       | 55                            | 14  | 110          | 45                    |
| 2                 | 6,3         | 1,5       | 55                            | 20  | 120          | 45                    |
| 3                 | 3,2         | 1,4       | 50                            | 10  | 25           | 20Х                   |
| 4                 | 3,2         | 1,4       | 50                            | 15  | 40           | 20Х                   |
| 5                 | 3,2         | 1,4       | 70                            | 20  | 50           | ХН77ТЮР               |
| 6                 | 6,3         | 1,5       | 20                            | 20  | 140          | ВК6                   |
| 7                 | 6,3         | 1,5       | 20                            | 22  | 60           | ВК6                   |
| 8                 | 6,3         | 1,5       | 30                            | 25  | 150          | ВК15                  |
| 9                 | 3,2         | 1,4       | 30                            | 30  | 130          | ВК15                  |
| 10                | 6,3         | 1,5       | 130                           | 17  | 110          | АЛ6                   |
| 11                | 3,2         | 1,4       | 130                           | 20  | 125          | АЛ6                   |
| 12                | 6,3         | 1,5       | 110                           | 15  | 55           | Д1                    |
| 13                | 12,5        | 1,5       | 110                           | 40  | 160          | Д1                    |
| 14                | 3,2         | 1,4       | 70                            | 22  | 60           | М1                    |

### 3.2. Порядок проведення роботи

1. Згідно визначеного викладачем варіанту (табл. 3.1) для виконання розрахунків, внести дані до табл. 3.2 протоколу.

Таблиця 3.2.

Вихідні дані для розрахунків електричних параметрів електроерозійної  
обробки

| Номер<br>варіанту | $R_a$ , мкм | $\beta_1$ | $k_M$ , м/Дж <sup>0,333</sup> | $q$ | $U_{xx}$ , В | Матеріал<br>заготовки |
|-------------------|-------------|-----------|-------------------------------|-----|--------------|-----------------------|
|                   |             |           |                               |     |              |                       |

2. Визначити необхідні параметри електричного режиму електроерозійної обробки для забезпечення заданої якості обробленої поверхні заготовки: енергію імпульсів  $A_i$ , ємність розрядного конденсатора  $C$  генератору імпульсів, середню напругу пробою  $U_{пр}$ , силу струму закорочення  $I_{зк}$ , середнє значення сили струму  $I_c$ , частоту повторення імпульсів генератору імпульсів  $f$ , період повторення імпульсів  $\tau_{п}$ , тривалість імпульсів  $\tau_i$ ; визначити очікувану товщину дефектного шару  $H$ .

Розрахунки виконати згідно формул теоретичних відомостей.

3. Отримані результати занести у табл. 3.3.

4. Дати висновок про ймовірність виникнення мікротріщин на обробленій поверхні деталі після електроерозійної обробки.

Таблиця 3.3.

Показники електричного режиму електроерозійної обробки

| №<br>зп | Назва електричного показника<br>електроерозійної обробки     | Одиниця<br>вимірювання | Величина |
|---------|--------------------------------------------------------------|------------------------|----------|
| 1       | Енергія імпульсів, $A_i$                                     | Дж                     |          |
| 2       | Ємність розрядного конденсатора<br>генератору імпульсів, $C$ | мкФ                    |          |
| 3       | Середня напруга пробою, $U_{пр}$                             | В                      |          |
| 4       | Сила струму закорочення, $I_{зк}$                            | А                      |          |
| 5       | Середнє значення сили струму, $I_c$                          | А                      |          |
| 6       | Частота повторення імпульсів<br>генератору імпульсів, $f$    | Гц                     |          |
| 7       | Період повторення імпульсів, $\tau_{п}$                      | с                      |          |
| 8       | Тривалість імпульсів, $\tau_i$                               | с                      |          |
| 9       | Товщина дефектного шару, $H$                                 | мм                     |          |

### 3.3. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Вихідні дані для розрахунку електричних параметрів електроерозійної обробки (табл. 3.2).
3. Результати розрахунків електричного режиму електроерозійної обробки (табл. 3.3).
4. Висновки щодо ймовірності виникнення мікротріщин на обробленій поверхні деталі після електроерозійної обробки.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 3

1. Які електричні показники визначають результати електроерозійної обробки матеріалів?
2. Які показники визначають товщину дефектного шару  $H$ , що утворюється під час електроерозійної обробки металів?
3. З якою метою електроерозійний верстат оснащено системою переміщення заготовки?
4. З якою метою задають різну величину подачі напрямних роликів електрода-інструмента?
5. Як залежить висота мікронерівностей, що утворюються під час електроерозійної обробки металів, від енергії електричних імпульсів?
6. На що вказує товщина дефектного шару  $H$ , який утворюється під час електроерозійної обробки на поверхні деталі?
7. Яка товщина дефектного шару  $H$ , який утворюється під час електроерозійної обробки на поверхні деталі, свідчитиме про неминучу появу мікротріщин?

## Лабораторна робота № 4.

### Визначення техніко-економічних показників електроерозійної обробки

**Мета роботи:** визначити техніко-економічні показники електроерозійної обробки заготовок та розрахувати за індивідуальним завданням.

#### 4.1. Теоретичні відомості

До основних техніко-економічних показників електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом відносяться продуктивність  $Q$ , основний технологічний час обробки  $T_0$ , сумарні енерговитрати  $A_E$ , витрати дротяного електрода-інструмента по масі  $M_i$ .

Продуктивність  $Q$  [мм<sup>3</sup>/хв] електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом:

$$Q = 60 \cdot 10^6 k_2 k_3 I_{\text{зк}} U_{\text{пр}} (d_i + 2\delta_{\text{МЕП}}), \quad (4.1)$$

де  $k_2$  – експериментальний безрозмірний коефіцієнт, що враховує діаметр  $d_i$  дротяного електрода-інструмента, товщину заготовки, властивості матеріалів електрода-інструмента та заготовки;  $k_3$  – експериментальний коефіцієнт, що характеризує властивості різних оброблюваних матеріалів [м<sup>2</sup>/(с·В·А)];  $\delta_{\text{МЕП}}$  – бічний міжелектродний проміжок [мм]:

$$\delta_{\text{МЕП}} = 7,45 \left( \frac{I_c}{f} \right)^{0,31}, \quad (4.2)$$

де  $f$  – частота повторення імпульсів [кГц].

Основний технологічний час  $T_0$  [хв] електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом розраховують за формулою:

$$T_0 = \frac{LB(d_i + 2\delta_{\text{МЕП}})}{Q}, \quad (4.3)$$

де  $B$  – товщина заготовки [мм];  $L$  – довжина траєкторії дротяного електрода-інструмента [мм].

Сумарні енерговитрати  $A_E$  (кВт·год) розраховують за залежністю:

$$A_E = \frac{A_i N_{\text{імп}}}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (4.4)$$

де  $N_{\text{імп}}$  – число імпульсів, задіяних у електроерозійному руйнуванні металу на оброблюваній поверхні:

$$N_{\text{імп}} \approx \frac{60 T_0}{\tau_{\text{п}}}.$$

Визначимо витрати дрітного електрода-інструмента за довжиною  $L_i$  [м] за формулою:

$$L_i = 60 \cdot 10^{-3} V_{\text{п}} T_0, \quad (4.5)$$

де  $V_{\text{п}}$  – швидкість перемотування електрода-інструмента [мм/с].

Витрати  $M_i$  [кг] дрітного електрода-інструмента із застосуванням електроерозійної обробки визначають за формулою:

$$M_i = 10^{-6} \frac{\pi d_i^2}{4} L_i \rho, \quad (4.6)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу дрітного електрода-інструмента [кг/м<sup>3</sup>].

Параметри  $A_i$ ,  $U_{\text{пр}}$ ,  $I_{\text{зк}}$ ,  $I_c$ ,  $f$ ,  $\tau_{\text{п}}$ ,  $H$  було розраховано під час виконання попередньої лабораторної роботи (табл. 3.3). Слід зазначити, що показники  $T_0$ ,  $A_E$ ,  $M_i$  є факторами впливу, від яких залежатиме технологічна собівартість операції електроерозійної обробки та виробу в цілому.

## 4.2. Порядок проведення роботи

1. Визначити техніко-економічні показники електроерозійної обробки заготовок (рис. 4.1): продуктивність  $Q$ , основний технологічний час  $T_0$ , сумарні енерговитрати  $A_E$ , витрати електрода-інструмента за довжиною  $L_i$  та масою  $M_i$ .

Параметри для розрахунків обрати згідно визначеного викладачем варіанту індивідуального завдання (табл. 4.1).

2. Отримані результати внести у табл. 4.2.

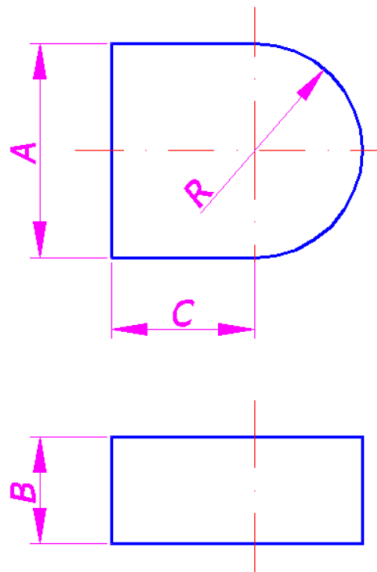


Рис. 4.1. Ескіз деталі для вирізання заданої поверхні на електроерозійному верстаті

Таблиця 4.1.

Дані для розрахунку техніко-економічних показників електроерозійної  
обробки

| № варіанту | $k_2$ | $k_3, \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{В} \cdot \text{А})$ | $d_i, \text{ мм}$ | $V_{\text{п}}, \text{ мм/с}$ | $\rho, \text{ кг/м}^3$ | A, мм | B, мм | C, мм |
|------------|-------|-------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| 1          | 1,02  | $5,87 \times 10^{-8}$                                       | 0,25              | 25                           | 8440 (Л63)             | 30    | 30    | 20    |
| 2          | 1,05  | $5,87 \times 10^{-8}$                                       | 0,30              | 30                           | 8440 (Л63)             | 20    | 25    | 15    |
| 3          | 1,02  | $6 \times 10^{-8}$                                          | 0,25              | 15                           | 8600 (Л68)             | 15    | 10    | 20    |
| 4          | 1,05  | $6 \times 10^{-8}$                                          | 0,30              | 20                           | 8600 (Л68)             | 25    | 40    | 20    |
| 5          | 1,02  | $5,28 \times 10^{-8}$                                       | 0,25              | 15                           | 8440 (Л63)             | 10    | 20    | 10    |
| 6          | 1,00  | $4 \times 10^{-8}$                                          | 0,30              | 28                           | 8600 (Л68)             | 15    | 30    | 15    |
| 7          | 1,05  | $4,5 \times 10^{-8}$                                        | 0,25              | 30                           | 8440 (Л63)             | 20    | 35    | 10    |
| 8          | 1,03  | $5,5 \times 10^{-8}$                                        | 0,3               | 12                           | 8600 (Л68)             | 15    | 10    | 20    |
| 9          | 1,01  | $5,3 \times 10^{-8}$                                        | 0,25              | 15                           | 8440 (Л63)             | 25    | 40    | 20    |
| 10         | 1,00  | $5,7 \times 10^{-8}$                                        | 0,3               | 26                           | 8600 (Л68)             | 10    | 20    | 10    |
| 11         | 0,95  | $4 \times 10^{-8}$                                          | 0,25              | 17                           | 8440 (Л63)             | 15    | 30    | 15    |
| 12         | 1,05  | $5 \times 10^{-8}$                                          | 0,3               | 30                           | 8600 (Л68)             | 20    | 35    | 10    |
| 13         | 1,03  | $5,4 \times 10^{-8}$                                        | 0,25              | 28                           | 8440 (Л63)             | 20    | 25    | 15    |
| 14         | 1,01  | $4,7 \times 10^{-8}$                                        | 0,3               | 15                           | 8600 (Л68)             | 15    | 10    | 20    |

Таблиця 4.2.

## Техніко-економічні показники електроерозійної обробки

| Варіант | Продуктивність<br>$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв | Основний технологічний час $T_0$ , хв | Сумарні енерговитрати $A_E$ , кВт·год | Витрати електрода-інструмента |                     |
|---------|---------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
|         |                                             |                                       |                                       | за довжиною $L_i$ , м         | за масою $M_i$ , кг |
|         |                                             |                                       |                                       |                               |                     |

**4.3. Зміст звіту**

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Вихідні дані для розрахунків (табл. 4.1) для електроерозійної обробки.
3. Накреслити ескіз деталі (рис. 4.1) для вирізання заданої поверхні на електроерозійному верстаті з розмірами, що відповідають обраному варіанту.
4. Результати розрахунків техніко-економічних показників електроерозійної обробки обраної деталі (табл. 4.2).
5. Висновки щодо техніко-економічних показників електроерозійної обробки.

**Контрольні питання до лабораторної роботи № 4**

1. Назвіть основні техніко-економічні показники електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом.
2. Як залежить продуктивність електроерозійної обробки від діаметру дротяного електрода-інструмента?
3. Як залежить основний технологічний час електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом від продуктивності?
4. Що визначають техніко-економічні показники електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом?

## Лабораторна робота № 5.

### Визначення продуктивності ультразвукового прошивального верстата

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією та принципом роботи ультразвукового прошивального верстата; навчитися самостійно проводити порівняльний аналіз продуктивності верстата у процесі обробки різних матеріалів.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Ультразвуковий прошивальний верстат 4Д772.
2. Робочий інструмент для виготовлення в заготовці циліндричного отвору.
3. Заготовки зі скла, ситалу, кераміки, твердого сплаву, загартованої сталі.
4. Вимірювальний інструмент: штангенциркуль, секундомір.
5. Зразки деталей, оброблених на ультразвуковому верстаті.

### 5.1. Короткі теоретичні відомості

#### 5.1.1. Призначення ультразвукового прошивального верстата

Ультразвуковий прошивальний верстат призначений для виготовлення та чистового оброблення отворів різної конфігурації в заготовках із твердих крихких струмопровідних та діелектричних матеріалів (скло, ситали, кераміка, ферити, кремній, германій, рубін, алмази, тверді сплави тощо) (рис. 5.1).

#### 5.1.2. Принцип ультразвукового методу обробки

Під час ультразвукової розмірної обробки видалення матеріалу із заготовки здійснюється зернами абразиву, яким надається значне прискорення інструментом, який здійснює коливання з ультразвуковою частотою. Ударяючись о поверхню заготовки, абразивні зерна сколюють

мікрочастинки матеріалу. Велика частота ударів (14...22 тисяч за секунду) одночасно великою кількістю абразивних зерен забезпечує інтенсивне видалення матеріалу заготовки.

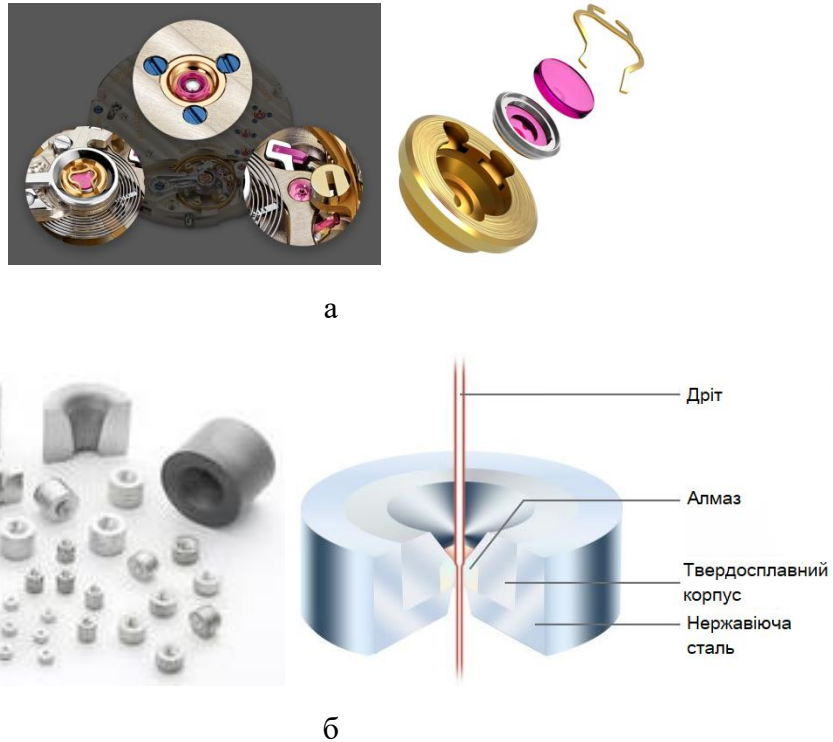


Рис. 5.1. Зразки деталей, що оброблюються ультразвуковим прошивальним верстатом: а) підшипник ковзання у годиннику; б) керамічні та алмазні філь'єри

сновою технологічною характеристикою розмірної ультразвукової обробки є продуктивність  $Q$ , яку можна оцінити об'ємом матеріалу, який видаляється з оброблюваної заготовки в одиницю часу. У процесі обробки отвору продуктивність  $[мм^3/хв]$  визначається за формулою

$$Q = 60 \frac{H \cdot S_{\text{п}}}{T}, \quad (5.1)$$

де  $H$  – глибина отвору,  $[мм]$ ;  $S_{\text{п}}$  – площа оброблюваної поверхні заготовки,  $[мм^2]$ ;  $T$  – час виготовлення отвору,  $[с]$ .

Для виготовлення циліндричного отвору застосовується інструмент у вигляді циліндра. Утворений отвір діаметром  $D$  дещо більший за діаметр інструмента на дві величини зазору, що утворюється у результаті тертя

абразивних зерен о бічну поверхню інструмента [мм]

$$S_{\pi} = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (5.2)$$

де  $D$  – діаметр отвору, [мм].

Також важливою для розрахунку технологічного процесу є швидкість прошивання отвору  $V_{\pi}$ , яка визначається як [мм/с]

$$V_{\pi} = \frac{H}{T}. \quad (5.3)$$

### 5.1.3. Опис схеми ультразвукового прошивального верстата

Заготовку 5 (рис. 5.2) на підкладці 9 встановлюють на столі верстата 8, що огорожений знімним захисним кожухом 7, який обмежує розбризкування та витік абразивної суспензії, що подається у зону обробки. До заготовки підводиться робочий інструмент 4, закріплений на концентраторі 3 магнітострикційного перетворювача 1. Для охолодження перетворювача через головку верстата прокачується вода 2 [1].

Коливання  $\Delta S$  перетворювача 1 збуджуються ультразвуковим генератором (УЗГ) 13 та джерелом постійного струму (ДПС) 12. Концентратор 3 призначений для збільшення амплітуди коливань робочого інструмента 4. Абразивна суспензія (вода з абразивним порошком) 6 подається у зону обробки патрубком 11 з бака з мішалкою та помпою 10.

### 5.1.4. Основні вузли верстата 4Д772

1. **Станина** (рис. 5.3) з горизонтальними напрямними для поздовжнього переміщення столу та вертикальними напрямними для переміщення ультразвукової головки. Всередині станини розміщено бак з мішалкою та діафрагмовим насосом для подачі розмішаної абразивної суспензії в зону обробки.

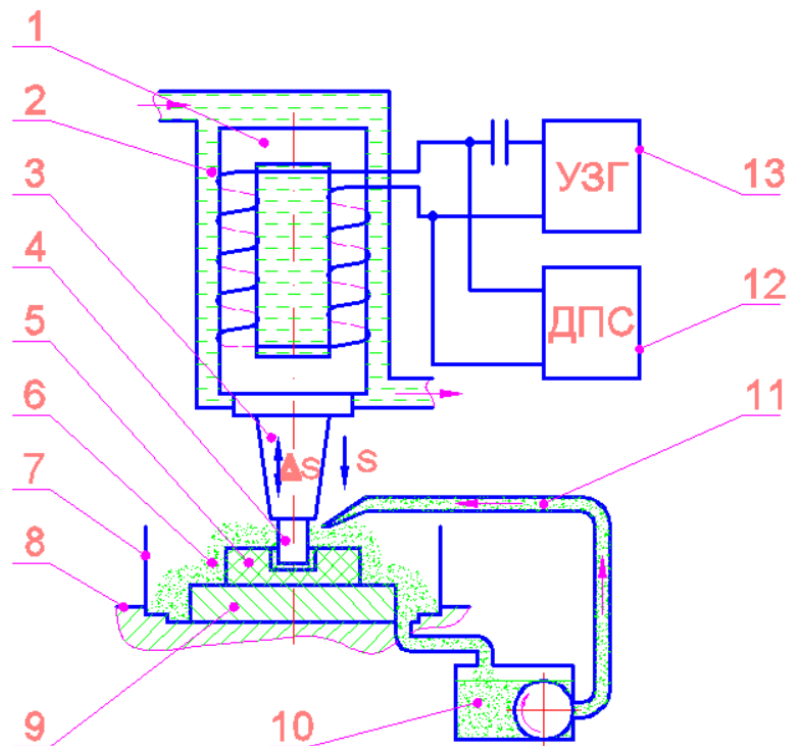


Рис. 5.2. Схема ультразвукового прошивального верстата: 1 – перетворювач ультразвукових коливань; 2 – головка верстата з охолоджуваною рідиною; 3 – концентратор енергії ультразвукових коливань; 4 – інструмент; 5 – заготовка; 6 – абразивна суспензія; 7 – захисний кожух; 8 – стіл верстата; 9 – підкладка; 10 – бак з мішалкою та помпою; 11 – патрубок; 12 – джерело постійного струму; 13 – ультразвуковий генератор

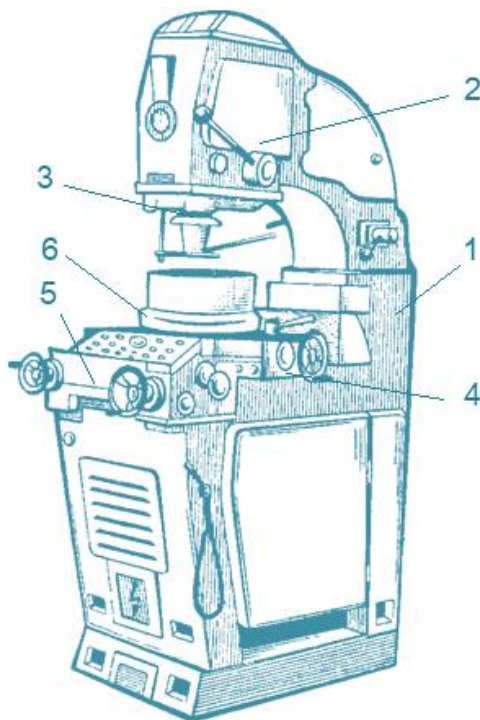


Рис. 5.3. Зовнішній вигляд ультразвукового верстата: 1 – станина; 2 – головка ультразвукова; 3 – механізм робочої подачі; 4 – поздовжній стіл; 5 – поперечний стіл; 6 – поворотний круглий стіл

2. **Головка ультразвукова**, в якій розміщено магнітострикційний перетворювач охолоджуваний водою.

3. **Механізм робочої подачі**, призначений для здійснення налагоджувального та робочого переміщень інструмента.

4. **Поздовжній стіл** переміщується вручну в поздовжньому напрямку по напрямним станини.

5. **Поперечний стіл** переміщується вручну в поперечному напрямку по поперечних напрямних поздовжнього стола.

6. **Поворотний круглий стіл** обертається як вручну, так й автоматично від електродвигуна. На ньому встановлюють оброблювану заготовку.

## 5.2. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи ультразвукового прошивального верстата.

2. Встановити на стіл верстата заготовку та обробляти її протягом цілого числа хвилин. Повторити аналогічну обробку заготовок з інших матеріалів. Режим роботи верстата під час обробки кожної заготовки залишається незмінним.

3. За допомогою індикатора визначити глибину отриманого отвору в заготовках.

4. Виміряти мікрометром діаметр виготовленого отвору.

5. За формулами 5.1 та 5.2 визначити продуктивність ультразвукової прошивки отворів у зразках; за формулою 5.3 – швидкість прошивання. Результати вимірювань та розрахунків занести у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати вимірювань та розрахунків ультразвукового прошивання отворів

| № з/п | Оброблюваний матеріал | Діаметр інструмента, $D$ , мм | Час обробки, $T$ , хв | Глибина заглиблення, $H$ , мм | Продуктивність, $Q$ , мм <sup>3</sup> /хв | Швидкість прошивання, $V_p$ , мм/хв |
|-------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1     |                       |                               |                       |                               |                                           |                                     |
| 2     |                       |                               |                       |                               |                                           |                                     |
| 3     |                       |                               |                       |                               |                                           |                                     |
| 4     |                       |                               |                       |                               |                                           |                                     |
| 5     |                       |                               |                       |                               |                                           |                                     |

### 5.3. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Описати призначення, принцип роботи (зі схемою) та конструкцію ультразвукового прошивального верстата. Накреслити рис. 5.2.
4. Після проведення експерименту внести отримані дані до табл. 5.1.
5. Розрахувати продуктивність обробки для кількох заготовок (скло, ситал, кераміка, твердий сплав, загартована сталь). Внести розрахунки у табл. 5.1.
6. Зробити висновки за результатами експерименту та розрахунків.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 5

1. Для чого призначений ультразвуковий прошивальний верстат?
2. Яким чином здійснюється видалення матеріалу з заготовки у процесі ультразвукової розмірної обробки?
3. З якою частотою коливається інструмент під час ультразвукової розмірної обробки?
4. Назвіть одну з основних технологічних характеристик розмірної ультразвукової обробки.
5. Як можна оцінити продуктивність розмірної ультразвукової обробки?

6. Назвіть призначення знімного захисного кожуху на столі верстата для розмірної ультразвукової обробки.
7. З якою метою прокачується вода через головку верстата для розмірної ультразвукової обробки?
8. Назвіть призначення ультразвукового генератора ультразвукового верстата?
9. Для чого призначений концентратор верстата для розмірної ультразвукової обробки?
10. Що являє собою абразивна суспензія, яка застосовується для ультразвукової обробки матеріалів?
11. Які рухи забезпечують напрямні, встановлені на станині верстата для розмірної ультразвукової обробки?
12. Назвіть призначення поздовжнього та поперечного столів верстата для розмірної ультразвукової обробки.

## Лабораторна робота № 6.

### Вивчення особливостей коливальної системи ультразвукових верстатів та визначення змін швидкості робочої подачі інструмента під час прошивання отворів

**Мета роботи:** вивчити сучасні конструкції та принципи робіт електроакустичних перетворювачів; ознайомитися з особливостями технології прошивання отворів на ультразвуковому обладнанні.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Ультразвуковий верстат 4Д77К.00.000РЭ (рис. 6.1).
2. Магнітострикційний перетворювач.
3. Концентратори різної геометричної форми (циліндричні ступеневі, конічні, експонентні, комбіновані).
4. Набір інструментів.
5. Заготовки зі скла (кераміки).



а



б

Рис. 6.1. Ультразвуковий прошивальний верстат: а) загальний вигляд; б) зона обробки

## 6.1. Короткі теоретичні відомості

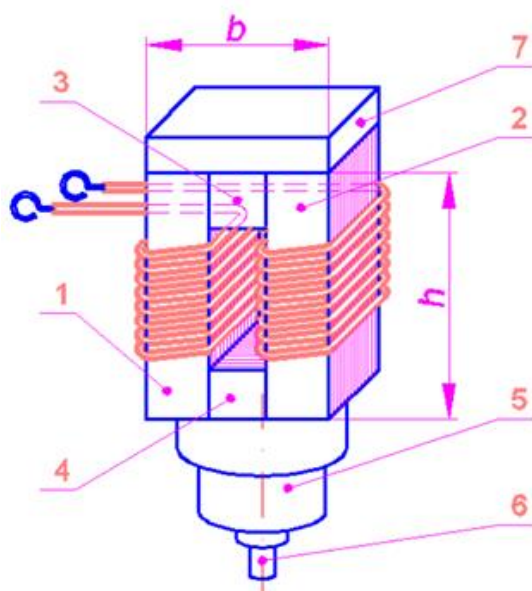
Ультразвукова коливальна система складається з:

1. Джерела живлення – генератора, який перетворює напругу промислової частоти (50 Гц) у напругу ультразвукової частоти (16...25 кГц).
2. Електроакустичного перетворювача, що перетворює електричні коливання в механічні.
3. Концентратора ультразвукових коливань (трансформатора пружних коливань), який концентрує енергію коливань на інструмент, що визначається у збільшенні амплітуди його коливань.
4. Інструмента, що закріплений на концентраторі та передає рух абразивним зернам, які й видаляють матеріал з заготовки.

**Магніострикційний перетворювач** являє собою осердя з магніострикційного матеріалу з обмоткою. Магніострикційні матеріали здатні змінювати розміри під впливом змінного магнітного поля (збільшуються або зменшуються в залежності від напрямку проходження магнітного потоку). Значний магніострикційний ефект мають сплави платини з залізом, залізо-кобальтовий (пермендюр) та залізо-алюмінієвий (альфер) сплави. У більшості верстатів, що виготовляються, у якості активного матеріалу магніострикційних перетворювачів використовують пермендюр. Перетворювач стрижневого типу, як правило, складається з двох вертикальних (поздовжніх) стрижнів 1 та 2 (рис. 6.2), сполучених між собою горизонтальними (поперечними) накладками 3 та 4. Для зменшення втрат від вихрових струмів (струмів Фуко) у осерді, стрижні набирають зі штампованих пластин товщиною 0,1...0,2 мм, які ізолювані одна від одної електроізоляційним лаком. На стрижні осердя намотано обмотку, теж вкриту ізоляційним матеріалом [1].

Всі розміри осердя обчислюються. Зокрема, ширина перетворювача  $b$  приймається менша за половину довжини акустичної хвилі, інакше

виникатимуть значні поперечні акустичні коливання у перетворювачі. Висота осердя  $h$  має відповідати довжині непарного числа півхвиль, тоді амплітуда акустичних коливань буде максимальною за рахунок резонансу саме у цьому напрямку.



а



б

Рис. 6.2. Магнітострикційний перетворювач: а) схема; б) осердя з обмотками

В ультразвукових верстатах використовують односторонні перетворювачі, у яких ультразвукові коливання надходять у робочу зону з одного торця осердя через концентратор 5 та інструмент 6. На неробочому торці розміщують екран, наприклад, накладають пористу гуму 7. Ультразвукова хвиля відбивається від такого екрану та у потрібній фазі досягає випромінюючого торця осердя. У процесі роботи магнітострикційний перетворювач нагрівається за рахунок вихрових струмів та магнітного гістерезису. Тому перетворювачі потужністю більше 500 Вт виготовляють з водяним охолодженням. Стрижні магнітострикційних перетворювачів виготовляють також з феритів (ферито-нікелю, ферито-міді тощо). Вони відносно дешеві, але дають малу амплітуду механічних коливань.

Принцип роботи *п'єзоелектричного перетворювача* заснований на п'єзоелектричному ефекті, під впливом якого матеріал періодично

деформується під дією змінного електричного поля. Найбільше використання для ультразвукових випромінювачів отримала п'єзокераміка на основі твердих розчинів титанату цирконіту в свинцю.

П'єзокераміка виготовляється у вигляді стержнів або пластин. Кількість пластин може відрізнятись у різних конструкціях п'єзоелектричних перетворювачів від двох (рис. 6.3, а та б) до декількох (рис. 6.3, в), що визначатиме величину амплітуди на робочому торці перетворювача.

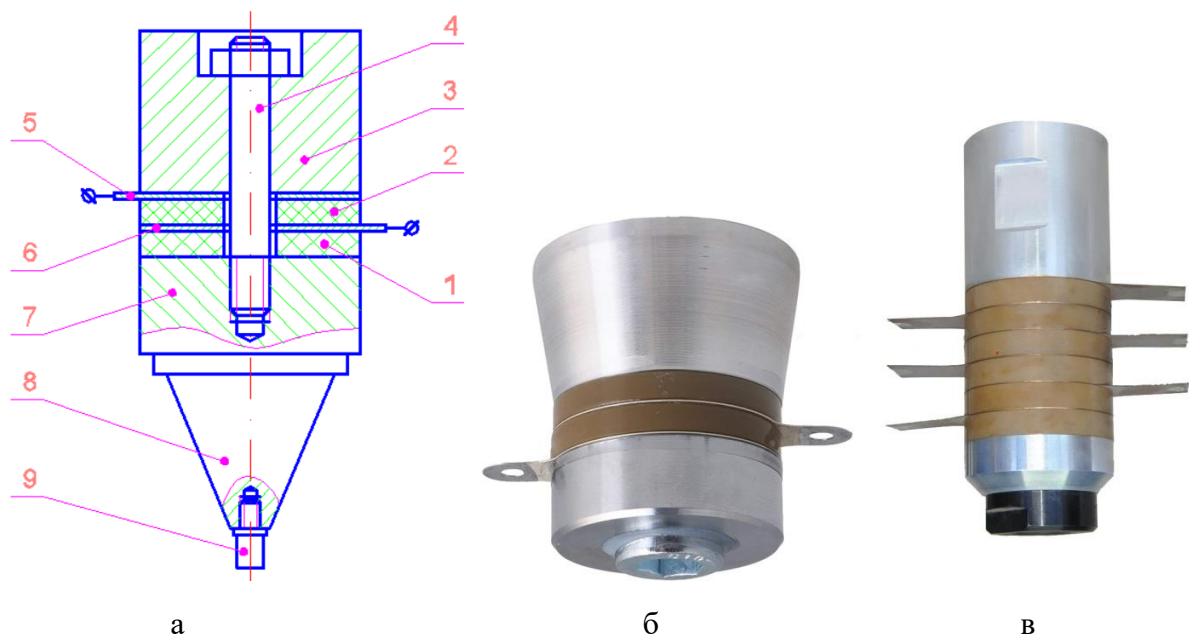


Рис. 6.3. П'єзоелектричний перетворювач: а) схема; б) з двома п'єзоелектричними пластинами потужністю 60 Вт частотою 40 кГц; в) з шістьма пластинами

П'єзокерамічні пластини 1 та 2 (рис. 6.3, а) та струмопровідні пластини 5 та 6 закріплено шпилькою 4 між відбивальною накладкою 3 та робочою накладкою 7. До робочої накладки прикріплено концентратор 8 з інструментом 9.

Під час подачі на струмопровідні пластини різниці потенціалів між пластинами виникає змінне електричне поле, під дією якого п'єзоелектричні пластини змінюють свою товщину. Потужність п'єзоелектричних перетворювачів обмежується в основному механічною міцністю п'єзокерамічних пластин. П'єзоелектричні перетворювачі широко використовуються на обладнанні Японії, США та Великобританії.

**Концентратор енергії ультразвукових коливань** (рис. 6.4) виконує роль ланки резонансної довжини для передачі коливань від перетворювача через інструмент у робочу зону. Амплітуда коливань торця перетворювача зазвичай не перевищує 5...10 мкм.

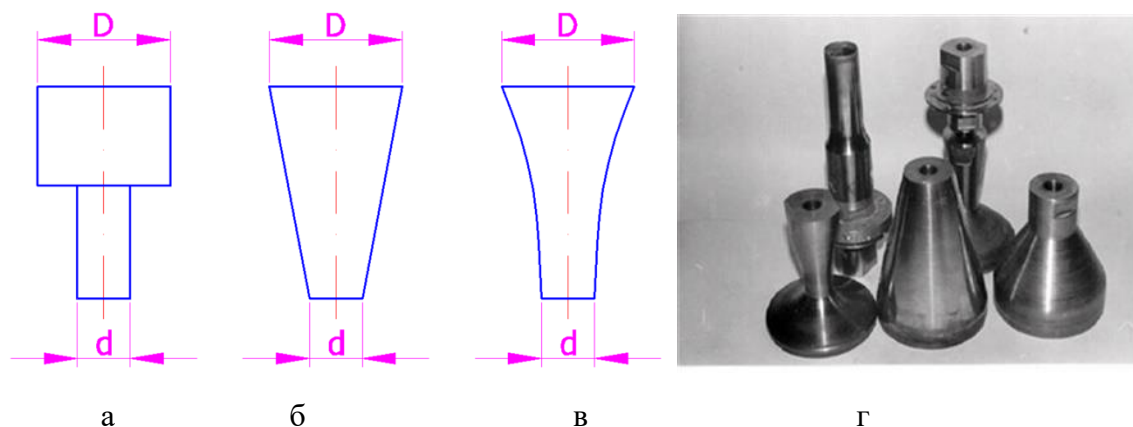


Рис. 6.4. Концентратори енергії ультразвукових коливань: а) ступеневий циліндричний; б) конічний; в) експонентний; г) зразки

Для збільшення амплітуди коливань до робочої величини в діапазоні 20...150 мкм, концентраторам надається відповідна форма, що забезпечує на торці інструмента максимально можливу амплітуду. Амплітуда збільшується пропорційно відношенню площ верхнього, діаметром  $D$ , та нижнього, діаметром  $d$ , торців концентратора (рис. 6.4). Тому коефіцієнт перетворення визначається як:

$$K_{\pi} \approx \frac{S_D}{S_d} = \frac{\pi \frac{D^2}{4}}{\pi \frac{d^2}{4}} = \left( \frac{D}{d} \right)^2, \quad (6.1)$$

що визначає саме квадратичну залежність у зміні амплітуди ультразвукових коливань.

Параметри концентраторів обчислюють як параметри акустичних хвилеводів. У процесі обчислення використовується явище збільшення амплітуди зміщення часток стрижня концентратора під час зменшення його поперечного перерізу. Частіше за все концентратори виготовляються трьох

форм: ступеневі циліндричні (рис. 6.4, а), конічні (рис. 6.4, б) та експонентні (рис. 6.4, в). Конфігурація реальних концентраторів залежатиме від багатьох умов, зокрема, від способу закріплення на перетворювачі, конфігурації інструмента тощо.

Концентратори виготовляють з матеріалів, які мають високу межу витривалості та мінімальні втрати затухання ультразвуку, зокрема, зі *Сталь 45* або титанових сплавів. Закріплюють концентратори на перетворювачі паянням високотемпературними припоями та зварюванням. До феритних та п'єзоелектричних перетворювачів концентратори приклеюють.

Робочий інструмент (рис. 6.5) кріпиться до концентратора за допомогою різьбового з'єднання. Для попередження саморозгвинчування під час обробки під дією коливань використовують малий крок різьби.

Виготовлення отворів різної конфігурації – операція, яка найчастіше виконується на серійних ультразвукових верстатах. Отвори виготовляються різної форми та розмірів (0,2...60 мм). Отримання отворів глибиною більш ніж 15...20 мм ускладнено, оскільки погіршується подавання свіжої абразивної суспензії у робочу зону. Для отримання глибоких отворів необхідно застосовувати активні способи підведення суспензії – прокачування її крізь інструмент під тиском або застосування вакуумних відсмоктувачів.



Рис. 6.5. Інструмент для ультразвукової обробки

## 6.2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію магнітострикційного перетворювача.
2. Вивчити конструкції концентраторів енергії ультразвукових коливань.
3. В заготовці зі скла (товщина  $>12$  мм) інструментом  $\varnothing 3$ ,  $\varnothing 5$  та  $\varnothing 10$  мм прошити наскрізні отвори (досліди № 1, 2, 3). Визначити зміни швидкості подачі інструментів, для цього в процесі обробки через рівні проміжки часу (30 секунд) фіксувати індикатором шлях  $h$ , який пройшов інструмент. Визначити абсолютну швидкість прошивання для кожної ділянки за глибиною отвору:  $v=(h_{\text{пот}}-h_{\text{поп}})/t$ , [мм/с], де  $h_{\text{пот}}$  та  $h_{\text{поп}}$  – відповідно, поточне та попереднє значення глибини отвору;  $t$  – відрізок часу між вимірюваннями. Дані занести до табл. 6.1, починаючи з першого рядка.
4. За результатами розрахунків провести побудову графіку залежності швидкості прошивання від глибини виготовленого отвору  $v=f(h)$ .
5. За результатами експериментів зробити висновки.

Таблиця 6.1

Результати вимірювань та розрахунків

| Фіксований час, с | Експеримент № 1<br>інструмент $\varnothing 3$ мм |                                            | Експеримент № 2<br>інструмент $\varnothing 5$ мм |                                            | Експеримент № 3<br>інструмент $\varnothing 10$ мм |                                            |
|-------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                   | Покази індикатора, $h$ , мм                      | Абсолютна швидкість прошивання, $v$ , мм/с | Покази індикатора, $h$ , мм                      | Абсолютна швидкість прошивання, $v$ , мм/с | Покази індикатора, $h$ , мм                       | Абсолютна швидкість прошивання, $v$ , мм/с |
| 0                 | 0                                                |                                            | 0                                                |                                            | 0                                                 |                                            |
| 30                |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
| 60                |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
| 90                |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
| 120               |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
| 150               |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
| 180               |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
|                   |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |
|                   |                                                  |                                            |                                                  |                                            |                                                   |                                            |

### 6.3. Зміст звіту

1. Описати призначення та конструкцію елементів коливальних систем ультразвукових верстатів.
2. Зобразити схеми перетворювачів (рис. 6.2, а; 6.3, а).
3. Заповнити табл. 6.1.
4. Побудувати графіки залежностей  $v=f(h)$  для трьох експериментів у одній сітці координат.
5. Зробити висновки за результатами проведених експериментів.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 6

1. З яких основних компонентів складається коливальна система ультразвукового прошивального верстата?
2. З яких основних частин складається магнітострикційний перетворювач ультразвукового прошивального верстата?
3. Який принцип закладений у роботу магнітострикційного перетворювача?
4. Які матеріали мають значний магнітострикційний ефект та можуть використовуватись для виготовлення магнітострикційного перетворювача?
5. З якою метою стрижні осердя набирають зі штампованих пластин товщиною 0,1...0,2 мм?
6. Який розмір обирають для ширини перетворювача  $b$  з метою запобігання виникнення значних поперечних механічних коливань у перетворювачі?
7. Яку довжину осердя  $l$  треба обрати задля отримання максимальної амплітуди акустичних коливань за рахунок резонансу?
8. За рахунок чого магнітострикційний перетворювач нагрівається у процесі роботи?
9. У чому полягає принцип роботи п'єзоелектричного перетворювача ультразвукового прошивального верстата?

10. З яких основних елементів складається п'єзоелектричний перетворювач ультразвукового прошивального верстата?

11. З якою амплітудою коливається робочий торець перетворювача ультразвукових коливань в ультразвуковому прошивальному верстаті?

12. До яких значень збільшується амплітуда механічних коливань після концентратора?

13. Якої форми зазвичай виготовляють концентратори в ультразвуковому прошивальному верстаті?

14. Які основні вимоги висуваються до матеріалу, з якого виготовлено концентратор ультразвукового прошивального верстата?

15. Яким чином закріплюють концентратори ультразвукових коливань на перетворювачі ультразвукового прошивального верстата?

16. Яким чином закріплюють робочий інструмент ультразвукового прошивального верстата на концентраторі?

17. Яка операція найчастіше виконується на серійних ультразвукових верстатах?

18. Які проблеми виникають при виготовленні отворів глибиною більш ніж 15...20 мм?

19. Які технологічні засоби застосовують для отримання глибоких отворів на ультразвукових верстатах?

## Лабораторна робота № 7.

### Вивчення основних закономірностей вібраційної обробки

**Мета роботи:** вивчити основні закономірності вібраційної обробки виробів з чорних та кольорових металів; визначити вплив складу та характеристик робочого середовища на продуктивність та якість поверхонь оброблюваних виробів.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Тороїдальні абразивно-вібраційні установки ТВУ-5, ТВУ-80-1М та полірувальна установка ЦПУ-475.
2. Терези ВТ-100.
3. Набір металевих та керамічних наповнювачів, абразивних водозмивних паст.
4. Еталони шорсткості поверхонь.

### 7.1. Короткі теоретичні відомості

Вібраційна обробка залежно від характеру робочого середовища, що використовується (наповнювача, абразивної пасти, поверхнево-активних речовин), являє собою механічний та фізико-хімічний процеси видалення невеликих часток металу та його оксидів з оброблюваних поверхонь заготовок, які здійснюють у процесі обробки рух за складної траєкторією, а також згладжування мікронерівностей шляхом пластичного деформування. Робоче середовище та оброблювані заготовки здійснюють зазвичай два рухи: коливальний та обертальний рухи.

Процес вібраційної обробки залежить від таких складових:

- режиму вібрації (амплітуди та частоти коливань);
- матеріалу оброблюваних заготовок, їхньої маси та форми;
- характеристики робочого середовища;
- співвідношення оброблюваних заготовок та робочого середовища;
- типу та зернистості застосованого абразиву;

- об'єму робочої камери;
- ступеня заповнення камери робочим середовищем та виробами, які обробляються.

## 7.2. Характеристики вібраційних установок

Конструкційно вібраційні установки відрізняються (рис. 7.1):

- типом вібраторів (механічні, інерційні, дисбалансні, електроіндукційні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані);
- розміщенням вібраторів (установки з виносним та внутрішнім розміщенням вібраторів);
- числом валів та типом дисбалансних механізмів (одно-, дво-, чотири- та десятивалкових);
- типом підвіски контейнера (на спіральній та плоскій ресорній пружинах, на гумових амортизаторах, гумокорундних та пневматичних);
- типом подачі (періодичної або безперервної) рідинного середовища в контейнер.



а



б

Рис. 7.1. Вібраційні установки для шліфування: а) прямокутної та б) тороїдальної форми

Використовуються різні типи вібраційних установок з об'ємом робочих камер прямокутної форми: 40, 100, 200, 300, 500 та 1000 дм<sup>3</sup> та тороїдальної: 50, 100, 800, 2000 дм<sup>3</sup>.

На підприємствах машинобудування використовуються установки відомих іноземних фірм: TIRTO (Японія), Вальтер Треваль (Німеччина), Лорд Комикл (США), Рота-Фініш (Великобританія).

Основні параметри віброустановки ТВУ-5 (рис. 7.2):

- |                                                  |                         |
|--------------------------------------------------|-------------------------|
| - місткість віброконтейнера                      | 5 л;                    |
| - максимальна маса завантаження                  | 14 кг;                  |
| - максимальна довжина оброблюваних заготовок     | 50 мм;                  |
| - потужність електродвигуна                      | 0,5 кВт;                |
| - частота обертання електродвигуна (дисбалансів) | 3000 хв <sup>-1</sup> ; |
| - габаритні розміри l×b×h                        | 550×360×510 мм;         |
| - маса                                           | 40 кг.                  |

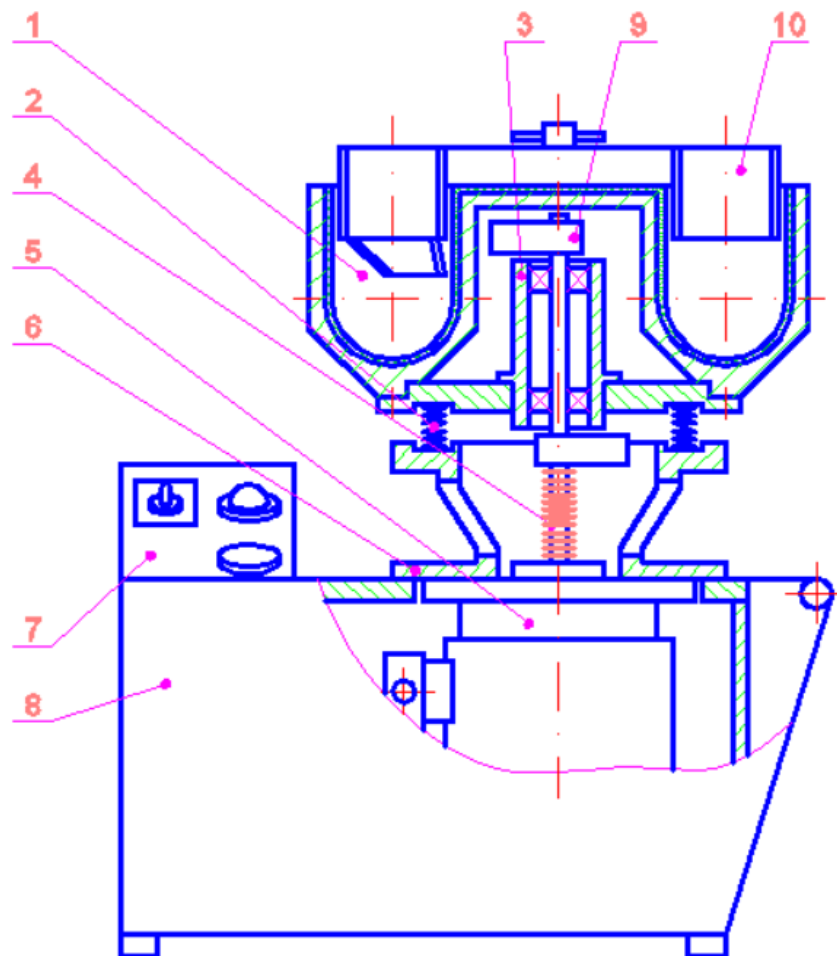


Рис. 7.2. Конструкція тороїдальної вібраційної установки ТВУ-5 місткістю 5 літрів:  
1 – контейнер; 2 – пружинні амортизатори; 3 – вібратор; 4 – пружинна еластична муфта;  
5 – електродвигун; 6 – підставка; 7 – пульт керування; 8 – станина; 9 – дисбаланс;  
10 – сепаратор

Для полірування застосовують роторні установки з барабаном, вісь якого орієнтована горизонтально (рис. 7.3). Установки можуть працювати у мокрому та сухому режимах та дозволяють використовувати різні наповнювачі з пластику, кераміки, металу та горіху. Горизонтально розташований барабан (рис. 7.3, а) встановлено на циліндричних опорах, що обертаються, та називаються актуаторами. Оброблювані заготовки, разом з індивідуально підібраним наповнювачем, завантажуються в барабан машини. При включенні актуатора починає обертатися барабан, заготовки та наповнювач перемішуються, абразивна паста полірує поверхні заготовок.



Рис. 7.3. Установки для полірування: а) ювелірних виробів з Aliexpress місткістю до 3 кг; б) для доведення поверхні металевих виробів місткістю 150 літрів

Вібраційний процес заснований на принципі передачі коливальних рухів заготовкам у контейнері з наповнювачем, тому важливе значення має вибір оптимальних величин частоти та амплітуди коливань. Дослідженнями встановлено, що оптимальна частота та амплітуда коливань зворотно пропорційні твердості оброблюваних заготовок.

Для виробів із загартованої сталі частота коливань має становити 30...38 Гц, амплітуда коливань 4,5...5,5 мм. Для виробів з кольорових металів частота коливань обирається 35...40 Гц, амплітуда коливань 1...3 мм. Більші

значення частоти та менші величини амплітуди встановлюють у випадку полірування та зміцнення поверхонь деталей, а менші значення частоти та більші величини амплітуди – для операцій очищення. Амплітуду необхідно знижувати у випадку зменшення товщини оброблюваних заготовок, залишаючи постійною частоту коливань.

Наповнювач – тверді тіла будь-якої форми (рис. 7.4), що взаємодіють з поверхнею заготовки та здійснюють видалення задирок, оксидних плівок, іржі, шліфування та полірування.



Рис. 7.4. Наповнювач для вібраційної установки: а) призматичний; б) циліндричний; в) похилений; г) пірамідальний

Співвідношення об'єму деталей, наповнювача та пасти визначає інтенсивність обробки. Об'єм незаповненого простору в контейнері має становити 20...25 %, а співвідношення оброблюваних заготовок та наповнювача за об'ємом може змінюватися в процесі полірування від 1:1 до 1:2, у процесі очищення від 1:2 до 1:4, зміцнення – від 1:2 до 1:3.

Ступінь заповнення камери робочим середовищем значно впливає на видалення металу з поверхні оброблюваної заготовки (рис. 7.5). Сутність механічного впливу під час вібраційної обробки визначається силою взаємодії деталей, що залежить від режиму обробки та кута їх зіткнень (кута атаки). Динаміка зіткнень та кут атаки залежать від розмірів, форми та маси оброблюваних заготовок та часток наповнювача, від опору робочого середовища їх переміщенню.

При гострому куті зіткнень ( $0...20^\circ$ ) відбувається прослизання деталей одна по одній зі згладжуванням мікронерівностей поверхонь; при величині

кута зіткнень  $20...70^\circ$  відбувається мікрорізання із частковим зміцненням поверхневого шару, а при тупому куті зіткнень ( $70...90^\circ$ ) – ущільнення поверхневого шару з утворенням вм'ятин.

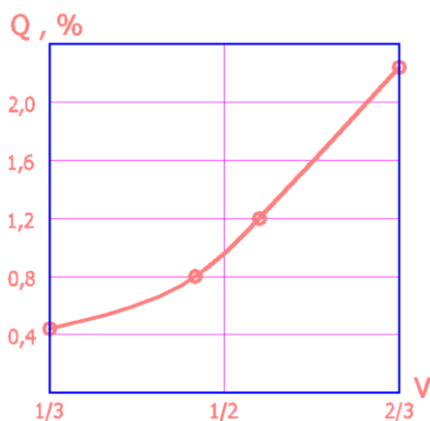


Рис. 7.5. Знімання металу  $Q$  залежно від ступеня заповнення робочої камери  $V$  робочим середовищем (виробу із золота 585 проби)

Основний вплив на якість обробки має вибір робочого середовища з абразивним матеріалом. Абразивний матеріал (абразивний порошок, абразивна паста) вибирається залежно від таких вимог, як продуктивність обробки, твердість оброблюваної поверхні, а також фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваних заготовок (табл. 7.1). На рис. 7.6 та 7.7 показано залежності продуктивності обробки та твердості оброблюваних поверхонь від типу абразивного матеріалу та його зернистості.

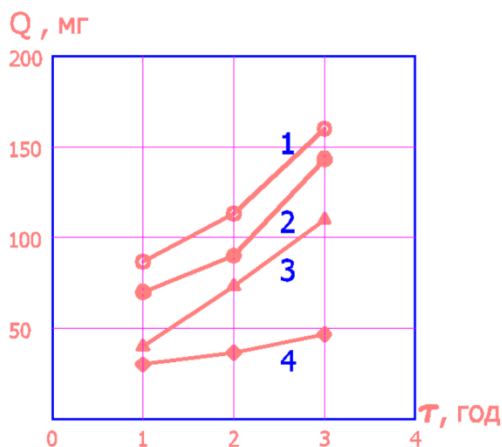


Рис. 7.6. Вплив абразивного матеріалу (зернистість мікропорошку M28) на продуктивність обробки (виробу із золота 585 проби): 1 – діборид титану; 2 – карбід кремнію зелений; 3 – електрокорунд; 4 – карбід титану;  $\tau$  – час обробки, годин;  $Q$  – маса видаленого металу, мг

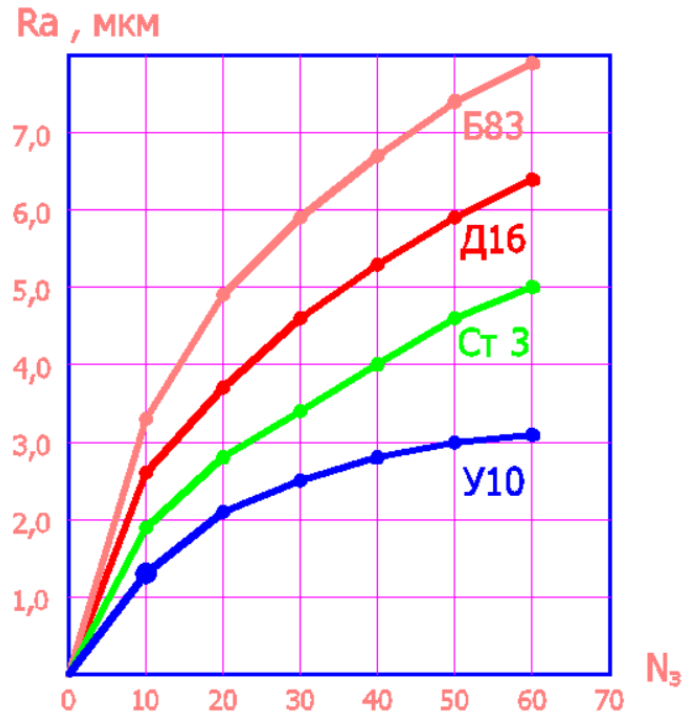


Рис 7.7. Залежність шорсткості  $R_a$  від зернистості абразиву  $N_3$  (номер зерна абразиву) при вібраційній обробці заготовок з: Б83 – бронза; Д16 – алюмінієвий сплав; Ст 3 – вуглецева сталь; У10 – інструментальна сталь

Параметр шорсткості  $R_a$  орієнтовно пов'язаний з середнім розміром абразивних зерен  $d_a$  залежністю

$$R_a = \left( \frac{d_a}{C_a} \right)^2, \quad (7.1)$$

де  $C_a = 70 \dots 85$  – стала, яка залежить від властивостей матеріалу заготовки та абразивного круга.

Тоді величину зерна абразиву можна визначити за формулою

$$d_a = C_a \sqrt{R_a}. \quad (7.2)$$

Таблиця 7.1.

Характеристики водозмивних абразивних паст для об'ємного механізованого шліфування та полірування

| Марка абразивної пасти | Вміст компонентів, %     |                  |               |                          |       |                | Призначення для обробки матеріалів                                         |
|------------------------|--------------------------|------------------|---------------|--------------------------|-------|----------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                        | Абразив                  | Олеїнова кислота | Триетаноламін | Кремнію діоксин аморфний | Глина | Триетилгліколь |                                                                            |
| Шліфувальні            |                          |                  |               |                          |       |                |                                                                            |
| ПАШ-1/63               | Електрокорунд білий 80 % | 14,5             | 4,0           | 1,5                      |       |                | сталь                                                                      |
| ПАШ-1/50               | Електрокорунд білий 75 % | 18,0             | 5,0           | 2,0                      |       |                | кольорові метали                                                           |
| ПАШ-1/50К              | Карбід кремнію 80 %      | 14,5             | 4,0           | 1,5                      |       |                | камінь                                                                     |
| ПАШ-1/100Б             | Карбід бору 75 %         | 18,0             | 5,0           | 2,0                      |       |                | камінь                                                                     |
| ПАШ-2                  | Електрокорунд білий 80 % | 13,5             | 4,0           | 1,5                      | 1,0   |                | сплави на основі золота, срібла та цирконію                                |
| Полірувальні           |                          |                  |               |                          |       |                |                                                                            |
| ПАП-1                  | Електрокорунд білий 85 % | 11,0             | 3,0           | 1,0                      |       |                | сталь, камінь                                                              |
| ПАП-2                  | На основі діоксиду церію | 11,5             | 3,2           | 1,5                      | 1,6   | 0,2            | кольорові метали, у тому числі сплави на основі золота, срібла та цирконію |

Відповідно, для отримання заданої шорсткості поверхні обробленої деталі застосовуються абразиви з різною величиною середнього розміру абразивних зерен (табл. 7.2). За маркуванням **FEPA-P** (The Federation of the European Producers of Abrasives) застосовуються абразивні матеріали з широким діапазоном зернистості для різних матеріалів та видів обробки.

Матеріал твердого наповнювача (рис. 7.4) вибирається залежно від твердості поверхонь оброблюваних заготовок (табл. 7.3). Для виготовлення

твердого наповнювача використовують металеві висічки з різних металів, які мають форму зірочок, шарів, роликів тощо, а також неметалеві елементи – спеціально виготовлені пластикові тіла, абразивний бій, плавлений електрокорунд, кварцит, порцеляна, мармур тощо.

Таблиця 7.2.

Абразивні матеріали для вібраційної обробки

| Розмір зерна, мкм | Маркування за <b>FEPA</b> | Призначення                                       |
|-------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Шліфпорошки       |                           |                                                   |
| 50...63           | P240                      | Тонке шліфування,<br>підготовка до<br>полірування |
| 40...50           | P320                      |                                                   |
| 28...40           | P400                      |                                                   |
| Мікропорошки      |                           |                                                   |
| 14...20           | P1000                     | Підготовка до<br>полірування,<br>полірування      |
| 10...14           | P1200                     |                                                   |

Таблиця 7.3.

Наповнювач для вібраційної обробки

| Матеріал заготовки                                                                                    | Наповнювач                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Шліфування із застосуванням установок ТВУ-5</b>                                                    |                                                              |
| Вуглецева та нержавіюча сталі, камінь                                                                 | Дротяний, діаметром 3 мм, з нержавіючої сталі, довжиною 6 мм |
| Кольорові сплави (мельхіор, бронза, латунь, алюмінієві сплави)                                        | Дротяний, діаметром 3 мм, з бронзи, довжиною 6 мм            |
| Срібло та цирконієві сплави                                                                           | Дротяний, діаметром 3 мм, з мельхіору, довжиною 5 мм         |
| Золото                                                                                                | Дротяний, діаметром 3 мм, з латуні, довжиною 7 мм            |
| Бурштин                                                                                               | Дротяний, діаметром 3 мм, з полімеру, довжиною 5...7 мм      |
| <b>Полірування із застосуванням установок ЦПУ-475</b>                                                 |                                                              |
| Вуглецева та нержавіюча сталі, кольорові сплави (мельхіор, бронза, латунь, алюмінієві сплави), камінь | Шкіряний, 3×4×8 мм                                           |
| Золото, срібло та цирконієві сплави, бурштин                                                          | Дерев'яний та шкіряний, 3×4×8 мм, співвідношення 1:1         |

### 7.3. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом роботи віброустановок типу ТВУ-5 та ЦПУ-475.
2. Ознайомитись з різними типами наповнювачів, порошків та абразивних паст.
3. Самостійно, згідно визначеного варіанту завдання (табл. 7.4):
  - а) підібрати марку абразивної пасти (табл. 7.1);
  - б) визначити зернистість абразивного порошку (формула 7.2);
  - в) обрати абразивний матеріал виходячи з розрахованої зернистості (табл. 7.2) з відповідним позначенням за **FEPA-P**;
  - г) обрати тип наповнювача (табл. 7.3) в залежності від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та виду обробки.
4. Провести обробку заготовок згідно визначених умов із застосуванням установок ТВУ-5 або ЦПУ-475.

### 7.4. Зміст звіту

1. Описати основні закономірності вібраційної обробки виробів різної конфігурації.
2. Накреслити схему вібраційної установки ТВУ-5 (рис. 7.2)
3. Підібрати марку абразивної пасти, зернистість абразивного порошку, марку абразивного матеріалу за **FEPA**, тип наповнювача, звести дані у табл. 7.5.
4. Зробити висновки по роботі та за результатами визначення параметрів вібраційної обробки деталей.

Таблиця 7.4.

## Варіанти індивідуальних завдань до лабораторної роботи

| Варіант                                 | Матеріал заготовки                                                         | Твердість<br>поверхні<br>заготовки | Шорсткість<br>поверхні<br>обробленої<br>деталі, мкм |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Шліфування на установці ТВУ-5</b>    |                                                                            |                                    |                                                     |
| 1                                       | Вуглецева сталь С80W1 (У8)                                                 | HRC 60...62                        | 0,40                                                |
| 2                                       | Нержавіюча сталь Х20Cr13 (20Х13)                                           | HRC 61...63                        | 0,32                                                |
| 3                                       | Мельхіор CuNi15Zn21 (МНЦ 15-20)                                            | HRC 38...45                        | 0,40                                                |
| 4                                       | Цирконієвий сплав Zr 705 (вміст цирконію 95,5 % та 4,5 % гафнію) (КТЦ 125) | HB 25                              | 0,32                                                |
| 5                                       | Алюмінієвий сплав AlSi5Cu1Mg (АК5М)                                        | HB 70                              | 0,40                                                |
| 6                                       | Бронза CuAl10Ni5Fe4 (БрАЖН 10-4-4)                                         | HRC 38...45                        | 0,50                                                |
| 7                                       | Срібло AgCu20 (СрМ800)                                                     | HB 25                              | 0,32                                                |
| 8                                       | Золото AuAg10Cu40 (ЗлСрМ 500-100)                                          | HB 20                              | 0,25                                                |
| 9                                       | Агат (склад SiO <sub>2</sub> із домішками)                                 | 7 одиниць за шкалою Мооса          | 0,32                                                |
| 10                                      | Бурштин                                                                    | 2 одиниці за шкалою Мооса          | 0,25                                                |
| <b>Полірування на установці ЦПУ-475</b> |                                                                            |                                    |                                                     |
| 11                                      | Вуглецева сталь С80W1 (У8)                                                 | HRC 60...62                        | 0,040                                               |
| 12                                      | Нержавіюча сталь Х20Cr13 (20Х13)                                           | HRC 61...63                        | 0,032                                               |
| 13                                      | Мельхіор CuNi15Zn21 (МНЦ 15-20)                                            | HRC 38...45                        | 0,040                                               |
| 14                                      | Цирконієвий сплав Zr 705 (вміст цирконію 95,5 % та 4,5 % гафнію) (КТЦ 125) | HB 25                              | 0,032                                               |
| 15                                      | Алюмінієвий сплав AlSi5Cu1Mg (АК5М)                                        | HB 70                              | 0,040                                               |
| 16                                      | Бронза CuAl10Ni5Fe4 (БрАЖН 10-4-4)                                         | HRC 38...45                        | 0,050                                               |
| 17                                      | Срібло AgCu20 (СрМ800)                                                     | HB 25                              | 0,032                                               |
| 18                                      | Золото AuAg10Cu40 (ЗлСрМ 500-100)                                          | HB 20                              | 0,025                                               |
| 19                                      | Агат (склад SiO <sub>2</sub> із домішками)                                 | 7 одиниць за шкалою Мооса          | 0,032                                               |
| 20                                      | Бурштин                                                                    | 2 одиниці за шкалою Мооса          | 0,025                                               |

Таблиця 7.5.

Результати вибору абразивної пасти, абразивного матеріалу та наповнювача

| Варіант | Марка абразивної пасти | Зернистість абразиву, мкм | Марка абразивного матеріалу за <b>FEPA</b> | Наповнювач |
|---------|------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|------------|
|         |                        |                           |                                            |            |

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 7

1. Що являє собою вібраційна обробка?
2. Які рухи здійснюють робоче середовище та оброблювані заготовки під час вібраційної обробки?
3. Від яких складових залежить процес вібраційної обробки?
4. Як відрізняються вібраційні установки за конструкцією вібраторів?
5. Як відрізняються вібраційні установки за розміщенням вібраторів?
6. Як відрізняються вібраційні установки за числом валів та типом дисбалансних механізмів?
7. Як відрізняються вібраційні установки за формою робочої камери?
8. Які технологічні параметри вібраційного процесу мають важливе значення?
9. У якому діапазоні має змінюватись частота коливань вібраційної установки для виробів із загартованої сталі та виробів з кольорових металів?
10. У якому діапазоні має змінюватись амплітуда коливань вібраційної установки для виробів із загартованої сталі та виробів з кольорових металів?
11. У якому випадку необхідно зменшувати амплітуду коливань під час вібраційної обробки?
12. Що називають наповнювачем, який застосовується під час вібраційної обробки?
13. Якої форми може використовуватись наповнювач, що застосовується при вібраційній обробці?
14. Яку частку об'єму контейнеру вібраційної установки має становити незаповнений простір?

15. Яке співвідношення оброблюваних заготовок та наповнювача за об'ємом може бути при вібраційній обробці?

16. Від яких параметрів вібраційної обробки залежить механічний вплив (динаміка зіткнень та кут атаки) на заготовку?

17. Залежно від яких вимог вибирається абразивний матеріал (абразивний порошок, абразивна паста) для проведення вібраційної обробки?

18. Залежно від чого вибирається матеріал твердого наповнювача для проведення вібраційної обробки?

19. З яких матеріалів виготовляють твердий наповнювач для проведення вібраційної обробки?

20. З яких металевих матеріалів виготовляють твердий наповнювач для проведення вібраційної обробки?

21. З яких неметалевих матеріалів виготовляють твердий наповнювач для проведення вібраційної обробки?

## Лабораторна робота № 8.

### Будова та основні елементи твердотілого лазера

**Мета роботи:** ознайомитися з принципом дії, складом, будовою та блок-схемою лазерів; вивчити конструкції випромінювачів твердотілого лазера; ознайомитися з основними елементами лазерних випромінювачів; набути практичні навички з обслуговування та догляду за елементами випромінювача лазера.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Лазерна технологічна установка "Квант-16".
2. Лазер газовий ЛГ-105.
3. Генераторна головка твердотілого лазера.
4. Стрижень активного середовища лазера.
5. Лампа накачування.
6. Блок віддзеркалення.
7. Набір дзеркал резонатора.
8. Колба з активним середовищем газового лазера.
9. Штангенциркуль.
10. Лінійка.
11. Матеріали: неткана серветка, вата гігроскопічна, спирт етиловий, білячий пензель.

### 8.1. Короткі теоретичні відомості

Зараз важко сказати хто першим створив, як тоді це називалось, оптичний квантовий генератор та отримав когерентне проміння. Є відомості, що 17 травня 1960 року американський вчений Тед Мейман (Ted Maiman) отримав проміння з рубінового лазера (рис. 8. 1).

Але ж «батьками» лазера визнано радянських вчених Миколу Геннадійовича Басова (14.12.1922 – 01.07.2001 рр.), Олександра

Михайловича Прохорова (11.07.1916 – 08.01.2002 рр.) та американського вченого Чарльза Харда Таунса (Charles Hard Townes) (28.07.1915 – 27.01.2015 рр.), які у 1954 році винайшли квантовий мікрохвильовий генератор. У 1964 році саме за це вони отримали Нобелівську премію з фізики.

Слово **ЛАЗЕР** – це аббревіатура словосполучення ***Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation***, що у перекладі українською означає "підсилення світла вимушеним випромінюванням".

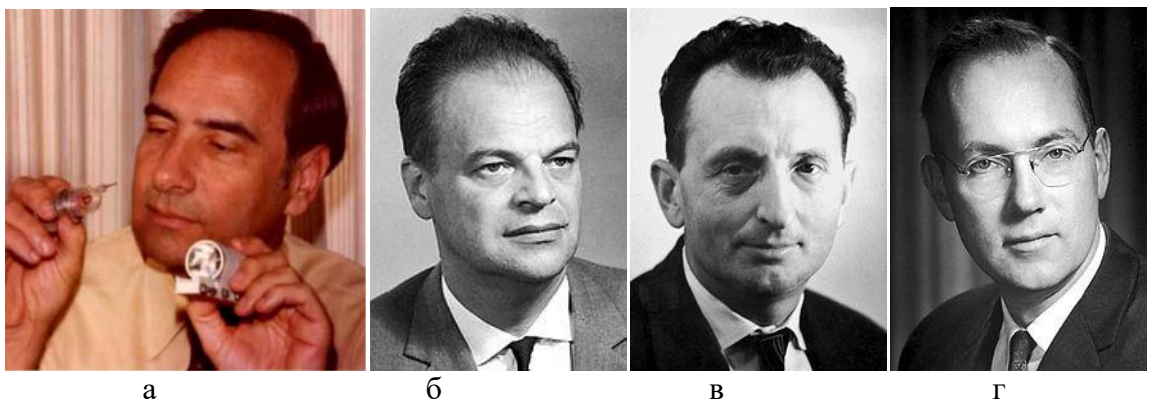


Рис. 8.1. Творці лазера: а) Тед Мейман; б) М. Г. Басов; в) О. М. Прохоров; г) Чарльз Таунс

### 8.1.1. Особливості лазерного проміння

Відмінністю лазерного проміння (ЛП) від інших джерел електромагнітного випромінювання є когерентність, тобто амплітуда, частота, фаза та поляризація електромагнітних хвиль лазерного пучка постійні у часі або змінюються за певним законом (рис. 8. 2).

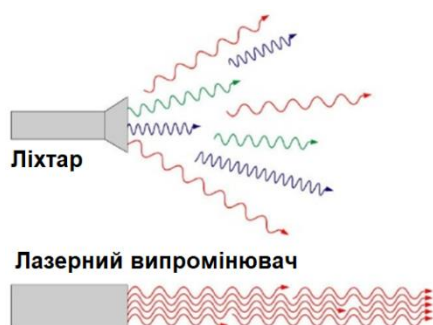


Рис. 8.2. Відмінність некогерентних та когерентних джерел електромагнітних хвиль

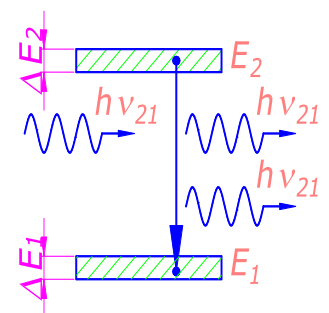


Рис. 8.3. Вимушене випромінювання квантів електромагнітних хвиль

Генерація когерентних електромагнітних хвиль відбувається елементарними частинками – іонами, атомами або молекулами, які знаходяться у збудженому стані, за рахунок вимушеного випромінювання квантів світла (рис. 8. 3). Наприклад, елементарна частинка може знаходитись на двох енергетичних рівнях  $E_1$  та  $E_2$ . Для переходу з нижнього рівня на верхній, частинка має отримати енергію  $E_{21} = E_1 - E_2$ . При зворотному переході частинка має виділити стільки ж енергії. Якщо поруч із частинкою рухатиметься квант електромагнітної хвилі, енергія якого дорівнює  $h\nu_{21} = E_{21}$ , це може призвести до випромінювання нового кванту світла, що повністю ідентичний (когерентний) першому.

Виходячи з когерентності лазерного пучка, витікають його основні особливості:

- монохроматичність (генерація відбувається у надвузькому діапазоні довжини хвиль);
- поляризація (електромагнітну хвилю, у якій напрямлення векторів електричного та магнітного полів зберігаються незмінними або змінюються за певним законом, називають поляризованою);
- вузька направленість (низька розбіжність – плоский або тілесний кут, які характеризують діаграму направленості проміння);
- висока густина потужності;
- можливість фокусування лазерного проміння у дуже малий розмір.

### 8.1.2. Механізм руйнування матеріалу ЛП

Частина потоку променевої енергії, що падає на поверхню речовини, поглинається, а частина – відбивається. Кількість відбитої енергії залежить від довжини хвилі проміння та стану опроміненої поверхні. Енергія проміння передається частинкам речовини – електронам, атомам тощо. Глибина проникнення світлової енергії у речовину складає для більшості речовин близько 5...50 нм (так званий скін-шар, від слова *skin* (англ.) – *шкіра*).

Відбувається перехід світлової енергії у теплову (збільшення кінетичної енергії часток, з яких складається тіло, що поглинає), розігрів матеріалу до високих температур з великою швидкістю. Спостерігається інтенсивне плавлення, випаровування та іонізація матеріалу.

Густина потужності лазерного проміння може досягати таких величин, що під його дією відбуватиметься й термоядерний синтез – реакція злиття атомних ядер. Саме це у найближчому майбутньому стане основою енергетики. Дослідження у цьому напрямі активно проводяться у багатьох країнах, а результат обіцяють вже у найближчі роки.

### 8.1.3. Активне лазерне середовище

Активне лазерне середовище – спеціально підібрана за складом та властивостями речовина, здібна генерувати лазерне проміння.

За агрегатним станом активного середовища лазери розділяють на:

1) твердотілі (активний елемент – кристалічна або аморфна матриця з рівномірно розподіленими у ній активаторами):

- рубіновий (оксид алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , активований іонами хрому  $\text{Cr}^{3+}$ );
- на ітрій-алюмінієвому гранаті ( $\text{Y}_3\text{Al}_2(\text{AlO}_4)_3$ , активований іонами хрому  $\text{Cr}^{3+}$  або неодиму  $\text{Nd}^{3+}$ );
- скло (фосфатне та силікатне, а також германатне, фтор-фосфатне, фторберилатне, боратне, телуритне тощо), активоване іонами неодиму  $\text{Nd}^{3+}$ ;
- олександритовий ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ , активований іонами хрому  $\text{Cr}^{3+}$ );
- сапфіровий (матриця  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з домішками титану  $\text{Ti}$  та заліза  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ );

2) газові (активне середовище – газ, суміш газів або суміш газу з парами металу):

- гелій-неоновий He-Ne (вимушене випромінювання здійснюється атомами неону);
- аргоновий Ar (вимушене випромінювання здійснюється іонами аргону);
- на вуглекислому газі (суміш вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ , азоту  $\text{N}_2$  та

гелію He);

- на чадному газі CO;
- ексімерний (суміш благородних газів з F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, фторидами), ексімерні молекули – коротко існуючі з'єднання атомів інертних газів між собою, з галогенами або з киснем;

3) рідинні, або лазери на барвниках (органічних речовинах), головна перевага – великий діапазон регулювання частоти генерованого проміння.

Окремо можна виділити напівпровідникові лазери (активне середовище – напівпровідник). На відміну від інших, у напівпровідникових лазерах використовуються квантові переходи між дозволеними енергетичними зонами – валентною зоною та зоною провідності, а не дискретними рівнями енергії. Довжина випромінюваної хвилі знаходиться у діапазоні 0,3...45 мкм. Оптичне підсилювання активного середовища напівпровідникових лазерів може досягати значних величин (до 10<sup>4</sup> см<sup>-1</sup>), що дозволяє виготовляти їх виключно невеликими, а довжина резонатора може складати декілька мікрометрів (зазвичай 200...300 мкм). Вони також характеризуються низькою інерційністю (близько 10<sup>-9</sup>с), високим к. к. д. (10...50 %), можливістю плавного спектрального налаштування, великим вибором речовин для генерації у широкому спектральному діапазоні.

На прикладі активного середовища на кристалі YAG: Nd<sup>3+</sup> розглянемо схему енергетичних рівнів (чотирирівнева система). Іони неодиму Nd<sup>3+</sup>, які втратили на зовнішній орбіті три електрони, зафіксовані у кристалічній ґратці гранату, мають систему енергетичних рівнів, схематично зображену на рис. 8.4. Рівень <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>, називається основним та відповідає мінімально можливій енергії, яку матимуть іони у активному середовищі (кристалі або склі).

Лазерний перехід, під час якого відбувається випромінювання кванту електромагнітної хвилі з довжиною хвилі  $\lambda=1,06$  мкм, є найбільш сильним з переходів <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>. Дві основні полоси накачування (поглинання) іонів неодиму розташовані на довжині хвиль 0,73 та 0,8 мкм. Ці полоси пов'язані

зі швидкою релаксацією без випромінювання з рівнем  ${}^4F_{3/2}$ , а нижній рівень  ${}^4I_{11/2}$  пов'язаний також зі швидкою релаксацією без випромінювання з основним станом. Різниця між енергіями рівнів  ${}^4I_{11/2}$  та  ${}^4I_{9/2}$  на порядок більше енергії теплового збудження, таким чином, за кімнатної температури практично всі іони знаходяться у основному стані.

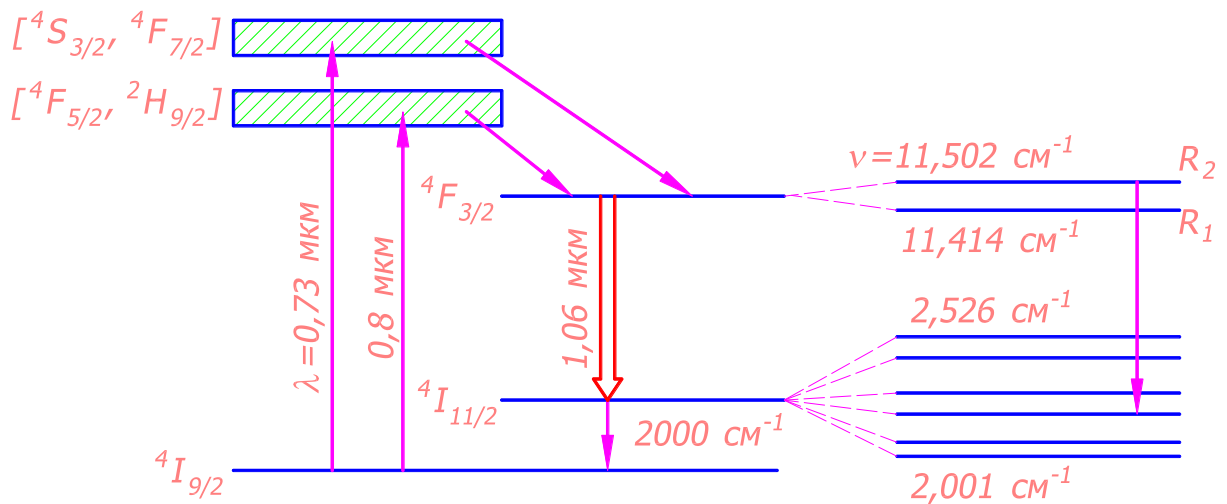


Рис. 8.4. Схема енергетичних рівнів іону неодиму  $\text{Nd}^{3+}$  у кристалі ітрій-алюмінієвого гранату (YAG)

#### 8.1.4. Оптичний резонатор

Лазерний резонатор (від лат. **resono** – звучу у відповідь, відгукуюсь) (рис. 8.5) призначений для отримання когерентного проміння та здійснення позитивного зворотного зв'язку, який призводить до багаторазового проходження створеного лазерного проміння 4 через активне середовище 1.

Резонатор побудовано з двох або більше дзеркальних елементів: плоских 2 (вихідне дзеркало) та 3 (глухе або непрозоре дзеркало); сферичних 5 та 6 дзеркал; призми 7 тощо, поміж яких розміщено активне лазерне середовище.

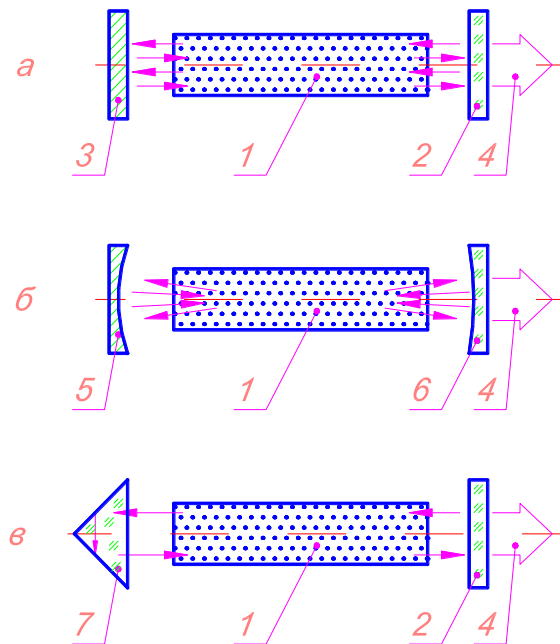


Рис. 8.5. Лазерні резонатори: а) плоскопаралельний (Фабрі-Перо); б) сферичний; в) з використанням призми

### 8.1.5. Система накачування активного середовища

Накачування – переведення активних центрів лазерного середовища у збуджений стан під впливом зовнішнього джерела енергії: світла, електричного розряду, тепла, хімічних реакцій, ядерної енергії тощо.

У твердотілих лазерах частіше за все застосовують накачування світловим потоком від лампи-спалаху. У газових лазерах збудження здійснюють за допомогою електричного тліючого розряду, який створюється безпосередньо у активному середовищі, або високочастотного електричного поля [2].

### 8.1.6. Технологічні особливості ЛО

1. Лазерний пучок можна передавати на значні відстані.
2. Відсутній механічний та електричний контакт між джерелом енергії та заготовкою у зоні обробки.
3. Висока концентрація енергії у плямі нагріву при "гострому" фокусуванні.
4. Плавне регулювання густини світлового потоку у плямі нагріву.

5. Високі температури у зоні впливу проміння.
6. Імпульсна або безперервна подача енергії.
7. Малі розміри (до кількох мікрометрів) зони обробки.
8. Можна переміщувати пучок з високою точністю та швидкістю при нерухомому об'єкті обробки.
9. Технологічний процес можна вести у будь-якому оптично прозорому середовищі.

### 8.1.7. Типові операції ЛО

#### 1. Термічне зміцнення.

Ґрунтується на локальному нагріванні ділянки поверхні 3 (рис. 8.6) заготовки 4 під впливом проміння 1, яке концентрується лінзою 2, до надкритичних температур та охолодження цієї ділянки із надкритичною швидкістю після припинення впливу за рахунок тепловідведення у внутрішні шари металу.

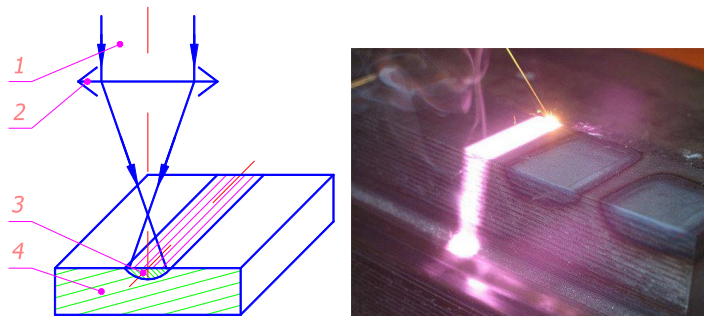


Рис. 8.6. Схема та процес лазерного зміцнення поверхні

На відміну від загартування струмом високої частоти та електронагрівом, лазерне загартування не є об'ємним процесом, а відбувається лише на локальній ділянці поверхні. Це призводить до зниження можливого короблення деталі та дає можливість використовувати дану обробку як заключну операцію.

Регулювання швидкості нагрівання та охолодження і часу перебування металу при високих температурах дозволяє отримати потрібну структуру поверхневого шару та відповідні властивості матеріалу заготовки.

Необхідність застосування охолоджувальних середовищ відсутня – загартування відбувається на повітрі.

У результаті лазерного зміцнення досягаються висока твердість поверхні, висока дисперсність її структури, зменшення коефіцієнту тертя порівняно з необробленою поверхнею, збільшення несучої здатності поверхневих шарів тощо.

## **2. Легування та наплавлення поверхневого шару.**

Ділянка поверхні нагрівається вище температури плавлення, у зону оплавлення вводять порошкові компоненти для легування та наплавлення (рис. 8.7), які також розплавляються та перемішуються із матеріалом заготовки. Утворюється поверхневий шар з хімічним складом, відмінним від металу заготовки.

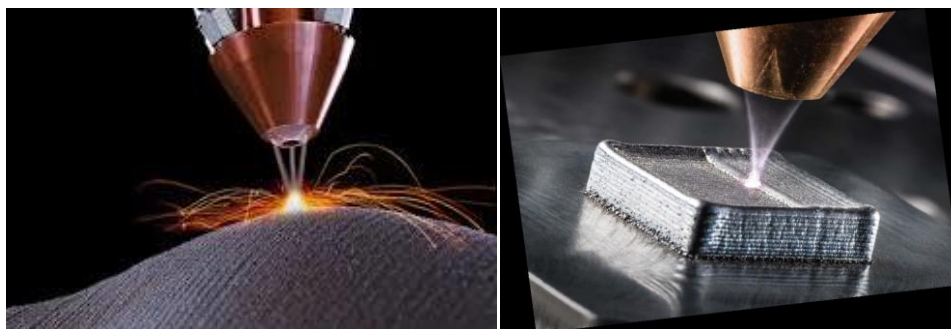


Рис. 8.7. Лазерне наплавлення та легування поверхні заготовки

**3. Оплавлення поверхні** використовується для покращення якості поверхні – зменшення пористості та шорсткості за рахунок розплавлення поверхневого шару матеріалу.

**4. Аморфізація** – отримання металевого покриття, позбавленого кристалічної структури. Швидкість охолодження розплавленого поверхневого шару має бути настільки великою, щоб не встигло відбутися упорядкування атомів у кристалічну ґратку.

## **5. Свердління отворів та порожнин.**

За допомогою лазерного проміння 1 (рис. 8.8), що концентрується об'єктивом 2, можна отримувати отвори 5 у заготовці 3 глибиною до 10 мм

та діаметром до 1 мм й більше у важко оброблюваних матеріалах.

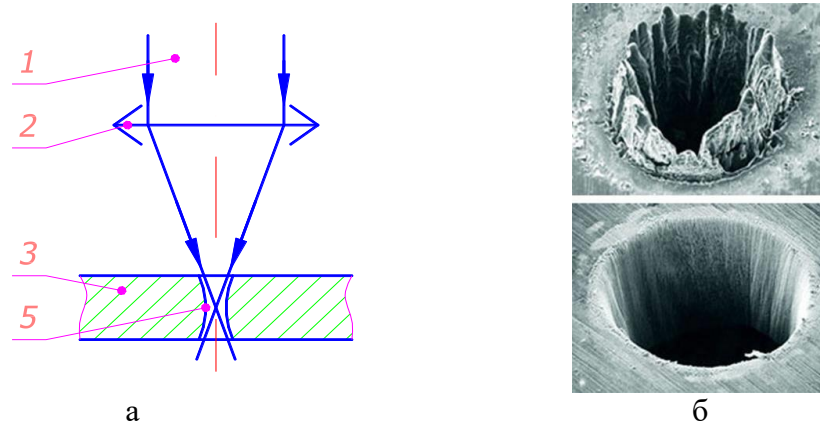


Рис. 8.8. Прошивання отворів: а) схема утворення; б) отвори, що утворюються; 1 – лазерний промінь; 2 – лінза фокусувальна; 3 – заготовка; 5 – отвір

**6. Різання** завдяки високій концентрації енергії у лазерному пучку. Дозволяє розділяти будь-які матеріали незалежно від їх теплофізичних властивостей (рис. 8.9). При цьому утворюються вузькі розрізи з мінімальною товщиною зміненого поверхневого шару – зони термічного впливу (ЗТВ).

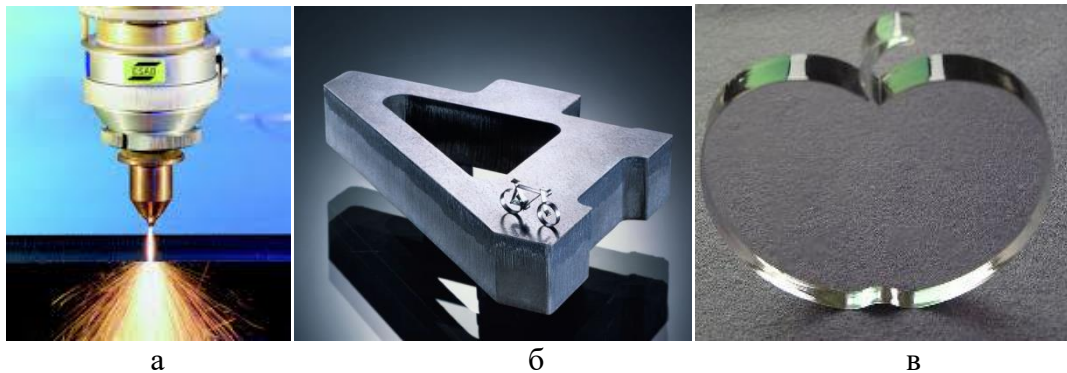


Рис. 8.9. Лазерне різання: а) лазерний різак; б) розкрій металу; в) різання пластику

**7. Термічне розколювання** – розділення під впливом напружень, які виникають внаслідок нерівномірного нагрівання заготовки. У багатьох випадках це призводить до зменшення енергетичних витрат у 5...10 разів порівняно із звичайним різанням.

**8. Зварювання** дозволяє отримувати зварні шви у важко доступних місцях та шви складної форми (рис. 8. 10). Ширина шва може бути менше

0,5 мм, що значно менше, ніж при зварюванні іншими методами. За рахунок локального теплового впливу відсутній нагрів матеріалу навколо шва, короблення деталей та зберігаються покриття у навколошовній зоні. Завдяки кіндзальному проплавленню заготовок зварювання деталей різної товщини відбувається без спеціальної підготовки кромки, а отже, й без використання присадкових матеріалів. Забезпечується висока корозійна стійкість швів.

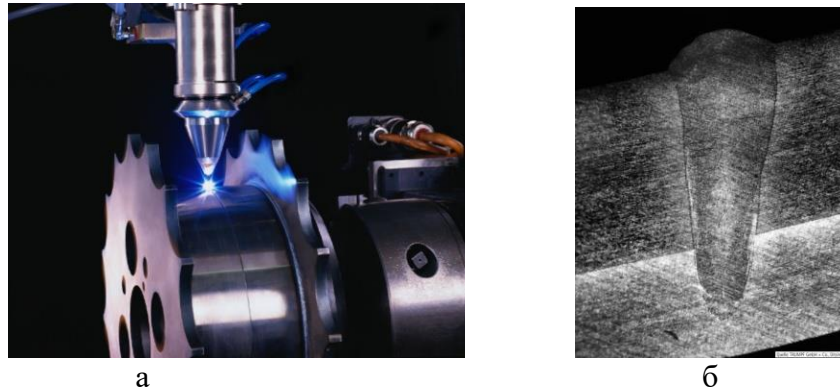


Рис. 8.10. Лазерне зварювання: а) процес обробки; б) шов, що утворюється

**9. Очищення поверхні** – за рахунок теплового впливу з поверхні випаровуються будь-які забруднення, лакофарбові покриття, оксидні та масляні плівки тощо.

Очищення поверхні є однією з базових технологій у багатьох галузях промисловості. Для зварювального, лакофарбового, гальванічного виробництва очищення поверхні є надзвичайно важливим питанням, оскільки воно гарантує високий ресурс та надійність роботи виробів.

Очищення представляє собою операцію видалення поверхневого шару, що забруднено побічними органічними та неорганічними домішками або має небажані покриття. Також очищення поверхні допомагає вирішити питання технологічної та експлуатаційної ідентичності поверхневого шару, а саме:

- покращення трибологічних властивостей поверхні, стабілізація коефіцієнта тертя;
- активація поверхні;
- перерозподіл залишкових поверхневих напружень.

Лазерний пучок є універсальним технологічним інструментом та має надзвичайні енергетичні характеристики. Густина потужності у зоні впливу на поверхню матеріалу (більше  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) та тривалість впливу від фемтосекунд ( $10^{-12}$  с) дозволяє випаровувати будь-які матеріали при майже повністю відсутній зоні термічного впливу та вигоранні хімічних складових матеріалу. Так, на рис. 8.11, а показано результати очищення сталевієї полоси від масляної плівки (ліворуч – очищена поверхня). Використовувався волоконний лазер: потужність 50 Вт, частота подачі імпульсів 100 кГц, діаметр пучка у зоні обробки 0,1 мм, продуктивність 100 м<sup>2</sup>/ч.

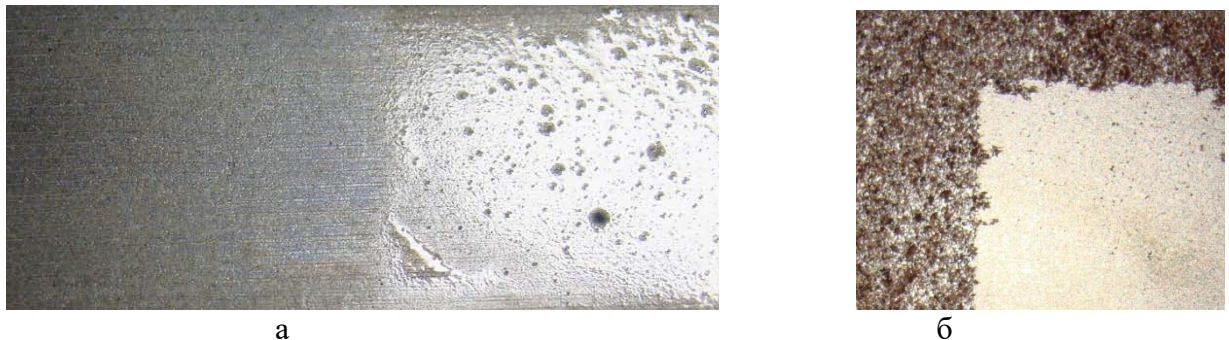


Рис. 8.11. Очищення сталевієї заготовки від: а) масляної плівки; б) іржі

Висока продуктивність лазерного очищення поверхні досягає декількох квадратних метрів за годину, значно вища екологічна безпека, відсутність витратних матеріалів, висока технологічна відтворюваність процесу, можливість комплексно вирішувати проблему одночасного видалення органічних та неорганічних забруднень відкривають значні потенційні можливості впровадження даної технології у багатьох галузях промисловості.

#### 8.1.8. Обладнання для ЛО

Для проведення ЛО виготовляються лазерні технологічні комплекси, у склад яких входять (рис. 8.12):

- випромінювач (технологічний лазер);
- система транспортування ЛП;

- система фокусування;
- охолоджувальна система для забезпечення стабільної роботи комплексу;
- стіл з обладнанням для встановлення, базування та закріплення заготовки;
- система переміщення заготовки або лазерного пучка;
- система газозабезпечення для випромінювача та обробки;
- вентиляційна система для видалення газоподібних шкідливих речовин;
- система числового програмного керування;
- інше технологічне оснащення для завантажування-розвантажування, освітлення тощо.

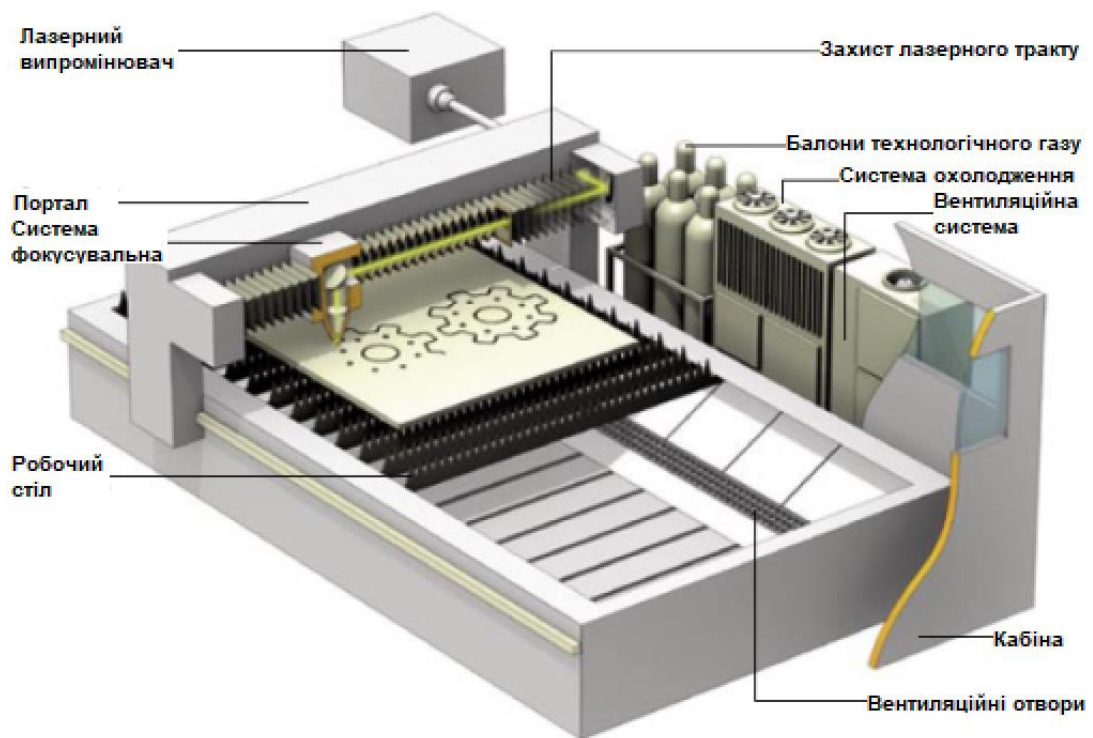


Рис. 8.12. Обладнання для лазерного різання

### 8.1.9. Випромінювач твердотілого технологічного лазера

Основними блоками твердотілого лазера є випромінювач, блок електроживлення, блок охолодження та система керування (рис. 8.13). Випромінювач поєднує активний елемент, освітлювальну систему (лампа накачування, віддзеркалювач) та оптичний резонатор. Активний елемент, лампа накачування та віддзеркалювач розміщуються у герметичній камері, яка називається генераторною головкою або квантроном, що встановлено разом з дзеркалами резонатора на оптичній лаві резонатора.

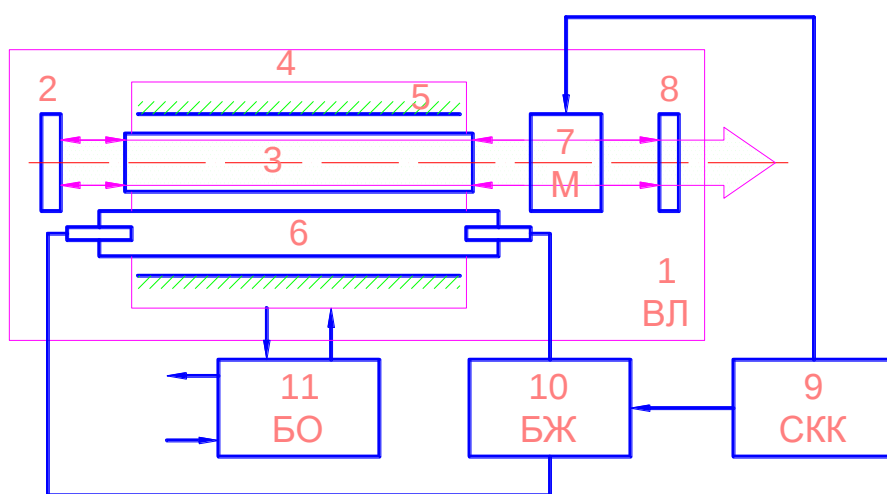


Рис. 8.13. Структурна схема твердотілого лазера: 1 – випромінювач лазера (ВЛ); 2 – глухе (непрозоре) дзеркало резонатора; 3 – активний елемент; 4 – герметична камера (квантрон); 5 – віддзеркалювач; 6 – лампа накачування; 7 – модулятор добротності резонатора; 8 – вихідне (напівпрозоре) дзеркало резонатора; 9 – система керування та контролю (СКК); 10 – блок електроживлення (БЖ); 11 – блок охолодження (БО)

Блок електроживлення газорозрядної лампи накачування складається з силової частини, пристрою запалювання та системи керування (рис. 8.14). Силова частина блоку електроживлення включає перетворювач напруги електромережі, зарядний комутатор, зарядний пристрій та накопичувач енергії.

У твердотілих лазерах частіше застосовуються ємкісні накопичувачі енергії. Найбільш раціональним способом заряджання ємкісних накопичувачів є заряджання постійним струмом за допомогою індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги у джерело струму.

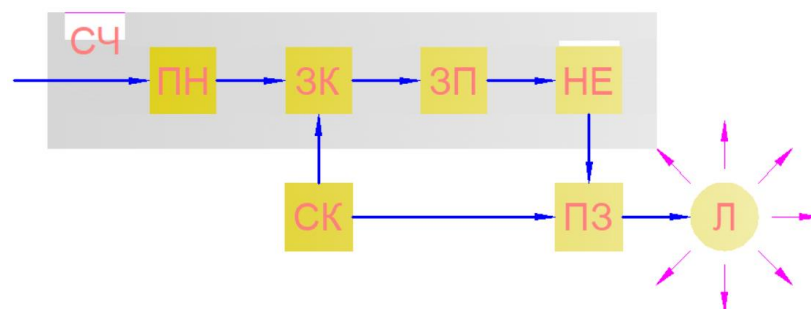


Рис. 8.14. Структурна схема блока електроживлення: СЧ – силова частина; СК – система керування; ПЗ – пристрій запалювання; Л – лампа; ПН – перетворювач напруги мережі; ЗК – зарядний комутатор; ЗП – зарядний пристрій; НЕ – накопичувач енергії

### 8.1.10. Конструкція генераторної головки твердотілого лазера

В сучасних твердотілих лазерах генераторна головка (рис. 8.15) складається зі стрижня активного середовища 1, лампи накачування 2, віддзеркалювача 3, металевого корпусу 4, ущільнювачів 5 для герметизації елементів головки, кришок 6, 7 та 8 для герметизації лазерного стержня та лампи накачування, а також штуцерів 9 для підведення та відведення холодоагенту системи охолодження.

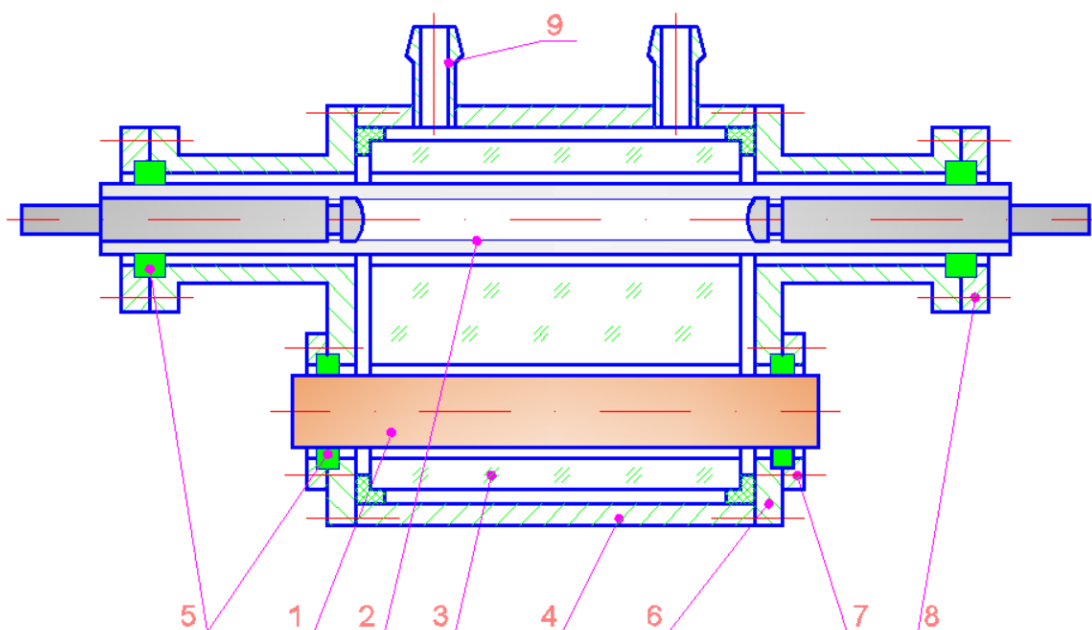


Рис. 8.15. Ескіз генераторної головки твердотілого лазера: 1 – стрижень активного середовища; 2 – лампи накачування; 3 – віддзеркалювач; 4 – корпус; 5 – ущільнювачі; 6, 7 та 8 – кришки; 9 – штуцер

## 8.2. Методика обслуговування генераторної головки (квантрона)

Регламентне обслуговування генераторної головки:

- а) розібрати генераторну головку лазерної установки "Квант-16";
- б) ганчіркою очистити елементи головки від бруду та накипу, промити проточною водою;
- в) змоченої у спирті ватою протерти лазерний стрижень, лампу накачування та кварцовий блок віддзеркалювача;
- г) протерти торці стрижня спиртом, висушити їх та обмахнути білячим пензлем, промитим у спирті;
- д) скласти головку в такій послідовності:
  - віддзеркалювач 3 (рис 8.5), помістити у корпус головки 4 та закрити корпус однією з кришок 6;
  - установити лампу накачування 2 та зафіксувати її кришкою лампи з ущільненням 5;
  - установити лазерний стрижень 1 з закріпленим ущільненням 6 на одному з його кінців та зафіксувати кришкою;
  - закрити генераторну головку другою кришкою 6, пропустити у її отвори кінці лампи 2 та лазерний стрижень 1;
  - установити кришку 8 з ущільненням 5 на інший кінець лампи накачування 2;
  - встановити на вільний кінець стрижня 1 ущільнення 6 та зафіксувати його кришкою 7;
  - торці стрижня обмахнути білячим пензлем.

## 8.3. Порядок виконання роботи

1. Вивчити принцип дії та склад лазера. Накреслити блок-схему лазерної установки (рис. 8.13). Ознайомитися із конструкцією кожного з основних вузлів лазера на прикладі лазерної установки "Квант-16".
2. Ознайомитись з конструкцією генераторної головки твердотілого лазера та накреслити її ескіз (рис. 8.15).

3. Вивчити характеристики основних елементів випромінювача твердотілого лазера (стрижень, лампа накачки, віддзеркалювач, дзеркала резонатора), визначити їх розміри. Накреслити ескізи основних елементів випромінювача твердотілого лазера, вказавши основні розміри.

4. Ознайомитися з методикою обслуговування генераторної головки (п. 8.2).

#### **8.4. Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи.
2. Структурна схема твердотілого лазера з описом основних конструкційних елементів (рис. 8.13).
3. Описати конструкцією генераторної головки твердотілого лазера та накреслити її ескіз (рис. 8.15).
4. Зробити висновки за результатами вивчення конструкції твердотілого лазера.

#### **Контрольні питання до лабораторної роботи № 8**

1. Від якого словосполучення утворилось слово ЛАЗЕР?
2. Назвіть відмінність лазерного проміння від інших джерел електромагнітного випромінювання.
3. Які елементарні частинки випромінюють когерентні електромагнітні хвилі?
4. Які основні особливості лазерного пучка витікають з когерентності проміння?
5. На яку глибину відбувається проникнення світлової енергії лазерного проміння у речовину?
6. Який вплив здійснює лазерне проміння на опромінювану речовину?
7. Які явища спостерігаються при переході світлової енергії лазерного проміння у теплову матеріалу заготовки?
8. Що називають активним лазерним середовищем?

9. Як розділяють лазери за агрегатним станом активного середовища?
10. Для чого призначений лазерний резонатор?
11. З чого побудовано лазерний резонатор?
12. Що називають накачуванням активного середовища лазера?
13. Яке накачування частіше за все застосовують у твердотілих лазерах?
14. Яке накачування частіше за все застосовують у газових лазерах?
15. Назвіть основні типові операції лазерної обробки?
16. На якому процесі ґрунтується термічне зміцнення деталей під впливом лазерного проміння?
17. На якому процесі ґрунтується легування та наплавлення поверхневого шару деталей під впливом лазерного проміння?
18. На якому процесі ґрунтується аморфізація поверхні металевих деталей під впливом лазерного проміння?
19. Які матеріали можна розділяти лазерним промінням?
20. Які особливості лазерного зварювання порівняно з традиційними методами?
21. Які системи зазвичай входять у склад технологічних комплексів для проведення лазерної обробки?
22. Які основні блоки входять у склад твердотілого лазера?
23. Як називається герметична камера у якій розміщуються активний елемент, лампа накачування та віддзеркалювач твердотілого лазера?
24. З яких частин складається блок електроживлення газорозрядної лампи накачування твердотілого лазера?

## Лабораторна робота № 9.

### Аналіз закономірностей лазерної поверхневої термообробки сплавів та вибір режимів лазерного зміцнення

**Мета роботи:** визначення параметрів режимів лазерного зміцнення сталі при імпульсно-періодичному та безперервному випромінюванні.

#### 9.1. Теоретичні відомості

##### 9.1.1. Сутність процесу

Зміцнення під час впливу лазерного проміння на металеві сплави обумовлено надвисокими швидкостями нагрівання протягом  $10^{-2} \dots 10^{-7}$  с та подальшого швидкого охолодження опромінюваного матеріалу, часткового легування поверхневого шару елементами навколишнього середовища, збільшення щільності дислокацій у зоні опромінення тощо. У матеріалі відбуваються структурні та фазові перетворення з утворенням специфічної ультрадисперсної гомогенної структури з унікальними властивостями. Це відбувається завдяки високій та стабільній питомій потужності у плямі та великій лінійній швидкості переміщення лазерного пучка, при цьому глибинні шари деталі не встигають нагрітися до високих температур, які могли б викликати небажані внутрішні напруження, деформації (короблення) та зміну геометричних розмірів. Залежно від рівня розвитку зазначених явищ у матеріалі розрізняють кілька видів поверхневої лазерної обробки (табл. 9.1), можливість реалізації яких визначається в основному рівнем питомої потужності випромінювання [2].

**Зміцнення без фазового перетворення** передбачає структурні зміни в матеріалі при рівні питомої потужності лазерного проміння, що не призводить до розплавлення поверхні матеріалу. При цьому виді обробки зберігається вихідна шорсткість обробленої поверхні. Швидкий локальний нагрів поверхні та подальше охолодження за рахунок тепловідведення у

масив матеріалу призводять до утворення в поверхневому шарі сталі специфічної високодисперсної, дезорієнтованої в просторі структури, що має мікротвердість у 2...4 рази вищу за мікротвердість основи.

Таблиця 9.1.

Види поверхневої лазерної обробки

| Вид обробки                         | Питома потужність, Вт/м <sup>2</sup> | Швидкість охолодження, °C/с | Глибина ЗТВ, мм |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Зміцнення без фазового перетворення | $10^7 \dots 10^8$                    | $10^4 \dots 10^5$           | 0,02...1,5      |
| Лазерний відпал                     | $10^6 \dots 10^7$                    | -                           | 0,05...0,1      |
| Зміцнення з фазовим перетворенням   | $10^8 \dots 10^9$                    | $10^4 \dots 10^6$           | 0,2...3,0       |
| Лазерне легування                   | $10^8 \dots 10^{10}$                 | $10^4 \dots 10^6$           | 0,2...2,0       |
| Лазерне наплавлення (напилення)     | $10^8 \dots 10^{10}$                 | $10^4 \dots 10^6$           | 0,02...3,0      |
| Аморфізація поверхні                | $10^{12} \dots 10^{14}$              | $10^6 \dots 10^{10}$        | 0,01...0,05     |
| Шокове зміцнення                    | $10^{13} \dots 10^{16}$              | $10^4 \dots 10^6$           | 0,02...0,2      |

При малій питомій потужності, швидкості нагрівання та охолодження, що не перевищують критичних значень, може бути реалізований режим відпалу раніше загартованих матеріалів. Необхідність такої операції виникає, наприклад, при виготовленні листових пружин, відбортовці крайок обойми підшипника тощо.

**Зміцнення з фазовим перетворенням** передбачає плавлення матеріалу в зоні термічного впливу (ЗТВ). Цей вид зміцнення потребує більш високої питомої потужності випромінювання, що дозволяє домогтися значної глибини зміцненого шару.

Перелічені види обробки проводяться на повітрі, при цьому можлива дифузія складових повітря у поверхню.

При **лазерному легуванні** для насичення поверхневого шару легуючими елементами потрібне спеціальне середовище (газоподібне, рідинне, тверде). В результаті на оброблюваній поверхні утворюється новий сплав, що відрізняється за складом та структурою від матеріалу основи.

**Лазерне наплавлення** (напилення) використовується для нанесення на поверхню оброблюваного матеріалу шару іншого матеріалу, що поліпшує експлуатаційні характеристики основного.

**Аморфізація поверхні** сплаву відбувається в умовах швидкісного опромінення (дуже коротким імпульсом або скануючим променем). Надвисокі швидкості тепловідводу, що досягаються при цьому, забезпечують своєрідне «заморожування» розплаву, у якому не відбувається упорядкування структури та не виникає кристалічної ґратки, утворення металевого скла (метгласу) або аморфного стану поверхневого шару. В результаті досягаються висока твердість, корозійна стійкість, поліпшені магнітні характеристики та інші специфічні властивості металів.

**Шокове зміцнення** має місце при впливі на матеріал потужного імпульсу проміння наносекундної тривалості. Попередньо на матеріал наноситься тонкий шар легкоплавкого металу. Вплив потужного імпульсу викликає вибухоподібне випаровування легкоплавкого металу, що призводить до виникнення імпульсу віддачі, в свою чергу генерує потужну ударну хвилю в матеріалі. В результаті відбувається пластичне деформування поверхневого шару матеріалу, а при нагріванні – й відповідні зміни у структурі. Надзвичайно швидка кристалізація розплаву, яка обумовлює отримання надзвичайно дрібнозернистих структур або структур з надвисокою дисперсністю зміцнюючих фаз, визначає більш високі експлуатаційні властивості поверхневих шарів. Саме таким способом отримана подрібнена однорідна структура у однорідному нікелевому сплаві (15 % Ni, 15 % Co, 5 % Cr, 2,75 % Mo, B) з мікротвердістю 14000 МПа. Спостерігалися також подрібнення карбідної евтектики та збільшення об'ємної частки фази карбіду (від 13,8 до 50 %) в евтектичній системі Co-TaC та подрібнення первинних карбідів у інструментальній сталі. У зв'язку з цим поняття «лазерне глазурування» трактується більш широко, тобто його відносять не тільки до отримання аморфних фаз, але й до обробки з утворенням шарів з підвищеною дисперсністю кристалічних фаз.

Перші чотири види поверхневої лазерної обробки набули найбільшого поширення. Всі ці види обробки можна здійснити за допомогою й імпульсного, й безперервного опромінювання, причому зміцнення без фазового переходу більш придатне для прецизійної обробки поверхонь порівняно невеликих розмірів, продуктивність процесу обмежується порівняно невисокою частотою проходження імпульсів лазерного проміння. Безперервне опромінення дозволяє проводити обробку з високою продуктивністю поверхонь великих розмірів.

При імпульсному опроміненні зона лазерного впливу (ЗЛВ) має форму кола діаметром  $D$  (рис. 9.1, *a*), а при безперервному – смуги шириною до 10 мм (рис. 9.1, *в, з*). Для обробки поверхні необхідно переміщувати промінь з взаємним перекриттям (рис. 9.1, *a*) або без перекриття зон зміцнення (відношення кроку обробки  $S$  до діаметру  $D$  одиничної зони лазерного впливу  $k=S/D$  носить назву коефіцієнта перекриття). При обробці з перекриттям ЗЛВ є зони багаторазового нагрівання та зони відпалу (нагрів нижче  $A_{c1}$ ) зі зниженою твердістю. Товщина зміцненого шару залежить від густини потужності лазерного проміння та може становити від 0,1 до 1,5 мм.

Використання безперервного лазерного проміння (рис. 9.1, *в, з*) більш продуктивне та забезпечує більшу рівномірність зміцнення. Швидкість обробки поверхні становить  $10^2 \dots 10^4$  мм/хв. При перекритті смуг також утворюються зони відпалу, тому в деяких випадках смуги наносяться на деякій відстані одна від одної ( $k>1$ ). Залежно від питомої потужності лазерного проміння нагрівання здійснюється як з розплавленням металу, так і без нього. Критична питома потужність, вище якої відбувається оплавлення поверхні, становить  $(2 \dots 6) \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Чим вище потужність проміння, менше діаметр плями та швидкість переміщення, тим більше товщина зміцненого шару. Найбільша товщина шару без оплавлення сталі не перевищує 1,5...2,0 мм, а чавуну – 1,0...1,5 мм. При обробці з оплавленням товщина зміцненого шару збільшується.

Структура за товщиною зони лазерного впливу на середньовуглецевих

(0,35...0,45 % C) сталях включає (рис. 9.1, б):

1) **зону плавлення**, що складається зазвичай з дендритних кристалів мартенситу (мікротвердість  $H\mu=800\ldots850$  МПа);

2) **зону термічного впливу** (нагрівання до температури вище  $A_{c3}$ ), що складається з білого шару азотисто-вуглецевого мартенситу, що не травиться (насичення мартенситу азотом відбувається з повітря при високих температурах) з мікротвердістю  $H\mu=800$ ; нижня межа шару визначається зоною неповного гартування (нагрів у інтервалі температур  $A_{c1}-A_{c3}$ ) зі структурою мартенсит та ферит;

3) **зону відпаалу** зі зниженою твердістю ( $H\mu=500\ldots650$  МПа);

4) **зону вихідної структури і твердості**.

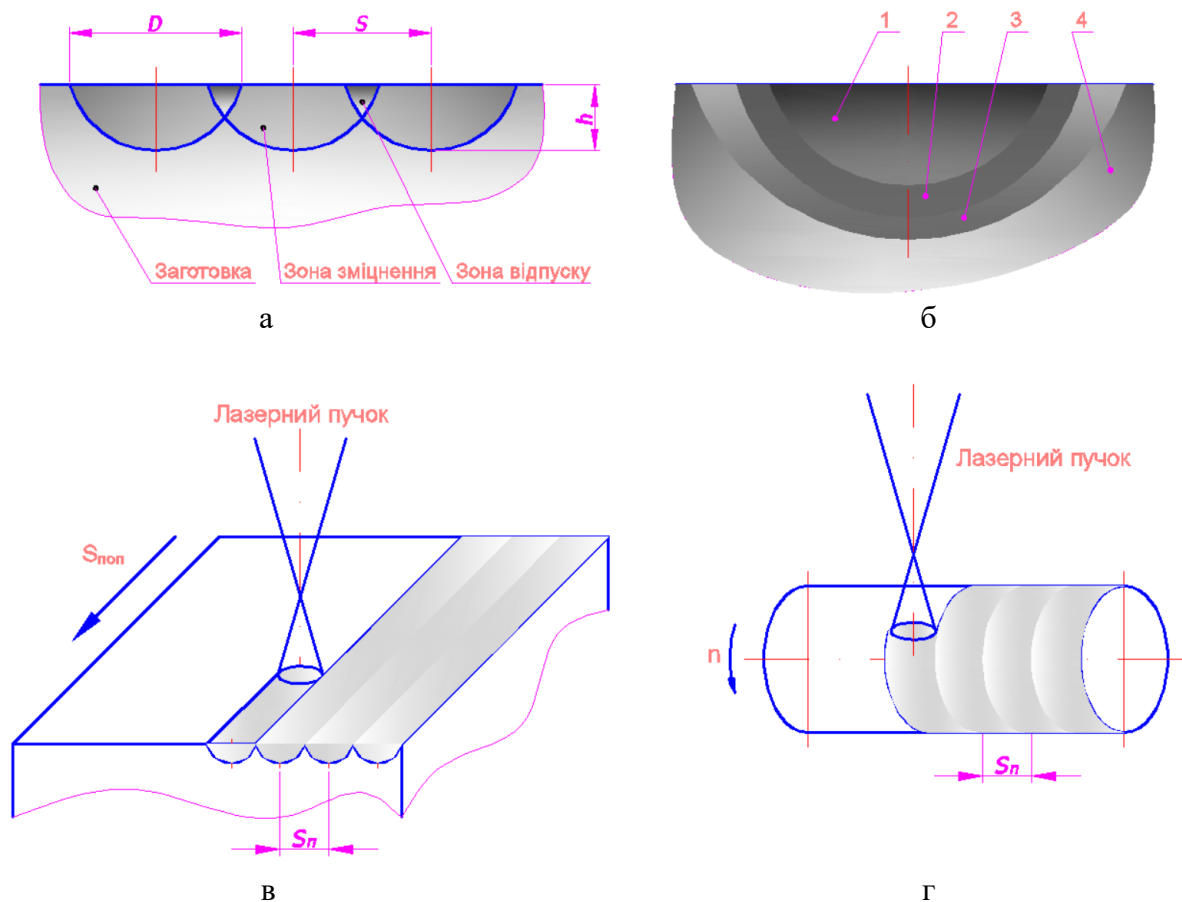


Рис. 9.1. Схема нагрівання лазерним промінням для поверхневого гартування [2]: а) схема розташування зон термічного впливу ( $D$  – діаметр зони лазерного впливу;  $S$  – крок обробки;  $h$  – товщина зміцненого шару); б) схема будови зони зміцнення: 1 – зона плавлення; 2 – зона термічного впливу; 3 – зона неповного гартування; 4 – вихідна структура; в) схема зміцнення плоскої поверхні безперервною дією проміння з періодичним зміщенням деталі на крок  $S_{\Pi}$  та поперечною подачею  $S_{\text{поп}}$ ; г) обробка циліндричної деталі з постійною осьовою подачею  $S_{\Pi}$  та частотою обертання  $n$

Ефективно зміцнюються середньовуглецеві сталі: 45, 40Х, 40Х13; високовуглецеві: У8, У10, ШХ15, ХВГ, 9ХС; інструментальні: Р18, Р6М5, Х12М, Х12МФ, Х12Ф, 4Х5МФС, Х6ВФ, чавуни СЧ20, ЧФ4, ЧХ1, титанові сплави ВТ-6, ВТ5-1 тощо. Мікротвердість після обробки лазерним промінням високовуглецевих сталей (У8, У10, ШХ15 тощо) досягає  $H\mu=1000\ldots1100$  МПа. Поверхнєве гартування лазерним промінням без оплавлення підвищує у 2...4 рази (в залежності від марки сталі) зносостійкість, на 70...80 % – межу витривалості при вигині та на 60...70 % – межу контактної витривалості. Якщо деталі, крім зношування, зазнають великих радіальних навантажень (наприклад, шийки валів, обойми підшипників тощо), оптимальним є об'ємне гартування деталі до 35...42 HRC перед її остаточною механічною обробкою. А після остаточної обробки в розмір слід провести лазерне зміцнення зношеної поверхні без її оплавлення, без порушення макро- та мікрогеометрії, наприклад до 60...62 HRC.

Лазерну обробку успішно застосовують для поверхневого зміцнення виливків з перлітного сірого, ковкого та високоміцного чавунів. Завдяки оплавленню поверхні та утворення ледебуритної евтектики (відбілювання чавуну) та мартенситного підшару мікротвердість на поверхні досягає  $H\mu=750\ldots900$  МПа. Часткове оплавлення погіршує шорсткість поверхні. При відсутності оплавлення твердість після нагрівання лазерним промінням підвищується у результаті загартування тонкого поверхневого шару.

Лазерне гартування – перспективний спосіб зміцнення деталей складних виробів, довговічність яких лімітується зносостійкістю та опором втоми, коли їх гартування іншими методами ускладнено. Лазерне гартування дозволяє зміцнювати будь-які локальні ділянки, тонкостінні та нежорсткі деталі.

### 9.1.2. Технологічні показники технології лазерного зміцнення

До технологічних характеристик зміцнення поверхні слід віднести розмірні параметри (ширину та глибину зони зміцнення), ступінь зміцнення (мікротвердість) та шорсткість. Ступінь зміцнення залежить від типу матеріалу та його вихідного стану. Для загартованих сталей рівень зміцнення вищий, ніж для відпалених. Розмірні параметри залежать від енергетичних (енергія  $E$  чи потужність  $P$ ), просторових (форма та розміри пучка на поверхні заготовки) та часових (тривалості імпульсу  $\tau$  або час впливу) характеристик проміння, які визначають густину потужності проміння  $W_p$ . Одним із найважливіших параметрів процесу зміцнення імпульсним промінням є коефіцієнт перекриття  $k$ , на вибір якого впливає ряд обмежень: розмір зміцненої та не зміцненої зон; шорсткість зміцненої поверхні; товщина шару рівномірного зміцнення та продуктивність процесу. Можна рекомендувати деяку оптимальну величину коефіцієнта перекриття  $k=0,8\dots1,2$ , при якій усі обмежувальні фактори витримуються в допустимих межах.

Критичними режимами лазерного зміцнення вважаються ті, які під впливом лазерного проміння не призводять до погіршення шорсткості поверхні, а глибина зміцненого шару є максимальною. При лазерному опроміненні у режимі вільної генерації глибина зміцненого шару  $h = \sqrt{\alpha\tau}$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\tau$  – тривалість лазерного імпульсу.

Зі зменшенням  $\tau$  зменшується глибина  $h$  зміцненого шару. Критична енергія лазерного гартування знижується при зменшенні діаметру плями гартування, що призводить до зменшення глибини зміцненого шару. У ряді випадків (наприклад, при зміцненні вирубних пуансонів діаметром 2...3 мм) потрібно проводити лазерне зміцнення при різних діаметрах плями гартування. Значення критичної енергії  $E$  лазерного проміння, глибини  $h$  зміцненого шару для сталей деяких марок при різних діаметрах плями гартування, а також мікротвердість до та після зміцнення наведено у табл. 9.2.

Вибір критичної енергії лазерного проміння при обробці з різним діаметром плями гартування проводять у такий спосіб. При фіксованому діаметрі плями гартування виконують лазерну термообробку поверхні досліджуваних зразків при різній енергії лазерного проміння. Кількість енергії, перевищення якої призводить до погіршення шорсткості поверхні, вважається критичною. Для отримання рівномірного за глибиною зміцненого шару перед обробкою поверхні деталі травлять реактивом, що містить: хлорного заліза 10 г, соляної кислоти 15 см<sup>3</sup>, води 15 см<sup>3</sup>. Потім зміцнювану деталь, що має рівний темно-сірий колір, встановлюють та фіксують на столі механізму переміщення лазерної установки.

Таблиця 9.2.

Режими лазерного гартування інструментальних сталей

| Марка сталі | При діаметрі плями гартування, мм |    |     |    |     |                |     |     |     |     | HV100   |                 |
|-------------|-----------------------------------|----|-----|----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|---------|-----------------|
|             | 2                                 | 3  | 3,6 | 4  | 4,5 | 2              | 3   | 3,6 | 4,0 | 4,5 | вихідна | після зміцнення |
|             | <i>E</i> , Дж                     |    |     |    |     | <i>h</i> , мкм |     |     |     |     |         |                 |
| <b>У8</b>   | 9                                 | 23 | 31  | 41 | 54  | 108            | 117 | 126 | 132 | 136 | 708     | 1070            |
| <b>ХВГ</b>  | 8                                 | 22 | 30  | 39 | 51  | 103            | 114 | 121 | 127 | 131 | 734     | 976             |
| <b>9ХС</b>  | 8                                 | 21 | 29  | 37 | 49  | 98             | 112 | 117 | 124 | 129 | 708     | 1023            |
| <b>Х12М</b> | 7,5                               | 20 | 28  | 35 | 46  | 91             | 103 | 112 | 115 | 118 | 764     | 934             |
| <b>Р6М5</b> | 7                                 | 18 | 26  | 32 | 43  | 82             | 91  | 103 | 107 | 113 | 794     | 871             |

Оптимальні значення густини енергії  $W_E = E/S$  (де  $S$  – площа лазерного пучка на поверхні оброблюваної заготовки), глибини  $h$  зміцненого шару та мікротвердості при лазерному гартуванні інструментальних сталей деяких марок досягаються у повітряному та аргоновому середовищах на установці "Квант-16" при площі плями гартування 0,1 см<sup>2</sup> (табл. 9.3).

Густина падаючої енергії при лазерному гартуванні у повітрі менше, ніж у середовищі аргону. Це пов'язано з тим, що нагрівання металів лазерним промінням на повітрі призводить до меншого відбивання світла в результаті додаткового поглинання енергії оксидної плівкою, що утворюється. Шорсткість поверхні після лазерного гартування у оптимальному режимі не погіршується.

Таблиця 9.3.

Режими лазерного гартування інструментальних сталей на установці  
"Квант-16"

| Параметр режиму                             | Сталь |      |     |      |      |     |      |
|---------------------------------------------|-------|------|-----|------|------|-----|------|
|                                             | У8    | У10  | 9ХС | ХВГ  | ШХ15 | Х12 | Х12М |
| $W_{E \text{ аргон}}, \text{Дж/см}^2$       | 310   | 300  | 300 | 300  | 300  | 280 | 280  |
| $W_{E \text{ повітря}}, \text{Дж/см}^2$     | 200   | 190  | 190 | 190  | 190  | 180 | 180  |
| $h_{\text{аргон}}, \text{мкм}$              | 125   | 120  | 120 | 120  | 120  | 105 | 105  |
| $h_{\text{повітря}}, \text{мкм}$            | 135   | 130  | 130 | 130  | 130  | 115 | 115  |
| Твердість поверхні після гартування (HV100) | 1030  | 1000 | 980 | 1000 | 980  | 960 | 960  |

Лазерне гартування, як завершальний вид обробки, можна застосовувати при виготовленні інструментів та деталей технологічного оснащення для зміцнення робочих поверхонь у разі інтенсивного їх зношування або тих, що мають протяжну кромку. Для лазерного зміцнення протяжних кромek інструмента та деталей технологічного оснащення застосовують коефіцієнт перекриття плям гартування  $k=0,5$ . Поперечний переріз зони лазерного впливу має форму сегменту (рис. 9.1, а) і глибина зміцненої зони вздовж діаметра плями гартування змінюється від 0 до  $h_{\text{max}}$ . При  $k=0,5$  глибина зміцненої зони практично однакова по всій довжині зміцненого шару. Подальше збільшення коефіцієнта перекриття плям гартування недоцільне, оскільки зменшується продуктивність обробки.

Можливі схеми керування переміщенням лазерного проміння у просторі при зміцнювальній обробці наведено на рис. 9.1, в, г. Оптимальні режими зміцнення типових інструментальних сталей на установці "Квант-18" наведено у табл. 9.4.

### 9.1.3. Вибір режимів зміцнення при імпульсному опроміненні

Для вибору режимів при імпульсно-періодичному гартуванні використовують вуглецеві еквіваленти сталей, які розраховують у

відповідності з вмістом легуючих компонентів у відсотках:

$$C_E = [C] + \frac{1}{\alpha_1} [Mn] + \frac{1}{\alpha_2} [Si] + \frac{1}{\alpha_3} [Ni] + \frac{1}{\alpha_4} [Cr] + \frac{1}{\alpha_5} [Mo] + \frac{1}{\alpha_6} [Cu] + \frac{1}{\alpha_7} [W] + \frac{1}{\alpha_8} [V],$$

де  $\frac{1}{\alpha_1} \dots \frac{1}{\alpha_8}$  – постійні коефіцієнти, що залежать від виду легуючих компонентів. У табл. 9.5 наведено вуглецеві еквіваленти деяких сталей.

Таблиця 9.4.

Оптимальні режими зміцнення сталей на установці "Квант-18"

| Сталь | Енергія проміння $E$ ,<br>Дж |                           | Глибина<br>зміцненого шару<br>$h$ , мм |       | Мікротвердість<br>HV100 |                 |
|-------|------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------------|-----------------|
|       | Обробка в середовищі         |                           |                                        |       |                         |                 |
|       | Повітря<br>$D=8/3 \times 11$ | Аргон<br>$D=6/2 \times 8$ | Повітря                                | Аргон | Вихідна                 | Зміцненого шару |
| 45    | 106/71                       | 104/72                    | 160                                    | 140   | 560                     | 890             |
| У8    | 105/70                       | 103/71                    | 160                                    | 140   | 708                     | 1023            |
| ХВГ   | 100/67                       | 98/67                     | 150                                    | 130   | 730                     | 976             |
| Х12М  | 99/66                        | 96/66                     | 140                                    | 120   | 754                     | 976             |
| ШХ15  | 103/69                       | 101/69                    | 150                                    | 130   | 708                     | 934             |

Таблиця 9.5.

Вуглецеві еквіваленти деяких сталей

| Сталь | 20   | 45   | 48   | У10  | 9ХС  | У12  | ШХ15 | ХВГ  | Р6М5 | Х12М |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_E$ | 0,38 | 0,66 | 0,89 | 1,09 | 1,27 | 1,29 | 1,39 | 1,40 | 3,1  | 4,05 |

На рис. 9.2 представлено номограму визначення режимів зміцнення імпульсним лазерним опроміненням інструментальних сталей за заданою глибиною зміцненого шару. За допомогою цієї номограми можна вирішувати й зворотну задачу, тобто за заданими режимами обробки та конструкційними особливостями визначати глибину зміцненого шару.

**Розглянемо приклад 1 (зміцнення імпульсним промінням)** для отримання глибини зміцненого шару  $h=70$  мкм у сталі Х12М:

1. Ліва номограма (рис. 9.2): за кривою  $C_{E4}$ , що відповідає залежності  $h=f(W_E)$ , визначаємо потрібну густину енергії лазерного проміння  $W_E=2,25$  Дж/мм<sup>2</sup>. Обираємо енергію опромінення  $E=35$  Дж з урахуванням

можливостей наявного лазерного обладнання та визначаємо відповідний цій густині енергії діаметр плями фокусування  $d_0=4,6$  мм.

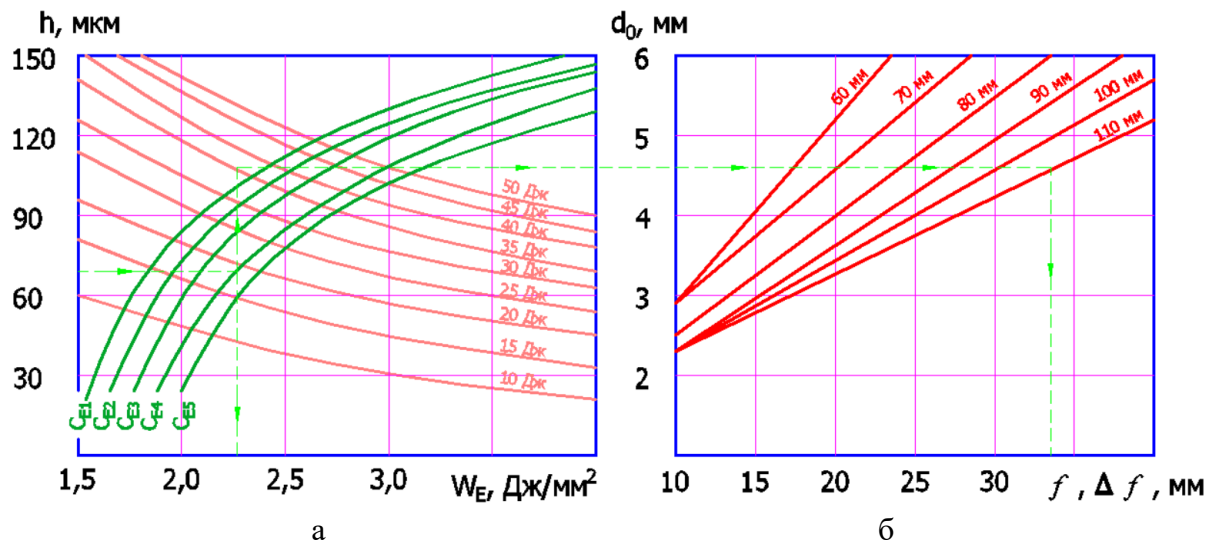


Рис. 9.2. Номограма для вибору режимів зміщення інструментальних сталей імпульсним промінням без оплавлення поверхні:

$C_{E1}$  — У8;  $C_{E2}$  — 9ХС;  $C_{E3}$  — ХВГ;  $C_{E4}$  — Х12М;  $C_{E5}$  — Р6М5

2. Права номограма (рис. 9.2): за визначеним діаметром плями фокусування  $d_0$  та заданій або обраній фокусній відстані лінзи  $f=110$  мм (похилені прямі на номограмі) визначаємо величину зміщення поверхні деталі щодо фокальної площини фокуруючої лінзи  $\Delta f=37$  мм (рис. 9.3).

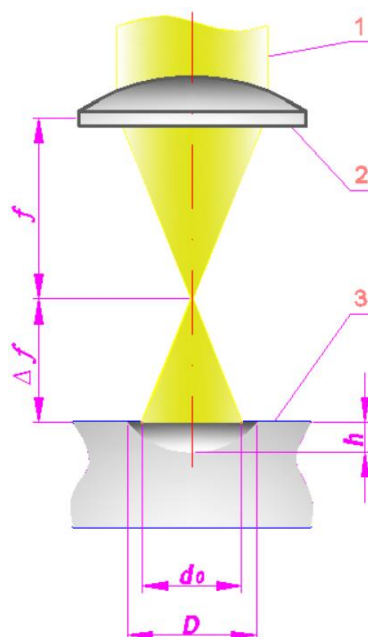


Рис. 9.3. Схема фокусування проміння: 1 – лазерний пучок; 2 – лінза; 3 – заготовка

Визначені за номограмою значення вносимо у таблицю:

| Варіант | Сталь | $h$ , мкм | $W_E$ , Дж/мм <sup>2</sup> | $E$ , Дж | $d_0$ , мм | $f$ , мм | $\Delta f$ , мм |
|---------|-------|-----------|----------------------------|----------|------------|----------|-----------------|
| XX      | X12M  | 70        | 2,25                       | 35       | 4,6        | 110      | 37              |

#### 9.1.4. Вибір режимів зміцнення при безперервному опроміненні

При використанні безперервного лазерного опромінення можливості процесу зміцнення значно розширюються. І насамперед значно підвищується продуктивність обробки, що дозволяє піддавати операції зміцнення ділянки значних розмірів як малих, так й великогабаритних деталей. Технологічні характеристики, як і у разі обробки імпульсним промінням, залежать від схем обробки, властивостей оброблюваного матеріалу, енергетичних параметрів проміння, швидкості обробки тощо.

Для вибору оптимальних режимів зміцнення інструментальних сталей можна скористатися номограмами, побудованими на підставі експериментальних даних (рис. 9.4). Вихідними даними для номограм є необхідні мікротвердість та глибина зміцненого шару. У номограмі використовується енергетичний параметр – густина енергії проміння  $W_E = W_P t = W_P d_0 / V$ , де  $d_0$  – діаметр плями фокусування;  $t$  – тривалість впливу проміння;  $V$  – швидкість переміщення лазерного пучка.

За залежностями  $h = f(W_E)$  або  $H_\mu = f(W_E)$  встановлюється густина енергії проміння, що відповідає заданим  $h$  або  $H_\mu$ . Залежно від можливостей технологічного обладнання та з урахуванням забезпечення максимальної продуктивності вибирається потужність проміння, діаметр плями фокусування та визначається густина потужності проміння, що досягається за цих умов. За встановленими  $W_E$  та  $W_P$  визначається тривалість впливу проміння  $t$ . За діаметром плями фокусування  $d_0$  та тривалістю впливу проміння  $t$  визначається швидкість  $V$  переміщення променя відносно оброблюваної поверхні.

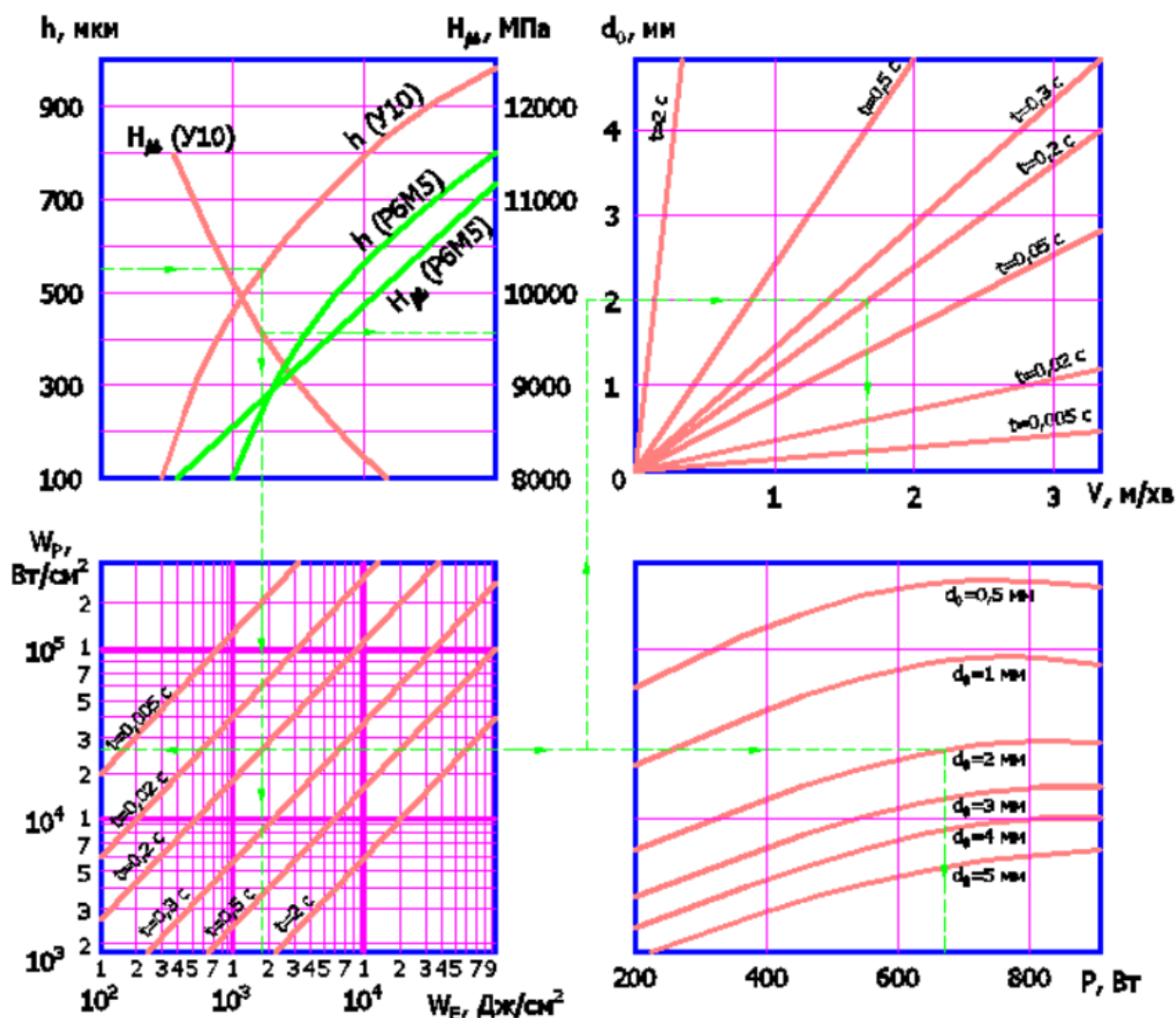


Рис. 9.4. Номограма для вибору режимів зміцнення безперервним опроміненням

**Розглянемо приклад 2 (зміцнення безперервним опроміненням).** Так, оптимальні режими лазерного зміцнення сталі У10 за вихідними даними (марка сталі та глибина зміцненого шару  $h=580$  мкм) визначаються наступним чином.

1. Верхня ліва номограма: За густиною зміцненого шару знаходимо мікротвердість поверхневого шару матеріалу (за пунктирною лінією)  $H_\mu=9400$  МПа.

2. Нижня ліва номограма: Обираємо тривалість впливу на матеріал  $t=0,5$  с, це середнє можливе значення. Визначаємо потрібні густина енергії  $W_E=2 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>2</sup> та густина потужності  $W_P=6 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>.

3. Нижня права номограма: Діаметр пучка на оброблюваній поверхні може знаходитись в межах 2...5 мм. Обираємо найбільше значення для

більшої продуктивності обробки:  $d_0=5$  мм. Тоді потужність лазерного пучка становитиме  $P=800$  Вт.

4. Верхня права номограма: За діаметром пучка  $d_0=5$  мм та тривалістю впливу на матеріал  $t=0,5$  с визначаємо швидкість переміщення лазерного пучка по оброблюваній поверхні  $V=0,8$  м/хв.

Визначені за номограмами значення вносимо у таблицю:

| Варіант | Сталь | $h$ ,<br>мкм | $H_\mu$ ,<br>МПа | $P$ ,<br>Вт | $d_0$ ,<br>мм | $W_E$ ,<br>Дж/мм <sup>2</sup> | $W_P$ ,<br>Вт/мм <sup>2</sup> | $t$ ,<br>с | $V$ ,<br>м/хв |
|---------|-------|--------------|------------------|-------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|
| XX      | У10   | 580          | 9400             | 800         | 5             | $2 \cdot 10^3$                | $6 \cdot 10^3$                | 0,5        | 0,8           |

Розглянуті номограми придатні для вирішення зворотного завдання: за заданими енергетичними параметрами проміння та швидкості обробки визначити глибину та твердість зміцненого шару. Для визначення продуктивності можна користуватися залежностями, побудованими на підставі експериментальних даних для конкретного матеріалу, задаючись необхідною глибиною зміцнення, діаметром фокусування пучка та доступним рівнем потужності проміння.

## 9.2. Порядок виконання роботи

1. Вибрати свій варіант з табл. 9.6.
2. Для заданої глибини зміцненого шару  $h$  за номограмою (рис. 9.2) визначити режими зміцнення при імпульсному опроміненні (завдання 1):  $W_E$ ,  $E$ ,  $d_0$ ,  $f$ ,  $\Delta f$  та отримані значення записати у табл. 9.7.
3. Для заданої глибини зміцненого шару  $h$  за номограмою (рис. 9.4) визначити режими зміцнення безперервним опроміненням (завдання 2):  $H_\mu$ ,  $P$ ,  $d_0$ ,  $W_E$ ,  $W_P$  та отримані значення записати у табл. 9.8.
4. Користуючись отриманими даними режимів зміцнення при імпульсному опроміненні з табл. 9.7, провести зміцнення зразків зі сталей У8, 9ХС, ХВГ, Х12М, Р6М5.

Таблиця 9.6.

## Індивідуальні завдання

| Завдання 1 |       |           | Завдання 2 |       |           |
|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|
| Варіант    | Сталь | $h$ , мкм | Варіант    | Сталь | $h$ , мкм |
| 1          | У8    | 120       | 1          | Р6М5  | 750       |
| 2          | У8    | 100       | 2          | Р6М5  | 720       |
| 3          | У8    | 110       | 3          | Р6М5  | 680       |
| 4          | 9ХС   | 100       | 4          | Р6М5  | 640       |
| 5          | 9ХС   | 90        | 5          | Р6М5  | 620       |
| 6          | 9ХС   | 80        | 6          | Р6М5  | 540       |
| 7          | ХВГ   | 90        | 7          | Р6М5  | 500       |
| 8          | ХВГ   | 100       | 8          | Р6М5  | 480       |
| 9          | ХВГ   | 70        | 9          | У10   | 750       |
| 10         | Х12М  | 70        | 10         | У10   | 720       |
| 11         | Х12М  | 80        | 11         | У10   | 680       |
| 12         | Х12М  | 100       | 12         | У10   | 640       |
| 13         | Р6М5  | 60        | 13         | У10   | 620       |
| 14         | Р6М5  | 70        | 14         | У10   | 540       |
| 15         | Р6М5  | 90        | 15         | У10   | 500       |
| 16         | Р6М5  | 80        | 16         | У10   | 480       |

Таблиця 9.7.

## Режими зміцнення при імпульсному опроміненні

| Варіант | Сталь | $h$ , мкм | $W_E$ , Дж/мм <sup>2</sup> | $E$ , Дж | $d_0$ , мм | $f$ , мм | $\Delta f$ , мм |
|---------|-------|-----------|----------------------------|----------|------------|----------|-----------------|
|         |       |           |                            |          |            |          |                 |

Таблиця 9.8.

## Режими зміцнення при безперервному опроміненні

| Варіант | Сталь | $h$ , мкм | $H_\mu$ , МПа | $P$ , Вт | $d_0$ , мм | $W_E$ , Дж/мм <sup>2</sup> | $W_P$ , Вт/мм <sup>2</sup> | $t$ , с | $V$ , м/хв |
|---------|-------|-----------|---------------|----------|------------|----------------------------|----------------------------|---------|------------|
|         |       |           |               |          |            |                            |                            |         |            |

Таблиця 9.9.

## Експериментальні дані

| № експерименту                   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Енергія у імпульсі, $E$ , Дж     |   |   |   |   |   |   |
| Ширина зони зміцнення, $D$ , мм  |   |   |   |   |   |   |
| Глибина зони зміцнення, $h$ , мм |   |   |   |   |   |   |

5. Використовуючи заздалегідь підготовлені шліфи (рис. 9.5), визначити глибину зміцненого шару для різних розмірів плям гартування та енергії  $E$ . Отримані дані занести у табл. 9.9 та побудувати графіки  $h=f(D)$ ,  $h=f(E)$ .

6. Зробити висновки з лабораторної роботи згідно з отриманими результатами розрахунків та експерименту.

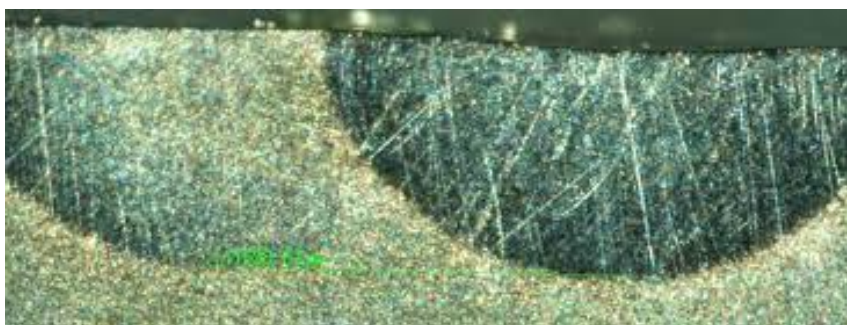


Рис. 9.5. Результат лазерного зміцнення сталевий заготовки, на якому видно зони термічного впливу лазерного проміння зі зміненими властивостями матеріалу

### 9.3. Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. За індивідуальним завданням (табл. 9.6) та номограмами (рис. 9.2) визначити режими зміцнення при імпульсному опроміненні (завдання 1). Заповнити табл. 9.7.
3. За індивідуальним завданням (табл. 9.6) за номограмами (рис. 9.4) визначити режими зміцнення безперервним опроміненням (завдання 2). Заповнити табл. 9.8.
4. Заповнити табл. 9.9 та побудувати графіки  $h=f(D)$ ,  $h=f(E)$ .
5. Зробити висновки згідно з отриманими результатами.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 9

1. Якими процесами обумовлено зміцнення металевих сплавів при впливі лазерного проміння?

2. Відсутність яких небажаних явищ відрізняє лазерне зміцнення від інших видів термічного зміцнення?
3. Які умови передбачає лазерне зміцнення без фазового перетворення?
4. Яку основну перевагу має лазерне зміцнення з фазовим перетворенням?
5. Що утворюється на оброблюваній поверхні заготовки при лазерному легуванні у спеціальному середовищі?
6. Що наноситься на поверхню оброблюваного матеріалу при лазерному наплавленні (напиленні)?
7. Яка основна особливість процесу аморфізації поверхні під впливом лазерного опромінення?
8. З якою метою проводиться аморфізація поверхні металів під впливом лазерного опромінення?
9. Що відбувається при шоківому зміцненні матеріалів під впливом потужного імпульсу проміння наносекундної тривалості?
10. Що називають коефіцієнтом перекриття при лазерному зміцненні поверхонь заготовок?
11. Яку товщину зміцненого шару можна отримати на оброблюваній заготовці в залежності від густини потужності лазерного проміння?
12. Як необхідно змінювати параметри лазерної обробки для збільшення товщини зміцненого поверхневого шару оброблюваної заготовки?
13. Які зони розрізняють у приповерхневих шарах заготовок, що піддавались лазерному зміцненню?
14. Які матеріали ефективно зміцнюються лазерним промінням?
15. Як впливає лазерне зміцнення на зносостійкість сталі?
16. Який вид лазерного зміцнення слід провести після остаточної обробки деталі у розмір?

17. Які параметри слід відносити до технологічних характеристик зміцненої поверхні?

18. Які характеристики визначають густину потужності лазерного проміння?

19. Яку енергію називають критичною при лазерному зміцненні?

20. Який коефіцієнт перекриття плям гартування зазвичай застосовують для лазерного зміцнення подовжених кромek інструмента та деталей технологічного оснащення задля отримання однакової глибини зміцненої зони практично по всій довжині?

21. Яку методику можна застосовувати для визначення режимів лазерного зміцнення інструментальних сталей за заданою глибиною зміцненого шару?

## Лабораторна робота № 10.

### Визначення основних енергетичних та технологічних параметрів електронно-променевої обробки матеріалів

**Мета роботи:** вивчити сутність процесу електронно-променевої обробки (ЕПО) матеріалів; ознайомитись з технологічним обладнанням; визначити основні енергетичні та технологічні параметри процесу електронно-променевої обробки.

#### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Електронно-променева установка.
2. Модель електронної гармати.
3. Зразки деталей, які оброблено електронним променем.

#### 10.1. Короткі теоретичні відомості

Початок робіт з використання електронного променя для розмірної обробки матеріалів відноситься до 1959...1960 рр. В цей час були створені перші верстати для виготовлення діафрагм для електронних мікроскопів та для фрезерування електронним пучком.

##### 10.1.1. Механізм руйнування матеріалу

Під час дії на матеріал електронного пучка електрони проникають на деяку глибину  $h$  [мкм], яка порівняно невелика та залежить від напруги прискорення  $U$ , [кВ], та густини матеріалу  $\rho$ , [г/см<sup>3</sup>]

$$h = 2,1 \cdot 10^{-2} \frac{U^2}{\rho} . \quad (10.1)$$

При напрузі прискорення 50 кВ глибина пробігу електронів дорівнює: алюміній – 19,4 мкм; вольфрам – 2,7 мкм; мідь – 5,9 мкм; сталь – 6,8 мкм; титан – 11,7 мкм.

Таблиця 10.1

## Властивості оброблюваних металів

| №<br>п/п | Оброблюваний<br>матеріал | Густина<br>матеріалу,<br>$\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Питома теплота<br>випаровування,<br>$L_v$ , кДж/кг | Коефіцієнт<br>температуро-<br>провідності, $a$ ,<br>м <sup>2</sup> /с |
|----------|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1        | магній                   | 1,8                                                 | 5610                                               | $0,144 \times 10^{-6}$                                                |
| 2        | алюміній                 | 2,7                                                 | 10800                                              | $0,209 \times 10^{-6}$                                                |
| 3        | цинк                     | 7,14                                                | 1780                                               | $0,113 \times 10^{-6}$                                                |
| 4        | сталь                    | 7,8                                                 | 6070                                               | $0,0733 \times 10^{-6}$                                               |
| 5        | нікель                   | 8,9                                                 | 6361                                               | $0,093 \times 10^{-6}$                                                |
| 6        | мідь                     | 8,93                                                | 4770                                               | $0,395 \times 10^{-6}$                                                |
| 7        | вольфрам                 | 19,25                                               | 4020                                               | $0,166 \times 10^{-6}$                                                |
| 8        | титан                    | 4,54                                                | 8800                                               | $0,173 \times 10^{-6}$                                                |

При проникненні електронів 1 у матеріал 2 їх рух поступово гальмується внаслідок взаємодії з електронами 3 та ядрами 4 атомів речовини (рис. 10.1). Більша частина енергії електронів перетворюється у теплову (внутрішню енергію речовини). Частина енергії перетворюється у світлове 5 та рентгенівське 6 проміння [2].

При падінні електронного пучка достатньої потужності на поверхню матеріалу утворюється лунка-кратер відповідної глибини. Глибина лунки у багато разів перевищує глибину проникнення електронів тому, що відбувається плавлення та випаровування матеріалу за рахунок виділеного тепла.

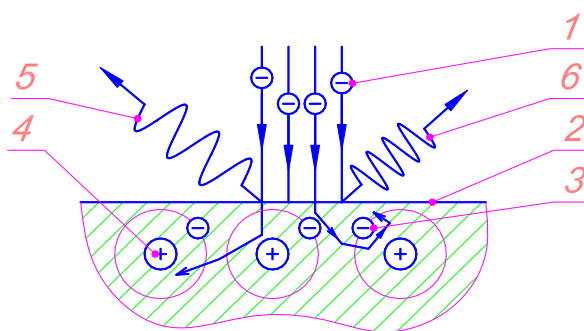


Рис. 10.1. Механізм руйнування матеріалу при електронно-променевій обробці

### 10.1.2. Формування електронного пучка

Для отримання електронного пучка та керування ним використовують спеціальний пристрій – електронну гармату (рис. 10.2).

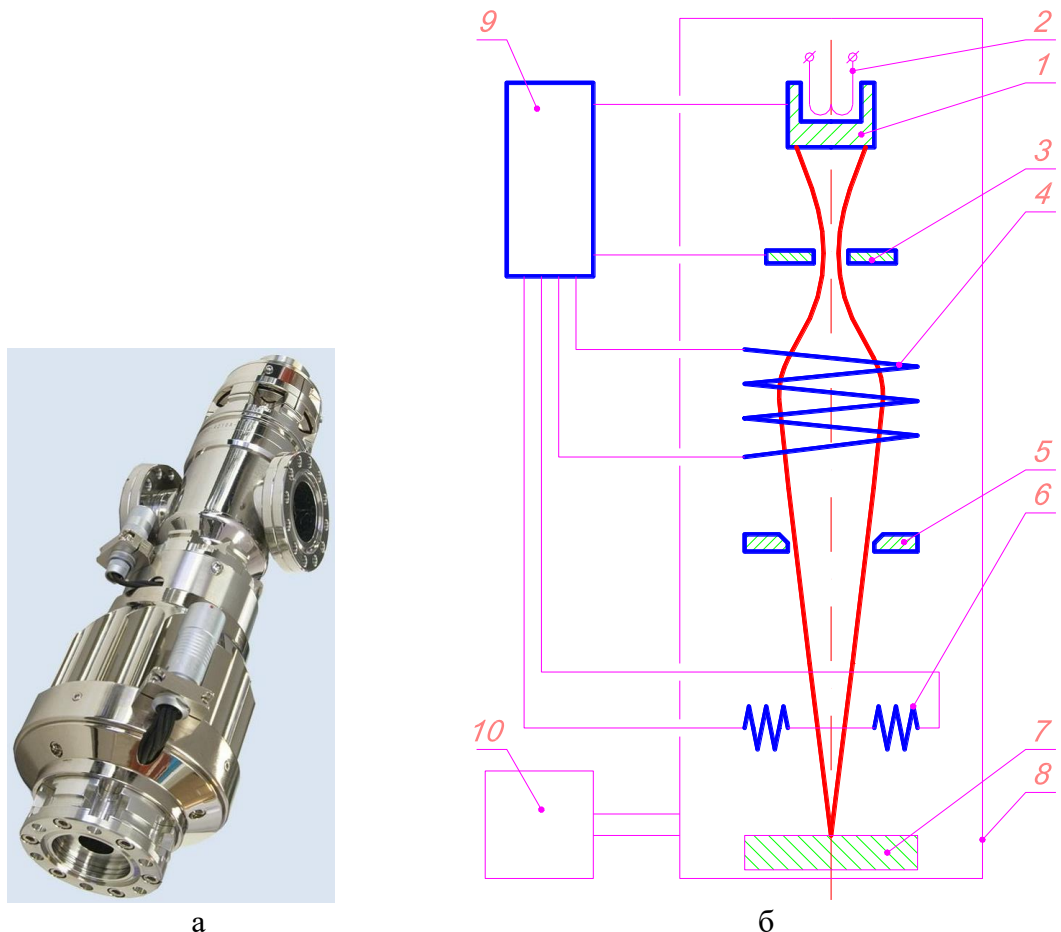


Рис. 10.2. Електронна гармата: а) загальний вигляд; б) схема принципова:  
1 – термоемісійний катод; 2 – нагрівальний елемент; 3 – анод з отвором;  
4 – магнітна лінза; 5 – діафрагма; 6 – система відхилення; 7 – заготовка;  
8 – робоча камера; 9 – блок живлення; 10 – система вакуумних насосів

Джерелом електронів у електронній гарматі зазвичай є термоемісійний катод 1 з вольфраму, танталу або гексабориду лантану. Його робоча температура становить 1600...2800 °С. Задля покращання електронної емісії підігрів катоду відбувається за допомогою підігрівного елемента 2. На деякій відстані від катоду знаходиться анод 3, виконаний у вигляді масивної деталі з отвором. Між катодом та анодом від високовольтного джерела живлення, який входить до складу блоку живлення 9, прикладається напруга прискорення  $U=30\ldots150$  кВ. Електрони у електричному полі з такою

напругою набувають значної кінетичної енергії [Дж]

$$E_e = m \cdot \frac{V^2}{2} = eU, \quad (10.2)$$

де  $m$  та  $e$  – маса та заряд електрона, ( $m=9,109 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e=1,602177 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $V$  – швидкість електронів [м/с];  $U$  – напруга прискорення, що діє на електрони між катодом та анодом [В].

Швидкість електронів  $V$  у результаті прискорення визначається як [м/с]

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2E_e}{m}}. \quad (10.3)$$

Енергія електронів становить порядку  $10^{-14} \dots 10^{-15}$  Дж, а швидкість  $10^6 \dots 10^7$  м/с й вище.

Для фокусування пучка електронів у електронній гарматі зазвичай використовують систему діафрагм 5 та магнітних лінз 4. Магнітна лінза 4 являє собою соленоїд з магнітопроводом, вона утворює спеціальної форми магнітне поле, що зміщує електрони до осі системи. Діафрагма 5 відсікає крайові електрони та пропускає центральну монокінетичну частину електронів.

Потужність електронного променя  $P_n$  [Вт] визначається як

$$P_n = IU, \quad (10.4)$$

де  $I$  – сила струму у промені, А. Сила струму в промені зазвичай становить 0,2...1 А.

Система відхилення 6 слугує для переміщення пучка по оброблюваній поверхні заготовки 7, складається з чотирьох електромагнітних котушок та відхиляє пучок у двох взаємно перпендикулярних осях.

Густина потужності  $W_n$  [Вт/см<sup>2</sup>] на оброблюваній поверхні заготовки дорівнює

$$W_n = \frac{P_n}{S_n}, \quad (10.5)$$

де  $S_{\pi}$  – площа, на яку потрапляє електронний пучок на поверхні заготовки,  $\text{см}^2$ . Зазвичай пучок на оброблюваній поверхні має форму кола, тому

$$S_{\pi} = \pi \frac{d_n^2}{4}.$$

Діаметр електронного пучка на оброблюваній поверхні зазвичай

становить 0,5...500 мкм. Для проведення розмірної обробки електронним променем (прошивання отворів та виготовлення пазів) потрібна густина потужності від  $10^7 \text{ Вт/см}^2$ .

Електронний пучок формується у вакуумі, тому всі перераховані вузли розміщено у робочій камері 8. Для створення тиску, що має не перевищувати  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ Па}$ , використовують систему насосів 10.

При обробці матеріалів з видаленням матеріалу заготовки доцільно застосовувати імпульсний режим подачі електронного пучка. Тривалість паузи між імпульсами вибирається такою, щоб продукти ерозії матеріалу заготовки встигали евакуюватися із зони обробки і промінь не поглинався та не розсіювався на них. Застосування такого режиму дозволяє на заготовках з корозійностійкої сталі одержувати отвори глибиною до 60 мм та діаметром до 2 мм.

Тривалість імпульсу  $\tau_i$  [с] визначають з умови

$$\tau_i \leq \frac{\rho h L_b}{W_{\pi}}, \quad (10.6)$$

де  $L_b$  – питома енергія вибухового закипання матеріалу заготовки, що чисельно дорівнює питомій теплоті випаровування. Зазвичай використовують тривалість імпульсів від 1 мкс до 10 мс при частоті слідування від кількох Гц до 10 кГц.

Оптимальну величину шпаруватості  $Q = \frac{T}{\tau_i}$  ( $T$  – період слідування імпульсів) імпульсного режиму обирають в межах

$$10 = Q_{\min} < Q < Q_{\max} = \frac{d_{\pi}^2}{a\tau_i}, \quad (10.7)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності матеріалу заготовки.

Швидкість переміщення електронного пучка по поверхні оброблюваної заготовки  $V_o$  [м/с] у імпульсному режимі

$$V_o = \frac{d_{\pi}(1-k)}{T}, \quad (10.8)$$

де  $k$  – коефіцієнт перекриття точок впливу електронного пучка (зазвичай приймають у діапазоні 0,5...0,9).

Найбільшого поширення, окрім електронно-променевого зварювання, набула електронно-променева розмірна обробка – отримання отворів фігурної або циліндричної форми діаметром 2...500 мкм, тонких пазів, щілин, прорізів розмірами від кількох десятків мікрометрів у матеріалах малої товщини (плівка, фольга), для розрізання матеріалів (напівпровідників, феритів, надчистих матеріалів тощо), особливо коли до поверхонь різку висуваються високі вимоги. Зазвичай виконують розмірну обробку тонких металевих заготовок, глибина обробки яких не перевищує 0,5...1 мм. Також оброблюють діелектричні матеріали на глибину 2...5 мм.

Точність ЕПО знаходиться у межах 8...11 квалітетів, а шорсткість обробленої поверхні становить  $Rz=20...3$  мкм та залежить від діаметра пучка, тривалості імпульсів, потужності пучка та теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. У промисловості ЕПО застосовується для виготовлення деталей з кількістю отворів від кількох тисяч до кількох мільйонів (виготовлення отворів у кварцових пластинах мікроелектронних схем).

Для забезпечення високої якості обробки необхідно забезпечувати точне наведення електронного пучка на оброблювану поверхню, тому зазвичай використовують спеціальні оптичні системи для візуалізації та спостереження за процесом обробки.

### 10.1.3. Технологічні особливості електронно-променевої обробки

Головними перевагами ЕПО можна вважати:

- 1) плавне регулювання питомої енергії у зоні нагріву за рахунок фокусування пучка;
- 2) великий діапазон регулювання потужності (від десятків ват до мегават) у пучку;
- 3) порівняно просте керування просторовим положенням пучка та можливість його модулювання;
- 4) наявність вакууму як робочого середовища;
- 5) можливість отримання малорозмірної (прецизійної) зони впливу електронного пучка на оброблюваний матеріал.

### 10.1.4. Типові операції електронно-променевої обробки

Всі основні технологічні операції електронно-променевої обробки можна умовно розділити на три групи:

- плавлення (локальний переплав, плавка у вакуумі, зварювання);
- випаровування (випаровування у вакуумі, розмірна обробка);
- термообробка (без змінення агрегатного стану речовини).

**1. Локальний переплав** – під час даної операції виникають надзвичайно високі швидкості кристалізації металу у зоні плавлення. Утворені при цьому структури значно відрізняються від отриманих у звичайних умовах: розширюються межі розчинення для твердих розчинів, подрібнюється мікроструктура, значно підвищується пластичність та твердість.

**2. Плавлення** використовується для отримання особливо чистих металів, у тому числі хімічно активних. Найбільш повно відбувається дегазація, відгонка летючих домішок. Особливу роль у досягненні цієї мети відіграє вакуум.

**3. Зварювання** здійснюється з глибоким проплавленням з'єднуваних заготовок. Проплавлення такого типу називають кинджальним (рис. 10. 3),

яке дозволяє за один прохід зварювати без попередньої підготовки крайок заготовки товщиною від 100 до 300 мм. Вакуум як захисне середовище дозволяє отримувати набагато вищі характеристики властивостей зварного шва, ніж при зварюванні у захисних газах. Малий об'єм ванни дозволяє знизити деформацію зварних виробів.

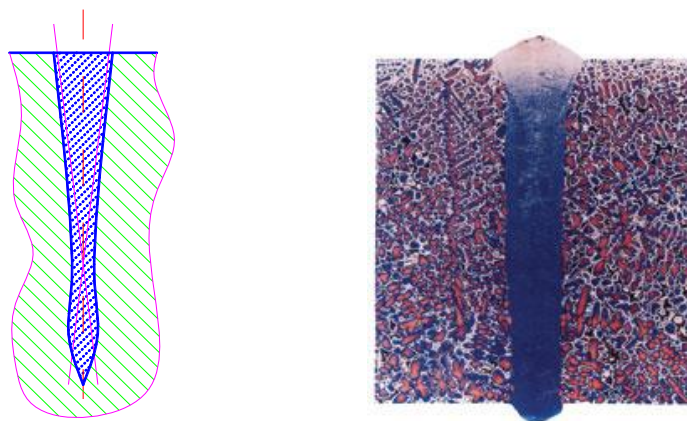


Рис. 10.3. Вигляд «кинджального» проплавлення зварного шва

**4. Випаровування матеріалів** широко використовується для отримання тонких плівок матеріалу та покриттів високої чистоти. Керування пучком у просторі та часі дозволяє точно регулювати швидкість випаровування та розподілення густини потоку пару. Покращуються адгезійні властивості осаджених плівок.

**5. Розмірна ЕПО** для виготовляються глухих або наскрізних отворів заданих розмірів та контуру на заготовці з визначеними допусками на їх розміри (рис. 10.4).

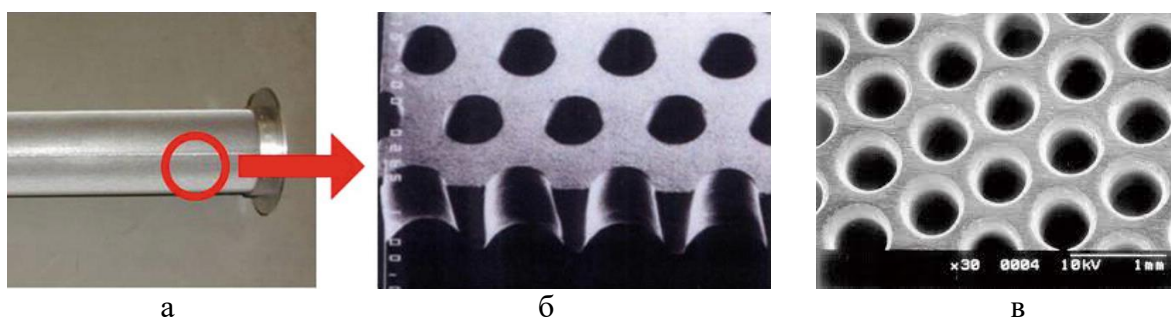


Рис. 10.4. Виготовлення отворів: а) корпус фільтра; б) отвори у бічній стінці; в) отвори у металевій пластині

**6. Термообробка** з локальним нагріванням оброблюваних ділянок поверхні заготовки з метою отримання структурних перетворень матеріалу (гартування) або для відпалу у вакуумі листових матеріалів.

**7. 3D-друк** використовується для виготовлення моделей та готових деталей спіканням частинок матеріалу із застосуванням енергії електронного пучка (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Виготовлення деталей застосуванням адитивної технології: а) серійний верстат **Spectra H** фірми **Arcam** (США); б) виготовлені деталі

### 10.1.5. Обладнання для ЕПО

Кожний верстат складається з двох комплексів (рис. 10.4):

1) електромеханічний комплекс (призначений для виконання операцій, не пов'язаних безпосередньо з формуванням електронного пучка, керуванням його інтенсивністю та положенням):

- робоча камера;
- вакуумна система;
- система позиціонування та переміщення заготовки;
- система спостереження за ходом протікання процесу;
- система захисту оператора від рентгенівського проміння;
- ряд допоміжних пристроїв та механізмів;

2) енергетичний комплекс (апаратура для формування потоку електронів та керування його параметрами та положенням відносно оброблюваної заготовки):

- електронна гармата з блоком живлення;
- система керування пучком.

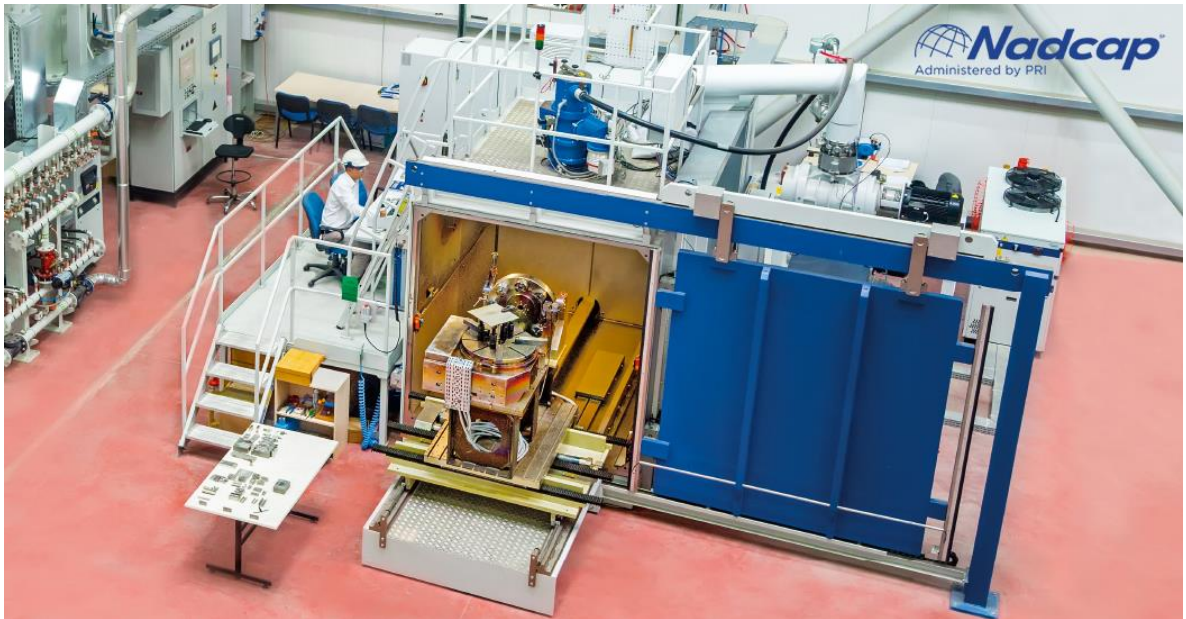


Рис. 10.4. Технологічний комплекс для електронно-променевої обробки

## 10.2. Порядок проведення роботи

1. Вивчити фізичну сутність електронно-променевої обробки та принцип роботи електронної гармати.
2. Згідно індивідуального завдання (табл. 10.2) для заданого матеріалу заготовки, розрахувати глибину  $h$  проникнення електронів у матеріал заготовки (формула 10.1) при різних напрузі прискорення  $U=25; 50; 75; 100; 125; 150$  кВ, занести результати у табл. 10.3 та побудувати графік залежності  $h=f(U)$ .
3. Визначити основні характеристики електронного променя, що утворюється у електронній гарматі, а саме:
  - а) кінетичну енергію електронів (формула 10.2);
  - б) швидкість електронів на виході з гармати (формула 10.3).

Таблиця 10.2.

## Варіанти індивідуальних завдань

| №<br>варіанта | Оброблюваний<br>матеріал | $U$ , кВ | $I$ , А | $d_{\text{п}}$ , мкм | $k$ |
|---------------|--------------------------|----------|---------|----------------------|-----|
| 1             | магній                   | 30       | 1       | 20                   | 0,5 |
| 2             | алюміній                 | 60       | 0,9     | 40                   | 0,6 |
| 3             | цинк                     | 90       | 0,8     | 60                   | 0,7 |
| 4             | сталь                    | 120      | 0,7     | 80                   | 0,8 |
| 5             | нікель                   | 150      | 0,6     | 100                  | 0,9 |
| 6             | мідь                     | 30       | 0,5     | 120                  | 0,5 |
| 7             | вольфрам                 | 60       | 0,4     | 140                  | 0,6 |
| 8             | магній                   | 90       | 0,3     | 160                  | 0,7 |
| 9             | алюміній                 | 120      | 0,2     | 180                  | 0,8 |
| 10            | цинк                     | 150      | 1       | 200                  | 0,9 |
| 11            | сталь                    | 30       | 0,9     | 220                  | 0,5 |
| 12            | нікель                   | 60       | 0,8     | 240                  | 0,6 |
| 13            | мідь                     | 90       | 0,7     | 260                  | 0,7 |
| 14            | вольфрам                 | 120      | 0,6     | 280                  | 0,8 |
| 15            | магній                   | 150      | 0,5     | 300                  | 0,9 |
| 16            | алюміній                 | 30       | 0,4     | 320                  | 0,5 |
| 17            | цинк                     | 60       | 0,3     | 340                  | 0,6 |
| 18            | сталь                    | 90       | 0,2     | 360                  | 0,7 |
| 19            | нікель                   | 120      | 1       | 380                  | 0,8 |
| 20            | мідь                     | 150      | 0,9     | 400                  | 0,9 |
| 21            | вольфрам                 | 30       | 0,8     | 420                  | 0,5 |
| 22            | магній                   | 60       | 0,7     | 440                  | 0,6 |
| 23            | алюміній                 | 90       | 0,6     | 460                  | 0,7 |
| 24            | цинк                     | 120      | 0,5     | 480                  | 0,8 |
| 25            | сталь                    | 150      | 0,4     | 500                  | 0,9 |

Таблиця 10.3.

Визначення залежності глибини проникнення електронів в залежності від  
напруги прискорення

| Оброблюваний<br>матеріал | Глибина проникнення електронів всередину матеріалу, $h$ , мкм при<br>напрузі прискорення, $U$ , кВ |    |    |     |     |     |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
|                          | 25                                                                                                 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 |
|                          |                                                                                                    |    |    |     |     |     |

4. Визначити основні характеристики теплового джерела енергії на  
поверхні заготовки, а саме:

а) потужність електронного променя (формула 10.4);

б) густину потужності на оброблюваній поверхні заготовки (формула 10.5).

5. Визначити основні технологічні особливості електронно-променевої обробки:

а) тривалість імпульсу  $\tau_i$  (формула 10.6);

б) діапазон величини шпаруватості імпульсів (формула 10.7) та обрати,

як остаточне, середнє значення шпаруватості  $Q_c = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2}$ ;

в) період слідування імпульсів  $T = Q\tau_i$ ;

г) швидкість переміщення електронного пучка по поверхні оброблюваної заготовки при імпульсному режимі (формула 10.8).

6. Отримані результати розрахунків звести у табл. 10.4.

7. Ознайомитись із зразками деталей, що виготовлені з використанням ЕПО.

Таблиця 10.4.

Результати розрахунків параметрів теплового джерела енергії та  
технологічних параметрів ЕПО

| № з/п | Назва параметра                             | Позначення | Одиниця вимірювання | Величина |
|-------|---------------------------------------------|------------|---------------------|----------|
| 1     | Кінетична енергія електронів                | $E_e$      | Дж                  |          |
| 2     | Швидкість електронів на виході з гармати    | $V$        | м/с                 |          |
| 3     | Потужність електронного променя             | $P_n$      | Вт                  |          |
| 4     | Густина потужності на оброблюваній поверхні | $W_n$      | Вт/см <sup>2</sup>  |          |
| 5     | Тривалість імпульсу                         | $\tau_i$   | с                   |          |
| 6     | Діапазон шпаруватості імпульсів             | $Q$        | —                   |          |
| 7     | Обрана середня шпаруватість                 | $Q_c$      | —                   |          |
| 8     | Період слідування імпульсів                 | $T$        | с                   |          |
| 9     | Швидкість переміщення електронного пучка    | $V_o$      | м/с                 |          |

### 10.3. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Накреслити схему електронної гармати (рис. 10.2).
4. Результати розрахунків глибини проникнення електронів в залежності від напруги прискорення (табл. 10.3) та графік залежності  $h=f(U)$ .
5. Результати розрахунків параметрів теплового джерела енергії та технологічних параметрів ЕПО (табл. 10.4).
6. Висновки за результатами розрахунків.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 10

1. Як залежить глибина  $h$ , на яку проникають електрони від напруги прискорення  $U$  під час дії на матеріал електронного пучка?
2. У яку енергію перетворюється більша частина енергії електронів під час дії на матеріал електронного пучка?
3. Який спеціальний пристрій використовують для отримання електронного пучка та керування ним?
4. Що зазвичай є джерелом електронів у електронній гарматі?
5. На якій ділянці у електронній гарматі прикладається напруга прискорення від високовольтного джерела живлення?
6. Які компоненти електронної гармати зазвичай використовуються для фокусування пучка електронів?
7. Яку функцію виконує система відхилення електронної гармати?
8. З яких компонентів складається система відхилення електронної гармати?
9. Який діаметр зазвичай становить електронний пучок на оброблюваній поверхні заготовки при електронно-променевої обробці?
10. Чому при електронно-променевої обробці усі вузли електронної гармати розміщено у робочій камері?
11. Який тиск створюється у робочій камері при проведенні електронно-

променевої обробки?

12. Який режим обробки доцільно застосовувати при проведенні електронно-променевої обробки з видаленням матеріалу заготовки?

13. Яким чином підбирають тривалість пауз між імпульсами електронного пучка при проведенні електронно-променевої обробки?

14. У якому діапазоні зазвичай приймають коефіцієнт перекриття точок впливу електронного пучка при проведенні електронно-променевої обробки?

15. Які види електронно-променевої розмірної обробки набули найбільшого поширення, окрім зварювання?

16. Яка точність та шорсткість обробленої поверхні заготовки досягаються при електронно-променевої розмірній обробці?

17. Які параметри впливають на точність та шорсткість обробленої поверхні заготовки при електронно-променевої розмірній обробці?

18. З якою метою використовують спеціальні оптичні системи для візуалізації та спостереження процесу обробки при електронно-променевої розмірній обробці?

19. Які основні переваги електронно-променевої розмірної обробки?

20. На які групи можна умовно розділити усі основні технологічні операції електронно-променевої обробки?

21. Як за зовнішніми ознаками проплавлення називають зварювальні шви, що утворюються при електронно-променевому зварюванні?

22. Яку товщину заготовок дозволяє здійснювати електронно-променеве зварювання за один прохід без попереднього підготування крайок?

23. З яких двох комплексів складається верстат для електронно-променевої обробки?

24. З яких елементів складається енергетичний комплекс верстата для електронно-променевої обробки?

## Лабораторна робота № 11.

### Дослідження процесу плазмової обробки

**Мета роботи:** вивчити сутність процесу плазмової обробки матеріалів; визначити типові операції обробки; ознайомитись з технологічним обладнанням; визначити за індивідуальним варіантом режими обробки заготовки.

### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Установка повітряно-плазмового різання металів «Київ-4М».
2. Плазмотрон для повітряно-плазмового різання металів ВПР-15.
3. Зразки деталей, що виготовлено із застосуванням плазмового обладнання.

#### 11.1. Короткі теоретичні відомості

**Плазма** (від грец. *πλάσμα* – зображення, вигадка) – особливий стан речовини, у якому поряд з нейтральними та збудженими атомами присутні іонізовані атоми та електрони, це четвертий агрегатний стан речовини. Перехід речовини до іонізованого стану відбувається поступово: при 3000...5000 °С у газі з'являється незначна кількість заряджених частинок, при 30 000...50 000 °С відбувається повна іонізація газу. Слово **іонізований** означає, що від атому або молекули відокремлено принаймні один електрон [2].

Майже вся речовина у Всесвіті знаходиться у іонізованому стані – за масою близько 99,9 %. Всі зорі складаються з плазми, і навіть простір між ними заповнений плазмою, хоча і дуже розрідженою.

Враховуючи високу температуру плазми, зрозуміло, що вона здійснює тепловий вплив на матеріал оброблюваної заготовки. Під дією теплового потоку плазми матеріал нагрівається до температури плавлення та вище. Таким чином, плазмова обробка застосовується для змінення властивостей поверхні заготовки (поверхнева обробка) та для розмірної обробки – різання,

зварювання тощо.

### 11.1.1. Типові операції плазмової обробки

**1. Різання листового матеріалу.** Плазмове різання застосовується для автоматичного та ручного різання кольорових та чорних металів у діапазоні від 5 до 150 мм завтовшки (рис. 11.1). На поверхні отриманої крайки майже відсутня окалина. Ширина різку незначна у відношенні до товщини розрізуваного металу, поверхня різку гладка. Плазмове різання використовується також для розділення крайок під зварювання. Широко використовується у заготівельному виробництві для розділення листового металу. У автоматичному режимі плазмове різання можна проводити під шаром води, що значно зменшує екологічну небезпеку.



Рис. 11.1. Плазмове різання металевої заготовки

**2. Обробка щілин, пазів та отворів малих розмірів.** Зрозуміло, що для проведення таких операцій необхідно чітко дозувати подачу енергії плазми у зону обробки для отримання відповідних розмірів та точності виготовлення щілин, пазів та невеликих за розміром отворів.

**3. Наплавлення поверхневого шару матеріалу.** Використовується для нанесення на оброблювану заготовку поверхневого шару з метою покращення експлуатаційних характеристик деталей (рис. 11.2).

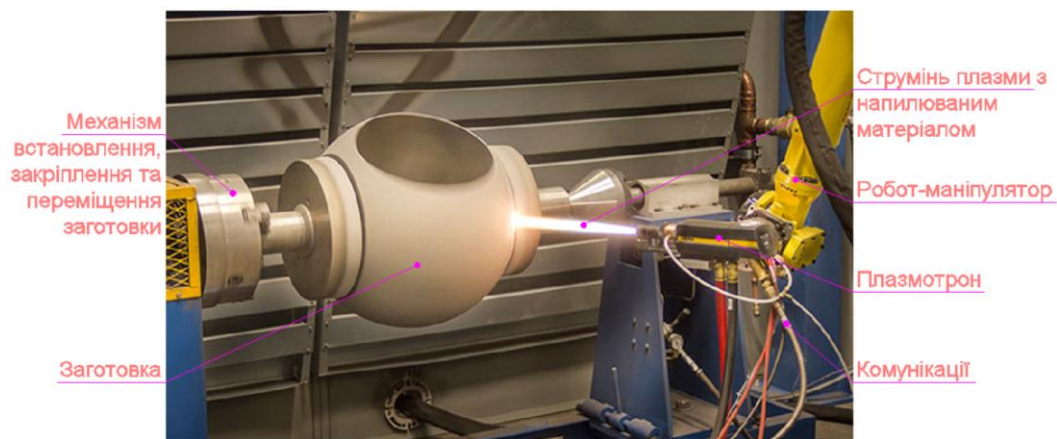


Рис. 11.2. Наплавлення у плазмовому струмені

Наприклад, наносяться зносостійкі покриття на колінчасті вали великовантажних автомобілів та тракторів. Термін експлуатації деталей збільшується на 80...100 %. Наносяться надтонкі (0,01...0,1 мкм) покриття на металеві та неметалеві основи. Нанесення металів та інтерметалідів (хімічна сполука двох або кількох металів, у якій атоми металів сполучені металічними зв'язками) на різноманітні підкладки без їх нагрівання (наприклад, мідь на графіт, ніхром на скло, мідь на нержавіючу сталь, цинк на кварц, інтерметаліди на основі нікелю на мідь).

**4. Попереднє нагрівання заготовки при обробці різанням.** При підвищенні температури поверхні заготовки сили різання значно знижуються. При нагріванні до  $500^{\circ}\text{C}$  сили різання знижуються у середньому на 24 %, а при  $800^{\circ}\text{C}$  – на 45 %. Використовується для обробки корозійностійких та жаростійких сталей, кобальтових та нікелевих сплавів.

**5. Видалення поверхневого шару із заготовки (строжка).** Плазмовий струмінь 2 замінює різець (рис. 11.3). Плазмотрон 1 розташовано поблизу поверхні оброблюваної заготовки 3, яку закріплено у механізмі обертання 4. "Плазмове точіння" використовується для важко оброблюваних матеріалів або для чорнової обдирки заготовок, видалення дефектів з поверхні (пригарів, неметалевих включень), розгортання тріщин під подальше заварювання.

**6. Гранулювання металу** – подрібнення металу зазвичай проводять розбризкуванням розплавленого металу 3 при швидкому обертанні тигля 4

(рис. 11.4). Струмінь плазми 2, що утворюється на виході з плазмотрона 1, розплавляє метал. Краплі рідкого металу 6 потрапляють на холодні стінки кристалізатора 5, відбувається їх кристалізація та у вигляді гранул зісковзують у бункер.

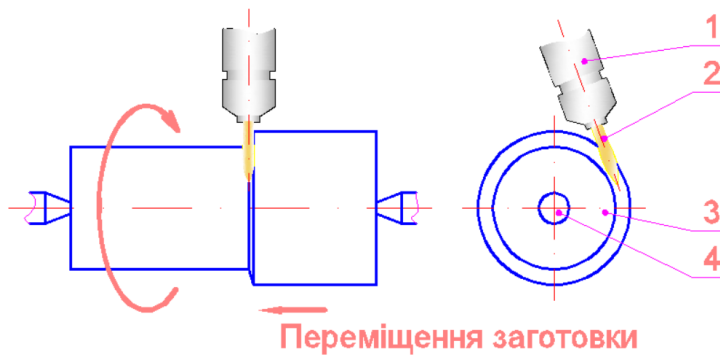


Рис. 11.3. Видалення поверхневого шару (строжка)

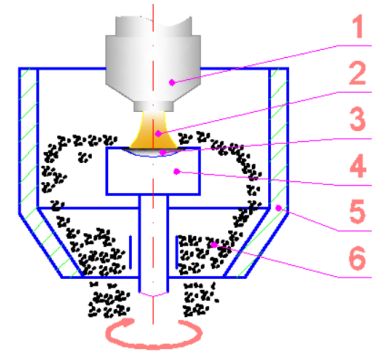


Рис. 11.4. Гранулювання металу

**7. Зварювання** – порівняно з електродуговим зварюванням даний метод має переваги:

- велика глибина проплавлення (до 20 мм за один прохід) (рис. 11.5, а);
- висока продуктивність;
- незначна зона термічного впливу;
- низька деформація виробу після зварювання (рис. 11.5, б);
- знижені витрати захисних газів;
- більш висока стабільність горіння дуги;
- менша залежність якості шва від змінення довжини дуги.



а

б

Рис. 11.5. Зварювання плазмовим струменем: а) форма струменя плазми; б) конфігурація зварного шва

**8. Плазмохімічний піроліз та спалювання рідких, твердих та газоподібних відходів.** Піроліз – розщеплення складних органічних сполук на простіші при високій температурі. Характерні реакції під час піролізу – розщеплення вуглець-вуглецевих зв'язків, дегідрогенізація, мономеризація, ізомеризація, конденсація. До піролізу належить коксування, крекінг тощо. Відповідно, плазмохімічний піроліз – процес руйнування хімічних зв'язків у речовинах під дією високої температури плазми, при цьому утворюються менш складні речовини, які простіше переробляти чи використовувати як вторинну сировину.

Тверді побутові відходи спалюють у плазмових печах. Токсичні відходи знищують у плазмових реакторах, у тому числі, продукти сільгоспхімії, військові матеріали (ракетне паливо, хімічна зброя тощо), промислові відходи, небезпечні медичні та біологічні відходи. Переробляються гумотехнічні вироби, у тому числі автомобільні покришки з отриманням вуглеводневої сировини.

**9. Виробництво наноматеріалів.** У плазмових реакторах виготовляються різноманітні наноматеріали розміром 10...200 нм. Отримуються нанопорошки методом переконденсації, наприклад, при барботажному продуванні високотемпературного газового струменю розплавів металів та їх сполук з неметалами.

### **11.1.2. Обладнання для плазмової обробки**

Склад обладнання для плазмового різання розглянемо на прикладі апарата для повітряно-плазмового різання А1612.УХЛ4 «Київ-4М» (рис. 11.6), що виготовлений дослідним заводом ІЕЗ ім. Є. О. Патона.

Апарат "Київ-4М" (табл. 11.1) призначений для повітряно-плазмового різання чорних, кольорових металів та їх сплавів товщиною до 90 мм. У якості робочого газу використовується стиснене повітря згідно ГОСТ 11882-73 з чистотою не нижче 10 класу за ГОСТ 17433-80. Для

охолодження плазмотрона застосовується вода за ГОСТ 2874-82. Апарат підключається до електричної мережі номінальною напругою 380 В частотою 50 Гц. Якість електроенергії визначається за ГОСТ 13109-67.

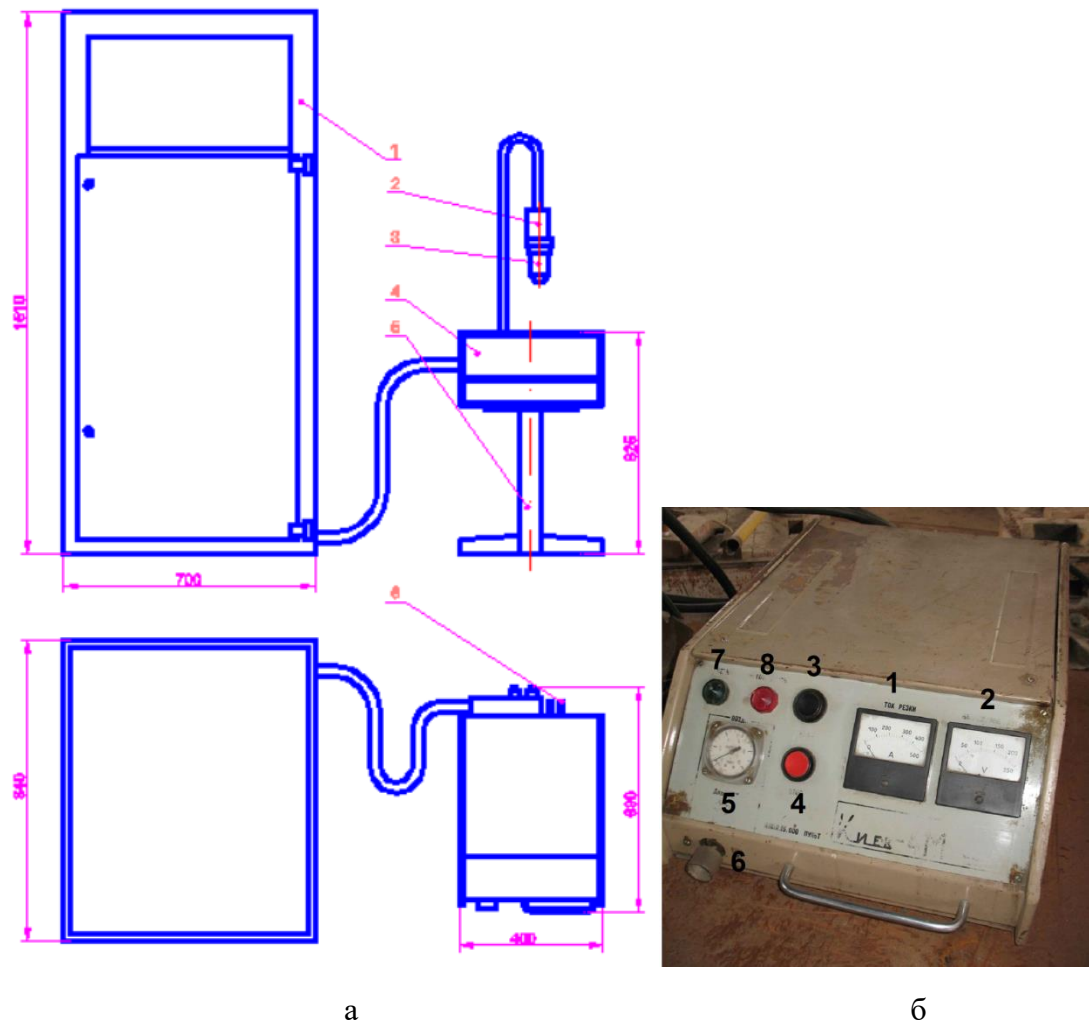


Рис. 11.6. Апарат повітряно-плазмового різання "Київ-4М": 1 – шафа силова; 2 – колектор; 3 – плазмотрон; 4 – пульт керування; 5 – підставка під пульт керування; 6 – штуцери для підведення та відведення охолоджувальної води

До складу апарата входять наступні вузли:

- джерело живлення, що знаходиться у силовій шафі 1;
- колектор 2, що забезпечує розподіл подачі всередину плазмотрона електричної енергії, плазмоутворюючого газу та охолоджувальної води;
- плазмотрон 3;
- пульт керування 4 з підставкою 5 для зручного розташування поблизу технологічного посту;

- система охолодження, яка забезпечує охолодження плазмотрону потоком води, що підводиться та відводиться через штуцери 6.

Пульт керування апаратом «Київ-4М» призначений для контролю та регулювання технологічних параметрів процесу плазмового різання та складається з наступних елементів (рис. 11.5, б):

- 1 – амперметр для контролю робочого струму в дузі;
- 2 – вольтметр для контролю робочої напруги;
- 3 – кнопка "Пуск" для включення процесу різання;
- 4 – кнопка "Стоп" для виключення процесу різання;
- 5 – манометр МТП-3 для контролю величини тиску плазмоутворюючого газу;
- 6 – регулятор витрат плазмоутворюючого газу (стисненого повітря);
- 7 – лампа для контролю подачі напруги;
- 8 – лампа сигналізації готовності до роботи.

Таблиця 11.1.

Основні технічні характеристики апарата для повітряно-плазмового різання  
"Київ-4М"

| Технічні характеристики                                                     | Одиниця вимірювання | Величина  |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
| 1                                                                           | 2                   | 3         |
| Номінальна напруга трифазної мережі живлення змінного струму частотою 50 Гц | В                   | 380       |
| Номінальний робочий струм                                                   | А                   | 315±15    |
| Тривалість вмикання, ТВ                                                     | %                   | 100       |
| Напруга холостого ходу                                                      | В                   | 200±10    |
| Робоча напруга, у межах                                                     | В                   | 130...200 |
| Ступені робочого струму                                                     | А                   |           |
| 1 ступінь                                                                   |                     | 100±5     |
| 2 ступінь                                                                   |                     | 200±10    |
| 3 ступінь                                                                   |                     | 315±15    |
| Стабільність робочого струму                                                | %                   | 7,5       |
| Потужність, не більше                                                       | кВА                 | 77        |
| Показники економічності енергоспоживання, не більше                         |                     | 0,77      |
| Коефіцієнт потужності, середній                                             |                     | 0,9       |

Продовження таблиці 11.1.

| 1                                                                                                           | 2                   | 3                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Витрати повітря у робочому режимі під тиском у мережі 0,5...0,6 МПа, у межах                                | м <sup>3</sup> /год | 2,5...3,0                     |
| Витрати охолоджувальної води у робочому режимі під тиском у мережі 0,25...0,4 МПа, у межах                  | м <sup>3</sup> /год | 0,3...0,5                     |
| Потужність плазмотрона, не менше                                                                            | кВт                 | 70                            |
| Товщина розрізуваних листових заготовок, не більше<br>високолегована сталь<br>алюміній<br>мідь              | мм                  | 90<br>80<br>60                |
| Рекомендований діапазон товщини розрізуваних листових заготовок<br>високолегована сталь<br>алюміній<br>мідь | мм                  | 10...60<br>10...70<br>10...50 |
| Питома маса, не більше                                                                                      | кг·м/год            | 7,0...8,6                     |
| Швидкість різання при товщині сталевих листа 20±1 мм                                                        | м/год               | 100...130                     |
| Габаритні розміри силової шафи, не більше<br>довжина<br>ширина<br>висота                                    | мм                  | 700<br>840<br>1550            |
| Маса апарата, не більше                                                                                     | кг                  | 830                           |
| Габаритні розміри пульта керування, не більше<br>ширина<br>висота                                           | мм                  | 400<br>625                    |
| Маса пульта керування, не більше                                                                            | кг                  | 30                            |
| Габаритні розміри плазмотрона з комунікаціями<br>довжина<br>діаметр                                         | мм                  | 8150<br>65                    |
| Маса плазмотрона з комунікаціями, не більше                                                                 | кг                  | 14,2                          |

### 11.1.3. Визначення режимів повітряно-плазмового різання

Повітряно-плазмове різання є найбільш розповсюдженим застосуванням плазмової технології для продуктивного та відносно якісного розкрою металів. Із застосуванням апарата для повітряно-плазмового різання «Київ-4М» (рис. 11.6, а) разом з плазмотроном ВПР-15 можна розрізати

різноманітні метали (табл. 11.1). Сила струму в дузі  $I_d$  регулюється ступінчасто та становить 100, 200 та 315 А (табл. 11.2) в залежності від матеріалу заготовки та його товщини. Для кожної сили струму застосовується сопло відповідного діаметру  $d_c$ .

Таблиця 11.2.

Параметри проведення операції повітряно-плазмового різання

| Матеріал заготовки   | Товщина,<br>$\delta$ , мм | Сила струму,<br>$I_d$ , А | Діаметр сопла,<br>$d_c$ , мм |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Сталь конструкційна  | 5...30                    | 100                       | 2                            |
|                      | 31...60                   | 200                       | 3                            |
|                      | 61...90                   | 315                       | 3,5                          |
| Сталь високолегована | 5...25                    | 100                       | 2                            |
|                      | 26...50                   | 200                       | 3                            |
|                      | 51...75                   | 315                       | 3,5                          |
| Алюміній             | 5...20                    | 100                       | 2                            |
|                      | 21...35                   | 200                       | 3                            |
|                      | 36...50                   | 315                       | 3,5                          |
| Мідь                 | 5...15                    | 100                       | 2                            |
|                      | 16...25                   | 200                       | 3                            |
|                      | 26...35                   | 315                       | 3,5                          |

Через те, що метали відрізняються за фізико-термічними властивостями, необхідно обирати регульовані режими різання, а саме: швидкість переміщення плазмотрона відносно оброблюваної деталі  $V_p$ , витрати плазмоутворюючого газу (стисненого повітря)  $Q_r$  тощо. Задля визначення цих технологічних параметрів можна користуватись табличними даними з довідників інженера-технолога, розраховувати за феноменологічними, математичними моделями або графіками, які отримано експериментально (рис. 11.7).

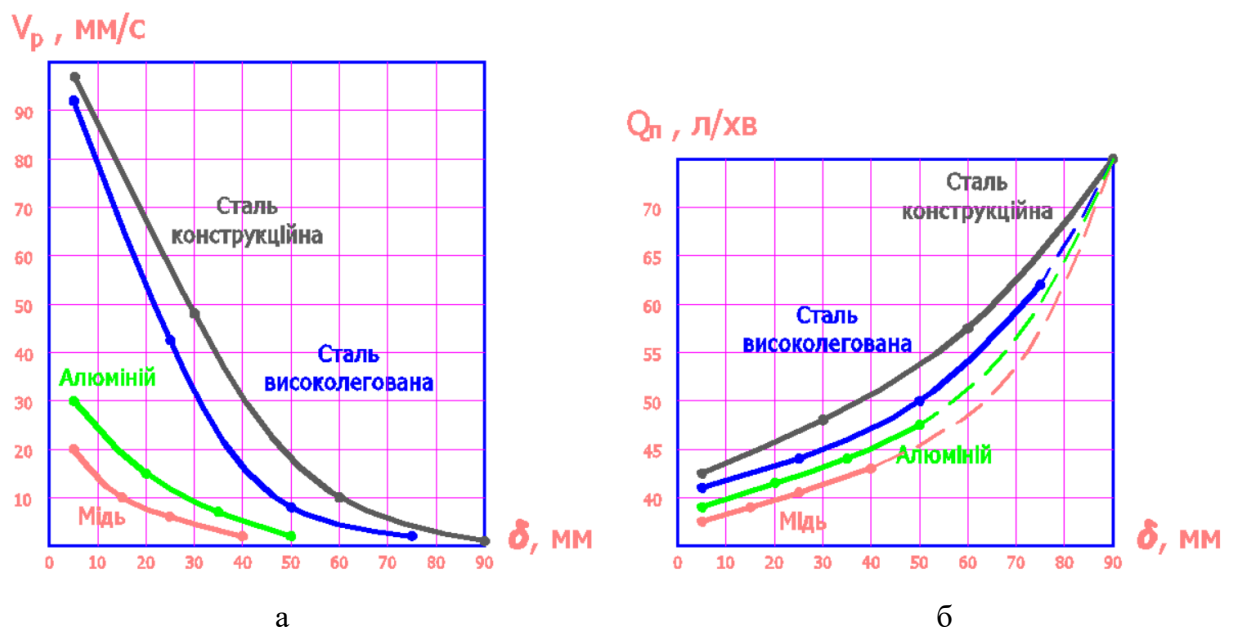


Рис. 11.7. Визначення регульованих параметрів технологічного процесу повітряно-плазмового різання із застосуванням апарату "Київ-4М" в залежності від товщини оброблюваного матеріалу  $\delta$ : а) швидкість різання  $V_p$ ; б) витрати плазмоутворюючого газу (стисненого повітря)  $Q_p$

Також для правильного проектування технологічного процесу необхідно визначити величини нерегульованих параметрів повітряно-плазмового різання, зокрема, напругу на електричній дузі  $U_d$  та ширину різі  $b_p$  (рис. 11.8).

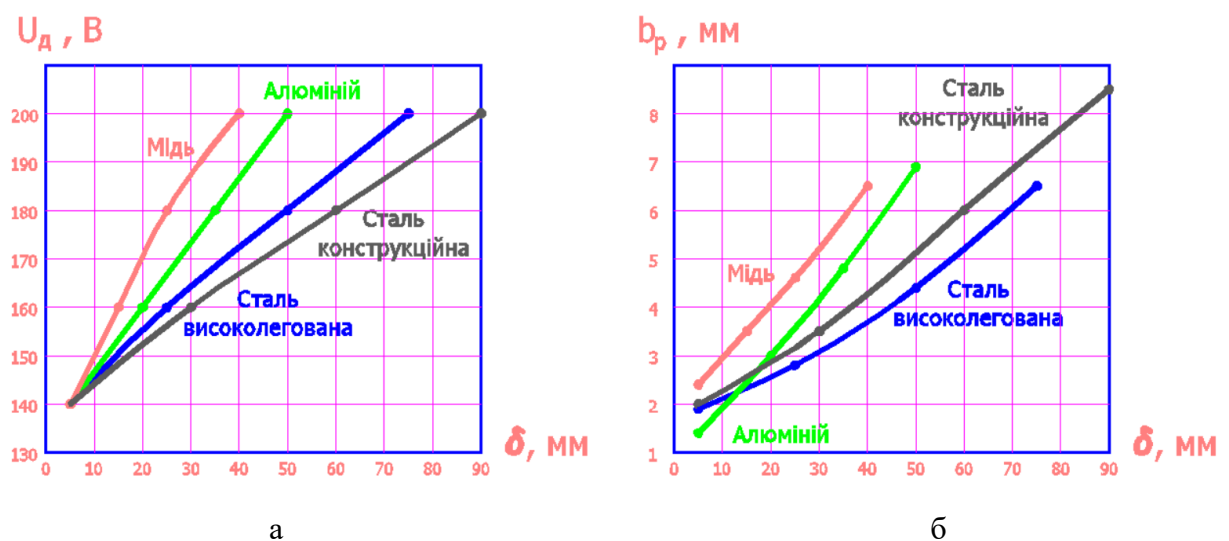
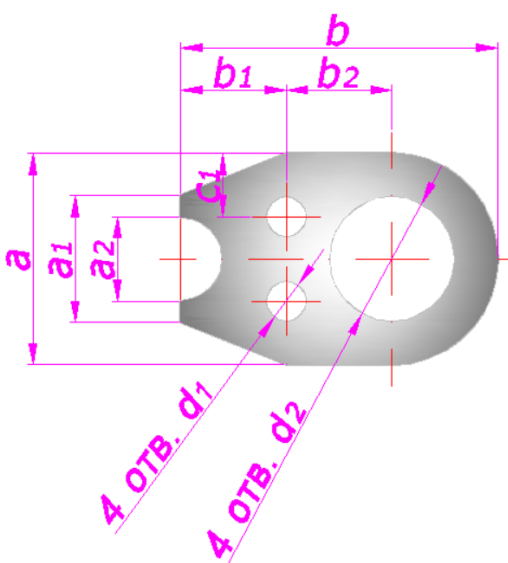


Рис. 11.8. Визначення нерегульованих параметрів технологічного процесу повітряно-плазмового різання із застосуванням апарату "Київ-4М" в залежності від товщини оброблюваного матеріалу  $\delta$ : а) напруга на електричній дузі  $U_d$ ; б) ширина різі  $b_p$

Розглянемо проєктування технології виготовлення деталі (табл. 11.3) за допомогою повітряно-плазмового різання. Деталь має назву СКОБА та виготовлена зі сталі С45 (EN 10083-2:2006).

Таблиця 11.3.

Деталь для обробки повітряно-плазмовим різанням

| Назва деталі                                                                       | Розміри       |          |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|
| Скоба, сталь С45                                                                   | Позначення    | Величина |
|  | $\delta$ , мм | 20       |
|                                                                                    | a, мм         | 100      |
|                                                                                    | $a_1$ , мм    | 60       |
|                                                                                    | $a_2$ , мм    | 40       |
|                                                                                    | b, мм         | 150      |
|                                                                                    | $b_1$ , мм    | 50       |
|                                                                                    | $b_2$ , мм    | 50       |
|                                                                                    | $d_1$ , мм    | 20       |
|                                                                                    | $d_2$ , мм    | 60       |
|                                                                                    | $c_1$ , мм    | 20       |

1. Для виготовлення деталі із заданим контуром (рис. 11.9) необхідно врахувати ширину різку, що утвориться під час обробки (рис. 11.8, б). Для заданої товщини  $\delta=20$  мм (табл. 11.2) визначаємо ширину різку  $b_p=2,9$  мм.

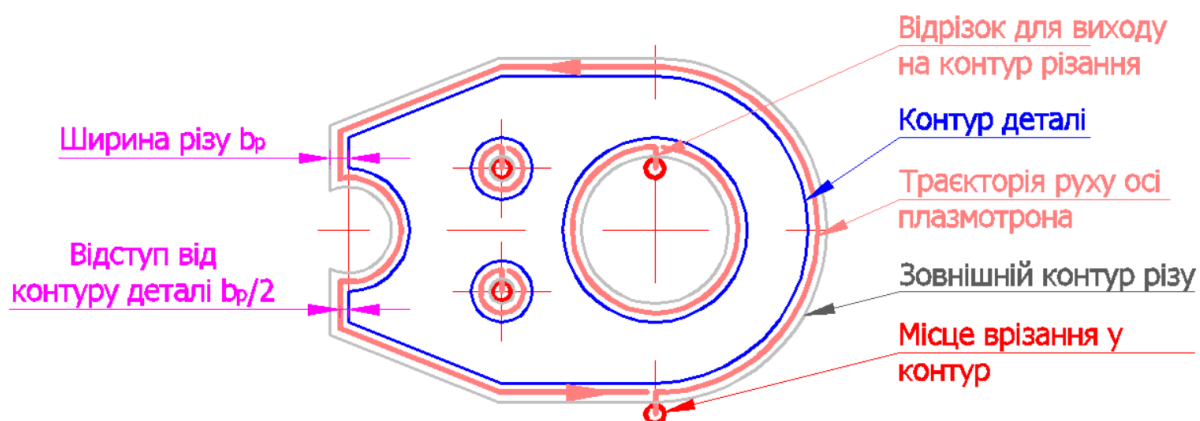


Рис. 11.9. Схема утворення контуру деталі під час повітряно-плазмового різання

2. Визначимо довжину траєкторії руху осі плазмотрона з урахуванням ширини різку:

а) контур деталі  $L_1=470,62$  мм;

б) великий отвір  $L_2=167,14$  мм;

в) малий отвір  $L_3=41,93$  мм.

З урахуванням чотирьох відрізків врізання у листову заготовку  $L_B \approx 7$  мм отримаємо загальну довжину різку:

$$L=L_1+L_2+2L_3+4 \times L_B=470,62+167,14+2 \times 41,93+4 \times 7=749,62 \text{ мм.}$$

3. За графіком залежності швидкості від товщини заготовки (рис. 11.7, а) визначаємо  $V_p=67$  мм/с.

4. Час, що потрібний виключно для різання деталі, становитиме

$$t_p=L/V_p=749,62/67=11,2 \text{ с.}$$

5. Визначаємо витрати стисненого повітря (рис. 11.7, б)

$$Q_r=46 \text{ л/хв.}$$

6. Напруга на дузі (рис. 11.8, а) становитиме

$$U_d=152 \text{ В.}$$

7. Визначаємо потужність плазмотрона  $P_{\Pi}$

$$P_{\Pi}=I_d U_d=100 \times 152=15200 \text{ В} \cdot \text{А} =15,2 \text{ кВт} \cdot \text{А.}$$

8. Витрати стисненого повітря  $Q_{\Pi}$  на виготовлення заданої деталі

$$Q_{\Pi}=Q_r t_p=46 \times 11,2/60=8,59 \text{ л.}$$

9. Результати розрахунків та вибору технологічних параметрів зводимо у табл. 11.4.

Таблиця 11.4.

Параметри проведення операції повітряно-плазмового різання

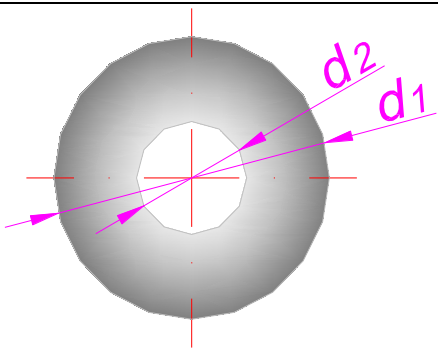
| Матеріал заготовки | Товщина, $\delta$ , мм | Сила струму, $I_d$ , А | Діаметр сопла, $d_c$ , мм | Довжина різку, $L$ , мм | Швидкість, $V_p$ , мм/с | Час різання, $t_p$ , с | Витрати стисненого повітря, $Q_r$ , л/хв | Напруга на дузі, $U_d$ , В | Потужність плазмотрона, $P_{\Pi}$ , кВт·А | Витрати повітря, $Q_{\Pi}$ , л |
|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| C45                | 20                     | 100                    | 2                         | 749,62                  | 67                      | 11,2                   | 46                                       | 152                        | 15,2                                      | 8,59                           |

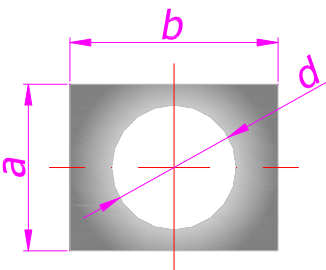
## 11.2. Порядок проведення роботи

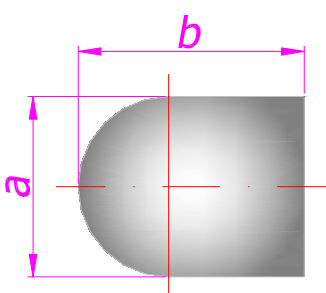
1. Вивчити фізичну сутність процесу плазмової обробки.
2. Ознайомитись з технологічними процесами плазмової обробки матеріалів.
3. Вивчити конструкцію апарата для повітряно-плазмового різання «Київ-4М».
4. За індивідуальним завданням (табл. 11.5) для заданого матеріалу заготовки вибрати та розрахувати параметри повітряно-плазмового різання згідно п. 11.1.3.
5. Отримані результати звести у табл. 11.4.
6. Зробити висновки по роботі.

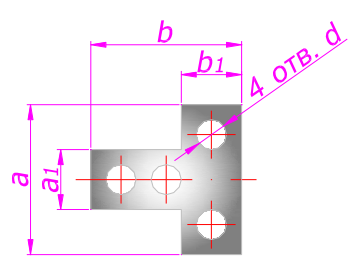
Таблиця 11.5.

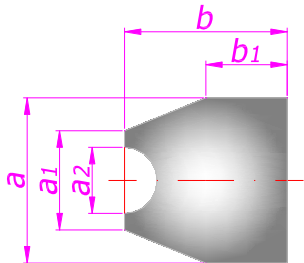
Варіанти індивідуальних завдань

| Варіант I                                                                           |            |               |            |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|------------|------------|
| Назва деталі                                                                        | Підваріант | Розміри       |            |            |
| Кільце, сталь X30Cr13                                                               |            | $\delta$ , мм | $d_1$ , мм | $d_2$ , мм |
|  | 1          | 20            | 200        | 100        |
|                                                                                     | 2          | 30            | 250        | 125        |
|                                                                                     | 3          | 40            | 300        | 150        |
|                                                                                     | 4          | 50            | 450        | 225        |
|                                                                                     | 5          | 60            | 500        | 250        |

| Варіант II                                                                        |            |               |          |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|----------|----------|
| Назва деталі                                                                      | Підваріант | Розміри       |          |          |          |
| Шайба, бронза CuAl10Fe3                                                           |            | $\delta$ , мм | $a$ , мм | $b$ , мм | $d$ , мм |
|  | 6          | 10            | 150      | 200      | 100      |
|                                                                                   | 7          | 20            | 200      | 250      | 125      |
|                                                                                   | 8          | 30            | 250      | 300      | 150      |
|                                                                                   | 9          | 35            | 400      | 450      | 225      |
|                                                                                   | 10         | 40            | 450      | 500      | 250      |

| Варіант III                                                                         |            |               |          |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|----------|
| Назва деталі                                                                        | Підваріант | Розміри       |          |          |
| Пластина, сталь С45                                                                 |            | $\delta$ , мм | $a$ , мм | $b$ , мм |
|  | 11         | 20            | 150      | 200      |
|                                                                                     | 12         | 30            | 200      | 250      |
|                                                                                     | 13         | 40            | 250      | 300      |
|                                                                                     | 14         | 50            | 400      | 450      |
|                                                                                     | 15         | 60            | 450      | 500      |

| Варіант IV                                                                          |            |               |          |            |          |            |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| Назва деталі                                                                        | Підваріант | Розміри       |          |            |          |            |          |
| Кронштейн, дюралюміній Cu4MgSi                                                      |            | $\delta$ , мм | $a$ , мм | $a_1$ , мм | $b$ , мм | $b_1$ , мм | $d$ , мм |
|  | 16         | 10            | 150      | 100        | 200      | 100        | 60       |
|                                                                                     | 17         | 20            | 200      | 150        | 250      | 150        | 70       |
|                                                                                     | 18         | 30            | 250      | 150        | 300      | 150        | 80       |
|                                                                                     | 19         | 40            | 400      | 200        | 450      | 200        | 100      |
|                                                                                     | 20         | 50            | 450      | 200        | 500      | 200        | 120      |

| Варіант V                                                                         |            |               |          |            |            |          |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|------------|------------|----------|------------|
| Назва деталі                                                                      | Підваріант | Розміри       |          |            |            |          |            |
| Вухо, сталь С45                                                                   |            | $\delta$ , мм | $a$ , мм | $a_1$ , мм | $a_2$ , мм | $b$ , мм | $b_1$ , мм |
|  | 21         | 20            | 150      | 100        | 70         | 200      | 100        |
|                                                                                   | 22         | 30            | 200      | 150        | 100        | 250      | 150        |
|                                                                                   | 23         | 40            | 250      | 150        | 100        | 300      | 150        |
|                                                                                   | 24         | 50            | 400      | 200        | 120        | 450      | 200        |
|                                                                                   | 25         | 60            | 450      | 200        | 150        | 500      | 200        |

### 11.3. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Схема апарата повітряно-плазмового різання «Київ-4М» (рис. 11.6, а).
4. Схема утворення контуру деталі під час повітряно-плазмового різання за зразком рис. 11.9.
5. Результати призначених та розрахованих параметрів повітряно-плазмового різання звести у табл. 11.4.
6. Висновки за результатами розрахунків.

### Контрольні питання до лабораторної роботи № 11

1. Як називають особливий стан речовини, у якому поряд з нейтральними та збудженими атомами присутні іонізовані атоми та електрони?
2. При якій температурі відбувається повна іонізація речовини?
3. Який вплив здійснює струмінь плазми на матеріал оброблюваної заготовки?
4. Для якої товщини кольорових та чорних металів застосовується плазмове різання?
5. Яка ширина різку у відношенні до товщини розрізуваного металу

утворюється під час плазмового різання?

6. З якою метою застосовують плазмове різання перед зварюванням металевих заготовок?

7. З якою метою застосовують плазмове наплавлення поверхневого шару матеріалу заготовки?

8. На які основи можна наносити покриття за допомогою плазмового напилення?

9. До яких наслідків призводить підвищення температури поверхні заготовки під час обробки різанням?

10. Яку операцію плазмової обробки називають строжкою?

11. Яку операцію плазмової обробки називають гранулюванням?

12. Які переваги має плазмове зварювання порівняно з електродуговим?

13. Як називають процес руйнування хімічних зв'язків у речовинах під дією високої температури плазми?

14. З якою метою застосовують плазмові реактори?

15. Який метод застосовують у плазмових реакторах для виготовлення різноманітних наноматеріалів?

16. Які вузли входять до складу апарата для повітряно-плазмового різання "Київ-4М"?

17. Який діапазон сили струму використовується у апараті для повітряно-плазмового різання "Київ-4М"?

18. На яку потужність розрахований плазмотрон, що застосовується у апараті для повітряно-плазмового різання "Київ-4М"?

## Лабораторна робота № 12.

### Вивчення конструкції плазмотрона для повітряно-плазмового різання металів

**Мета роботи:** вивчити принципи роботи плазмотронів для проведення операцій плазмової обробки матеріалів; вивчити конструкцію плазмотрона ВПР-15 для повітряно-плазмового різання металів.

#### Обладнання, інструменти та матеріали

1. Плазмотрон для повітряно-плазмового різання металів ВПР-15.
2. Деталі, що підлягають частій заміні: сопла, електроди, ущільнення.
3. Інструменти для складання плазмотрона та його регулювання: спеціальний ключ для встановлення катода, набір гайкових ключів, викрутка.

#### 12.1. Короткі теоретичні відомості

##### 12.1.1. Формування плазмового струменю

Плазмова обробка почала застосовуватись приблизно з 1956 р. Найбільш простим способом отримання плазми є збудження у газі електричного розряду (тліючого, дугового або іскрового). У результаті впливу плазми на оброблюваний матеріал відбувається його нагрівання, плавлення та часткове випаровування, під впливом кінетичної енергії струменя плазми розплав видаляється з зони обробки.

Для отримання високотемпературного плазмового струменю використовують пристрій – **плазмотрон**. Використовуються плазмотрони прямої та непрямої дії (рис. 12.1) [2].

В плазмотронах прямої дії (рис. 12.1, а) дуговий розряд горить між катодом 1 та оброблюваною заготовкою 3. Газ для утворення плазми 4 видувається через отвір сопла 2. Під впливом дугового розряду відбувається іонізація газу та утворюється плазмовий струмінь 5. Катод підключається до "мінусу" джерела постійного струму, а заготовка – до "плюсу" та є анодом.

У плазмотронах непрямої дії (рис. 12.1, б) електрична дуга утворюється між катодом 1 та соплом 2 і повністю розташована усередині плазмотрона. Іонізований газ у вигляді плазмового струменя видувається через отвір сопла. У даному випадку заготовка є нейтральною, а сопло – анодом, тобто за такою схемою можна також обробляти матеріали, що не проводять електричний струм.

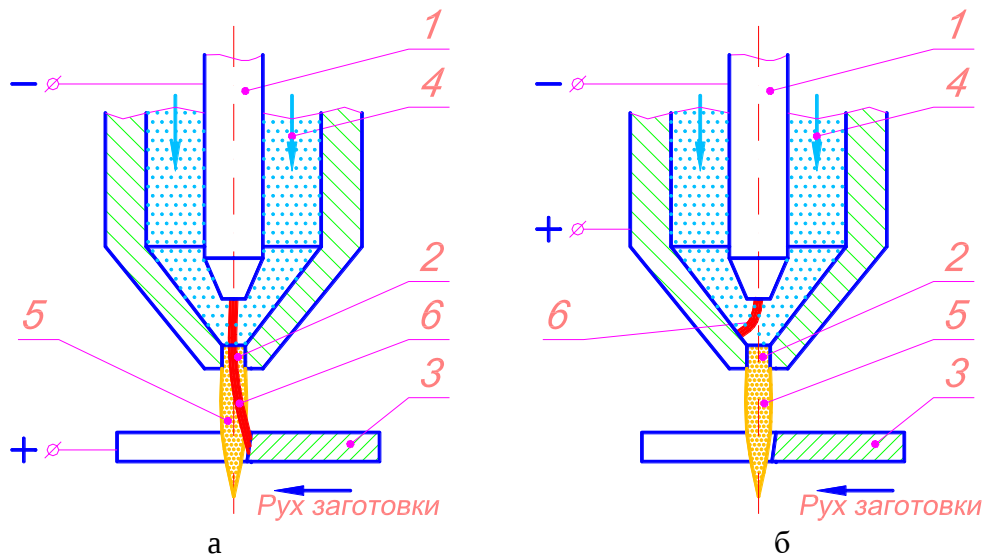


Рис. 12.1. Плазмотрони а) прямої та б) непрямої дії.

Плазмовий струмінь, який стискається отвором сопла, має температуру значно вище, ніж у випадку відкритого (не стисненого) дугового розряду. Густина електричного струму на виході з плазмотрона досягає  $100 \text{ А/мм}^2$ , а температура –  $15000...30000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Плазмотрони прямої дії мають більш високий к. к. д. за рахунок енергії, яка виділяється у дуговому розряді на поверхні заготовки у так званій анодній плямі.

Плазмотрони прямої дії використовуються для зварювання, різання та наплавлення, а плазмотрони непрямої дії – для напилювання та нагрівання.

При плазмовому зварюванні, наплавленні, напилюванні, нанесенні покриттів використовують пряму та зворотну полярність підключення електродів до джерела живлення. У плазмотронах прямої дії переважно використовується пряма полярність (електрод, встановлений у плазмотроні є

катодом) тому, що температура на катоді значно нижча, ніж на аноді. Це забезпечує більший термін експлуатації електроду та більшу стабільність дугового розряду.

Речовину для створення плазми обирають в залежності від технологічних умов, якості, вартості, тепломісткості та температури плазми. Для зварювання та наплавлення використовують аргон, вуглекислий газ (для сталей), азот (для міді) або суміші цих газів. Для плазмового різання – повітря, кисень та воду (рис. 12.2).



Рис. 12.2. Плазмотрон з водою в якості плазмоторної речовини

Електроди (катоди) плазмотронів (рис. 12.3) піддаються значному нагріванню, тому зазвичай виготовляються із міді з вольфрамовими, цирконієвими або гафнієвими вставками та охолоджуються проточною водою або струменем плазмоторного газу. Найбільшу стійкість у інертних газах, а також у присутності водню та азоту мають електроди з вольфраму з додаванням лантану або ітрію. Використання окислювальних газів (повітря, кисень) або вуглекислого газу, які мають значну тепломісткість, потребує використання вставок з гафнію або цирконію.



Рис. 12.3. Плазмотрон для повітряно-плазмового різання зі змінними електродами та соплами

### 12.1.2. Конструкція плазмотрона для повітряно-плазмового різання

Конструкція та матеріал основних елементів плазмотрона визначають його основні експлуатаційні характеристики: стійкість до швидкого зношування, стабільність роботи та проплавлювальна здатність плазмового струменя, відповідно, продуктивність процесу різання та якість крайок вирізаних деталей.

Розрізняють технологічні та конструкційні параметри плазмотрона (рис. 12.4). До технологічних параметрів відносяться: струм дуги  $I_d$ , витрати  $Q$  та тиск  $P$  плазмоутворюючого стисненого повітря. До конструкційних відносяться параметри, що характеризують геометрію дугової камери плазмотрона: висота сопла  $h_c$ , радіус сполучення каналу сопла  $R_c$ , відстань від зрізу до робочої поверхні електрода  $H_k$ , радіус електрода  $R_e$ , кут розкриття  $\alpha$ , діаметр каналу сопла  $D_c$ , відстань від робочої поверхні електрода до вихороутворювача  $h$ . Для функціонування плазмотрона без зміни робочих характеристик необхідно, щоб саме параметр  $H_k$  залишався незмінним. Перераховані елементи утворюють систему, яку називають дуговою камерою.

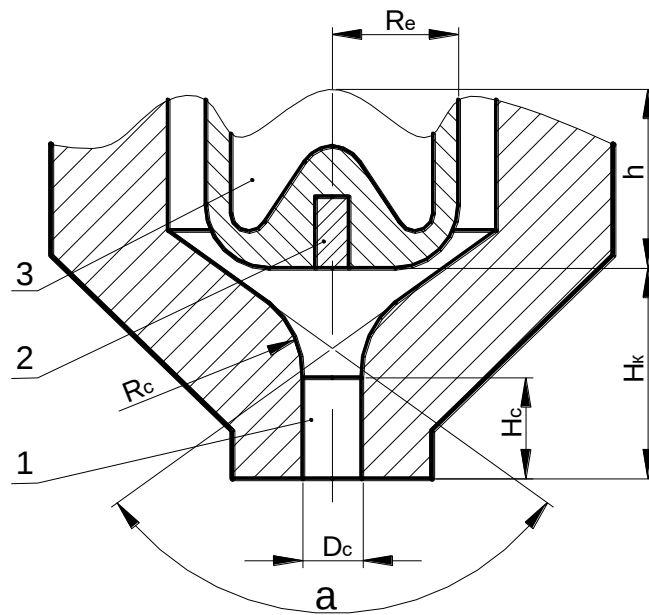


Рис. 12.4. Схема дугової камери плазматрона ВІР-15: 1 – сопло; 2 – вставка електрода; 3 – електрод

Вставку електрода 2 виготовлено з тугоплавкого металу – цирконію або гафнію. При взаємодії з плазмою вставка покривається оксидною плівкою, температура плавлення якої більше температури плавлення самого металу, що значно підвищує стійкість електрода 3. Вигорання поверхні вставки відбувається по параболі, тобто більш активно вигорає у центрі та менш інтенсивно на краю тому, що мідь краще проводить тепло та інтенсивніше відводить його від краю вставки.

Для поліпшення відведення тепла від вставки на внутрішній поверхні електрода виготовляється наплив параболоїдальної форми, який буде омиватися водою та активніше видаляти зайву теплоту з вставки електрода.

Діаметр  $D_c$  та висота  $h_c$  сопла обмежують канал та мають залишатися постійними у часі. Слід зазначити, що для різної сили електричного струму застосовують різні діаметри сопел. Наприклад, для сили струму 100 А використовують сопла діаметром 2 мм, для струму 200 А – 3 мм, а для струму 315 А – 3,5 мм.

Зазор між соплом та електродом також виконує дуже важливу роль та має знаходитись у межах  $1,5 \pm 0,2$  мм. При збільшенні величини зазору в дуговій камері відбувається деяке ослаблення вихору плазмоутворюючого

газу внаслідок недостатнього виходу його через отвір сопла. У зв'язку з цим зростає ймовірність утворення грату на краях різку під час різання сталевих заготовок.

На рис. 12.5 та 12.6 зображено конструкцію плазмотрона ВПР-15, специфікацію наведено на рис. 12.7. Зображення ріжучого блоку показано на рис. 12.8. Швидко зношувані деталі плазмотрона ВПР-15 зображено на рис. 12.9: електрод з цирконієвою або гафнієвою вставкою (рис. 12.9, а) та сопло з отвором діаметром 3,5 мм (рис. 12.9, б).

## **12.2. Порядок проведення роботи**

1. Ознайомитись з основними конструкціями плазмотронів для проведення операцій плазмової обробки матеріалів.
2. Вивчити особливості конструкції плазмотрона ВПР-15 для здійснення операції повітряно-плазмового різання металевих заготовок.
3. Навчитись проводити операцію налаштування плазмотрона ВПР-15 на роботу та замінювати швидко зношувані деталі (електрод та сопло) для відновлення роботи плазмотрона.

## **12.3. Зміст звіту**

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Обладнання, інструменти та матеріали.
3. Схема дугової камери плазмотрона ВПР-15 (рис. 12.4).
4. Показати, використовуючи рис. 12.6, шляхи руху охолоджувальної води (**синім кольором**), стисненого повітря (**червоним кольором**) для плазмотворення та подачі електричної енергії на катод плазмотрона (чорним кольором).
5. Висновки за лабораторною роботою.

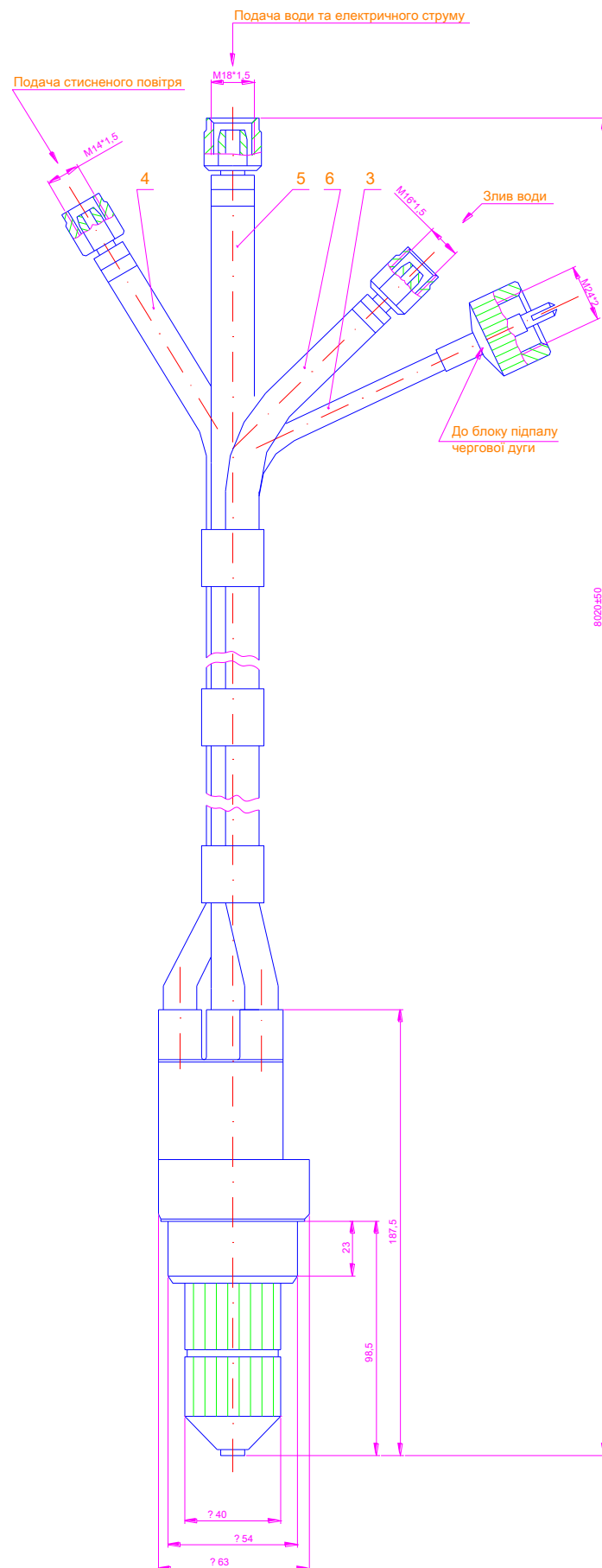


Рис. 12.5. Плазмотрон ВПР-15 для повітряно-плазмового різання з комунікаціями

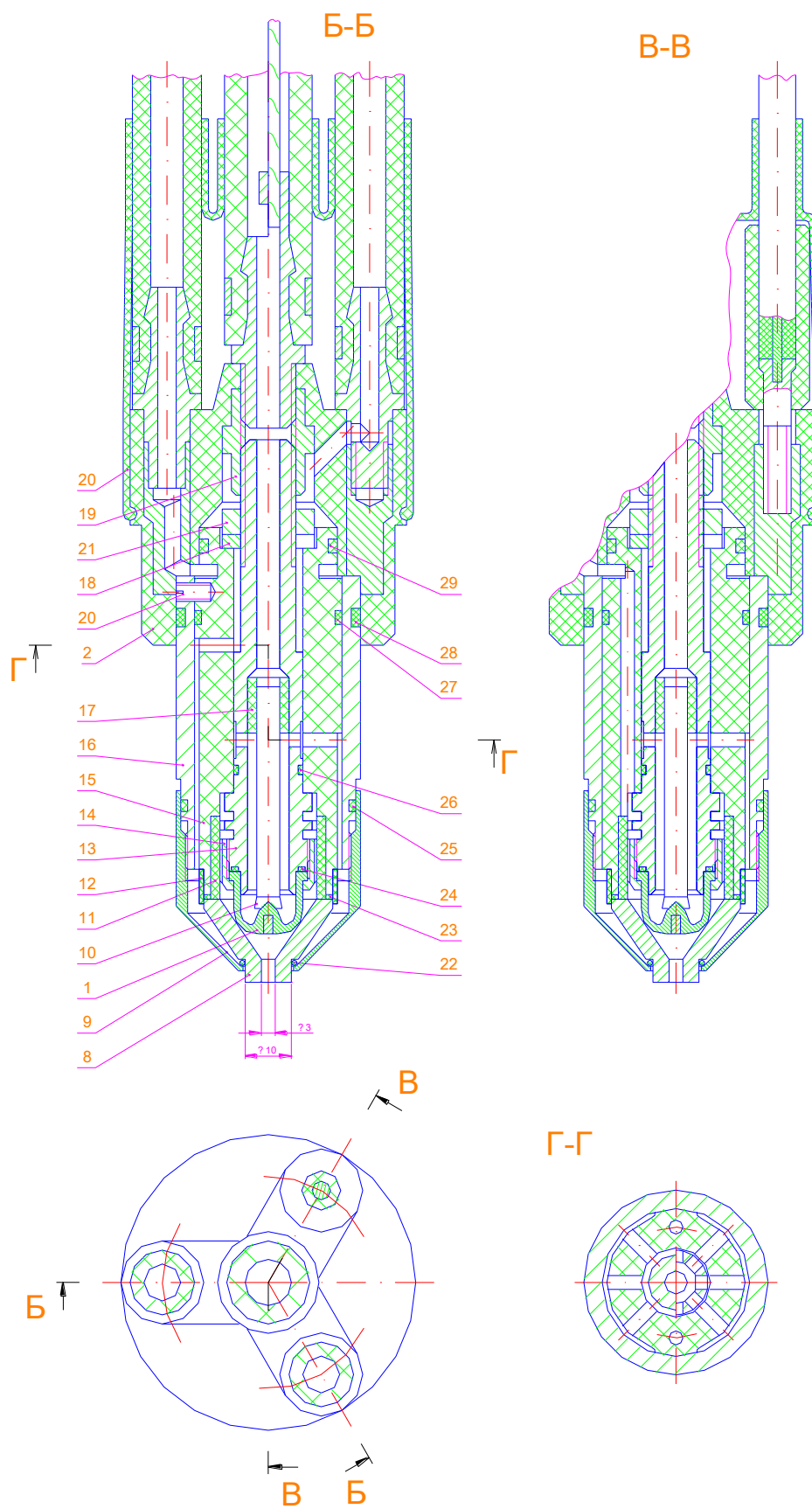


Рис. 12.6. Конструкція плазмоторона ВПР-15 для повітряно-плазмового різання

[illegible]

Рис. 12.7. Специфікація плазмотрона ВПР-15 для повітряно-плазмового різання

☐

(продовження)

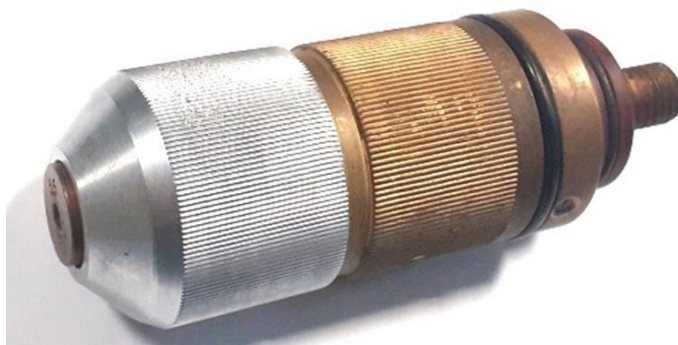


Рис. 12.8. Різальний блок плазмоторна ВІР-15



а

б

Рис. 12.9. Швидко зношені деталі плазмоторна ВІР-15: а) електрод з цирконієвою або гафнієвою вставкою; б) сопло з отвором діаметром 3,5 мм

## Контрольні питання до лабораторної роботи № 12

1. Що відбувається з оброблюваним матеріалом у результаті впливу на нього плазми?
2. Як називають пристрій для отримання високотемпературного плазмового струменю?
3. Які плазмоторни використовуються у технології обробки матеріалів в залежності від місця горіння дугового розряду?
4. У якому місці утворюється дуговий розряд у плазмоторнах прямої дії?
5. У якому місці утворюється дуговий розряд у плазмоторнах непрямої дії?
6. Яка основна перевага застосування плазмоторнів непрямої дії щодо номенклатури оброблюваних матеріалів?
7. Яка основна перевага застосування плазмоторнів прямої дії порівняно з плазмоторнами непрямої дії?
8. Яка полярність підключення електродів до джерела живлення

застосовується при плазмовому зварюванні, наплавленні, напилюванні, нанесенні покриттів тощо?

9. Яку перевагу забезпечує пряма полярність підключення електродів до джерела живлення у плазмотронах прямої дії?

10. Залежно від яких параметрів обирають речовину для створення плазми у технології обробки матеріалів?

11. Які гази застосовують для плазмового зварювання та наплавлення?

12. Які речовини застосовують для плазмового різання?

13. З яких матеріалів зазвичай виготовляються електроди (катоди) плазмотронів прямої дії?

14. Що застосовують для охолодження електродів (катодів) плазмотронів прямої дії?

15. Які експлуатаційні характеристики визначають конструкція та матеріал основних елементів плазмотрона?

16. Які параметри плазмотрона відносяться до технологічних?

17. Які параметри плазмотрона відносяться до конструкційних, що характеризують геометрію дугової камери?

18. Що саме значно підвищує стійкість електрода плазмотрона з цирконієвою або гафнієвою вставкою при взаємодії з плазмою дугового розряду?

19. З якою метою на внутрішній поверхні електрода виготовляється напівпараболоїдальної форми?

20. Від чого залежить діаметр сопла, що встановлюється у плазмотрон ВПР-15?

21. Які діаметри сопел використовують у плазмотроні ВПР-15?

22. Яку величину зазору між соплом та електродом необхідно забезпечити у плазмотроні ВПР-15?

23. Що може відбуватись при збільшенні величини зазору між соплом та електродом в дуговій камері плазмотрона ВПР-15?

## Вимоги до оформлення протоколів лабораторних робіт та семестрового звіту

Протокол лабораторної роботи відноситься до текстових документів, які містять інформацію, подану в основному технічною мовою, та графічну інформацію у вигляді ілюстрацій. Ілюстраціями можуть бути фрагменти схем, графіки, фотографії тощо. Частина інформації може бути подана у вигляді формул. Цифрову інформацію частіше подають у вигляді таблиць.

Протокол лабораторної роботи оформлюється на одній стороні аркушу білого паперу формату А4. При використанні комп'ютерної техніки шрифт має бути простим, прямим, одного типу розміром не менше 2,5 мм (Word, 14 пунктів), інтервал 1,5. Ілюстрації дозволяється виконувати олівцем або у графічних редакторах.

На кожному аркуші протоколу лабораторної роботи друкується рамка робочого поля та основний напис. Текст розміщують від рамки робочого поля: ліворуч та праворуч – не менше 3 мм; зверху та знизу – не менше 10 мм; абзац 10...15 мм.

Скорочення слів – відповідно до чинних стандартів. Назви складових частин чи розділів записують у вигляді заголовків. Заголовки мають бути короткими та відповідати тематиці викладеного матеріалу. Перенесення слів у заголовках не допускається. Крапку в кінці заголовків не ставлять. Якщо заголовок складається з двох та більше речень, то їх розділяють крапкою. Відстань між заголовком та текстом 2 інтервали, між заголовками – 2 інтервали. Не дозволяється залишати заголовок без тексту на попередній сторінці.

Титульний аркуш (заголовний аркуш звіту) виконується відповідно до додатка 1.

Протокол лабораторної роботи має містити усі необхідні матеріали (рисунки, інші ілюстративні матеріали, описи до них, розрахункові формули, таблиці, графіки тощо), що вказані у пункті «Зміст звіту».

Кожний протокол лабораторної роботи починається з нової сторінки з

основним написом як для текстових документів (додаток 2). Зразок усіх інших аркушів протоколів наведено у додатку 3.

Текст необхідно викладати в лаконічному технічному стилі. Умовні позначення фізичних величин та умовні графічні позначення компонентів мають відповідати установленим в стандартах. Перед позначенням фізичної величини має бути її пояснення (потужність  $P$ , енергія  $E$ ). Числа з розмірністю слід записувати цифрами, а без розмірності словами (відстань 2 мм, відміряти три рази). Позначення одиниць вимірювання слід писати в рядок з числовим значенням без перенесення у наступний рядок. Між останньою цифрою числа та позначенням одиниці вимірювання слід ставити пробіл (100 Вт, 2 А). Якщо наводиться ряд числових значень однієї й тієї ж фізичної величини, то одиницю фізичної величини вказують лише після останнього числового значення (2; 3; 3,5 мм). Скорочення слів в тексті не допускається, крім загальноприйнятих в українській мові та установлених у відповідних стандартах, а також скорочень, які прийняті для надписів на виробі (ТВУ-5, ВПР-15). Лапками виділяють найменування команд, режимів, сигналів («Пуск», «Стоп»). Не дозволяється використання «техніцизмів».

Кожну формулу записують з нового рядка, симетрично до тексту. Пояснення умовних буквених позначень (символів) в формулі наводять в тексті або одразу ж під формулою. Для цього після формули ставлять кому та записують пояснення у послідовності, у якій їх наведено у формулі, розділяючи крапкою з комою. Перший рядок має починатися зі слова «де» без будь-якого знака після нього. Усі формули в межах однієї лабораторної роботи нумерують арабськими числами. Номер вказують в круглих дужках з правої сторони, в кінці рядка, на рівні закінчення формули. Номер формули складається з номера лабораторної роботи та порядкового номера формули (1.2; 11.4), розділених крапкою.

Числову підстановку та розрахунок виконують з нового рядка не нумеруючи. Розмірність одного й того ж параметра в межах документа має бути однаковою. Якщо формула велика, то її можна переносити в наступні

рядки. Перенесення виконують тільки математичними знаками, повторюючи знак на початку наступного рядка. Формула є частиною речення, тому до неї застосовують такі ж правила граматики, як і до інших членів речення. Якщо формула знаходиться в кінці речення, то після неї ставлять крапку. Формули, які слідують одна за другою і не розділені текстом, розділяють комою. Посилання на формули в тексті дають в круглих дужках (в формулі (5.2); в формулах (5.7, ..., 5.10).

Рисунки та інші графічні ілюстрації розміщують в тексті або в додатках. В тексті ілюстрацію розміщують симетрично до тексту після першого посилання на неї або на наступній сторінці, якщо на даній вона не уміщується. На всі ілюстрації в тексті мають бути посилання (показано на рисунку 3.1; в дужках за текстом (рисунок 3.1); показані на рисунку 3.2, б) Посилання на раніше наведені ілюстрації дають зі скороченим словом (див. рисунок 1.3). Всі ілюстрації в протоколі лабораторної роботи називають рисунками та позначають під ілюстрацією симетрично до неї (Рисунок 3.5 - Найменування рисунка). Крапку в кінці не ставлять, знак переносу не використовують. Нумерують ілюстрації в межах лабораторної роботи, вказуючи номер розділу і порядковий номер ілюстрації в лабораторній роботі, розділяючи крапкою. Пояснювальні дані розміщують під ілюстрацією над її позначенням. У випадку, коли ілюстрація складається з частин, їх позначають малими буквами українського алфавіту (а; б; в) під відповідною частиною. В такому випадку після найменування ілюстрації ставлять двокрапку та дають найменування кожної частини (а – найменування першої частини; б – найменування другої частини) або за ходом найменування ілюстрації, беручи букви в дужки (Рисунок 3.2 – Структурна схема (а) та загальний вигляд (б) напівавтомата. Якщо частини ілюстрації не вміщуються на одній сторінці, то їх переносять на наступну сторінку. В цьому випадку, під початком ілюстрації вказують повне її позначення, а під її продовженнями скорочене без назви ілюстрації (Рисунок 3.2 (продовження)). Пояснювальні дані розміщують під кожною частиною ілюстрації.

Якщо в тексті є посилання на складові частини зображеного засобу, то на відповідній ілюстрації вказують їх порядкові номери в межах ілюстрації. Якщо ілюстрація є фрагментом повної розробленої схеми, то для всіх компонентів вказують ті позиційні позначення, які вказані на схемі.

Таблицю розміщують симетрично до тексту після першого посилання на даній сторінці або на наступній, якщо на даній вона не уміщується і таким чином, щоб зручно було її розглядати без повороту, або з поворотом на кут  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою. На всі таблиці мають бути посилання (наведено у таблиці 3.1; в таблицях 3.1...3.5) або в дужках по тексту ((таблиця 3.6)). Посилання на раніше наведену таблицю дають зі словом дивись (див. таблицю 2.4) за ходом чи в кінці речення. Таблицю розділяють на колонки та рядки. У верхній частині розміщують головку таблиці, в якій вказують найменування с. Діагональне ділення головки таблиці не допускається. Ліву колонку (боковик) часто використовують для найменування рядків. Допускається не розділяти рядки горизонтальними лініями. Розміри таблиці визначаються об'ємом матеріалу. Найменування колонок може складатися із заголовків і підзаголовків, які записують в однині, симетрично до тексту колонки малими буквами, починаючи з великої. Якщо підзаголовок складає одне речення із заголовком, то в цьому випадку його починають з малої букви. В кінці заголовків і підзаголовків колонок таблиці крапку не ставлять. Якщо всі параметри величин, які наведено у таблиці, мають одну й ту саму одиницю фізичної величини, то над таблицею розміщують її скорочене позначення (мм; Вт). Якщо ж параметри мають різні одиниці фізичних величин, то позначення одиниць записують в заголовках колонок після коми (Довжина, h, мм; Потужність, P, кВт). Текст заголовків і підзаголовків колонок може бути замінений буквеними позначеннями, якщо тільки вони пояснені в попередньому тексті чи у ілюстраціях (D – діаметр; H – висота тощо). Однакові буквені позначення групують послідовно у порядку росту їх індексів (M1, M2, ...). Найменування рядків записують в боковику таблиці у вигляді заголовків у

називному відмінку однини, малими буквами, починаючи з великої і з однієї позиції. В кінці заголовків крапку не ставлять. Позначення одиниць фізичних величин вказують в заголовках після коми. Для опису певного інтервалу значень в найменуваннях колонок і рядків таблиці можна використовувати слова: "більше", "менше", "не більше", "не менше", "в межах". Ці слова розміщують після одиниці фізичної величини (Напруга, В, не більше), а також використовують слова "від", "більше", "до" (Від 10 до 15; більше 15; до 20). Дані, що наводяться в таблиці, можуть бути словесними та числовими. Слова записують в колонках з однієї позиції. Якщо рядки таблиці не розділені лініями, то текст, який повторюється та складається з одного слова, дозволяється замінювати лапками ("). Якщо текст складається з одного і більше слів, то при першому повторенні його замінюють словами "те саме", а далі лапками. При розділенні таблиці горизонтальними лініями ніякої заміни не виконують. Числа записують посередині колонки так, щоб їх однакові розряди по всій колонці були точно один під одним, за винятком випадку, коли вказують інтервал. Інтервал вказують від меншого числа до більшого з тире між ними (12–35; 122–450). Дробові числа наводять у вигляді десяткових дробів, з однаковою кількістю знаків після коми в одній колонці. Ставити лапки замість цифр чи математичних символів, які повторюються, не можна. Якщо цифрові чи інші дані у таблиці не наводяться, то ставиться прочерк. Таблиці нумерують в межах розділів та позначають зліва над таблицею (Таблиця 4.2 - Найменування таблиці). Крапку в кінці не ставлять. Якщо найменування таблиці довге, то продовжують у наступному рядку, починаючи від слова "Таблиця". Номер таблиці складається з номера лабораторної роботи та порядкового номера таблиці, розділених крапкою. Дозволяється нумерувати в межах всього документа. Таблиця може бути великою як в горизонтальному, так і в вертикальному напрямках, мати велику кількість колонок та рядків. В таких випадках таблицю розділяють на частини та переносять на інші сторінки або розміщують одну частину під іншою чи поряд. Якщо частини таблиці розміщують поряд, то в кожній

частині повторюють головку таблиці, а при розміщенні однієї частини під іншою повторюють боковик. Якщо в кінці сторінки таблиця переривається та її продовження буде на наступній сторінці, в першій частині таблиці нижню горизонтальну лінію, що обмежує таблицю, не проводять. При перенесенні частин таблиці на інші сторінки, повторюють або продовжують найменування колонок. Допускається виконувати нумерацію колонок на початку таблиці та при перенесенні частин таблиці на наступні сторінки повторювати тільки нумерацію колонок. У всіх випадках найменування (при його наявності) таблиці розміщують тільки над першою частиною, а над іншими частинами зліва пишуть "Продовження таблиці 4.2" без крапки в кінці.

Висновки оформлюють із заголовком "Висновки", починаючи з абзацу.

В тексті аналізуються основні підсумки роботи над лабораторною роботою, дають оцінку результатам, визначають перспективи їх покращення.

## Список рекомендованої літератури

1. Курс лекцій з дисципліни «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів» для студентів інженерно-хімічного факультету напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» програм професійного спрямування «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» та «Обладнання лісового комплексу» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. Л. Дубнюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,30 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 84 с.  
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7758>

2. Дисципліна «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів» для студентів інженерно-хімічного факультету напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» програм професійного спрямування «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» та «Обладнання лісового комплексу» [Електронний ресурс] : [презентація] / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. Л. Дубнюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 13 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 146 с.  
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7757>

3. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки поверхонь деталей у машинобудуванні: [навчальний посібник]. - Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2011.- 412 с. Кіяновський М. В., Цивінда Н. І.

4. Електро-фізико-хімічні методи обробки матеріалів. Курс лекцій \ Головка Л. Ф. <http://ltft.kpi.ua/documents/EFHMO/EFHMO-lec.pdf>

## Перелік посилань

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів" для студентів всіх форм навчання напряму 6.050502 "Інженерна механіка" / Л. Ф. Головка, М. С. Блощин - К. : НТУУ "КПІ", 2012. - 68 с.

2. Курс лекцій з дисципліни «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів» для студентів інженерно-хімічного факультету напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» програм професійного спрямування «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» та «Обладнання лісового комплексу» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. Л. Дубнюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,30 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 84 с.  
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7758>

3. Дисципліна «Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів» для студентів інженерно-хімічного факультету напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» програм професійного спрямування «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» та «Обладнання лісового комплексу» [Електронний ресурс] : [презентація] / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. Л. Дубнюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 13 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 146 с.  
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7757>

Додаток 1.  
Титульний аркуш звіту

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Навчально-науковий інститут матеріалознавства  
та зварювання імені Є. О. Патона

Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

# З В І Т

з лабораторних робіт з дисципліни  
"Електрофізичні та електрохімічні  
методи обробки"

Виконав: студент IV курсу  
ММІ, гр. МТ-01  
Сидоренко П. В.

Перевірів: Петренко В. Д.

"\_\_" \_\_\_\_\_ 2024 р.

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2024 р.

## Перший аркуш протоколу з лабораторної роботи

147

### Додаток 3.

#### Другий аркуш протоколу з лабораторної роботи

The diagram illustrates the layout of a laboratory protocol sheet. It features a large central rectangular area for text, enclosed by a thick blue border. This central area is itself surrounded by a thinner magenta border. Dimensions are indicated by magenta arrows and numbers:

- Top margin: 5
- Right margin: 5
- Bottom margin: 5
- Left margin: 20
- Header area (bottom left):
  - Width segments: 7, 10, 23, 15, 10
  - Height segments: 15, 5
- Header area (bottom right): 10
- Header area (bottom center): 7

Labels within the header area include:

- Зм. (Summary)
- Арк. (Sheet)
- № докум. (Document No.)
- Підпис (Signature)
- Дата (Date)
- Лабораторна робота № \_\_\_\_ (Laboratory work No. \_\_\_\_)
- Арк. (Sheet)