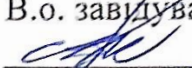


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
Кораблебудівний навчально науковий інститут**

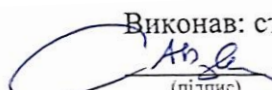
**Кафедра Зварювального виробництва**

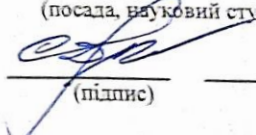
«Допущений до захисту»  
В.о. завідувача кафедри  
 С.В. Драган  
«17» 12 2024 р.

***КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА***

**на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

**на тему: РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ  
ТА ДОСЛІДНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ  
ПУЧКОМ ЕЛЕКТРОДІВ**

Виконав: студент групи 6121м  
 Зверєв А.В.  
(підпис)

Керівник роботи:  
В. о. зав. каф., к.т.н., професор НУК  
(посада, науковий ступень, вчене звання)  
 Драган С.В.  
(підпис)

Миколаїв, 2024 р.

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
Кораблебудівний навчально науковий інститут

Кафедра Зварювального виробництва

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Освітня програма Інжиніринг зварювання та споріднених процесів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_ С.В. Драган

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

Студенту

**Зверєву Андрію Володимировичу**

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Розробка автоматизованої установки та дослідне впровадження технології наплавлення пучком електродів.**

Керівник роботи **Драган Станіслав Володимирович, професор, к.т.н.**

Затверджені наказом ректора № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

2. Термін подання роботи: 15.12.2024 р.

3. Вихідні дані по роботі: Розробка автоматизованої установки та дослідне впровадження технології наплавлення пучком електродів.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

Аналіз технології дугового наплавлення деталей в суднобудуванні та машинобудуванні. Розробка автоматизованої установки для наплавлення пучком електродів. Дослідження технології наплавлення конструкційних сталей пучком електродів з використанням макету автоматизованої установки. Техніка безпеки та охорона праці при роботі на установці.

5. Перелік презентаційних матеріалів:

Тема, мета та завдання кваліфікаційної роботи. Об'єкт дослідження. Сутність методу наплавлення пучком електродів. Вихідні дані для проектування верстату для НПЕ. Вихідні дані для проектування механізму подачі ПЕ. Розрахунок несучої конструкції механізму переміщення ПЕ. Загальний вигляд маніпулятора деталі. Розрахунок навантаження механізму маніпулятора деталі. Силовий розрахунок редуктора механізму маніпулятора деталі. Експериментальні дослідження процесу наплавлення ПЕ. Розрахунок місцевої витяжної вентиляції робочої зони. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи.

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| 1.     | Драган С.В., професор, к.т.н.             | 15.09.2024     | 30.09.2024       |
| 2.     | Драган С.В., професор, к.т.н.             | 15.09.2024     | 31.10.2024       |
| 3.     | Драган С.В., професор, к.т.н.             | 15.09.2024     | 18.11.2024       |
| 4.     | Драган С.В., професор, к.т.н.             | 15.09.2024     | 02.12.2024       |

7. Дата видачі завдання 15.09.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| №  | Назва етапів роботи                                                                                                         | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1. | Аналіз технології дугового наплавлення деталей в суднобудуванні та машинобудуванні                                          | 15.09.2024-30.09.2024           |          |
| 2. | Розробка автоматизованої установки для наплавлення пучком електродів                                                        | 01.10.2024-31.10.2024           |          |
| 3. | Дослідження технології наплавлення конструкційних сталей пучком електродів з використанням макету автоматизованої установки | 01.11.2024-18.11.2024           |          |
| 4. | Техніка безпеки та охорона праці при роботі на установці                                                                    | 19.11.2024-02.12.2024           |          |
| 5. | Складання змісту, загальних висновків по роботі та списку використаних джерел інформації, оформлення пояснювальної записки  | 03.12.2024-09.12.2024           |          |
| 6. | Оформлення презентаційних матеріалів                                                                                        | 10.12.2024-15.12.2024           |          |

Студент \_\_\_\_\_ Зверєв А.В.  
(підпис) (ПІБ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Драган С.В.  
(підпис) (ПІБ)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота має: 138 с., 69 рис., 163 формули, 25 табл., 72 джерела.

У роботі розроблений ескізний проєкт механічної частини установки автоматизованого наплавлення пучком електродів.

Визначені технічні вимоги та характеристики, отримані конструктивні рішення маніпуляторів пучка електродів та деталі, що наплавляється. Складені розрахункові схеми маніпуляторів, виконано силовий розрахунок, перевірку на міцність та жорсткість найбільш навантажених елементів. Визначено оптимальну вихідну висоту ножичного підйомника маніпулятора деталі при заданому робочому ході. Перевірені умови кінематичного та динамічного узгодження електроприводу з механізмами. Виявлено «вузькі» місця в конструкції установки, проведено аналіз можливості підвищення навантаження на маніпулятори, визначені заходи, які забезпечать реалізацію.

Аналітично отримана апроксимаційна залежність струму наплавлення від кількості та діаметру електродів в пучку. Складено принциповий технологічний процес наплавлення пучком електродів. Створено діючий макет на базі маніпулятора електроімпульсного копіювально-прошивального верстату 4Б723М та виконано розрахунок параметрів для експериментального наплавлення на макеті в механізований спосіб. Проведені металографічні дослідження наплавлених експериментальних зразків.

Розрахована необхідна продуктивність місцевих відсмоктувачів для різних марок електродів. Побудована залежність відстані до робочої зони від продуктивності для забезпечення необхідної швидкості повітря при наплавленні. Визначені заходи для забезпечення санітарних вимог.

**Ключові слова:** наплавлення пучком електродів, установка автоматизованого наплавлення, універсальний зварювальний обертач, гібридний кроковий двигун, шкідливі викиди при наплавленні, фільтровентиляційний агрегат.

## ABSTRACT

The qualification work has: 138 p., 69 fig., 163 formulas, 25 tables, 72 sources.

The work has developed a draft design of the mechanical part of the installation for automated with a sheaf of electrodes surfacing.

The technical requirements and characteristics have been determined, the design solutions for the electrode sheaf manipulators and the part being surfacing have been obtained. The calculation schemes of the manipulators have been drawn up, a force calculation has been performed, and the strength and rigidity of the most loaded elements have been checked. The optimal initial height of the scissor lift of the part manipulator for a given working stroke has been determined. The conditions for the kinematic and dynamic coordination of the electric drive with the mechanisms have been checked. "Bottlenecks" in the design of the installation have been identified, an analysis of the possibility of increasing the load on the manipulators has been conducted, and measures have been identified that will ensure implementation.

The approximate dependence of the surfacing current on the number and diameter of electrodes in the sheaf was analytically obtained. The principle technological process of surfacing with a sheaf of electrodes was developed. A working model was created based on the manipulator of the 4B723M electric pulse copying and puncture machine and the parameters for experimental surfacing in a mechanized manner on the model were calculated. Metallographic studies of surfacing experimental samples were carried out.

The required productivity of local exhaust fans for different brands of electrodes was calculated. The dependence of the distance to the working area on the productivity to ensure the required air speed during surfacing was constructed. Measures were determined to ensure sanitary requirements.

**Keywords:** surfacing with a sheaf of electrodes, automated surfacing installation, universal welding rotator, hybrid stepper motor, harmful emissions during welding, filter ventilation unit.

## Зміст

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                                                       | 5  |
| 1. Аналіз технології дугового наплавлення деталей в суднобудуванні та машинобудуванні.....                                                       | 8  |
| 1.1. Характеристика деталей, що підлягають ремонтному відновленню методами дугового наплавлення.....                                             | 9  |
| 1.2. Технологія та обладнання для наплавлення конструкційних сталей покритими електродами.....                                                   | 10 |
| 1.3. Досвід впровадження ручного наплавлення пучком електродів та проблеми автоматизації процесу.....                                            | 17 |
| 1.4. Постановка завдань магістерського дослідження.....                                                                                          | 25 |
| Висновки.....                                                                                                                                    | 27 |
| 2. Розробка автоматизованої установки для наплавлення пучком електродів.....                                                                     | 28 |
| 2.1. Обґрунтування складу та принципової компоновальної схеми установки, функціональні вимоги до системи керування та виконавчих механізмів..... | 29 |
| 2.2. Проектування механізму подавання пучка електродів.....                                                                                      | 36 |
| 2.3. Проектування механізму переміщення пучка електродів.....                                                                                    | 39 |
| 2.3.1. Механізм переміщення пучка електродів вздовж осей X та Y.....                                                                             | 39 |
| 2.3.2. Визначення максимальних сил та моментів, що діють на механізм переміщення пучка електродів вздовж осей X та Y.....                        | 44 |
| 2.3.3. Перевірка за місцевими напруженнями міцності рейки, по якій переміщується упорний ролик колони.....                                       | 49 |
| 2.4. Проектування механізмів маніпулятора деталі, що наплавляється.....                                                                          | 50 |
| 2.4.1. Вихідні данні розрахунку маніпулятора деталі.....                                                                                         | 50 |
| 2.4.2. Розрахунок механізму обертання шпинделя.....                                                                                              | 56 |
| 2.4.3. Розрахунок механізму нахилу шпинделя.....                                                                                                 | 62 |
| 2.4.4. Розрахунок редуктора механізму нахилу шпинделя.....                                                                                       | 74 |
| 2.4.5. Силевий розрахунок ножичного підйомника та вибір привода.....                                                                             | 84 |
| Висновки.....                                                                                                                                    | 88 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Дослідження технології наплавлення конструкційних сталей пучком електродів з використанням макету автоматизованої установки..... | 90  |
| 3.1. Аналіз залежності струму наплавлення від складу пучка електродів.....                                                          | 91  |
| 3.2. Принциповий технологічний процес наплавлення деталей різної форми.....                                                         | 93  |
| 3.3. Контроль якості наплавлення, виправлення дефектів.....                                                                         | 97  |
| 3.4. Розрахунок дослідного режиму НПЕ.....                                                                                          | 100 |
| 3.5. Експериментальні дослідження процесу НПЕ.....                                                                                  | 105 |
| Висновки.....                                                                                                                       | 110 |
| 4. Техніка безпеки та охорона праці при роботі на установці.....                                                                    | 112 |
| 4.1. Аналіз шкідливостей та небезпечностей при дуговому напавленні електродами.....                                                 | 113 |
| 4.2. Розрахунок місцевої вентиляції.....                                                                                            | 117 |
| 4.3. Охорона навколишнього середовища.....                                                                                          | 126 |
| Висновки.....                                                                                                                       | 130 |
| Загальні висновки.....                                                                                                              | 131 |
| Список використаних джерел інформації.....                                                                                          | 133 |

|          |             |          |          |      |                         |  |  |  |  |                       |  |      |         |  |  |
|----------|-------------|----------|----------|------|-------------------------|--|--|--|--|-----------------------|--|------|---------|--|--|
|          |             |          |          |      | КР131.6121м.06.04.00.ПЗ |  |  |  |  |                       |  |      |         |  |  |
| Зм..     | Арк.        | № докум. | № Докум. | Дата |                         |  |  |  |  |                       |  |      |         |  |  |
| Студент  | Зверев А.В. |          |          |      | Вступ                   |  |  |  |  | Літ.                  |  | Арк. | Аркушів |  |  |
|          |             |          |          |      |                         |  |  |  |  |                       |  | 5    | 3       |  |  |
|          |             |          |          |      |                         |  |  |  |  |                       |  |      |         |  |  |
| Викладач | Драган С.В. |          |          |      |                         |  |  |  |  | НУК                   |  |      |         |  |  |
|          |             |          |          |      |                         |  |  |  |  | ім. адмірала Макарова |  |      |         |  |  |



В даний час у світі основними металомісткими галузями є промислове та цивільне будівництво, суднобудування, важке машинобудування, автомобілебудування, транспортне машинобудування, трубопровідний транспорт.

Серед конструкційних матеріалів найпоширенішим є сталь, частка якої становить приблизно 93%. За останні 30 років з'явилося понад 1000 нових марок сталей різного призначення, суттєво розширилася номенклатура сталевого прокату, в тому числі з різними покриттями. Механізація та автоматизація технологічних процесів виготовлення зварних конструкцій продовжує залишатися основним напрямом підвищення ефективності виробництва та якості виробів. Створено інверторні джерела живлення, що відрізняються високим ККД, коефіцієнтом потужності, надійністю, малою масою, можливістю здійснення швидкодіючого управління.

Співвідношення зварювальних матеріалів, що склалося в провідних економічно розвинених світових країнах і Україні, застосовуваних для різних способів дугового зварювання електродом, що плавиться, наведено в табл. [1].

Таблиця. Поширеність зварювальних матеріалів

| № з/п | Найменування зварювальних матеріалів                     | Частка зварювальних матеріалів, % |           |
|-------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
|       |                                                          | Провідні світові країни           | Україна   |
| 1     | Покриті електроди                                        | 20                                | 78        |
| 2     | Дріт суцільного перерізу для зварювання в захисних газах | 50...60                           | 12        |
| 3     | Порошковий дріт                                          | 10...20                           | 1,1...1,5 |
| 4     | Зварювальні флюси                                        | 9...12                            | 8...9     |

Аналіз даних табл. показує, що більше ніж три четвертих зварювальних матеріалів, що використовуються в Україні, складають покриті електроди (далі – ПЕ) для ручного дугового зварювання та наплавлення.

Застосування ПЕ має безперечну перевагу при зварюванні (наплавленні) в умовах дрібного виробництва, індивідуального ремонту, а також «польових» ремонтних чи монтажних робіт, що найбільш характерно для України.

Цей спосіб відрізняється великою маневреністю: можна виконувати

зварювання (наплавлення) у будь-якому просторовому положенні, в т.ч. у важкодоступних місцях, швидко змінювати напрям і місце робіт і тим самим регулювати можливі деформації деталі, змінювати склад металу шва (валика) в широких межах за рахунок застосування різних електродів [2].



Рис. Зовнішній вигляд маніпулятора комплексу УПЕ-500.

Переваги ручного дугового зварювання (наплавлення) ПЕ сприяють широкому поширенню в Україні. При цьому на стабільність процесу впливає багато факторів, не всі з яких можна оптимізувати при ручному виконанні робіт. Установки для автоматизованого зварювання (наплавлення) ПЕ існують у поодиноких екземплярах (рис.) і переважно використовуються для тестування електродів [3]. Широкого промислового застосування вони не отримали.

Тим часом в даний час проблема виконання якісного наплавлення сталевих деталей та вузлів актуальна, як ніколи. При виготовленні нових деталей ефект досягається в результаті одержання біметалевих виробів з оптимальним поєднанням властивостей наплавленого та основного металів. Після наплавлення зношених поверхонь відремонтована деталь у кілька разів дешевша за нову деталь і за правильно обраної технології відновлення не поступається їй у працездатності [4].

У сучасних умовах промислові підприємства та ремонтні майстерні нашої країни гостро потребують автоматизованих установок для наплавлення покритими електродами. Створення дешевих маніпуляторів при використанні існуючих зварювальних джерел та передових технологій ручного наплавлення дозволить не тільки забезпечити високу якість наплавних робіт за низької собівартості, а й зниження капітальних вкладень на обладнання.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Зм.. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

КР131.6121м.06.04.00.ПЗ

Аркуш

7

|          |             |          |          |      |                                                                                              |  |  |  |  |                              |      |         |    |
|----------|-------------|----------|----------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|------------------------------|------|---------|----|
|          |             |          |          |      | КР131.6121м.06.04.01.ПЗ                                                                      |  |  |  |  |                              |      |         |    |
| Зм..     | Арк.        | № докум. | № Докум. | Дата |                                                                                              |  |  |  |  |                              |      |         |    |
| Студент  | Зверев А.В. |          |          |      | Аналіз технології дугового на-<br>плавлення деталей в суднобу-<br>дуванні та машинобудуванні |  |  |  |  | Літ.                         | Арк. | Аркушів |    |
|          |             |          |          |      |                                                                                              |  |  |  |  |                              |      | 8       | 20 |
| Викладач | Драган С.В. |          |          |      |                                                                                              |  |  |  |  | НУК<br>ім. адмірала Макарова |      |         |    |
|          |             |          |          |      |                                                                                              |  |  |  |  |                              |      |         |    |

## 1.1. Характеристика деталей, що підлягають ремонтному відновленню методами дугового наплавлення.

Всі деталі, що відновлюються, поділяються на тіла і не тіла обертання.

До тіл обертання належать (рис. 1.1):

- точні циліндричні деталі (поршневі пальці, деталі гідроциліндрів, прецизійні деталі паливної апаратури, деталі гідророзподільників, хрестовини карданних валів, штовхачі двигунів, клапани двигунів);



Рис. 1.1. Тіла обертання.

- вали та осі (вали та осі циліндричні, вали шліцеві, вал та осі (півосі) з фланцями та (або) вилками, вали-шестірні, вали пусто-тілі, розподільні вали, колінчасті вали);

- склянки, гільзи, диски, ролики, ковзання (маховики, гільзи циліндрів, склянки, втулки, маточини, фланці, чашки диференціалів, напрямні колеса, ролики, шківи, барабани, барабани гальмівні, опорні катки, ролики, поршні двигунів, диски тертя) диски муфт зчеплення);

- деталі із зубчастими поверхнями (зубчасті колеса, зірочки ланцюгових передач, провідні колеса, храповики, полотна транспортерів, шнеки).

До тіл не обертання відносяться (рис. 1.2):

- корпусні деталі (блоки циліндрів, головки циліндрів, корпуси коробок передач і трансмісій, корпуси редукторів, картери, підшипникові щити, корпуси гідронасосів, балансири, станини, ланки гусениць, черевики, ножі різальних апаратів, кожухи, оперення, крила, баки, радіатори);



Рис. 1.2. Тіла не обертання.

- шатуни, важелі, кронштейни, рамні конструкції (шатуни, вилки перемикання передач, кронштейни, важелі, коромисла, рамні конструкції зварні та клепа-но-зварні, ланки, планки транспортерів) [8].

## 1.2. Технологія та обладнання для наплавлення конструкційних сталей покритими електродами.



Рис. 1.3. Ручне дугове наплавлення покритими електродами

Ручне дугове наплавлення покритими електродами (далі – РДНПЕ) застосовується в тих випадках, коли використання механізованих способів неможливе або не-доцільне (рис. 1.3). До переваг РДНПЕ відносяться використання звичайного зварювального обладнання та можливість наплавлення деталей складної конфігурації в усіх просторових положеннях. При РДНПЕ потрібна висока кваліфікація зварника, тому що технологічний процес необхідно вести на мінімальних струмі та напрузі з метою зменшення частки основного металу в на-

плавленім з одночасним забезпеченням якісного сплавлення [15].  
Для однотипних і масових виробів, що відновлюються методом наплавлення покритими електродами, доцільно мати детально розроблені карти технологічного процесу. Така карта значно спрощує роботу технолога, дозволяє оптимізувати роботу наплавної ділянки, забезпечує повторюваність та високу якість наплавлення [2].

Деталі, що піддаються наплавленню, як правило, працюють тривалий час і забруднюються. Деталі, що працюють на зминання та ударне навантаження, отримують наклеп і в них можуть мати місце тріщини, місцеві зминання та розшарування металу (рис. 1.4, а). Тому всі деталі або поверхні великих виробів, що наплавляються, повинні бути попередньо підготовлені до наплавлення. Зачищення проводять ручним механічним способом, при необхідності з використанням електро- або пневмоінструменту.

Поверхні зім'яті, наклепані, нерівномірно зношені в т.ч. ексцентрично,

що мають задираки, тріщини, повинні бути відповідним чином підготовлені до наплавлення. Обробку можна виконувати на токарних, стругальних, розточувальних та фрезерних верстатах. У більшості випадків величина шару, що знімається, становить 1,5...2 мм, а іноді може досягати і до 10 мм. У разі наплавлення зношених різьблень старе різьблення повинно бути видалене повністю і поверхня, що підлягає наплавленню, додатково піддана випалу газового пальника для видалення слідів масла, фарби і дегазації шару, що наплавляється.



а



б

Рис. 1.4. Ручне дугове наплавлення покритими електродами:

а – робочій поверхні рейки в «польових» умовах;

б – «розбитого» отвору великого діаметру.

Розроблені отвори діаметром до 30 мм зазвичай повністю заварюються. Перед заваркою обов'язкове очищення та обробка кромки отвору газовим полум'ям. Отвори великого діаметра відновлюються кільцевим наплавленням (рис. 1.4, б). Поверхні з точною механічною обробкою та шліфовані, розташовані поряд з частиною, що наплавляється, повинні бути ретельно захищені від попадання на них бризок; особливо ретельно слід захищати різьблення. Застосовують захисні ковпаки з листової сталі, азбесту та інших негорючих матеріалів. Можна обмежитися покриттям крейдою, розведеною водою з незначним додаванням рідкого скла, або скористатися спеціальними силіконовими спреями, пастами тощо [2].

У судноремонті для відновлення розмірів металевих деталей механізмів, елементів корпусу судна широко застосовують електродугове наплавлення, яке виконують механізованим способом або рідше вручну [10].

Основні параметри режиму РДНПЕ: сила зварювального струму, напруга на дугі та швидкість наплавлення. Тип електроду обирають в залежності від складу металу, який необхідно наплавити, а діаметр – від товщини та форми виробу, просторового положення поверхні. Переважно наплавлення виконують електродами діаметром 2...6 мм постійним струмом 80...300 А зворотної полярності. Продуктивність процесу складає 0,3...3 кг/год. Сила струму при напавленні залежить від швидкості подавання електроду. Продуктивність наплавлення прямопропорційна обом цим параметрам. Однак збільшення сили струму приводить до збільшення глибини проплавлення і утворення занадто вузьких та високих валиків, що негативно впливає на якість наплавлення. Напруга дуги визначає форму валика: із зростанням збільшується ширина та зменшується висота, збільшується довжина дуги та окислюваність металу. При збільшенні діаметру електрода зменшується глибина проплавлення та збільшується ширина валика.

ДСТ 10051 встановлює 44 типи покритих металевих електродів для наплавлення. Хімічний склад електродного стрижня значно впливає на склад і механічні властивості валика [15].

При РДНПЕ низьковуглецевих або низьколегованих конструкційних сталей, якщо наплавлений шар не повинен за своїми механічними властивостями відрізнитись від основного металу, за ГОСТ 9467 можливо застосовувати електроди наступних типів: Е42, Е42А, Е46, Е46А, Е50, Е50А, Е55, Е65, Е85 та ін.

Для наплавочних робіт в машинобудуванні, суднобудуванні та судноремонті добрі результати дають електроди типу «Б» з фтористо-кальцієвим (основним) покриттям (рис. 1.5), наприклад: УОНІ-13/45, УОНІ-13/55, УОНІ-13/65, УОНІ-13/85, УОНІ-13/105, ТМУ-21, АНО-11 та ін. Ці електроди



утворюють в наплавленому валику дрібнозернисту структуру з високою ударною в'язкістю та гарантують відсутність тріщин.



Рис. 1.5. Електроди з основним покриттям.

Електроди типу «Р» з рутиловим покриттям ( $\text{TiO}_2 - 50\%$ ) дозволяють отримати щільний наплавлений валик при наявності іржі на поверхні, незначне розбризкування електродного металу (рис. 1.6). Вони придатні для наплавлення постійним та змінним струмом у всіх положеннях, забезпечують стійке горіння дуги та використовуються для наплавлення низьковуглецевих сталей. Найбільш поширені марки рутилових електродів: АНО-4, АНО-21, АНО-24, ОЗС-4, МР-3.

Перед зварюванням та наплавленням необхідне прожарювання електродів: з рутиловою обмазкою при  $80...120\text{ }^\circ\text{C}$ , з карбонато-рутиловим покриттям при  $200...250\text{ }^\circ\text{C}$  та з основним – при  $300...350\text{ }^\circ\text{C}$ . Час прожарювання  $2...2,5$  години [2, 11, 15, 36].



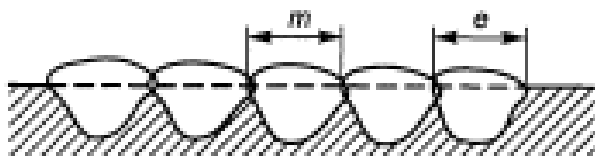
Рис. 1.6. Електроди з рутиловим покриттям.

Режим наплавлення залежить від товщини основного металу, розмірів виробу, вимог до якості, до зовнішнього вигляду та інших показників. Для отримання мінімальної глибини проплавлення основного металу електрод нахиляють в бік, зворотній напрямку наплавлення, щільність струму повинна складати  $11...12\text{ А/мм}^2$ . Дуга повинна бути достатньо стійкою, безперервною. Заміну електрода необхідно виконувати швидко, а після повторного збудження дуги метал кратеру потрібно добре переварити. При наплавленні для отримання однорідності кожний наступний валик повинен перекривати попередній приблизно на половину шва (рис. 1.7).

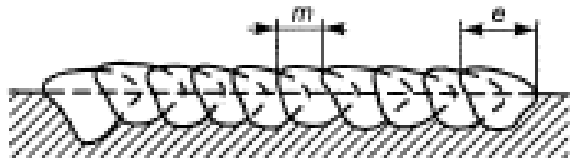
Техніка РДНПЕ передбачає різноманітні прийоми ведення робіт при наплавленні тіл обертання, плоских поверхонь та деталей складної форми (рис. 1.8) з метою отримання якісного наплавленого шару з заданими властивостями



та мінімальною деформацією виробу.



а



б

Рис. 1.7. Схема наплавлення валиків за різної величини кроку:

а – великий крок;

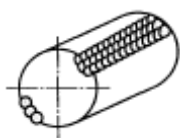
б – малий крок,

де  $m$  – крок наплавлення,

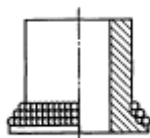
$e$  – ширина шва

При напавленні круглих деталей електрод зміщують відносно вертикальної осі, що проходить через центр обертання, в бік, протилежний обертанню деталі. Зміщенням електрода попереджують стікання рідкого металу та шлаку [15].

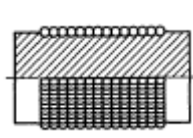
При напавленні великих поверхонь, наприклад обшивки корпусу судна, поверхню розбивають на рівні квадрати площею 100 см<sup>2</sup>. Напавлення ведуть врозкид зі зміною напрямку швів (рис. 1.9) [11].



а



б



в



г

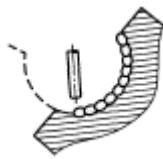
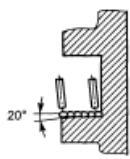


Рис. 1.8. Схеми виконання напавлення.

а – напавлення валу за твірною; б – напавлення валу по колу горизонтальним швом на вертикальній площині; в – напавлення валу, що обертається, по колу горизонтальним швом в нижньому положенні; г – напавлення струмків прокатних валків різних типів

При ремонті елементів з пластичних матеріалів релаксація напружень протікає самовільно та завершується на протязі коротких проміжків часу. Так стається з корпусними конструкціями суден [12].

При напавленні валів вздовж осі, щоб уникнути деформації, необхідно суворо дотримуватися послідовності накладання валиків. Перед механічною обробкою напавлені вали піддають термообробці для зняття внутрішніх

напружень [11].

Повністю зняти остаточні механічні напруження можливо лише за допомогою низькотемпературного відпалу, що в умовах судноремонтних підприємств не завжди вдається здійснити. Тому замість відпалу іноді вдаються до накладення з високою силою струму зайвого, «відпалюючого» валика, який надалі можливо видалити [12].

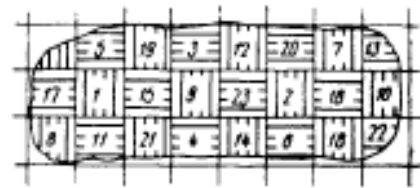


Рис. 1.9. Схема наплавлення корпусу судна.

Спеціальні стенди та пристосування дозволяють прискорити установку та повертання деталей, що наплавляються (рис. 1.10). Це підвищує продуктивність процесу на 15...20% та суттєво полегшує виконання допоміжних операцій. Продуктивність ручного дугового наплавлення збільшується на 30...40% також при використанні присадного прутка або пучка електродів [13].



Рис. 1.10. Консольний стенд для зварювання та наплавлення

Джерелом тепла при ручному електродуговому напавленні є електрична дуга, що є стійким електричним розрядом в іонізованій суміші парів і газів речовин, що входять до складу електрода (рис. 1.11). Температура стовпа дуги сягає 6000...7000°C. Теплота в області горіння електричної дуги розподіляється: на аноді 43%, на катоді – 36% та на дугу – 21%.

Електрична дуга постійного струму горить стійкіше і забезпечує процес наплавлення при прямій (мінус – на електроді, а плюс – на деталі) та зворотній полярності. Зворотна полярність дозволяє зменшити тепловий вплив на деталь, що наплавляється, тому що в цьому випадку на позитивному електроді (аноді) на 20 % виділяється тепла більше, ніж на катоді (деталі). Це має позитивний вплив на якість наплавлення, тому такий спосіб ведення процесу є найбільш поширеним. У разі використання змінного струму на електродах виділяється приблизно однакова кількість тепла. Наплавлення, як правило, ведуть короткою дугою з метою

кращого захисту валика (зменшення пороутворення, тощо) [9, 16].

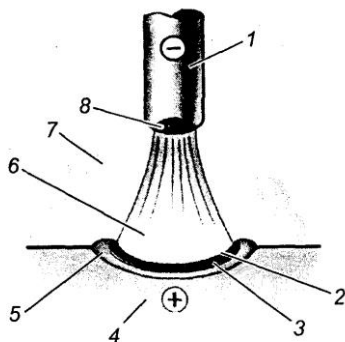


Рис. 1.11. Схема горіння зварювальної дуги.

1 – електрод; 2 – кратер; 3 – анодна пляма; 4 – основний метал (деталь); 5 – зварювальна ванна; 6 – стовп дуги; 7 – іонізована парогазова хмара; 8 – катодна пляма

Джерелом постійного струму при наплавленні електродуги є випрямлячі (рис. 1.12), перетворювачі і агрегати з приводом від двигуна внутрішнього згоряння. Джерело змінного струму – зварювальні трансформатори.

Застосовуються зварювальні випрямлячі ВДУ-306, ВДУ-601, ВСС-120А, ВСС-300-3, ЗСУ-300, ВДГ-302; ВДГ-601; ВСЖ-303, ВДУ-1001, ВКСМ-1001, випрямляч ВД-306Д, наприклад, призначений для ручного зварювання штучним електродом на постійному та змінному струмі вуглецевої та легованої сталей, зварювальні перетворювачі ПСО-300-3, ПСО -500, ПСУ-300, ПСГ-500, ПСУ-500, ПС-1000. Перетворювачі ПСО мають крутопадаючу зовнішню вольт-амперну характеристику (далі – ВАХ), ПСГ – жорстку, ПСУ – жорстку або падаючу при відповідному підключенні обмоток.



Рис. 1.12. Зварювальний випрямляч ВД-306Д

Зварювальні агрегати мають привід від бензинового або дизельного двигуна внутрішнього згоряння: АСБ-300-7, АДВ-306, АДД-303 – з крутопадаючою, АС Д-3-1 – падаючою, АСП-500Г-3М – з жорсткою зовнішньою ВАХ.

Для наплавлення на змінному струмі застосовують зварювальні трансформатори ТС-300, ТСП-2, ТД-300, СТН-450, СТШ-500, ТСД-1000, ТСК-300, ТСК-500, ТДМ-401, ТДМ-503. Зварювальні трансформатори мають падаючу зовнішню ВАХ [5, 14].

Найбільш складними та сучасними джерелами живлення зварювальної дуги є зварювальні інвертори. Завдяки малій вазі та розмірам понижуючого

трансформатора, інверторні джерела живлення мають невеликі габарити та вагу. Іншим достоїнством інверторів є їхня універсальність, бо їх зовнішні ВАХ можуть мати будь-яку форму, що дозволяє використовувати їх для будь-яких видів наплавлення.

Випускається великий спектр інверторів для ручного дугового наплавлення вітчизняних та зарубіжних фірм: інвертори PATON серії PRO від 160 до 630 А, професійні інвертори Дніпро-М, універсальний зварювальний інвертор загального призначення Invertec V-3001, інвертор Brima MMA-180 Hobby (ООО НВО Мідасот), Сварог PRO ARC – (фірма Jasic), Ресанта САПД-165, Форсаж-180, Форсаж-301, Форсаж-200 АС/ДС, Ударник УІС-200, Інтерскол ІСА-250/10,6 [9].



Рис. 1.13. Зварювальний інвертор PATON PRO-500-400V

До головних недоліків ручного дугового наплавлення слід віднести низьку продуктивність процесу, високу глибину проплавлення основного металу та високу частку його участі в наплавленому валику (20...40 %) [1], значні коливання лінії сплавлення вздовж валика, висока деформація виробу, якість наплавлення в значній мірі залежить від людського фактору, високі газовиділення процесу тощо [18].

### 1.3. Досвід впровадження ручного наплавлення пучком електродів та проблеми автоматизації процесу.

Одним із високопродуктивних способів РДНПЕ, як відзначалося вище, є застосування пучка електродів.

В 1893 році М. М. Бенардос (рис. 1.14) запропонував використовувати декілька електродів з загальним струмопідведенням для отримання ванни з рідким металом [19].



Рис. 1.14. Бенардос М. М.

1842 – 1905

Перші практичні результати в цьому напрямку були отримані в 1937 році. Інженером Василем Сергійовичем Володіним був розроблений метод зварювання спареними електродами, який пройшов випробування на низці заводів колишнього СРСР та отримав схвальні відгуки [20]. В 1939 році на московській нараді стахановців-зварювальників метод був рекомендований до широкого застосування в промисловості [21].

В 1946 році метод був вдоско-

налений автором (рис. 1.15) та отримав подальший розвиток як метод зварювання пучком електродів (далі – ЗПЕ). На протязі двох років він широко і з успіхом застосовувався на багатьох будівництвах Головнафтобуда Міністерства будівництва паливних підприємств колишнього СРСР [20]. В 1948...1950 роках були проведені всебічні дослідження метода ЗПЕ лабораторією зварювання ВНДІБуднафти, відділенням зварювання ЦНДІ залізничного транспорту, лабораторіями зварювання багатьох заводів. Метод ЗПЕ був рекомендований до широкого промислового впровадження. Протягом 6 років з моменту виникнення він в різних його варіантах набув значного розповсюдження. Особливо можна відзначити заводи та будівництва наступних міністерств колишнього СРСР: нафтової промисловості, шляхів сполучення, будівництва підприємств машинобудування, електротехнічної промисловості та ін. Цей метод зі значним успіхом застосовувався також на заводах з виготовлення зварних металоконструкцій [21].

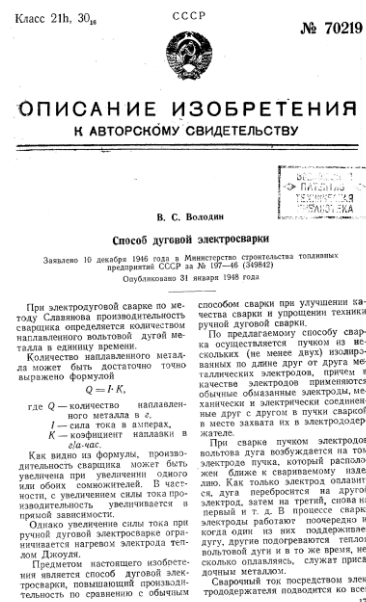


Рис. 1.15. Авторське свідоцтво Володіна В.С.



Рис. 1.16. Пучок з двох електродів

ЗПЕ набуло на даному підприємстві широкий розвиток.

Починаючи з 1953 року метод ЗПЕ почали використовувати в суднобудівній галузі. Після позитивних результатів, отриманих в корпусно-зварю-

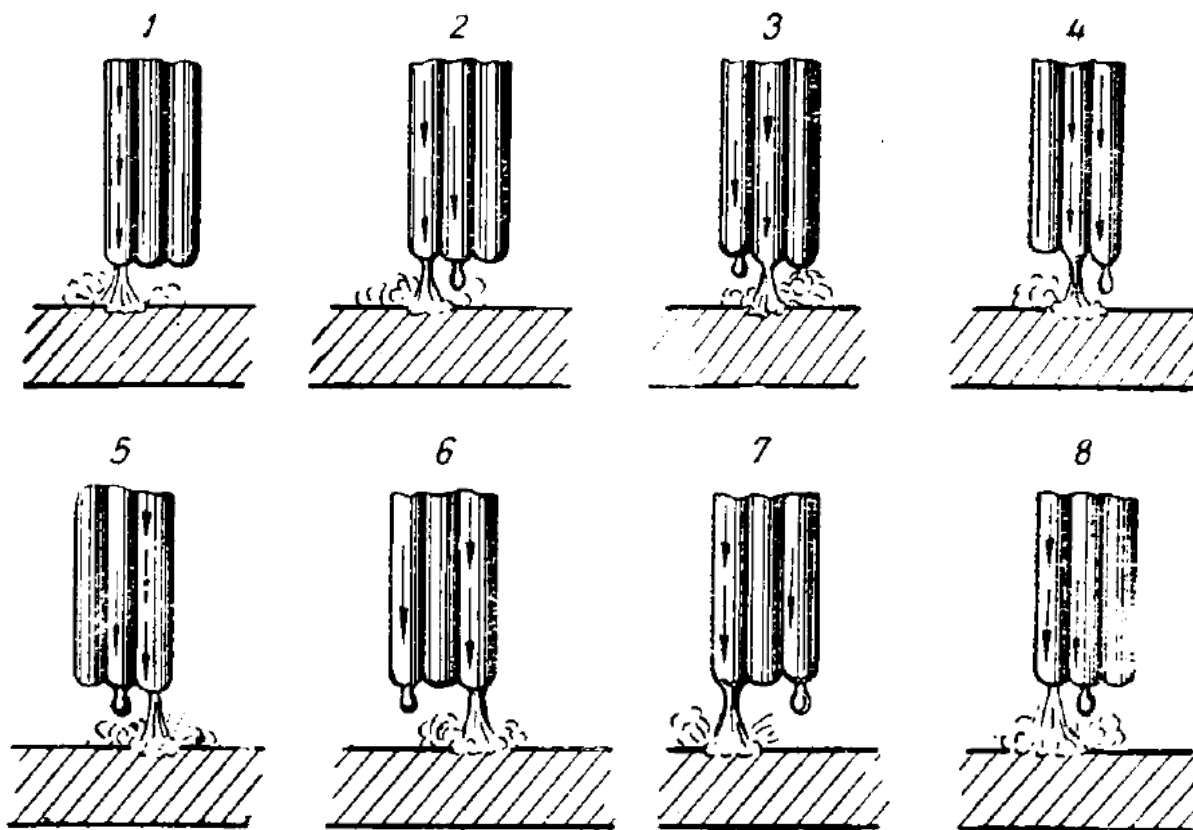


Рис. 1.17. Схема плавлення при наплавленні пучком, складеним із трьох електродів.

Одночасно з методом ЗПЕ були розроблені та впроваджені ремонтні технології наплавлення пучком електродів (далі – НПЕ). Наплавлення проводиться при одночасному використанні двох, трьох і більше електродів, ізолюваних один від одного по довжині покриттям і з'єднаних між собою у верхній частині пучка електроприхваткою, а поверх покриття перев'язаних лляною ниткою або тонким дротом в декількох місцях (рис. 1.16).



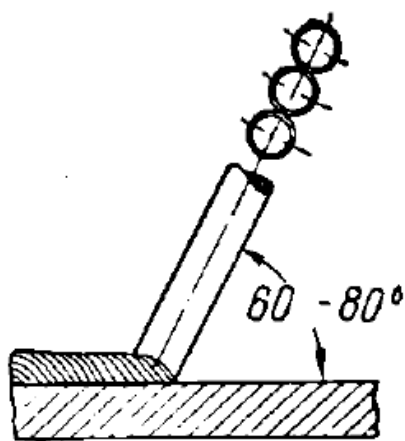


Рис. 1.18. Положення пучка електродів при наплавленні.

Установка електродів у пучку може бути різною і залежить як від виду наплавних робіт, так і від конструкцій деталей, що наплавляються. Крім того, пучок може бути складений із електродів однієї або різних марок.

Зварювальна дуга, поперемінно утворюючись на різних електродах, розплавляє їх по черзі, а плавлення електродів триває до повного використання покритої частини, після чого зварювальник виймає з електродотримача

недогарки і на їх місце вставляє новий пучок електродів (рис. 1.17).

За аналогічною схемою плавляться електроди пучка, складеного з двох, чотирьох і більше стрижнів, причому у всіх випадках дуга горить дуже стійко, завдяки чому забезпечується добре сплавлення валика з поверхнею.

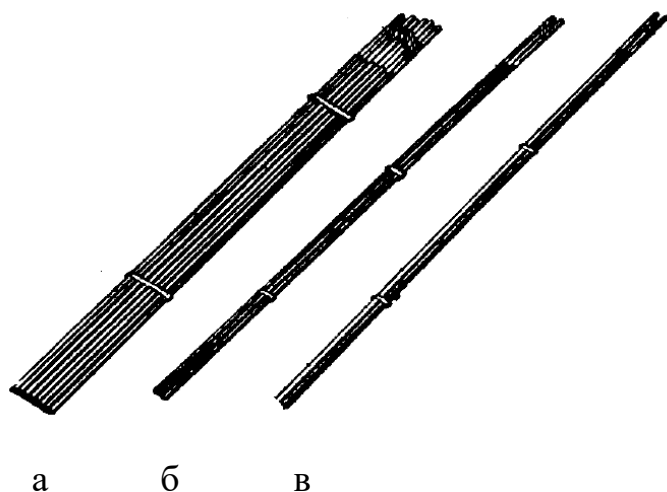


Рис. 1.19. Пучки електродів для наплавлення:

а – гребінка із семи електродів;

б – гребінка з трьох електродів;

в – гребінка з двох електродів.

При НПЕ зварювальник здійснює тільки подачу пучка електродів у міру його плавлення у зварювальну ванну і пересуває пучок вздовж поверхні, що наплавляється. Положення гребінки при наведено на рис. 1.18. Поперечні ж рухи пучка, обов'язкові при наплавленні одним електродом, робити не потрібно, тому що вони замінюються мимовільним переміщенням дуги по всій ширині гребінки. Для захисту валика від окислення та азотування дуга повинна бути можливо коротшою.

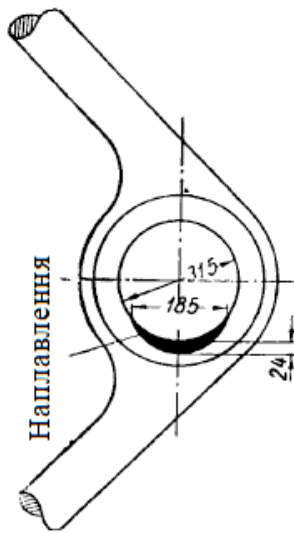


Рис. 1.20. Наплавлення внутрішньої поверхні маточини кронштейна гребного валу.

Перед НПЕ зношена внутрішня поверхня маточини кронштейна (довжиною 460 мм та шириною 185 мм) гребного валу (рис. 1.20) спочатку була ретельно очищена від мастила та бруду. Наплавлення виконувалося гребінками з трьох електродів діаметром 4 мм (рис. 1.21), при силі струму 300 А, причому валики першого шару наплавлялися по утворюючій, а валики другого шару – перпендикулярно їм і так далі. Поверхня кожного валика перед накладенням наступного ретельно очищалася від шлаку, окалини та бризки. Усього було наплавлено п'ять шарів.

Для наплавлення шийки гребний вал був покладений на роликові опори,

Для наплавлення, як правило, краще застосовувати пучки у вигляді гребінки з двох і більше електродів (рис. 1.19).

При НПЕ, загальна довжина електродів збільшується залежно від кількості електродів у гребінці. Завдяки цьому кількість обривів дуги зменшується, що позитивно позначається на якості наплавлення, а час плавлення пучка збільшується. Також скорочується допоміжний час на зміну електродів.

Серед НПЕ, виконаних на вищевказаному заводі, окремо можна відзначити наступні наплавлення: внутрішньої поверхні маточини кронштейна

гребного валу; шийок гребних та проміжних валів; внутрішніх поверхонь маточин гребних гвинтів; внутрішньої поверхні п'ятки керма; шийки балера керма тощо.

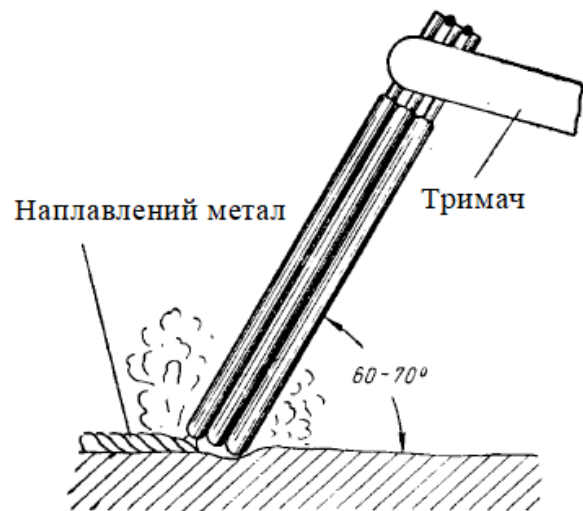


Рис. 1.21. Положення гребінки з трьох електродів при наплавленні.

Поверхня кожного валика перед накладенням наступного ретельно очищалася від шлаку, окалини та бризки. Усього було наплавлено п'ять шарів.



які дозволяли повертати його з наплавленням валиків. Для перевірки жолоблення валу в процесі НПЕ були використані рейсмуси. У зв'язку з тим, що вміст вуглецю в металі валу становив 0,3 %, щоб виключити появу в ньому небажаних структурних складових або значних внутрішніх напружень, шийка валу попередньо нагрівалася до температури 150°. При цьому вал нагрівався рівномірно як за довжиною, так і перерізом за допомогою спеціальної обмотки з використанням змінного струму промислової частоти. При переході з одного діаметра валу на інший валик металу не обривався в районі переходу, а поступово переводився на інший перетин на довжині 20...30 мм. Поверхня кожного наплавленого валика металу перед накладенням наступного очищалася від шлаку пневматичним молотком з подальшим зачищенням її металевими щітками. Наплавлення проводилося пучками з чотирьох електродів діаметром 4 мм марки УОНІ 13/45 типу Е42А, з'єднаних у вигляді гребінки. Сила струму становила 400 А.



Порядок накладення валиків

Рис. 1.22. Наплавлення шийки балера керма.

Для відновлення шийки балера керма зношена ділянка була проточена на токарному верстаті на глибину 2 мм. Далі балер уклали на роликові опори та зробили попередній підігрів місця НПЕ індукційним мето-

дом. Наплавлення проводилося пучками із шести електродів діаметром 4 мм, складеними у вигляді гребінки. Ділянка балера з наплавленою шийкою показана на рис. 1.22.

Застосування НПЕ дозволило у два з половиною рази підвищити продуктивність праці порівняно з наплавленням одиночним електродом.

Перевірка якості валиків, наплавлених пучком з електродів типу Е42 за ДСТ 2523-51, показала, що наплавлений метал має типову для електродугового наплавлення структуру, нормальну щільність, відсутність шлакових включень і пір, добре сплавлення [22].

Істотним недоліком, що обмежує застосування НПЕ, є можливість виконання наплавлення тільки в нижньому положенні.

Науково-дослідницькі та дослідно-конструкторські роботи ІЕЗ ім. Є. О. Патона, ВНДІЗТ, ВНДІАЧЕРМЕТ та багатьох інших організацій призвели до бурхливо впровадження в нашої країні з середини 50-х років минулого століття автоматизації процесів наплавлення в ремонтній сфері [19, 23, 24, 35]. Застосування більш продуктивних та стабільних технологічних процесів, що базувалися на використанні зварювальних дротів, призвело до поступового згасання зацікавленості в НПЕ, яке вимагало високої кваліфікації зварників та відрізнялося шкідливими умовами праці.

Створення автоматизованих установок НПЕ ніколи серйозно не розглядалося через наступні обставини.

Згідно з ДСТ 9466–75 довжина покритих електродів для низьковуглецевої або легованої сталей залежності від їх діаметру складає 200...450 мм, що суттєво обмежує обсяг робіт з наплавлення, який можливо виконати без згасання дуги, навіть при НПЕ.



Рис. 1.23. Стрижневі покриті електроди фірми HYUNDAI WELDING

В світі існують покриті електроди довжиною до 700...800 мм з діаметром від 4 мм та більше. Наприклад (рис. 1.23), рутилові електроди фірми HYUNDAI WELDING Co., LTD (Південна Корея) [37]. При наявності на підприємствах власного електродного виробництва або за спеціальними технічними умовами можливо виготовити покриті електроди з довжиною більше ніж 800 мм.

Велика довжина покритих електродів приведе до відхилень їх від прямолінійності, надмірним коливанням робочого торця при наплавленні, що унеможливає точне накладення валиків автоматичному режимі. Застосування бандажних ниток та дротів не дозволяє забезпечити технологічні вимоги до гребінки: в процесі НПЕ осі електродів повинні бути паралельні та лежати в одній площині.

Із зростанням кількості електродів в гребінці та їх довжини неплосинність буде тільки підсилюватись. Однак, при великій довжині збільшуються радіуси кривизни при згинанні, що у випадку основних електродів може виключити вірогідність розтріскування та відлущення покриття, яке має низьку еластичність.

Для виключення неплосинності гребінки та відхилення її торця, яке буде зменшуватись по мірі витрати електродів в ній, можливо застосовувати спеціальний напрямний пристрій у вигляді кронштейну з щілиною, через яку буде просуватися гребінка. Щілина повинна забезпечувати низькій опір проходженню електродів та не псувати їх покриття. Кронштейн потрібно встановлювати ближче до робочого торця гребінки. Бандажні нитки або дроти в такому випадку не потрібні.

Метод НПЕ має низку недоліків, що обмежують його застосування та заважають автоматизації процесу.

1. Необхідність виготовлення індивідуальних гребінок для кожного технологічного процесу, що ускладнює підготовку порівняно з застосуванням для наплавлення дротів та стрічок.

2. Гребінку з електродами великої довжини складно застосувати для внутрішнього наплавлення внаслідок громіздкості конструкції, а електроди малої довжини або діаметру приводять до збільшення кількості проходів.

3. Можливість виконання робіт лише в нижньому положенні потребує наявності спеціального оснащення для повертання деталі, що відновлюється.

4. Кількість шлаку при НПЕ прямо пропорційна кількості електродів в гребінці. Тому потрібно вживати заходів, щоб рідкий шлак не затікав на поверхню деталі перед наплавленням. Це також ускладнює заплавлення глибоких отворів при ремонті. Необхідність видаляти шлак після завершення кожного технологічного проходу збільшує трудомісткість допоміжних операцій.

5. Ведення наплавлення короткою дугою потребує високої чутливості системи автоматизованого керування, щоб уникнути залипання електродів, яке може привести до перегріву ділянки деталі, що відновлюється, а також дуже складно проходити за один раз нерівні за висотою поверхні.

6. Підвищена загазованість приміщення при НПЕ, потребує більш потужних систем вентиляції, або навіть захисту органів зору та дихання.

Дослідницькі роботи, спрямовані на рішення проблеми самовільного відокремлення та руйнування шлакової кірки після остигання валика, активно проводяться в усьому світі [38, 39]. Цілком можливо, що незабаром необхідність механічного видалення шлаків буде усунена та дрібні відлущені частки його можна буде просто прибирати пилососом, як це роблять для залишків флюсу. Тоді для повної автоматизації процесу НПЕ практично не буде суттєвих перешкод.

#### **1.4. Постановка завдань магістерського дослідження.**

Як було зазначено раніше (табл.) покриті електроди складають 78 % всіх зварювальних матеріалів, що використовуються в Україні. Провідне місце в ремонті машин займають саме процеси зварювання та наплавлення, на які приходить близько 80 % всіх відновлених деталей [13]. Тому можна стверджувати, що покриті електроди є життєво важливим для країни зварювальним матеріалом, який визначає технологічний рівень робіт з створення та ремонту сталевих деталей та конструкцій. Як відомо, сталі складають 93 % всіх конструкційних матеріалів в світі [1].

Слід також прийняти до уваги наявність налагодженого та розвинутого вітчизняного виробництва покритих електродів як на власній, так і на закордонній сировинній базі, наприклад, група компаній «ПлазмаТек» (м. Вінниця), ДП «ДЗЗМ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ (м. Київ), ТОВ «Суми-Електрод» (м. Суми), ТОВ ВКП «Українська Південна компанія» (м. Миколаїв) та ін. [26...28, 40].

Тому завдання подальшого розвитку технологій та устаткування для дугового наплавлення покритими електродами є стратегічно важливим для України, бо без прогресу в цій галузі неможливо забезпечити потреби виробництва та ремонту, що невпинно зростають. Втрата ініціативи за даним напрямком призведе до зростання залежності країни від зовнішніх ресурсів.

Найбільш ефективним засобом підвищення стабільності, зростання продуктивності, зменшення трудомісткості є автоматизація технологічного

процесу. Важливою частиною будь-якої автоматизованої установки є механічна частина, від простоти та точності роботи якої в значній мірі залежать капітальні та експлуатаційні витрати, а також якість виконання технологічного процесу. Важливо щоб механічна частина складалася з простих та доступних матеріалів, мала типові конструктивні рішення, виготовлення базувалось на широко поширених технологічних процесах [35].

На підставі вищевикладеного можна сформулювати наступні завдання магістерського дослідження.

1. Виконати аналіз технологічних процесів наплавлення конструкційних сталей покритими електродами в т.ч. ПЕ.

2. Сформулювати технічні вимоги до механічної частини установки автоматизованого наплавлення ПЕ.

3. Розробити конструкційні рішення маніпуляторів ПЕ та деталі, що наплавляється.

4. Скласти розрахункові схеми, виконати силовий розрахунок та перевірку на міцність та жорсткість найбільш відповідальних конструктивних елементів маніпуляторів, обґрунтувати вибір електропривода.

5. Виконати аналіз подальшого розширення технологічних можливостей при прийнятих конструктивних рішеннях для механічної частини автоматизованої установки.

6. Скласти технологічний процес та виконати розрахунок режиму наплавлення ПЕ конструкційних сталей.

7. Виконати ручне дугове заплавлення отвору та наплавлення плоскої поверхні зразків з сталі 20, яке використовується при відновлювальному ремонті, та виконати металографічні дослідження якості.

8. Виконати аналіз шкідливих викидів від електродів, які застосовуються для відновлювального наплавлення низьковуглецевих сталей, та їх вплив на людину та оточуючу середу. Визначити ефективність рішень з організації місцевої витяжної вентиляції.

## Висновки.

Виходячи з факту безумовного домінування покритих електродів серед зварювальних матеріалів, що поширені в Україні, завдання створення обладнання автоматизованого наплавлення ними для усунення проблем, пов'язаних з ручним способом ведення робіт, стоїть, як ніколи, актуально.

Застосування метода НПЕ відкриває широкі можливості за допомогою комбінування електродів різних типів отримати на деталі наплавлений шар будь-якого потрібного складу та властивостей. Автоматизація процесу НПЕ дозволить усунути головні недоліки ручного способу ведення робіт: знизити високу частку основного металу в наплавленому, звільнитися від залежності в високій кваліфікації зварювальника, забезпечити нешкідливі умови праці. Елементна база та конструктивні рішення маніпуляторів гребінки електродів та деталі для створення верстатів автоматизованого НПЕ повинні бути простими та доступними для звичайних механообробних, механо-складальних та зварювально-складальних дільниць в виробничих та ремонтних цехах загального машинобудування. Сформульовані принципи побудови маніпуляторів гребінки та деталі дозволяють зробити розрахунок механічної частини верстату для виконання НПЕ.

Використання доступних покритих електродів в рамках автоматизованого НПЕ дозволить не лише знизити витрати на закупівлю дорогих та рідкісних в країні зварювальних матеріалів, спеціального складного та переважно громіздкого устаткування для наплавлення, зберегти кошти, потрібні на сервісні договори та оренду великих виробничих приміщень, але й забезпечити високу якість наплавлення при використанні звичайного обладнання для ручного дугового зварювання. Це особливо важливо для малих підприємств, що зайняті відновленням широкого спектру різноманітних деталей та працюють в умовах штучного та дрібносерійного виробництва. Автоматизоване НПЕ дозволить їм чутливо реагувати на мінливу кон'юнктуру ринку, без додаткових витрат опановувати нові номенклатури виробів, виконувати обслуговування устаткування власними силами.

|          |             |          |          |      |                                                                      |                              |      |         |
|----------|-------------|----------|----------|------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|------|---------|
|          |             |          |          |      | КР131.6121м.06.04.02.ПЗ                                              |                              |      |         |
| Зм..     | Арк.        | № докум. | № Докум. | Дата | Розробка автоматизованої установки для наплавлення пучком електродів | Літ.                         | Арк. | Аркушів |
| Студент  | Зверев А.В. |          |          |      |                                                                      |                              | 28   | 62      |
|          |             |          |          |      |                                                                      | НУК<br>ім. адмірала Макарова |      |         |
| Викладач | Драган С.В. |          |          |      |                                                                      |                              |      |         |

## 2.1. Обґрунтування складу та принципової компоновальної схеми установки, функціональні вимоги до системи керування та виконавчих механізмів.

Раніше зазначалось, що наплавлення переважно виконують покритими електродами діаметром 2...6 мм [15]. Згідно з ДСТ 9466–75 для стрижнів з низьковуглецевих та легованих сталей повна довжина електроду буде сягають 250...450 мм [25]. Нормативну довжину недогарків зазвичай приймають 50 мм [50].

Кут нахилу електродів до горизонту при НПЕ в залежності від розміщення гребінки до напрямку наплавлення складає: для поперечного –  $60^\circ \dots 80^\circ$  (див. рис. 1.18), для поздовжнього –  $60^\circ \dots 70^\circ$  (див. рис. 1.21). Таким чином, максимальний кут складає  $80^\circ$ , тоді максимальний технологічний хід гребінки по вертикалі буде  $(450 - 50) \cdot \sin 80^\circ \approx 394$  мм. Максимальне переміщення по осі Z призначаємо 400 мм.

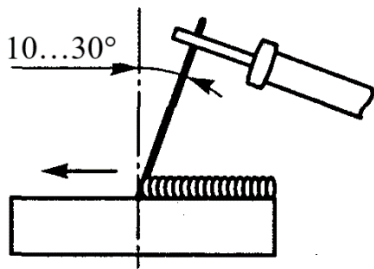


Рис. 2.1. Наплавлення «кутом вперед»

З точки зору зменшення глибини проплавлення доцільно вести наплавлення «кутом вперед» (з нахилом в бік валика) або, як максимум, під прямим кутом до поверхні, але внаслідок великої кількості шлаку при НПЕ неможливо буде стримати періодичне його затікання на поверхню перед електродом, що призведе до зриву процесу (рис. 2.1).

Тому наплавлення необхідно вести «кутом назад» (див. рис. 1.18 та 1.21) та тримати його для основних електродів як можна більше (близько  $80^\circ$  до поверхні), а для рутилових електродів – як можна менше (близько  $60^\circ$  до поверхні), бо шлак в них більш рідкоплинний [15, 18]. Таким чином, для основних електродів глибина проплавлення буде менше, ніж для рутилових.

Робоче переміщення електрода при наплавленні плоскої поверхні здійснюється приводами осей X та Y. Максимальний хід по осям X та Y визначимо з умови наплавлення за один прохід всієї робочої частини одиночного електроду діаметром 5 мм типу Е42А без виконання поперечних коливань. Маса електроду становить:  $m_{el} = 0,092$  кг. Щільність металу валика приймаємо:  $\rho_e = 7850$  кг/м<sup>3</sup>.



Відношення ширини валика до діаметру електроду, що наплавляє без поперечних коливань, становить 1,5 [15]. Відповідно ширина валика приймаємо:  $s_B = 0,005 * 1,5 = 0,0075$  м.

Відсутність коливань одиночного електроду технологічно небажана, але так можна чітко спрогнозувати ширину валика.

При наплавленні короткою дугою відношення її довжини до діаметру електроду буде лежати в інтервалі 0,5...1,1 [18]. Відповідно, дуговий проміжок знаходиться в діапазоні 2,5...5,5 мм. Таким чином, середню висоту валика в автоматичному режимі приймаємо:  $\bar{h}_e = 0,0025$  м.

Прийняте значення середньої висоти валика є мінімальним, що можна досягнути практично при самій короткій дугі та куті нахилу 90°. Менший шар наплавляти не доцільно, тому що при механічній обробці нерівностей поверхні він практично весь буде видалений. До того ж занадто тонкий шар весь буде насичений поверхневими забрудненнями, неминучими при наплавленні.

Коефіцієнт витрати наплавленого металу для електродів марки УОНІ-13/45, УОНІ-13/55 (тип Е42А) приймаємо:  $k_{el} = 1,6$  [5].

Маса наплавленого металу дорівнює, кг:

$$m_n = \frac{m_{el}}{k_{el}} = \rho_e * s_e * \bar{h}_e * l_e. \quad (2.1)$$

З формули 1.1 виразимо розрахункову довжину валика, м:

$$l_e = \frac{m_{el}}{k_{el} * \rho_e * s_e * \bar{h}_e}, \quad (2.2)$$

$$l_e = \frac{0,092}{1,6 * 7850 * 0,0075 * 0,0025} = 0,391.$$

При більшій довжині наплавлення потрібно встановити новий електрод. Таким чином, величину максимального переміщення по осям X та Y призна-чаємо 400 мм.



## 2.2. Крокові двигуни

Крокові двигуни (далі – ГКД) розвивають стабільний високий крутний момент в діапазоні до 100 об/хв та достатньо високу точність позиціонування [29, 30].

Маніпулятори деталі потрібно будувати на основі конструктивних рішень універсальних зварювальних обертачів [31...34].

Планшайба повинна обертатись навколо власної осі W з плавним регулюванням швидкості, як в зварювальному, так і в позиціонуючому режимах. Електропривод потрібно виконати на базі ГКД, що напряму з'єднаний з планшайбою. Повертання планшайби навколо осі V повинно здійснюватися в діапазоні  $0...180^\circ$  з надійною фіксацією кута нахилу до горизонту при вимкненому живленні двигуна, що можливо реалізувати на основі одного або пари ГКД з одноступінчастим черв'ячним редуктором. Кількість мотор-редукторів визначається в результаті розрахунку.

Універсальний зварювальний обертач (далі – УЗО) для його позиціонування необхідно встановлювати на візку, який по направляючим рейкам буде переміщуватись вздовж осі Y. Для компенсації зростання відстані від електродів до деталі при переході осі W від вертикального положення до горизонтального потрібен ножичний підйомний механізм за принципом пантографа (рис. 2.3). Кріплення УЗО до підйомника повинно в ручний спосіб забезпечувати можливість швидкого розвертання його в будь який бік на кут  $90^\circ$ . З метою чіткої фіксації положення візка або висоти обертача без

З метою спрощення конструкції та зменшення витрат якості електропривода трикоординатного маніпулятора гребінки обираємо крокові двигуни (рис. 2.2), які можна встановлювати без редуктора напряму до гвинтового валу. Найкращі гібридні кро-



## 2.3. Ножичний підйомник

включення живлення обмоток двигунів привод необхідно реалізувати на базі ГKD з одноступінчастим черв'ячним редуктором.



2.4. Горизонтальний оберач з задньою бабкою М31040

В разі необхідності наплавлення відносно довгих тіл обертання з максимальним діаметром 400 мм (наприклад, ступінчатих валів різноманітного призначення) можливо їх встановити горизонтально вздовж осі Х, щоб ділянки, призначені для відновлення, опинились в робочій зоні верстату НПЕ.

Один торець валу необхідно закріпити в горизонтальному обертачі, другий – в задній бабці (рис. 2.4).

Знизу вал при необхідності можна також оперти на роликову опору (рис. 2.5).

Таке оснащення, як правило, є в наявності на ремонтних підприємствах.

Як уже відзначалося раніше, наплавлення можна виконувати як по твірній, дотримуючись порядку накладення валиків, щоб уникнути деформації, так і кільцевими валиками.

Установка для наплавлення пучком електродів повинна бути створена з відносно недорогих матеріалів та комплектуючих, які широко поширені в Україні, мати просту конструкцію, технологія виготовлення якої не повинна складати труднощі для звичайних ремонтних підприємств.

Установка для НПЕ (рис. 2.6) повинна бути за конструкцією верстатом та мати в своєму складі наступні елементи: фундаментну раму (1); станину (10); колону (9); консоль (6); електроприводи (8) та механізми переміщення (7)



2.5. Роликова опора з регулюванням по висоті та ширині

за осями пучка електродів; робочий стіл з електроприводами та механізмами переміщення (2), обертання та нахилу деталі (3), що наплавляється; електродотримач (4).

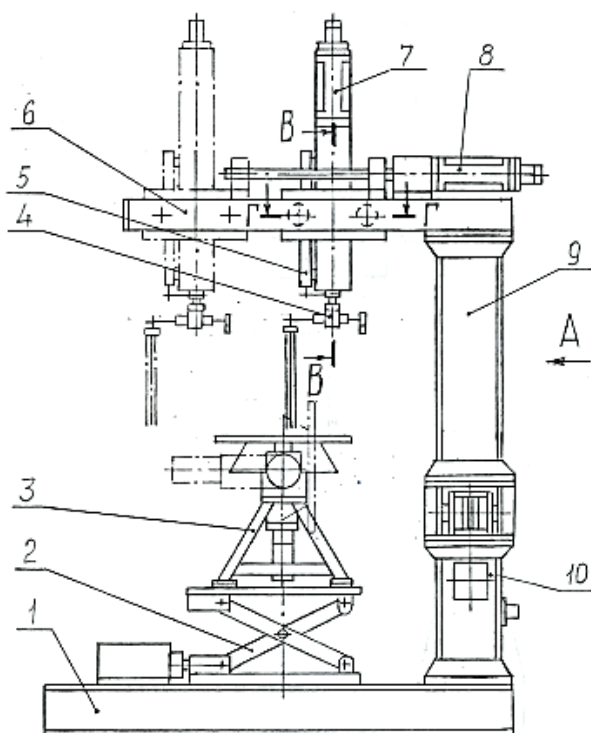


Рис. 2.6. Загальний вигляд верстату для наплавлення пучком електродів:

1. Фундаментна рама.
2. Ножичний підйомник.
3. УЗО
4. Електродотримач.
5. Потенціометрична лінійка.
6. Консоль.
7. Привод подавання ПЕ.
8. Кроковий двигун.
9. Колона.
10. Станина.

Переміщення пучка електродів необхідно здійснювати за трьома координатами (X, Y, Z) з точністю не гірше  $\pm 0,25$  мм. Максимальні переміщення пучка по кожній осі мають складати 400 мм, а швидкість повинна плавно регулюватись в діапазоні 0...10 мм/с. Переміщення потрібно здійснювати з використанням пари гвинт-ходово гайка. З метою уникнення люфтів привод механізмів переміщень необхідно виконувати напряму, за допомогою високомоментних крокових двигунів. Для компенсації перекидального моменту, що утворюється на консолі, необхідно розмістити вздовж осі X на фундаментній рамі напрямні рейки, по яким буде ходити упорний ролик, що жорстко пов'язаний з колоною.

Конструкція електродотримача повинна забезпечувати в ручний спосіб легке азимутальне повертання пучка (навколо осі Z) та зміну кута нахилу пучка до горизонту (до площини XY). Для швидкого виконання налаштування пучка підключення електроживлення до електродотримача повинно

здійснюватися за допомогою клєми, яка подібна до акумуляторної. Електроди в пучку для наплавлення повинні розташовуватись гребінкою з максимальною кількістю три штуки. Необхідно передбачити три змінні насадки для електродів відповідно 3 мм, 4 мм, 5 мм. Струмопровідні частини електродотримача повинні мати перетин, розрахований на максимальний зварювальний струм в 500 А.

Робочий стіл повинен бути встановленим на візку, який вручну переміщується по напрямним рейкам на фундаментній рамі вздовж осі Y. Кожна рейка виготовлена з двох кутиків, зварених в коробочку. Після позиціонування фіксація виконується за допомогою струбцини, яка притискує візок до фундаментної рами. На візку розташовується підйомник ножичного типу з електроприводом, на якому розміщується універсальний зварювальний обертач з робочим столом. Підйомник призначений для встановлення необхідної відстані між робочим столом та пучком електродів. Максимальний хід підйомника повинен складати 200 мм.

Робочий стіл повинен бути виконаний у вигляді план-шайби діаметром 400 мм, на яку в разі необхідності може закріплюватись токарний патрон або інше оснащення. Універсальний зварювальний обертач виконує обертання планшайби навколо центральної осі та забезпечує встановлення необхідного кута нахилу її до горизонту. Швидкість обертання планшайби повинна плавно регулюватись в діапазоні до 10 об/хв, швидкість зміни нахилу – до 2 об/хв, кут нахилу – від 0° до 180°. Для уникнення люфтів при обертанні планшайби привод її необхідно здійснювати напряду за допомогою високомоментного крокового двигуна. Для забезпечення утримання заданого нахилу планшайби необхідно застосовувати в відповідному приводі черв'ячний редуктор. Точність позиціонування планшайби та шпинделя  $\pm 1^\circ$ .

Крокові двигуни повинні бути гібридного типу з двобічним виходом валу. Кутове переміщення на основному кроці – не більше 1,8°(200 кроків за оборот), точність дотримання кроку – не гірше 5 %.



Рис. 2.7 Трансформатор, що обертається, BTM-1M

З метою виключення пропускання кроків, наприклад, при виникненні резонансу двигуна, необхідно передбачити підключення напряму до двигуна сельсина або трансформатора, що обертається, (наприклад, BTM-1M (рис. 2.7)) з похибкою відображення синусоїди не більше 1 %. На механізмі нахилу планшайби датчик кута повинен бути встановлений за редуктором, що дозволить контролювати кут.

На кожній осі переміщення пучка електродів повинні бути встановлені потенціометричні лінійки з дискретністю виміру 0,01 мм (рис. 2.8). Це дозволить уникнути залежності точності позиціонування від високої якості виготовлення та експлуатаційного зносу.



Рис. 2.8 Потенціометрична лінійка типу LTM (Туреччина)

До

складу установки повинні входити також система зварювального струму та система автоматизованого керування установкою.



Рис. 2.9 Зварювальний випрямляч ВД-506Т

До системи зварювального струму відносяться: зварювальний випрямляч з плавним регулювання струму 80...500 А, наприклад, зварювальний випрямляч ВД-506Т (рис. 2.9); силові кабелі; вимірювальний шунт; пристрій безконтактного збудження та стабілізації горіння дуги [49].

Система автоматизованого керування повинна забезпечувати:

1. Зручне завдання параметрів технологічних переміщень.
2. Протоколювання технологічних параметрів в процесі НПЕ.
3. Чітке позиціонування та переміщення пучка електродів відносно

поверхні, що наплавляється, відповідно до технологічного процесу.

4. Стабільне дотримання короткої дуги –  $(0,5 \dots 1,1) \cdot d_e$  для надійного захисту зварювальної ванни.
5. Захист механізмів установки від аварійного руйнування.
6. Виключення режимів резонансних частот крокових двигунів для уникнення втрати крутного моменту.
7. Роботу приводів в діапазоні частот прийомистості крокових двигунів для забезпечення необхідних прискорень.
8. Надійний захист приладів автоматики від частотних перешкод.
9. Аварійна сигналізація та виведення повідомлень про помилки і збої в роботі установки.

Системи зварювального струму та автоматизованого керування установкою не розглядаються в даній роботі.

## 2.2. Проектування механізму подавання пучка електродів.

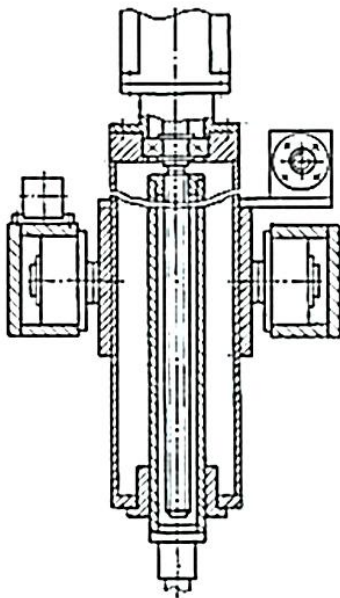


Рис. 2.10. Механізм подавання ПЕ

Переміщення пучка вздовж осі Z забезпечує механізм подавання ПЕ, принципова схема якого наведена на рис. 2.10.

При відносно невеликих ходах (до 500 мм) в робочому просторі, для автоматизованих наплавних установок рекомендовано застосовувати дволанкові телескопічні трубчасті механізми з внутрішнім розташуванням ходового гвинта. Це дозволяє надійно захищати механізм від пилу, бризок, бруду тощо [32].

Корпус механізму, який має квадратний перетин (100x100 мм), змонтовано на візку, що здійснює переміщення вздовж осі Y. На верхній кришці корпусу вертикально встановлюється електропривод, який напряму



з'єднується з ходовим гвинтом. Підшипник гвинта розташовано в кришці корпусу, а ходова гайка з антифрикційного чавуну закріплена зверху порожнього штоку, всередині якого обертається гвинт. Зовнішній діаметр штоку складає 45 мм.

На нижньому торці штоку встановлено текстолітовий ізолятор для закріплення електродотримача. Вздовж штоку діаметрально протилежно прорізані два глухих пази довжиною 400 мм, в які входять штифти, що закріплені в напрямній втулці штоку. Штифти виготовлені з конструкційного текстоліту та запобігають обертанню штоку та забезпечують його прямолінійний зворотно-поступальний рух. Напрямна втулка виготовлена з сірого чавуну та закріплена на нижній кришці корпусу.

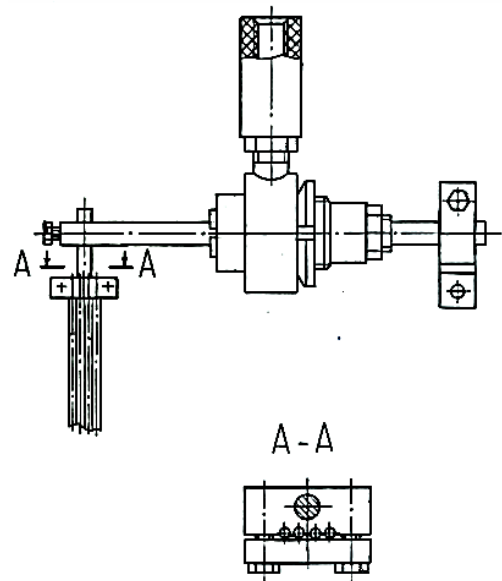


Рис. 2.11. Тримач з насадкою ПЕ

Конструкція тримача ПЕ та змінної насадки зображені на рис. 2.11.

Переріз струмопровідних частин тримача та насадки повинен складати, мм<sup>2</sup>:

$$s_{CnTp} \geq \frac{I_H}{\rho_I}, \quad (2.3)$$

де  $\rho_I = 5 \text{ А/мм}^2$  – допустима щільність струму для латуні. Тоді

$$s_{CnTp} \geq \frac{500}{5} = 100.$$

Для механізму подавання ПЕ визначено: різьблення  $Tr20 \times 4$ , осьова сила  $F_a = 70 \text{ Н}$ , радіальна сила  $F_r \approx 0$ , сила тертя в напрямній втулці  $F_n \approx 0$ , коефіцієнт тертя в парі гвинт-ходова гайка  $f = 0,13$ .

Кут підйому різьблення, град:

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{P}{\pi * d_2} \right), \quad (2.4)$$

де  $P = 4 \text{ мм}$  – крок різьблення,



$d_2 = 18$  мм – середній діаметр різьблення. Тоді

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{4}{\pi * 18}\right) = 4,05.$$

Кут тертя в різьбленні, град:

$$\rho = \frac{180}{\pi} * \arctg(f), \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{180}{\pi} \arctg(0,13) = 7,41.$$

В зв'язку з вертикальним положенням осі гвинта необхідно забезпечити його самогальмування, щоб уникнути самовільний рух привода подавання ПЕ після вимкнення живлення ГКД.

Перетворення поступального руху в обертальний можливо за наступної умови:

$$\psi \geq 2 * \rho, \quad (2.6)$$

$$4,05 < 2 * 7,41 = 14,82.$$

Умова не виконується, передача самогальмуюча.

Крутний момент гвинта визначається за формулою, Н·м:

$$T = F_a * \frac{d_2}{2} * \tg(\psi + \rho), \quad (2.7)$$

$$T = 70 * \frac{0,018}{2} * \tg(4,05 + 7,41) = 0,13.$$

Момент інерції гвинта визначається за формулою, кг·м<sup>2</sup>:

$$I_{ХГ} = \frac{1}{2} * m_{ХГ} * \left(\frac{d_2}{2}\right)^2, \quad (2.8)$$

де  $m_{ХГ} = 1,2$  кг – маса гвинта. Тоді

$$I_{ХГ} = \frac{1}{2} * 1,2 * \left(\frac{0,018}{2}\right)^2 = 4,86 \cdot 10^{-5}.$$

Особливістю роботи привода подавання ПЕ є пряме підключення (безредукторне) та робота з прискореннями, які виникають при регулюванні за величиною струму наплавлення. Тому ГКД необхідно обирати не тільки за крутним

моментом, але й за величиною інерції ротора. Вона повинна бути більшою за інерцію вузлів, що обертаються, як мінімум, на порядок. Це необхідно, щоб не погіршити динаміку ГКД на основному кроці, бо резонансні коливання ротора виникають, як правило, на частоті обертання прибіл. 1 об/с. При максимальній швидкості подавання 10 мм/с та кроці різьблення 4 мм частота обертання ГКД буде 2,5 об/с. Проблема резонансу усувається за рахунок застосування мікрокроку [30].

Характеристики ГКД, вибраного для механізму подавання ПЕ, наведені в табл. 2.1.

## 2.3. Проектування механізму переміщення пучка електродів.

### 2.3.1. Механізм переміщення пучка електродів вздовж осей X та Y.

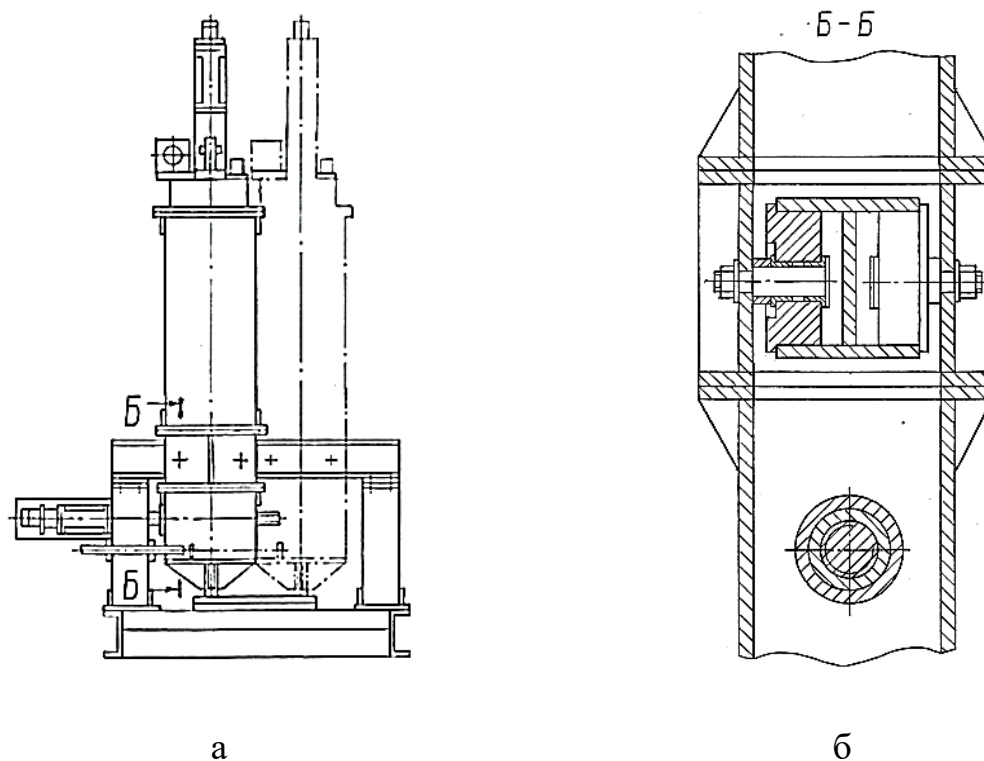


Рис. 2.12. Механізм переміщення ПЕ вздовж осі X

Переміщення вздовж осі X виконується за допомогою візка, через який проходить двотаврова зварна балка станини (рис. 2.12, а). На бокових плитах візка розміщені дві пари чавунних роликів з ребордами. З метою підсилення зовні до кожної з бокових та горизонтальних плит візка приварені центральні

вертикальні ребра. До горизонтальних плит візка за допомогою болтових з'єднань зверху та знизу кріпляться двотаврові зварні колони. В стінці нижньої колони приварюється обойма, в яку встановлюється чавунна ходова гайка осі Х (рис. 2.12, б). Перпендикулярно до нижньої плити нижньої колони приварена вісь упорного ролика, підкріплена чотирьох боків кницями в формі прямокутної трапеції. В якості ролика виступає підшипник кочення 308. Плити верхньої колони та верхня плита нижньої колони підсилені траверсами з обох боків поясів.

Сила опору переміщенню візка, Н:

$$F_{ОВ} = \mu * G_M, \quad (2.9)$$

де  $\mu = 0,3$  – коефіцієнт тертя кочення сталюого колеса по сухій рейці,

$G_M = 2637$  Н – споряджена вага трикоординатного маніпулятора ПЕ.

Тоді

$$F_{ОВ} = 0,3 * 2637 = 791.$$

Для механізму переміщення ПЕ вздовж осі Х визначено: різьблення *Tr40x6*, радіальна сила (вага ходової гайки)  $F_r \approx 10$  Н, коефіцієнт тертя в парі гвинт-ходова гайка  $f = 0,13$ .

Кут підйому різьблення, град:

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{P}{\pi * d_2} \right), \quad (2.10)$$

де  $P = 6$  мм – крок різьблення,

$d_2 = 37$  мм – середній діаметр різьблення. Тоді

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{6}{\pi * 37} \right) = 2,95.$$

Кут тертя в різьбленні, град:

$$\rho = \frac{180}{\pi} * \arctg (f), \quad (2.11)$$

$$\rho = \frac{180}{\pi} \arctg (0,13) = 7,41.$$

Крутний момент гвинта визначається за формулою, Н·м:

$$T = \frac{d_2}{2} * [F_a * \operatorname{tg}(\psi + \rho) + f * F_r], \quad (2.12)$$

де  $F_a = F_{OB} = 791$  Н – осьова сила. Тоді

$$T = \frac{0,037}{2} * [791 * \operatorname{tg}(2,95 + 7,41) + 0,13 * 10] = 2,7.$$

Момент інерції гвинта визначається за формулою,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ :

$$I_{\text{ХГ}} = \frac{1}{2} * m_{\text{ХГ}} * \left(\frac{d_2}{2}\right)^2, \quad (2.13)$$

де  $m_{\text{ХГ}} = 4,2$  кг – маса гвинта. Тоді

$$I_{\text{ХГ}} = \frac{1}{2} * 4,2 * \left(\frac{0,037}{2}\right)^2 = 7,19 \cdot 10^{-4}.$$

Момент інерції ротору ГКД повинен бути більшим за інерцію гвинта, як мінімум, на порядок.

Характеристики ГКД, вибраного для механізму переміщення ПЕ вздовж осі Х, наведені в табл. 2.1.

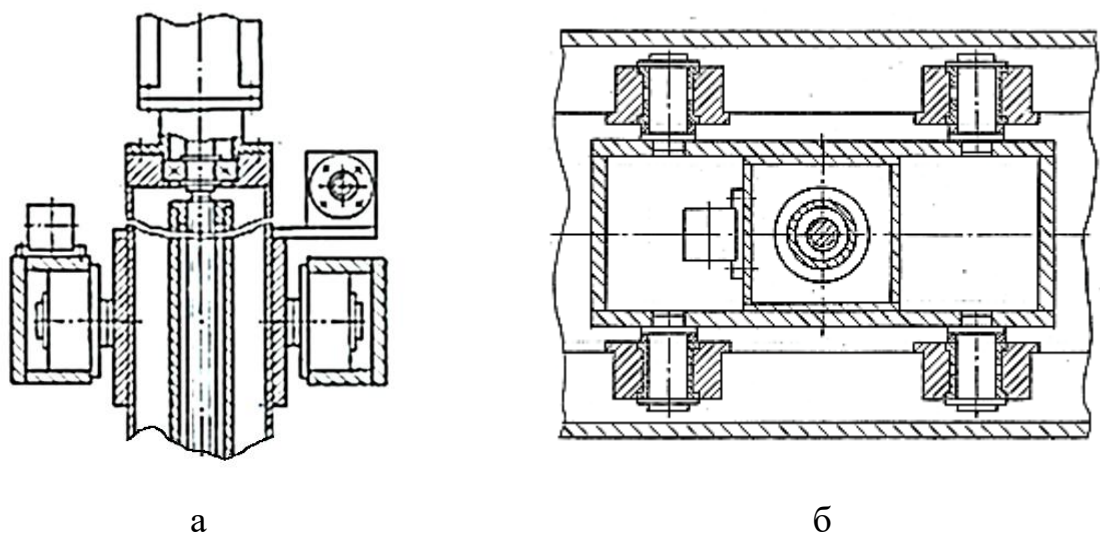


Рис. 2.13. Механізм переміщення пучка електродів вздовж осі Y

Переміщення вздовж осі Y виконується за допомогою візка, через який ходить між швелерами зварної балки консолі (рис. 2.13, а). На бокових плитах рами візка розміщені дві пари чавунних роликів з ребордами. Усередині рами візка приварено корпус механізму подавання ПЕ (рис. 2.13, б). Зверху на

швелероподібних напрямних консоля приварені дві обойми з підшипникам ходового гвинта (рис. 2.6) та встановлені лінійки для контролю переміщення. Обойма чавунної ходової гайки та кронштейн для приєднання штоку лінійки відповідно приварені обабіч до корпусу механізму подавання ПЕ над рамою візка (рис. 2.10).

Сила опору переміщенню візка, Н:

$$F_{OB} = \mu * G_M, \quad (2.14)$$

де  $\mu = 0,3$  – коефіцієнт тертя кочення сталюого колеса по сухій рейці,

$G_M = 397$  Н – споряджена вага механізму подавання ПЕ. Тоді

$$F_{OB} = 0,3 * 397 = 119.$$

Для механізму переміщення ПЕ вздовж осі Y визначено: різьблення  $Tr20 \times 4$ , радіальна сила (вага ходової гайки)  $F_r \approx 1,3$  Н, коефіцієнт тертя в парі гвинт-ходова гайка  $f = 0,13$ .

Кут підйому різьблення, град:

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{P}{\pi * d_2} \right), \quad (2.15)$$

де  $P = 4$  мм – крок різьблення,

$d_2 = 18$  мм – середній діаметр різьблення. Тоді

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{4}{\pi * 18} \right) = 4,05.$$

Кут тертя в різьбленні, град:

$$\rho = \frac{180}{\pi} * \arctg(f), \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{180}{\pi} \arctg(0,13) = 7,41.$$

Крутний момент гвинта визначається за формулою, Н·м:

$$T = \frac{d_2}{2} * [F_a * \tg(\psi + \rho) + f * F_r], \quad (2.17)$$

де  $F_a = F_{OB} = 119$  Н – осьова сила. Тоді

$$T = \frac{0,018}{2} * [119 * tg(4,05 + 7,41) + 0,13 * 1,3] = 0,22.$$

Момент інерції гвинта визначається за формулою, кг·м<sup>2</sup>:

$$I_{ХГ} = \frac{1}{2} * m_{ХГ} * \left( \frac{d_2}{2} \right)^2, \quad (2.18)$$

де  $m_{ХГ} = 1,2$  кг – маса гвинта. Тоді

$$I_{ХГ} = \frac{1}{2} * 1,2 * \left( \frac{0,018}{2} \right)^2 = 4,86 \cdot 10^{-5}.$$

Момент інерції ротору ГКД повинен бути більшим за інерцію гвинта, як мінімум, на порядок.

Характеристики ГКД, вибраного для механізму переміщення ПЕ вздовж осі Y, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Характеристики ГКД приводів переміщення ПЕ вздовж осей X, Y, Z

| Модель*                                                           | Момент утримання<br>±10% | Крутний момент в<br>діапазоні до 100 об/с | Маса             | Момент інерції<br>ротора | Розміри                  |                     | Допустиме на-<br>вантаження на<br>вал** |        |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------------|--------|
|                                                                   |                          |                                           |                  |                          | Статор                   | Хвостовик<br>ротору |                                         |        |
|                                                                   |                          |                                           |                  |                          | <i>B-H</i><br>x <i>L</i> | <i>D</i> x <i>l</i> | радіа-<br>льне                          | осьове |
|                                                                   | Н·м                      | кг                                        | Г·м <sup>2</sup> | мм                       | Н                        |                     |                                         |        |
| Механізм переміщення ПЕ вздовж осі X                              |                          |                                           |                  |                          |                          |                     |                                         |        |
| N42xxLF-L                                                         | 20,6                     | 14,5                                      | 8,34             | 1,09                     | 110<br>x<br>183          | 21<br>x<br>55       | 489                                     | 1800   |
| Механізм переміщення ПЕ вздовж осі Y та подавання ПЕ вздовж осі Z |                          |                                           |                  |                          |                          |                     |                                         |        |
| N34xxLG-L                                                         | 15,3                     | 10,8                                      | 6,85             | 0,53                     | 86<br>x<br>195           | 16x32               | 489                                     | 1360   |

\* Моделі обирались з ряду за мінімальним фазним струмом.

\*\* Максимальне навантаження валу базується на 20 тис. год. роботи при 1500 об/хв.

### 2.3.2. Визначення максимальних сил та моментів, що діють на механізм переміщення пучка електродів вздовж осей X та Y.

На рис. 2.14 представлена розрахункова схема несучої конструкції при максимальному віддаленні від колони механізму подачі пучка електродів  $L = 0,8$  м. Згинаюче навантаження, що викликає прогин конструкції та відхилення робочого кінця пучка електродів  $ПЕ$ , складається з зосередженої сили на кінці консолі  $G_a = 397$  Н, що дорівнює власній вазі механізму подачі пучка електродів разом з його повним спорядженням, та рівномірно розподіленому навантаженню  $G_b = 487$  Н, що дорівнює власній вазі консольної балки разом з її механізмами.

Максимальна відстань від осі консолі до робочого кінця  $ПЕ$  складає  $l = 0,65$  м.

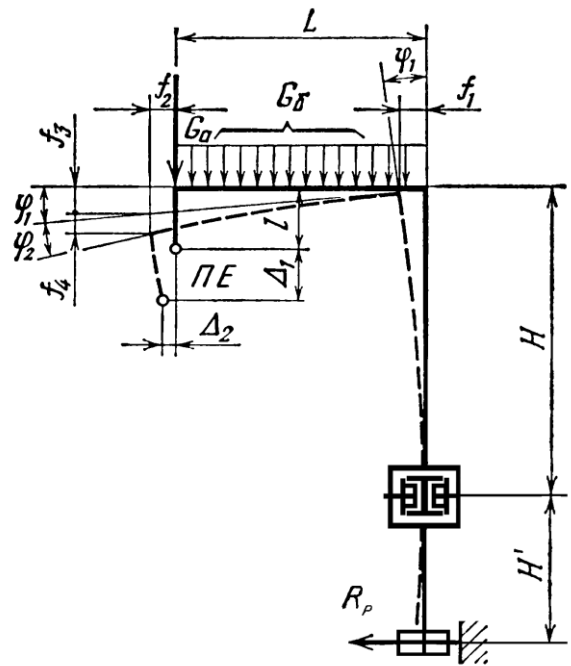
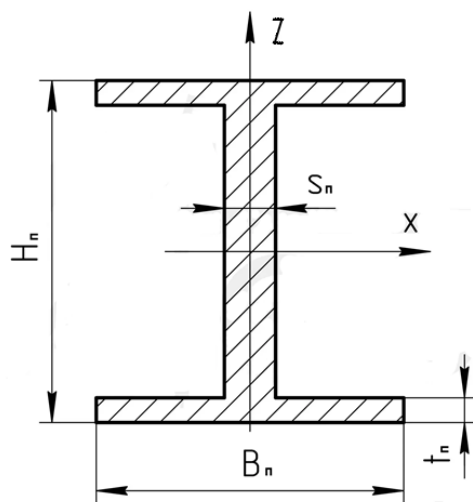


Рис. 2.14. Розрахункова схема несучої конструкції механізму переміщення пучка електродів



| Роз-<br>мір | Од.<br>ви-<br>міру | Зна-<br>чення |
|-------------|--------------------|---------------|
| $H_n$       | мм                 | 160           |
| $B_n$       |                    | 300           |
| $S_n$       |                    | 10            |
| $t_n$       |                    | 10            |

Рис. 2.15. Геометричні розміри перерізу колони

Найбільший згинальний момент консолі, Н·м:

$$M_K^{32} = (G_a + 0,5 * G_{\bar{o}}) * L, \quad (2.19)$$

$$M_K^{32} = (397 + 0,5 * 487) * 0,8 = 512,4.$$

Даний згинаючий момент діє по всій висоті верхньої колони  $H = 0,87$  м, та з протилежним знаком – по всій висоті нижньої колони  $H' = 0,37$  м.

Геометричні розміри перерізу колони представлені на рис. 2.15.

Осьовий момент інерції колони, м<sup>4</sup>:

$$I_{x_{Kl}} = \frac{B_n * H_n^3 - (B_n - s_n) * (H_n - 2 * t_n)^3}{12}, \quad (2.20)$$

$$I_{x_{Kl}} = \frac{0,3 * 0,16^3 - (0,3 - 0,01) * (0,16 - 2 * 0,01)^3}{12} = 3,61 \cdot 10^{-5}.$$

Осьовий момент опору перерізу колони, м<sup>3</sup>:

$$W_{x_{Kl}} = \frac{2 * I_{x_{Kl}}}{H_n}, \quad (2.21)$$

$$W_{x_{Kl}} = \frac{2 * 3,61 \cdot 10^{-5}}{0,16} = 45,1 \cdot 10^{-5}.$$

Напруження згинання, що виникають в перерізі колони, Па:

$$\sigma_{Kl}^{32} = \frac{M_K^{32}}{W_{x_{Kl}}} \leq [\sigma], \quad (2.22)$$

де  $[\sigma] = 160$  МПа – допустимі напруження для статичного розтягу СтЗсп [31].

$$\sigma_{Kl}^{32} = \frac{512,4}{45,1 \cdot 10^{-5}} = 1,14 \cdot 10^6,$$

$$1,14 \cdot 10^6 < 160 \cdot 10^6.$$

Міцність колони при згинанні забезпечується з великим запасом.

Геометричні розміри перерізу консолі представлені на рис. 2.16.

Власний осьовий момент інерції швелера відносно осі X, м<sup>4</sup>:

$$I_{x_{Шв}} = \frac{B_n * H_n^3 - (B_n - s_n) * (H_n - 2 * t_n)^3}{12}, \quad (2.23)$$

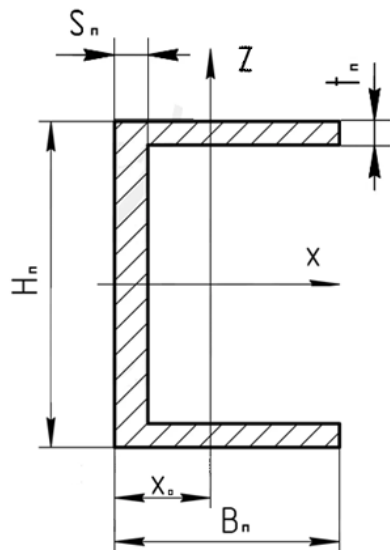


$$I_{x_{III\theta}} = \frac{0,055 * 0,09^3 - (0,055 - 0,01) * (0,09 - 2 * 0,01)^3}{12} = 2,1 \cdot 10^{-6}.$$

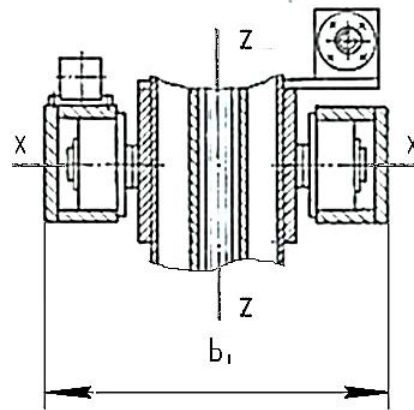
Площа швелера консолі, м<sup>2</sup>:

$$F_{III\theta} = H_n * s_n + 2 * (B_n - s_n) * t_n, \quad (2.24)$$

$$F_{III\theta} = 0,09 * 0,01 + 2 * (0,055 - 0,01) * 0,01 = 1,8 \cdot 10^{-3}.$$



а



б

| Роз-<br>мір    | Од.<br>ви-<br>міру | Зна-<br>чення |
|----------------|--------------------|---------------|
| H <sub>п</sub> | мм                 | 90            |
| B <sub>п</sub> |                    | 55            |
| s <sub>п</sub> |                    | 10            |
| t <sub>п</sub> |                    | 10            |
| b <sub>1</sub> |                    | 260           |
| x <sub>п</sub> |                    | 10            |

Рис. 2.16. Геометричні розміри перерізу консолі:

а – швелеру, з якого складений переріз консолі; б – консолі

Осьовий момент інерції консолі відносно осі X, м<sup>4</sup>:

$$I_{x_{Kc}} = 2 * \left[ I_{x_{III\theta}} + F_{III\theta} * \left( \frac{b_1 - 2 * x_n}{2} \right)^2 \right], \quad (2.25)$$

$$I_{x_{Kc}} = 2 * \left[ 2,1 \cdot 10^{-6} + 1,8 \cdot 10^{-3} * \left( \frac{0,26 - 2 * 0,01}{2} \right)^2 \right] = 5,6 \cdot 10^{-5}.$$

Осьовий момент опору перерізу консолі відносно осі X, м<sup>3</sup>:

$$W_{x_{Kc}} = \frac{2 * I_{x_{Kc}}}{H_n}, \quad (2.26)$$

$$W_{x_{Kc}} = \frac{2 * 5,6 \cdot 10^{-5}}{0,09} = 1,2 \cdot 10^{-3}.$$

Напруження згинання, що виникають в перерізі консолі, Па:

$$\sigma_{Kc}^{32} = \frac{M_K^{32}}{W_{x Kc}} \leq [\sigma], \quad (2.27)$$

$$\sigma_{Kc}^{32} = \frac{512,4}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 0,43 \cdot 10^6,$$

$$0,43 \cdot 10^6 < 160 \cdot 10^6.$$

Міцність консолі при згинанні забезпечується з великим запасом.

Розрахуємо прогини та кути повороту несучої конструкції, згідно з схемою на рис. 2.14:

$$f_1 = f_2 = \frac{M_K^{32} * H^2}{2 * E * I_{x Kc}}, \quad (2.28)$$

де  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па – модуль Юнга для сталей,

$$f_1 = f_2 = \frac{512,4 * 0,87^2}{2 * 2 \cdot 10^{11} * 3,61 \cdot 10^{-5}} = 27 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\varphi_1 = \frac{2 * f_1}{H}, \quad (2.29)$$

$$\varphi_1 = \frac{2 * 27 \cdot 10^{-6}}{0,87} = 62 \cdot 10^{-6} \text{ рад};$$

$$f_3 = \varphi_1 * L, \quad (2.30)$$

$$f_3 = 62 \cdot 10^{-6} * 0,8 = 49,6 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\varphi_2 = \left( G_a + \frac{G_{\delta}}{3} \right) * \frac{L^2}{2 * E * I_{x Kc}}, \quad (2.31)$$

$$\varphi_2 = \left( 397 + \frac{487}{3} \right) * \frac{0,8^2}{2 * 2 \cdot 10^{11} * 5,6 \cdot 10^{-5}} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ рад};$$

$$f_4 = \left( \frac{G_a}{3} + \frac{G_{\delta}}{8} \right) * \frac{L^3}{E * I_{x Kc}}, \quad (2.32)$$

$$f_4 = \left( \frac{397}{3} + \frac{487}{8} \right) * \frac{0,8^3}{2 \cdot 10^{11} * 5,6 \cdot 10^{-5}} = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Гранично допустима величина відхилення ПЕ, м:

- вертикальна

$$[\Delta_1] = \frac{L + H}{2000}, \quad (2.33)$$

$$[\Delta_1] = \frac{0,8 + 0,87}{2000} = 835 \cdot 10^{-6};$$

- горизонтальна

$$[\Delta_2] = \frac{L + H}{3000}, \quad (2.34)$$

$$[\Delta_2] = \frac{0,8 + 0,87}{3000} = 557 \cdot 10^{-6};$$

Відхилення ПЕ, як наслідок прогину колони та консолі, м:

- вертикальне

$$\Delta_1 = f_3 + f_3 \leq [\Delta_1], \quad (2.35)$$

$$\Delta_1 = 49,6 \cdot 10^{-6} + 8,8 \cdot 10^{-6} = 58,4 \cdot 10^{-6},$$

$$58,4 \cdot 10^{-6} < 835 \cdot 10^{-6};$$

- горизонтальне

$$\Delta_2 = f_2 - l * (\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.36)$$

$$\Delta_2 = 27,7 \cdot 10^{-6} - 0,65 * (62 \cdot 10^{-6} + 16 \cdot 10^{-6}) = 23 \cdot 10^{-6}.$$

$$23 \cdot 10^{-6} < 557 \cdot 10^{-6}.$$

Умови жорсткості виконуються з великим запасом.

Запаси міцності та жорсткості передбачені для можливості впровадження майбутньому додаткового устаткування, яке буде кріпитися до консолі. Наприклад, витяжні пристрої місцевої вентиляції, зварювальні апарати, котушки з зварювальним дротом, системи дистанційного відео спостереження за робочим процесом тощо. Все це може не тільки суттєво збільшити згинальний момент, але й привести до виникнення крутного моменту.

### 2.3.3. Перевірка за місцевими напруженнями міцності рейки, по якій переміщується упорний ролик колони.

Розрахункова схема наведена рис. 2.17.

Сила реакції рейки в місці контакту з роликом, Н:

$$R_p = \frac{M_K^{\text{зг}}}{H'}, \quad (2.37)$$

$$R_p = \frac{512,4}{0,37} = 1385.$$

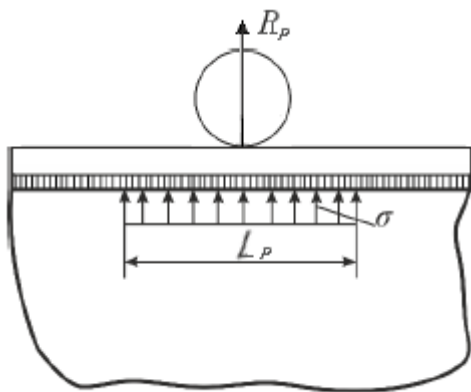


Рис. 2.17. Умовна довжина розосередження сили реакції

Розміри вертикального поперечного перерізу рейки:  $H_p = 50$  мм,  $B_p = 50$  мм. Матеріал рейки – Ст3сп.

Осьовий момент інерції рейки відносно осі Z, м<sup>4</sup>:

$$I_{zP} = \frac{H_p * B_p^3}{12}, \quad (2.38)$$

$$I_{zP} = \frac{0,05 * 0,05^3}{12} = 5,21 \cdot 10^{-7}.$$

Умовна довжина розосередження сили реакції в рейці (рис.2.11), м:

$$L_p = 3,25 * \sqrt[3]{\frac{I_{zP}}{B_p}}, \quad (2.39)$$

$$L_p = 3,25 * \sqrt[3]{\frac{5,21 \cdot 10^{-7}}{0,05}} = 0,071.$$

Напруження в рейці від зосередженого навантаження, Па:

$$\sigma_{\mu P} = \frac{R_p}{B_p * L_p} \leq [\sigma], \quad (2.40)$$

$$\sigma_{\mu P} = \frac{1385}{0,05 * 0,071} = 0,39 \cdot 10^6,$$

$$0,39 \cdot 10^6 < 160 \cdot 10^6.$$

Міцність рейки за місцевими напруженнями забезпечується з великим запасом.

## 2.4. Проектування механізмів маніпулятора деталі, що наплавляється.

### 2.4.1. Вихідні дані розрахунку маніпулятора деталі.

Як було зазначено вище, маніпулятор деталі виконано в вигляді УЗО. Універсальними зварювальними обертачами називають пристрої, які забезпечують, завдяки можливості нахилу осі обертання, зварювання кільцевих швів у зручному положенні. Такі обертачі використовують також як кантувачі та позиціонери. Кантування зварюваних виробів здійснюється при горизонтальному положенні осі обертання, позиціонування – шляхом зміни кута нахилу осі обертання у вертикальній площині. При цьому переміщення виробу виконуються з постійною швидкістю (з маршовою).

Загальний вигляд УЗО установки наплавлення наведено на рис.2.18.

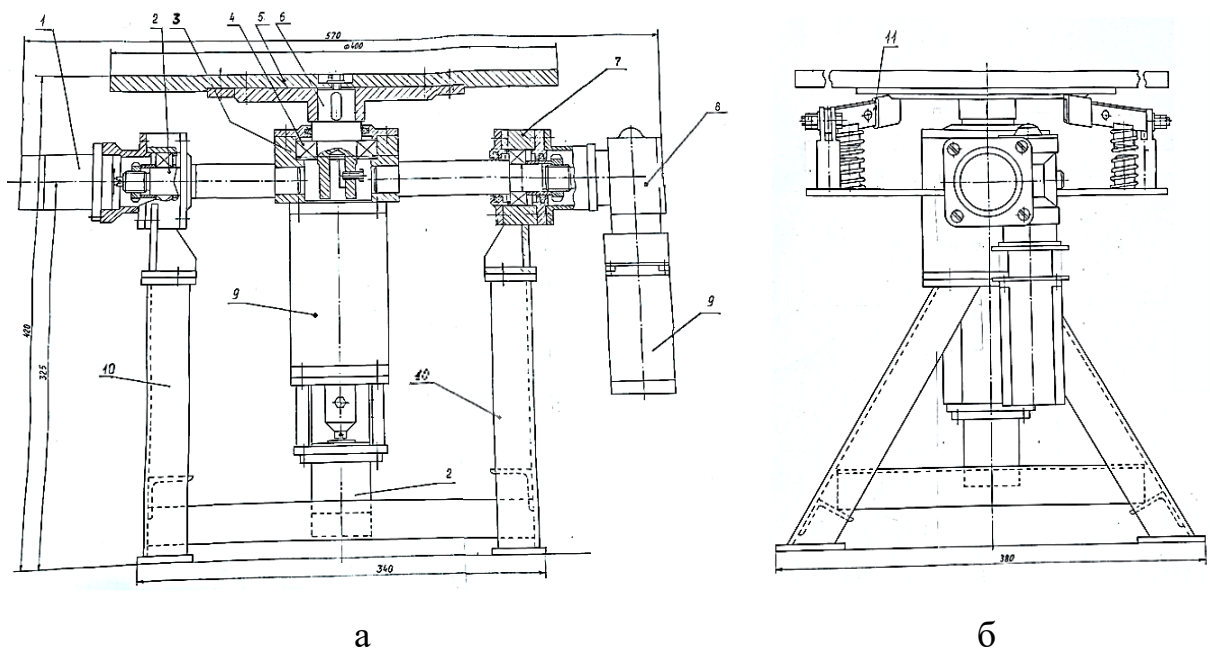


Рис. 2.18. Загальний вигляд УЗО установки наплавлення:

а – фронтальний вигляд; б – боковий вигляд.

1 – датчик кута повороту; 2 – цапфа траверси; 3 – обойма шпинделя; 4 – підшипник шпинделя; 5 – планшайба; 6 – вал планшайби; 7 – обойма траверси; 8 – редуктор нахилу; 9 – кроковий двигун; 10 – стійка; 11 – щітка маси

Характеристики гібридних крокових двигунів механізмів обертання та нахилу приведені в табл. 2.2 (виробник – фірма Kollmorgen (США)) [55, 56].

Таблиця 2.2. Характеристики ГКД механізмів УЗО

| Модель*            | Момент утримання<br>±10% | Крутний момент в<br>діапазоні до 100 об/с | Маса             | Момент інерції<br>ротора | Розміри         |                     | Допустиме на-<br>вантаження на<br>вал** |        |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------------|--------|
|                    |                          |                                           |                  |                          | Статор          | Хвостовик<br>ротору |                                         |        |
|                    |                          |                                           |                  |                          | B-H<br>x L      | D x l               | радіа-<br>льне                          | осьове |
|                    | Н·м                      | кг                                        | г·м <sup>2</sup> | мм                       |                 | Н                   |                                         |        |
| Механізм обертання |                          |                                           |                  |                          |                 |                     |                                         |        |
| K42xxLG-L          | 29,1                     | 21                                        | 8,34             | 1,09                     | 110<br>x<br>183 | 21<br>x<br>55       | 489                                     | 1800   |
| K43xxLK-L          | 39,9                     | 29                                        | 11,6             | 1,62                     | 110<br>x<br>234 |                     |                                         |        |
| Механізм нахилу    |                          |                                           |                  |                          |                 |                     |                                         |        |
| M22xxxE-L          | 1,6                      | 1,12                                      | 1,13             | 0,025                    | 57x79           | 6x21                | 89                                      | 58     |
| T22xxLC            | 1,98                     | 1,5                                       | 1,0              | 0,04                     | 57x108          | 6x21                | 67                                      | 111    |

\* Моделі обирались порівняно з рівноцінними аналогами за кращим співвідношенням між максимальним моментом утримання та мінімальним фазним струмом. Першим вказаний основний (економ-) варіант, другим – варіант для збільшення вантажопідйомності.

\*\* Максимальне навантаження валу базується на 20 тис. год. роботи при 1500 об/хв.

ГКД K42 / K43 є прецизійним пристроєм, який повинен стабільно працювати в діапазоні до 2000 об/хв, підтримуючи точність основного кроку  $\pm 1,5\%$  (без навантаження) [56]. Зазори, що в ньому підтримуються, за рівнем відповідають радіальним шарикопідшипникам. Тому виходячи з даних виробника можна розрахувати умовну динамічну радіальну вантажопідйомність валу ГКД за методикою [57].

Номінальна довговічність визначається за формулою, год:

$$L_h = \frac{N}{60 * n} * \left( \frac{C}{P} \right)^k, \quad (2.41)$$

де  $N = 1 \cdot 10^6$  об. – номінальна кількість оборотів ГКД до появи ознак зносу;  $n = 1500$  об/хв – частота обертів підшипника ГКД під час випробування на довговічність;  $P = 489$  Н – еквівалентне радіальне навантаження;  $k = 3$  – показник ступеня в рівнянні довговічності для шарикопідшипників;  $C$  – розшукувана величина умовної радіальної динамічної вантажопідйомності валу ГКД, Н. Номінальна довговічність  $L_h$  за даними виробника складає 20 тис. год.

Виразим розшукувану змінну з рівняння 2.1, Н

$$C = P * \sqrt[3]{\frac{60 * n * L_h}{N}}, \quad (2.42)$$

$$C = 489 * \sqrt[3]{\frac{60 * 1500 * 2 \cdot 10^4}{1 \cdot 10^6}} = 5948.$$

У зв'язку з тим, що ГКД буде експлуатуватись переважно на режимах  $\leq 1$  об/хв, які характерні для наплавних процесів, діюче навантаження потрібно розглядати як статичне [58].

Умовну радіальну статичну вантажопідйомність ГКД  $C_0$  можна приблизно оцінити, як половину від динамічної, аналогічно до радіальних шарикопідшипників.

Тоді  $C_0 = 2974$  Н.

Входячи з припущення, що ротор ГКД (рис. 2.19) є суцільним циліндром, що обертається навколо власної осі, можна знайти його масу за формулою:

$$m_p = \frac{2 * J_p}{R^2}. \quad (2.43)$$

Вагу ротора ГКД можна обчислити за формулою:



Рис. 2.19. Ротор гібридного крокового двигуна

$$G = m_p * g, \quad (2.44)$$

де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Результати розрахунків за формулами 2.41 та 2.42 представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Характеристики роторів ГКД приводних механізмів УЗО

| Модель          | K42xxLG-L | K43xxLK-L | M22xxxE-L | T22xxLC |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Маса ротора, кг | 2,4       | 3,6       | 0,056     | 0,089   |
| Вага ротора, Н  | 23,5      | 35,3      | 0,55      | 0,87    |

Визначимо масу вантажу.

Робочий стіл УЗО виконаний у вигляді планшайби, яка повинна працювати з в діапазоні кутів нахилу шпинделя  $0 \dots 180^\circ$ . Для кріплення деталей, що підлягають наплавленню, необхідно використовувати спеціальні пристрої та оснащення. Найбільш поширеними є патрони токарні 3-х та 4-х кулачкові відповідно за ДСТ 2675-80 та ДСТ 3890-82, а також лещата верстатні ручні за ДСТ 16518-87 (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Верстатні затискні пристрої:

а – патрон самоцентруючий трикулачковий; б – патрон чотирьохкулачковий з незалежним переміщенням кулачків; в – лещата верстатні ручні.

Механізм нахилу шпинделя зазвичай використовується для встановлення планшайби в робоче положення, після чого виконується закріплення



деталі для наплавлення. Таким чином, в якості вантажа виступає переважно оснащення. НПЕ виконується тільки в нижньому положенні, тому наплавлення при гострих кутах нахилу, як правило не здійснюється. При горизонтальній осі УЗО зазвичай використовують роликові опори (рис. 2.5) для спирання консольно розміщених деталей.

Найбільш придатними для планшайби є патрони  $\varnothing 160$  та лещата з шириною губок 80 мм. Згідно з стандартами [65...67] їх маса повинна складати не більше 12...15 кг, а сучасні такі пристрої мають суттєво меншу масу. Тому приймаємо масу розрахункового вантажу планшайби рівною 14 кг.

Вихідні дані для розрахунку УЗО наведені нижче.

Параметри навантаження планшайби:

|                                                             |        |
|-------------------------------------------------------------|--------|
| - маса $m$ , кг                                             | 14;    |
| - вага $G$ , Н                                              | 137,3; |
| - ексцентриситет ЦВ $e$ , м                                 | 0,1;   |
| - відстань від ЦВ до опори $A$ $h$ , м                      | 0,2;   |
| - відстань від ЦВ виробу до осі повороту траверси $h_1$ , м | 0,23.  |

Характеристики універсального обертача:

|                                        |          |
|----------------------------------------|----------|
| <u>Характер застосування пристрою:</u> | обертач. |
|----------------------------------------|----------|

Параметри робочого столу:

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| - матеріал планшайби та фланця       | Д16; |
| - маса планшайби разом з фланцем, кг | 7    |
| - діаметр планшайби, мм              | 400; |
| - товщина планшайби, мм              | 15.  |

Параметри механізму обертання планшайби:

|                                                   |        |
|---------------------------------------------------|--------|
| - діаметр цапфи шпинделя $d_A$ , м                | 0,05;  |
| - відстань між опорами $A$ і $B$ $l$ , м          | 0,155; |
| - відстань між опорою $A$ та планшайбою $K_1$ , м | 0,056; |
| - марка підшипника                                | 210;   |

- кількість підшипників 1;
- статична вантажопідйомність підшипника, кН 23,2
- спосіб підключення електродвигуна напругу;
- тип електродвигуна кроковий;
- відстань від опори  $B$  до центру ротора  $K_2$ , м 0;
- радіус ротора  $R$  (рис. 2.7), м 0,03;
- максимальна швидкість обертання, об/хв 10.

Параметри механізму нахилу планшайби:

- діапазон кутів нахилу осі планшайби  $\alpha$ , ° 0...180;
- спосіб підключення електродвигуна через редуктор;
- тип електродвигуна кроковий;
- максимальна швидкість обертання, об/хв 1;
- відстань між опорами цапф  $L_{Tp}$ , м 0,32;
- довжина обойми траверси  $L_{Ob}$ , м 0,14;
- висота обойми траверси  $H$ , м 0,06;
- ширина обойми траверси  $B$ , м 0,14;
- діаметр валу траверси  $d_B$ , м 0,06;
- довжина опорної частини в підшипнику цапфи  $l_1$ , м 0,02;
- довжина цапфи  $l_{Ц}$ , м 0,02;
- діаметр опорної частини цапфи  $d_1$ , м 0,05;
- марка підшипника цапфи 210;
- кількість підшипників в цапфі 1;
- статична вантажопідйомність підшипника, кН 23,2;
- радіус черв'ячного колеса редуктора  $R_1$ , м 0,05.

Загальні характеристики шпинделя та траверси:

- матеріал Ст35;
- умовна границя текучості  $\sigma_{0,2}$ , Па  $320 \cdot 10^6$ ;
- допустимі напруження при навантаженні, Па:
- при статичному розтязі  $210 \cdot 10^6$ ;

- при складному навантаженні (згинання та крутіння):  $80 \cdot 10^6$ ;
- модуль Юнга для сталі  $E$ , Па:  $2 \cdot 10^{11}$ ;
- модуль зсуву для сталі  $E_0$ , Па:  $0,8 \cdot 10^{11}$ ;
- коефіцієнти тертя в підшипниках  $f$  0.

\* Умовно припускаємо, що траверса є цілісним валом суцільного перерізу та довжиною, що дорівнює сумі довжин двох піввалів (або піввалу і півосі), а навантаження та моменти (крутний та згинальний) від мотор-шпинделя, планшайби та ваги її навантаження прикладені в центрі прогону валу.

#### 2.4.2. Розрахунок механізму обертання шпинделя.

Метою даного розрахунку є перевірка шпинделя, на якому обертається планшайба, на відповідність умовам міцності, жорсткості та характеристикам приводу обертання.

Розрахункова схема механізму обертання шпинделя наведена на рис. 2.21. В даному випадку шпиндель розглядається як двохопорна балка з передньою та задньою консолями, яка навантажена одночасно згинальним  $M_{зг}$  та крутним  $M_{кр}$  моментами, які є функціями кутів  $\alpha$  і  $\beta$ .

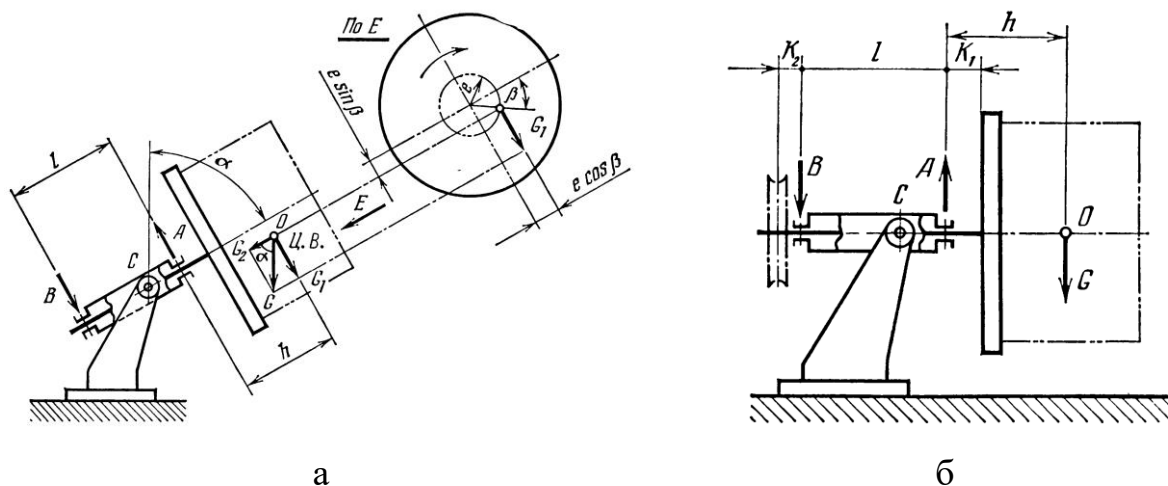


Рис. 2.21. Розрахункова схема механізму обертання УЗО:

а – при положенні шпинделя, нахилоного на довільний кут  $\alpha$ ;

б – горизонтальне положення шпинделя ( $\alpha = 90^\circ$ )

ГКД кріпиться до центральної обойми УЗО ГКД і фактично є задньою опорою шпинделя, яка утворена ротором, що спирається на підшипники двигуна. Тому умовно в розрахунку його можна замінити еквівалентною опорою, розташованою в центрі ротора, і до якої відповідно прикладена вага ротора. Привод шпинделя умовно можна представити як «зубчасту передачу» з електромагнітним зачепленням між ротором та статором ГКД. Відповідно, плече приводного моменту колової сили буде рівним радіусу ротора  $R$ . Рівнодіюча колової сили буде лежати в поперечній площині еквівалентної опори, тому відстань  $K_2$  від заднього підшипника шпинделя до площини прикладання колової сили на задній консолі шпинделя слід прийняти рівною нулю.

Прогін шпинделя утворений «півротором» та хвостовиком ГКД і задньою консоллю валу план-шайби, які з'єднані по типу вал-отвір за допомогою шпонки. Задня консоль валу план-шайби є слабким місцем прогину шпинделя. Для спрощення розрахунків будемо вважати, що прогін шпинделя суцільного перетину та виготовлений зі Ст35. За результатами буде прийняте рішення про необхідність збільшення «живого» перетину порожнистої консолі.

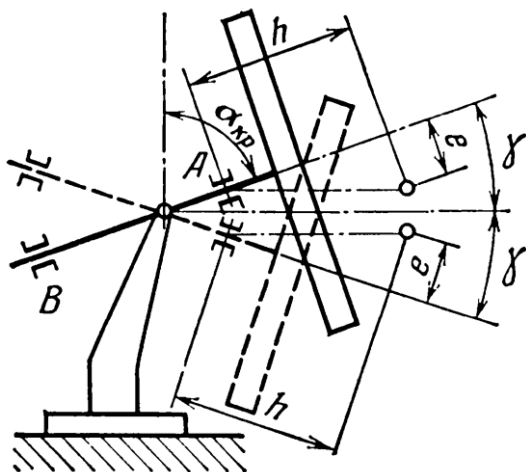


Рис. 2.22. Небезпечний розрахунковий діапазон УЗО

Підшипник валу планшайби є переднім підшипником шпинделя, а хвостовик валу, до якого безпосередньо кріпиться планшайба, виконує роль передньої консолі шпинделя.

Небезпечні розрахункові кути існують у діапазоні  $\pm\gamma$  від горизонтального положення осі шпинделя (рис. 2.22).

Небезпечний кут нахилу шпинделя, °:

$$\gamma = \frac{180}{\pi} * \arctg\left(\frac{e}{h}\right), \quad (2.45)$$

$$\gamma = \frac{180}{\pi} * \arctg\left(\frac{0,1}{0,2}\right) = 26,57.$$

Критичний кут нахилу шпинделя від вертикальної осі, °:

$$\alpha_{кр} = 90^\circ - \gamma, \quad (2.46)$$

$$\alpha_{кр} = 90 - 26,57 = 63,43.$$

Визначимо розрахункові зусилля, що діють на шпиндель УЗО, в найбільш напружених положеннях.

Для спрощення розрахунків спочатку розглянемо величини моментів, що утворює відносно до опори А вага конструктивних елементів УЗО та вантажу при горизонтальному положенні шпинделя (табл. 2.4).

Позитивним прийнято напрямок моменту вантажу.

Таблиця 2.4. Величини моментів відносно до опори А

| Найменування      | Відстань до опори А, м | Маса, кг | Момент, Н·м |
|-------------------|------------------------|----------|-------------|
| Ротор ГKD         | 0,155                  | 2,42     | -3,7        |
| Шпиндель          | 0,073                  | 2,4      | -1,8        |
| Хвостовик валу ПШ | 0,028                  | 0,9      | 0,2         |
| Планшайба         | 0,056                  | 7        | 3,8         |
| Вантаж            | 0,2                    | 14       | 27,5        |
| Разом             |                        |          | 26          |

Таким чином, сумарний момент складає 95% від моменту вантажу, тому в подальших розрахунках моментами конструктивних елементів УЗО можна знехтувати.

Розрахунки проведемо в табличній формі (табл. 2.5 та 2.6).

Таблиця 2.5. Розрахунок шпинделя в похилому положенні

| Розрахунковий параметр | Позначення | Положення шпинделя                                               |                                                                                              |
|------------------------|------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        |            | $\alpha = \alpha_{кр}, \beta = 90^\circ$                         |                                                                                              |
|                        |            | Формула                                                          | Рішення                                                                                      |
| Опорні реакції А, Н    | $A_1$      | $G \cdot \frac{h^2 + e^2 + h \cdot l}{l \cdot \sqrt{h^2 + e^2}}$ | $137,3 \cdot \frac{0,2^2 + 0,1^2 + 0,2 \cdot 0,155}{0,155 \cdot \sqrt{0,2^2 + 0,1^2}} = 320$ |
|                        | $A_2$      | 0                                                                | 0                                                                                            |

|                                       |          |                                   |                                                      |
|---------------------------------------|----------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                       | $A_0$    | $\sqrt{A_1^2 + A_2^2}$            | 320                                                  |
|                                       | $A_{oc}$ | $G * \frac{e}{\sqrt{h^2 + e^2}}$  | $137,3 * \frac{0,1}{\sqrt{0,2^2 + 0,1^2}} = 61$      |
| Опроні реакції $B$ , Н                | $B_1$    | $G * \frac{\sqrt{h^2 + e^2}}{l}$  | $137,3 * \frac{\sqrt{0,2^2 + 0,1^2}}{0,155} = 197,6$ |
|                                       | $B_2$    | 0                                 | 0                                                    |
|                                       | $B_0$    | $\sqrt{B_1^2 + B_2^2}$            | 197,6                                                |
| Моменти в опорному перерізі $A$ , Н·м | $M_1$    | $G * \sqrt{h^2 + e^2}$            | $137,3 * \sqrt{0,2^2 + 0,1^2} = 30,6$                |
|                                       | $M_2$    | 0                                 | 0                                                    |
|                                       | $M_{кр}$ | 0                                 | 0                                                    |
|                                       | $M_e$    | $\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_{кр}^2}$ | 30,6                                                 |

Таблиця 2.6. Розрахунок шпинделя в горизонтальному положенні

| Розрахунковий параметр                | Позначення | Положення шпинделя                   |                                                      |
|---------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                       |            | $\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$ |                                                      |
|                                       |            | Формула                              | Рішення                                              |
| Опорні реакції $A$ , Н                | $A_1$      | $G * \left(1 + \frac{h}{l}\right)$   | $137,3 * \left(1 + \frac{0,2}{0,155}\right) = 313,8$ |
|                                       | $A_2$      | 0                                    | 0                                                    |
|                                       | $A_0$      | $\sqrt{A_1^2 + A_2^2}$               | 313,8                                                |
|                                       | $A_{oc}$   | 0                                    | 0                                                    |
| Опроні реакції $B$ , Н                | $B_1$      | $G * \frac{h}{l}$                    | $137,3 * \frac{0,2}{0,155} = 176,8$                  |
|                                       | $B_2$      | $G * \frac{e}{R}$                    | $137,3 * \frac{0,1}{0,03} = 456,7$                   |
|                                       | $B_0$      | $\sqrt{B_1^2 + B_2^2}$               | $\sqrt{176,8^2 + 456,7^2} = 489,7$                   |
| Моменти в опорному перерізі $A$ , Н·м | $M_1$      | $G * h$                              | $137,3 * 0,2 = 27,4$                                 |
|                                       | $M_2$      | 0                                    | 0                                                    |
|                                       | $M_{кр}$   | $G * e$                              | $137,3 * 0,1 = 13,7$                                 |
|                                       | $M_e$      | $\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_{кр}^2}$    | $\sqrt{27,4^2 + 13,7^2} = 30,6$                      |

За даними табл. 2.5 максимальне осьове навантаження на опору  $A$

складає 61 Н при еквівалентному моменті – 30,6 Н·м.

Напруження, що виникають в шпинделі при складному навантаженні, Па:

$$\sigma = \frac{10 * M_e}{d_A^3} + \frac{1,3 * A_{oc}}{d_A^2} \leq [\sigma], \quad (2.47)$$

$$\sigma = \frac{10 * 30,6}{0,05^3} + \frac{1,3 * 61}{0,05^2} = 2,5 \cdot 10^6,$$

$$2,5 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6.$$

Міцність шпинделя забезпечується.

Допустиме значення прогину для шпинделя обертача, м:

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * l, \quad (2.48)$$

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * 0,155 = 31 \cdot 10^{-6}.$$

Довжина вкручуваної ділянки валу, м:

$$l_{KP} = l + K_1, \quad (2.49)$$

$$l_{KP} = 0,155 + 0,056 = 0,211.$$

Допустиме значення кута закручування для шпинделя обертача, °:

$$[\varphi] = 0,1 * l_{KP}, \quad (2.50)$$

$$[\varphi] = 0,1 * 0,211 = 0,021.$$

Момент інерції поперечного перерізу шпинделя, м<sup>4</sup>:

$$I = \frac{\pi * d_A^4}{64}, \quad (2.51)$$

$$I = \frac{\pi * 0,05^4}{64} = 3,1 \cdot 10^{-7}.$$

Полярний момент інерції поперечного перерізу шпинделя, м<sup>4</sup>:

$$I_0 = 2 * I, \quad (2.52)$$

$$I_0 = 2 * 3,1 \cdot 10^{-7} = 6,2 \cdot 10^{-7}.$$

Максимальний прогин шпинделя УЗО, м:

$$\Delta = \frac{G * h^2}{3 * E * I} * (h + l), \quad (2.53)$$

$$\Delta = \frac{137,3 * 0,2^2}{3 * 2 \cdot 10^{11} * 3,1 \cdot 10^{-7}} * (0,2 + 0,155) = 10,5 \cdot 10^{-6}.$$

$$10,5 \cdot 10^{-6} < 31 \cdot 10^{-6}.$$

Жорсткість при згинанні шпинделя забезпечується.

Максимальний кут закручування УЗО, °:

$$\varphi = \frac{180 * M_{KP} * l_{KP}}{\pi * E_0 * I_0}, \quad (2.54)$$

$$\varphi = \frac{180 * 13,7 * 0,211}{\pi * 0,8 \cdot 10^{11} * 6,2 \cdot 10^{-7}} = 33,4 \cdot 10^{-4}.$$

$$33,4 \cdot 10^{-4} < 210 \cdot 10^{-4}.$$

Жорсткість при крутінні шпинделя забезпечується.

Результати перевірки представлені в табл. 2.7

Таблиця 2.7. Силіві запаси шпинделя

| № з.п. | Найменування елемента | Запас міцності | Запас жорсткості |          |
|--------|-----------------------|----------------|------------------|----------|
|        |                       |                | Згинання         | Крутіння |
|        |                       |                | %                |          |
| 1      | Шпиндель              | 96,9           | 66,1             | 84,1     |

Як було зазначено вище шпиндель має складену конструкцію та приймаючи до уваги близькі до допустимих значення параметрів жорсткості, необхідно забезпечити площу «живого» перерізу порожнистої консолі валу планшайби рівну площі суцільного перетину, виходячи з умови:

$$\frac{\pi * d_A^2}{4} \leq \frac{\pi * d_{um}^2}{4} - \frac{\pi * d_{xв}^2}{4}, \quad (2.55)$$

де  $d_{xв} = 21$  мм – діаметр хвостовика ротору ГКД.

Тоді мінімальний потрібний діаметр шпинделя визначиться за формулою, мм:



$$d_{un}^{min} = \sqrt{d_A^2 + d_{xв}^2}, \quad (2.56)$$

$$d_{un}^{min} = \sqrt{50^2 + 21^2} = 54,2.$$

Умови міцності та жорсткості шпинделя виконуються з запасом, тому збільшувати діаметр шпинделя не потрібно.

Результати перевірки шпинделя показують, що максимально вантаж можна збільшити: за міцністю – в 32 рази, за жорсткістю за згинанням – в 3 рази, а за крутінням – в 6 разів.

Максимальне радіальне навантаження на вал ГКД складає 489,7 Н, що не перевищує умовну статичну вантажопідйомність, яка дорівнює 2974 Н. Згідно з табл. 2.1 практично таке радіальне навантаження (489 Н) визначено виробником в якості еквівалентного при ресурсних випробуваннях двигунів.

Порівняння технічних характеристик двигунів K42xxLG-L та K43xxLK-L, наведених в табл. 2.1 та 2.2, показує що двигун K43xxLK-L переважає за крутним моментом в 1,4 рази, за вагою ротора в 1,5 рази, що створює можливість збільшити масу вантажу до 21 кг навіть при розрахунковій відстані та ексцентриситеті центра ваги вантажу. Усунення ексцентриситету прибирає крутний момент з шпинделя і тоді взагалі масу вантажу можна збільшити до 42 кг.

З боку ГКД діє обмеження в розмірі 303 кг, але в разі встановлення на центральній обоймі додаткової задньої кришки з підшипником, що потребує також незначного доопрацювання задньої консолі валу планшайби, можливо без ексцентриситету збільшити вантаж до 448 кг. Підшипник шпинделя (210) обмежує вантаж до 2365 кг.

Все це показує, що конструкція шпинделя дозволяє суттєво збільшити навантаження на УЗО в разі виникнення такої потреби.

#### 2.4.3. Розрахунок механізму нахилу шпинделя.

Метою даного розрахунку є перевірка траверси, на якій обертається шпиндель, на відповідність умовам міцності, жорсткості та характеристикам приводу нахилу.

Розрахункова схема наведена на рис. 2.23.

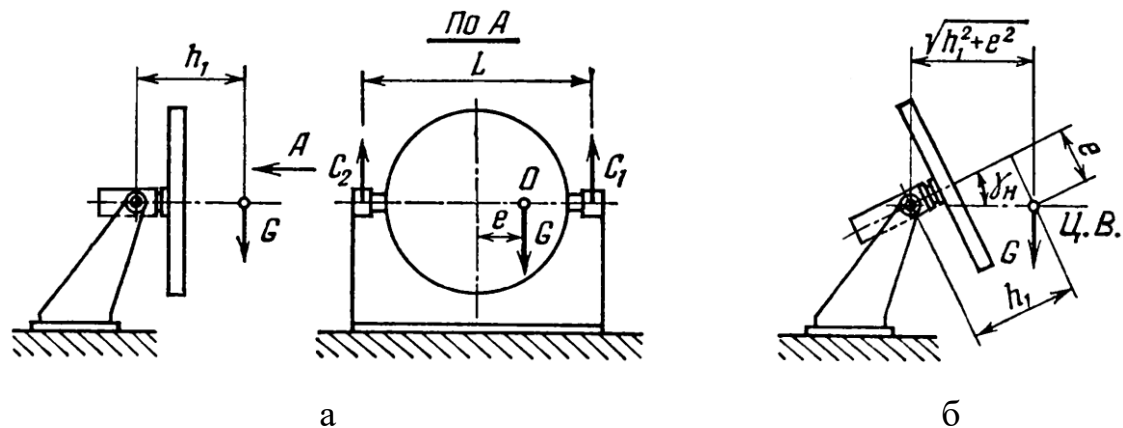


Рис. 2.23. Розрахункова схема механізму нахилу УЗО

а – положення шпинделя при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ;

б – положення шпинделя при  $\alpha = \alpha_{KP}$ ,  $\beta = 90^\circ$ .

Для спрощення розрахунків спочатку розглянемо величини моментів, що утворює відносно до осі нахилу вага конструктивних елементів УЗО та вантажу при горизонтальному положенні шпинделя (табл. 2.8). Позитивним прийнято напрямок моменту вантажу.

Таблиця 2.8. Величини моментів відносно до осі нахилу шпинделя

| Найменування      | Відстань до опори А, м | Маса, кг | Момент, Н·м |
|-------------------|------------------------|----------|-------------|
| ГКД               | 0,125                  | 8,34     | -10,2       |
| Шпиндель          | 0,043                  | 2,4      | -1,1        |
| Хвостовик валу ПШ | 0,058                  | 0,9      | 0,5         |
| Планшайба         | 0,086                  | 7        | 5,9         |
| Вантаж            | 0,23                   | 14       | 31,6        |
| Разом             |                        |          | 26,7        |

Таким чином, сумарний момент складає 84% від моменту вантажу, тому в подальших розрахунках моментами конструктивних елементів УЗО можна знехтувати. При розрахунку редуктора запас крутного моменту можна не додавати.

Небезпечний кут нахилу шпинделя до горизонту, °:

$$\gamma_n = \frac{180}{\pi} * \arctg\left(\frac{e}{h_1}\right), \quad (2.57)$$

$$\gamma_n = \frac{180}{3,14} * \arctg\left(\frac{0,1}{0,23}\right) = 23,5.$$

Небезпечні кути нахилу існують у діапазоні  $\pm\gamma_n$  від горизонтального положення осі шпинделя.

Критичний кут нахилу для траверси, °:

$$\alpha_{KP} = 90 - \gamma_n, \quad (2.58)$$

$$\alpha_{KP} = 90 - 23,5 = 66,5.$$

Найбільший вантажний момент відносно осі нахилу виникне при положенні  $b$  (рис. 2.9), бо тоді відстань до центру ваги буде максимальною, Н·м:

$$M_{BT} = G * \sqrt{h_1^2 + e^2}, \quad (2.59)$$

$$M_{BT} = 137 * \sqrt{0,23^2 + 0,1^2} = 34,4.$$

Силовий розрахунок механізму нахилу УЗО наведено в табл. 2.9, 2.10.

Таблиця 2.9. Розрахунок механізму нахилу УЗО при горизонтальному положенні шпинделя

| Розрахунковий параметр |       | Позначення | Положення шпинделя горизонтальне                  |                                                                          |
|------------------------|-------|------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                        |       |            | $\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$              |                                                                          |
|                        |       |            | Формула                                           | Значення                                                                 |
| Момент вантажу, Н·м    |       | $M_{BT}$   | $G * h_1$                                         | $137,3 * 0,23 = 31,6$                                                    |
| Реакція цапф, Н        | Макс. | $C_1$      | $\frac{G}{R_1 * L} * (R_1 + h_1) * (0,5 * L + e)$ | $\frac{137,3}{0,05 * 0,31} * (0,05 + 0,23) * (0,5 * 0,31 + 0,1) = 632,5$ |
|                        | Мін.  | $C_2$      | $\frac{G}{R_1 * L} * (R_1 + h_1) * (0,5 * L - e)$ | $\frac{137,3}{0,05 * 0,31} * (0,05 + 0,23) * (0,5 * 0,31 - 0,1) = 136,4$ |
|                        | Сум.  | $C_C$      | $C_1 + C_2$                                       | $632,5 + 136,4 = 768,9$                                                  |

|                   |       |                       |                                     |
|-------------------|-------|-----------------------|-------------------------------------|
| Колове зусилля, Н | $Q_K$ | $G * \frac{h_1}{R_1}$ | $137,3 * \frac{0,23}{0,05} = 631,6$ |
|-------------------|-------|-----------------------|-------------------------------------|

Таблиця 2.10. Розрахунок механізму нахилу УЗО при похилому положенні шпинделя

| Розрахунковий параметр |          | Позначення | Положення шпинделя похиле                        |                                                                 |
|------------------------|----------|------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                        |          |            | $\alpha = \alpha_{KP}, \beta = 90^\circ$         |                                                                 |
|                        |          |            | Формула                                          | Значення                                                        |
| Момент вантажу, Н·м    |          | $M_{BT}$   | $G * \sqrt{h_1^2 + e^2}$                         | $137,3 * \sqrt{0,23^2 + 0,1^2} = 34,4$                          |
| Реакція цапф, Н        | Одинична | $C_1$      | $\frac{G}{2 * R_1} * (R_1 + \sqrt{h_1^2 + e^2})$ | $\frac{137,3}{2 * 0,05} * (0,05 + \sqrt{0,23^2 + 0,1^2}) = 413$ |
|                        |          | $C_2$      |                                                  |                                                                 |
|                        | Сум.     | $C_C$      | $C_1 + C_2$                                      | $413 + 413 = 826$                                               |
| Колове зусилля, Н      |          | $Q_K$      | $G * \frac{\sqrt{h_1^2 + e^2}}{R_1}$             | $137,3 * \frac{\sqrt{0,23^2 + 0,1^2}}{0,05} = 688,7$            |

Виходячи з розрахунків табл. 2.9 та 2.10 для подальших розрахунків приймаємо найбільші значення, Н:

$$C_1 = 632,5, C_2 = 413, C_c = 826.$$

В якості найбільшого крутного моменту приймаємо максимальний момент вантажу  $M_{BT} = 34,4$  Н·м.

Момент опору суцільної круглої цапфи при згинанні, м<sup>3</sup>:

$$W_{\text{ц}}^{\text{зг}} = \frac{\pi * d_{\text{ц}}^3}{32}, \quad (2.60)$$

$$W_{\text{ц}}^{\text{зг}} = \frac{\pi * 0,05^3}{32} = 1,2 \cdot 10^{-5}.$$

Момент опору суцільної круглої цапфи при крутінні, м<sup>3</sup>:

$$W_{\text{ц}}^{\text{кр}} = \frac{\pi * d_{\text{ц}}^3}{16}, \quad (2.61)$$

$$W_{\text{Ц}}^{\text{кр}} = \frac{\pi * 0,05^3}{16} = 2,4 \cdot 10^{-5}.$$

Згинальний момент, що діє в основі активної (опорної) частини цапфи, Н·м:

$$M_{\text{Ц}}^{\text{зг}} = \frac{C_1 * l_1}{2}, \quad (2.62)$$

$$M_{\text{Ц}}^{\text{зг}} = \frac{632,5 * 0,02}{2} = 6,3.$$

Нормальні напруження при згинанні в поперечному перерізі цапфи, Па:

$$\sigma_{\text{Ц}}^{\text{зг}} = \frac{M_{\text{Ц}}^{\text{зг}}}{W_{\text{Ц}}^{\text{зг}}}, \quad (2.63)$$

$$\sigma_{\text{Ц}}^{\text{зг}} = \frac{6,3}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 0,5 \cdot 10^6.$$

Дотичні напруження крутіння в поперечному перерізі цапфи, Па:

$$\tau_{\text{Ц}}^{\text{кр}} = \frac{M_{\text{БТ}}}{W_{\text{Ц}}^{\text{кр}}}, \quad (2.64)$$

$$\tau_{\text{Ц}}^{\text{кр}} = \frac{34,4}{2,4 \cdot 10^{-5}} = 1,4 \cdot 10^6.$$

Еквівалентне напруження відповідно до IV (енергетичної) теорії міцності, Па:

$$\sigma_{\text{Ц}}^{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_{\text{Ц}}^{\text{зг}2} + 3 * \tau_{\text{Ц}}^{\text{кр}2}}, \quad (2.65)$$

$$\sigma_{\text{Ц}}^{\text{екв}} = 10^6 \sqrt{0,5^2 + 3 * 1,4^2} = 2,5 \cdot 10^6.$$

$$2,5 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6.$$

Міцність цапфи забезпечується.

Допустимий прогин цапфи розраховується аналогічно, як для траверси обертача, м:

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * l_{\text{Ц}}, \quad (2.66)$$

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * 0,02 = 4 \cdot 10^{-6}.$$

Допустиме значення кута закручування цапфи розраховується аналогічно, як для траверси обертача, °:

$$[\varphi] = 0,05 * l_{\text{ц}}, \quad (2.67)$$

$$[\varphi] = 0,05 * 0,02 = 1 \cdot 10^{-3}.$$

Момент інерції поперечного перерізу цапфи, м<sup>4</sup>:

$$I_{\text{ц}} = \frac{\pi * d_{\text{ц}}^4}{64}, \quad (2.68)$$

$$I_{\text{ц}} = \frac{\pi * 0,05^4}{64} = 3,1 \cdot 10^{-7}.$$

Полярний момент інерції поперечного перерізу цапфи, м<sup>4</sup>:

$$I_{0\text{ц}} = 2 * I_{\text{ц}}, \quad (2.69)$$

$$I_{0\text{ц}} = 2 * 3,1 \cdot 10^{-7} = 6,2 \cdot 10^{-7}.$$

Максимальний прогин цапфи механізму нахилу УЗО, м:

$$\Delta = \frac{G * l_{\text{ц}}^3}{48 * E * I_{\text{ц}}}, \quad (2.70)$$

$$\Delta = \frac{137,3 * 0,02^3}{48 * 2 \cdot 10^{11} * 3,1 \cdot 10^{-7}} = 3,7 \cdot 10^{-10}.$$

$$3,7 \cdot 10^{-10} < 4 \cdot 10^{-6}.$$

Жорсткість при згинанні цапфи забезпечується.

Максимальний кут закручування цапфи механізму нахилу УЗО, °:

$$\varphi = \frac{180 * M_{\text{вт}} * l_{\text{ц}}}{\pi * E_0 * I_{0\text{ц}}}, \quad (2.71)$$

$$\varphi = \frac{180 * 34,4 * 0,02}{\pi * 0,8 \cdot 10^{11} * 6,2 \cdot 10^{-7}} = 7,9 \cdot 10^{-4}.$$

$$7,9 \cdot 10^{-4} < 10 \cdot 10^{-4}.$$

Жорсткість при крутінні цапфи забезпечується.

Виконаємо перевірку траверси.

Траверса механізму нахилу складається з трьох частин: приводного валу,

центральної обойми та піввосі. В умовах дії крутного та згинального моментів працюють лише перші дві частини. Якщо вал задовольняє умовам жорсткості при згинанні, то піввісь можна не перевіряти, бо вона аналогічної конструкції.

Момент опору суцільного круглого валу або осі при згинанні, м<sup>3</sup>:

$$W_B^{32} = \frac{\pi * d_B^3}{32}, \quad (2.72)$$

$$W_B^{32} = \frac{\pi * 0,06^3}{32} = 2,1 \cdot 10^{-5}.$$

Момент опору суцільного круглого валу при крутінні, м<sup>3</sup>:

$$W_B^{kp} = \frac{\pi * d_B^3}{16}, \quad (2.73)$$

$$W_B^{kp} = \frac{\pi * 0,06^3}{16} = 4,2 \cdot 10^{-5}.$$

Максимальний згинальний момент, що діє на вал або ось в точці з'єднання з обоймою, Н·м:

$$M_B^{32} = \frac{G * (L_{Tp} - L_{O6})}{2}, \quad (2.74)$$

$$M_B^{32} = \frac{137,3 * (0,32 - 0,14)}{2} = 12,4.$$

Нормальні напруження при згинанні в поперечному перерізі валу або осі, Па:

$$\sigma_B^{32} = \frac{M_B^{32}}{W_B^{32}}, \quad (2.75)$$

$$\sigma_B^{32} = \frac{12,4}{2,1 \cdot 10^{-5}} = 0,6 \cdot 10^6.$$

Ось забезпечує вимогам жорсткості при згинанні з великим запасом.

Дотичні напруження крутіння в поперечному перерізі валу, Па:

$$\tau_B^{kp} = \frac{M_{BT}}{W_B^{kp}}, \quad (2.76)$$

$$\tau_B^{kp} = \frac{34,4}{4,2 \cdot 10^{-5}} = 0,8 \cdot 10^6.$$

Еквівалентне напруження відповідно до IV (енергетичної) теорії міцності, Па:

$$\sigma_B^{екв} = \sqrt{\sigma_B^{з22} + 3 * \tau_B^{кр22}}, \quad (2.77)$$

$$\sigma_B^{екв} = 10^6 \sqrt{0,6^2 + 3 * 0,8^2} = 1,5 \cdot 10^6.$$

$$1,5 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6.$$

Міцність валу забезпечується.

Допустимий прогин валу траверси обертача, м:

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * \frac{(L_{Tp} - L_{О6})}{2}, \quad (2.78)$$

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * \frac{(0,32 - 0,14)}{2} = 18 \cdot 10^{-6}.$$

Допустиме значення кута закручування валу траверси обертача, °:

$$[\varphi] = 0,05 * \frac{(L_{Tp} - L_{О6})}{2}, \quad (2.79)$$

$$[\varphi] = 0,05 * \frac{(0,32 - 0,14)}{2} = 4,5 \cdot 10^{-3}.$$

Момент інерції поперечного перерізу валу, м<sup>4</sup>:

$$I_B = \frac{\pi * d_B^4}{64}, \quad (2.80)$$

$$I_B = \frac{\pi * 0,06^4}{64} = 6,4 \cdot 10^{-7}.$$

Полярний момент інерції поперечного перерізу валу, м<sup>4</sup>:

$$I_{0B} = 2 * I_B, \quad (2.81)$$

$$I_{0B} = 2 * 6,4 \cdot 10^{-7} = 12,8 \cdot 10^{-7}.$$

Максимальний прогин валу механізму нахилу УЗО, м:

$$\Delta = \frac{G}{48 * E * I_B} * \left[ \frac{(L_{Tp} - L_{О6})}{2} \right]^3 \quad (2.82)$$



$$\Delta = \frac{137,3}{48 * 2 \cdot 10^{11} * 6,4 \cdot 10^{-7}} * \left[ \frac{(0,32 - 0,14)}{2} \right]^3 = 2 \cdot 10^{-6}.$$

$$2 \cdot 10^{-6} < 18 \cdot 10^{-6}.$$

Жорсткість при згинанні валу забезпечується.

Максимальний кут закручування валу механізму нахилу УЗО, °:

$$\varphi = \frac{180 * M_{BT}}{\pi * E_0 * I_{0B}} * \frac{(L_{Tp} - L_{O\delta})}{2}, \quad (2.83)$$

$$\varphi = \frac{180 * 34,4}{\pi * 0,8 \cdot 10^{11} * 12,8 \cdot 10^{-7}} * \left[ \frac{(0,32 - 0,14)}{2} \right] = 1,7 \cdot 10^{-3}.$$

$$1,7 \cdot 10^{-3} < 4,5 \cdot 10^{-3}.$$

Жорсткість при крутінні валу забезпечується.

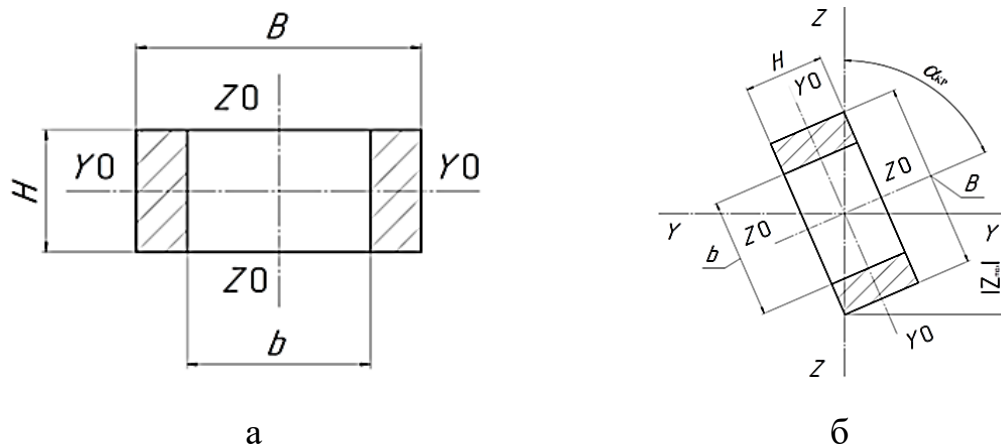


Рис. 2.24. Розрахункова схема центрального перерізу обойми траверси:  
а – вихідне вертикальне положення; б – положення після нахилу на  $\alpha_{KP}$ .

Центральну обойму можна спрощено уявити тілом симетрії відносно осі траверси та осі шпинделя а найтонший (центральный) переріз її, утворений площиною вертикальної осі і осі шпинделя, являє собою два прямокутника, рівновіддалених один від одного відносно осі шпинделя (рис. 2.24) Розміри перерізу: висота перерізу  $H = 0,06$  м, ширина  $B = 0,14$  м, ширина зазору  $b = 0,09$  м. При вертикальному положенні шпинделя осі інерції перерізу  $Y$  та  $Z$

співпадають з осями симетрії. Тому вихідні осьові та відцентровий моменти інерції визначаються [59, 60]:

$$I_{Y0} = \frac{H^3 * (B - b)}{12}. \quad (2.84)$$

$$I_{Z0} = \frac{H * (B^3 - b^3)}{12}. \quad (2.85)$$

$$I_{Y0Z0} = 0. \quad (2.86)$$

Тоді полярний момент інерції перерізу можна визначити:

$$I_0 = I_{Y0} + I_{Z0}. \quad (2.87)$$

Після підстановки 2.84 і 2.85 в 2.87 та нескладних математичних перетворень розрахуємо полярний момент інерції обойми, м<sup>4</sup>:

$$I_0 = \frac{H * (B - b)}{12} * (H^2 + B^2 + B * b + b^2), \quad (2.88)$$

$$I_0 = \frac{0,06 * (0,14 - 0,09)}{12} * (0,06^2 + 0,14^2 + 0,14 * 0,09 + 0,09^2) = 1,1 \cdot 10^{-5}.$$

Після нахилу осі шпинделя на  $\alpha_{KP}$  від вертикалі момент інерції обойми відносно горизонтальної осі Y стане, м<sup>4</sup>:

$$I_Y = I_{Y0} * \cos^2(\alpha_{KP}) + I_{Z0} * \sin^2(\alpha_{KP}) - I_{Y0Z0} * \sin(2 * \alpha_{KP}), \quad (2.89)$$

Після підстановки 2.44...2.46 в 2.49 та нескладних математичних перетворень розрахуємо горизонтальний осьовий момент інерції обойми, м<sup>4</sup>:

$$I_Y = \frac{H * (B - b)}{12} * [H^2 * \cos^2(\alpha_{KP}) + (B^2 + B * b + b^2) * \sin^2(\alpha_{KP})], \quad (2.90)$$

$$I_Y = \frac{0,06 * (0,14 - 0,09)}{12} * [0,06^2 * \cos^2(66,5^\circ) + (0,14^2 + 0,14 * 0,09 + 0,09^2) * \sin^2(66,5^\circ)] = 8,6 \cdot 10^{-6}.$$

Вихідні моменти опору центрального перерізу обойми при згинанні вздовж осей Y та Z, м<sup>3</sup>:

$$W_{Y0} = \frac{H^2 * (B - b)}{6}, \quad (2.91)$$

$$W_{Z0} = \frac{H * (B^3 - b^3)}{6 * B}, \quad (2.92)$$

Полярний момент опору центрального перерізу обойми, м<sup>3</sup>:

$$W_0 = W_{Y0} + W_{Z0}. \quad (2.93)$$

Після підстановки 2.51 та 2.52 в 2.53 та нескладних математичних перетворень розрахуємо полярний момент інерції центрального перерізу обойми, м<sup>3</sup>:

$$W_0 = \frac{H * (B - b)}{6 * B} * (H * B + B^2 + B * b + b^2), \quad (2.94)$$

$$W_0 = \frac{0,06 * (0,14 - 0,09)}{6 * 0,14} * (0,06 * 0,14 + 0,14^2 + 0,14 * 0,09 + 0,09^2) = 17,4 \cdot 10^{-5}.$$

Момент опору центрального перерізу обойми при згинанні вздовж горизонтальної осі Y після повертання осей симетрії перерізу на кут  $\alpha_{KP}$ , м<sup>3</sup>:

$$W_Y = \frac{I_Y}{|Z_{\max}|}, \quad (2.95)$$

де  $|Z_{\max}|$  – відстань від осі Y до найбільш віддаленої точки перерізу. В даному випадку  $|Z_{\max}|$  буде дорівнювати модулю висоти, що опущена з верхнього або нижнього кута перерізу на ось Y.

Найбільша відстань перерізу знаходиться за формулою, м:

$$|Z_{\max}| = \frac{B}{2 * \sin(\alpha_{KP})}, \quad (2.96)$$

$$|Z_{\max}| = \frac{0,14}{2 * \sin(66,5)} = 0,076.$$

Тоді момент опору перерізу при згинанні, м<sup>3</sup>:

$$W_Y = \frac{8,6 \cdot 10^{-6}}{0,076} = 1,1 \cdot 10^{-4}. \quad (2.97)$$

Нормальні напруження при згинанні в центральному поперечному перерізі обойми, Па:

$$\sigma_{O\sigma}^{3z} = \frac{M_{BT}}{W_Y}, \quad (2.98)$$

$$\sigma_{O\sigma}^{3z} = \frac{34,4}{1,1 \cdot 10^{-4}} = 0,3 \cdot 10^6.$$

Дотичні напруження крутіння в поперечному перерізі обойми, Па:

$$\tau_{O\sigma}^{kp} = \frac{M_{BT}}{W_0}, \quad (2.99)$$

$$\tau_{O\sigma}^{kp} = \frac{34,4}{17,4 \cdot 10^{-5}} = 0,2 \cdot 10^6.$$

Еквівалентне напруження відповідно до IV (енергетичної) теорії міцності, Па:

$$\sigma_{O\sigma}^{екв} = \sqrt{\sigma_{O\sigma}^{3z\ 2} + 3 \cdot \tau_{O\sigma}^{kp\ 2}}, \quad (2.100)$$

$$\sigma_{O\sigma}^{екв} = 10^6 \sqrt{0,3^2 + 3 \cdot 0,2^2} = 0,5 \cdot 10^6.$$

$$0,5 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6.$$

Міцність обойми забезпечується.

Допустимий прогин центральної обойми траверси обертача, м:

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * \frac{L_{O\sigma}}{2}, \quad (2.101)$$

$$[\Delta] = 2 \cdot 10^{-4} * \frac{0,14}{2} = 14 \cdot 10^{-6}.$$

Допустиме значення кута закручування центральної обойми траверси обертача, °:

$$[\varphi] = 0,05 * \frac{L_{O\sigma}}{2}, \quad (2.102)$$

$$[\varphi] = 0,05 * \frac{0,14}{2} = 3,5 \cdot 10^{-3}.$$

Максимальний прогин центральної обойми механізму нахилу УЗО, м:

$$\Delta = \frac{G}{48 * E * I_Y} * \left( \frac{L_{O\sigma}}{2} \right)^3 \quad (2.103)$$

$$\Delta = \frac{137,3}{48 * 2 \cdot 10^{11} * 8,6 \cdot 10^{-6}} * \left( \frac{0,14}{2} \right)^3 = 5,7 \cdot 10^{-10}.$$

$$5,7 \cdot 10^{-10} < 14 \cdot 10^{-6}.$$

Жорсткість при згинанні центральної обойми забезпечується з великим запасом.

Максимальний кут закручування центральної обойми механізму нахилу, °:

$$\varphi = \frac{180 * M_{BT}}{\pi * E_0 * I_0} * \frac{L_{Об}}{2} = \frac{90 * M_{BT} * L_{Об}}{\pi * E_0 * I_0}, \quad (2.104)$$

$$\varphi = \frac{90 * 34,4 * 0,14}{\pi * 0,8 \cdot 10^{11} * 1,1 \cdot 10^{-5}} = 1,6 \cdot 10^{-3}.$$

$$1,6 \cdot 10^{-3} < 3,5 \cdot 10^{-3}.$$

Жорсткість при крутінні центральної обойми забезпечується.

Результати перевірки представлені в табл. 2.11.

Таблиця 2.11. Силкові запаси розрахункових елементів траверси

| № з.п. | Найменування елементу | Запас міцності | Запас жорсткості |          |
|--------|-----------------------|----------------|------------------|----------|
|        |                       |                | Згинання         | Крутіння |
|        |                       | %              |                  |          |
| 1      | Цапфа                 | 96,9           | 100              | 21       |
| 2      | Вал                   | 98,1           | 88,9             | 62,2     |
| 3      | Центральна обойма     | 99,4           | 100              | 54,3     |

#### 2.4.4. Розрахунок редуктора механізму нахилу шпинделя.

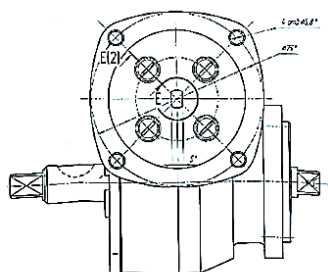


Рис. 2.25. Загальний вигляд малого одноступінчастого черв'ячного редуктора

Як було відзначено раніше, механізм нахилу шпинделя повинен забезпечити переміщення осі обертання планшайби щодо горизонту ( $\alpha = \pm 90^\circ$ ) та точну і надійну її фіксацію в заданому положенні. Швидкість нахилу необхідно плавно регулювати в діапазоні до 2 об/хв. Максимальний крутний момент складає 34,4 Н·м.

Такий режим роботи можна оптимально забезпечити за допомогою одноступінчастого черв'ячного редуктора (рис. 2.25) з ГКД в якості привода.

Одним з головних показників черв'ячної передачі є число заходів черв'яка, яке за ДСТ 2144–76 [64] необхідно вибирати з значень  $z_1 = 1, 2, 4$ . При числі заходів черв'яка  $z_1 = 1, 2$  габарити передачі виявляються дещо меншими, ніж при  $z_1 = 4$ , але одночасно з цим падає ККД. Тому такі черв'яки застосовуються зазвичай для малопотужних або зрідка працюючих передач, для яких зниження ККД не відіграє істотної ролі, а також для кінематичних передач (показчики кута повороту, ділильні пристрої, позиціонери і т. д.), в яких однозахідні черв'яки забезпечують підвищену, порівняно з багатозахідними точність установки. Однозахідні черв'яки застосовуються й у тих передачах, у яких треба забезпечити самогальмування [61...63]. Таким чином, обираємо  $z_1 = 1$ .

Передатне відношення  $u$  для однозахідних черв'яків повинно бути в діапазоні 30...80, а мінімальна кількість зубів черв'ячного колеса, що регламентується окремим рядом значень,  $z_2 = 32$ . Крім того, передатне відношення не повинно відрізнятись більш ніж на 4% від встановлених номінальних значень (в даному випадку – 31,5) [61]. Як раніше зазначалося, ГКД марки М22хххЕ-І забезпечують максимальний крутний момент 1,12 Н·м (табл. 2.1) в діапазоні прибіл. до 100 об/хв., тому приймаємо передатне відношення  $u = 32$ . Тоді мінімально потрібний крутний момент ГКД в цьому діапазоні повинен складати

$$M_{ГКД} = \frac{34,4}{32} = 1,08 \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ а кількість зубів черв'ячного колеса приймаємо } z_2 =$$

32. Слід враховувати, що при збільшені  $z_2$  зростає відстань між опорами колеса, тому для забезпечення жорсткості доводиться збільшувати діаметр або модуль черв'яка, що не бажано.

Таким чином, максимальні швидкості обертання черв'ячного редуктора складають:  $n_1^{\max} = 64 \text{ об/хв}$ ,  $n_2^{\max} = 2 \text{ об/хв}$ .

Для механізму нахилу шпинделя потрібний тихохідний редуктор, з умовами роботи характерними для редукторів з ручним приводом. Швидкість

ковзання в таких редукторах, як правило, менше 2 м/с, тому в них з метою здешевлення застосовують чавунні черв'ячні колеса та сталеві черв'яки [61].

Приймаємо передачу без зміщення, з архімедовим черв'яком, що має кут профіля в осьовому перерізі  $\alpha_{\text{ч}} = 20^\circ$  (рис. 2.26).

Для зменшення масо-габаритних показників приймаємо матеріал черв'ячного колеса СЧ20 та твердість черв'яка HRC > 45.

Значення меж контактної витривалості та витривалості згинання (МПа) зубів черв'ячного колеса, виготовлених з сірого чавуну або олов'янистої бронзи, при твердості робочих поверхонь витків черв'яка HRC > 45 [61] наведені в табл. 2.12.

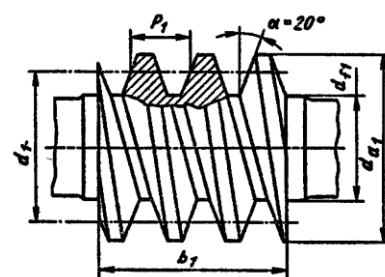


Рис. 2.26. Циліндричний архімедів черв'як

Таблиця 2.12. Механічні характеристики матеріалів для черв'ячного колеса

| Марка матеріалу | Спосіб виливки | $\sigma_B$ | $\sigma_T$ | $\sigma_{H0}$ | $\sigma_{F0}$ | $\sigma_{-1F0}$ |
|-----------------|----------------|------------|------------|---------------|---------------|-----------------|
| СЧ20            | Піщана форма   | МПа        |            |               |               |                 |
|                 |                | 206        | —          | 170           | 59            | 36              |
| БрО10Ф1         | Кокіль         | 255        | 147        | 221           | 71            | 51              |

Граничні напруження матеріалу черв'ячних коліс при пікових навантаженнях приведені в табл.2.13 [61].

Таблиця 2.13. Граничні напруження при пікових навантаженнях матеріалів черв'ячних коліс

| Матеріал           | $[\sigma_H]_{\text{гран}}$ | $[\sigma_F]_{\text{гран}}$ |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|
|                    | МПа                        |                            |
| Олов'янисті бронзи | $4 * \sigma_T$             | $0,8 * \sigma_T$           |
| Чавун              | 260...300                  | $0,6 * \sigma_B$           |

Розрахункове значення допустимих контактних напружень, МПа:

$$[\sigma_H] = \sigma_{H0} * K_{HL}, \quad (2.105)$$

де  $K_{HL} = 1,15$  – коефіцієнт довговічності для розрахунку контактних напружень (режим роботи привода близький до ручного). Тоді:

$$[\sigma_H] = 170 * 1,15 = 196.$$

Попереднє значення міжосьової відстані, мм

$$a'_w = 61 * \sqrt[3]{\frac{M_{KP}}{[\sigma_H]^2}}, \quad (2.106)$$

де  $M_{KP} = 34400$  Н·мм – крутний момент на черв'ячному колесі. Тоді:

$$a'_w = 61 * \sqrt[3]{\frac{34400}{196^2}} = 58,8.$$

Округлимо до найближчого більшого значення з першого ряду номінальних значень та приймаємо остаточне значення міжосьової відстані  $a_w = 63$  мм.

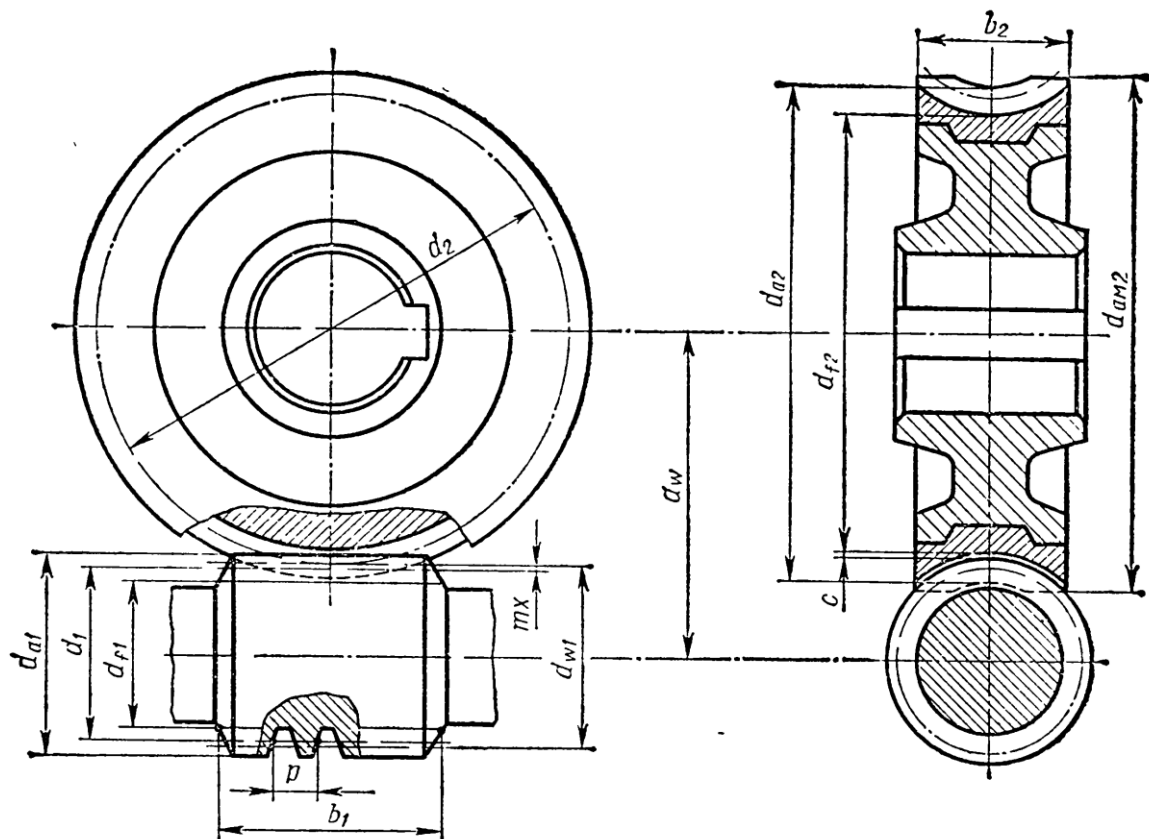


Рис. 2.27. Основні геометричні параметри черв'ячної передачі



За рекомендаціями для черв'ячних передач, виконаних без зміщення [61], приймаємо для отриманих  $u$  та  $a_w$ :

- модуль  $m = 3,15$  мм;
- коефіцієнт діаметру черв'яка  $q = 8$ .

Із збільшенням  $q$  збільшується жорсткість черв'яка, але зменшується ККД передачі. Тому доцільно притримуватись, як можна, менших  $q$ .

Виконаємо розрахунок геометричних параметрів черв'ячної передачі (рис. 2.27).

Ділильний діаметр черв'яка, мм

$$d_1 = q * m, \quad (2.107)$$

$$d_1 = 8 * 3,15 = 25,2.$$

Ділильний кут підйому черв'яка, °:

$$\gamma_q = \frac{\pi}{180} * \arctg\left(\frac{z_1}{q}\right), \quad (2.108)$$

$$\gamma_q = \frac{\pi}{180} * \arctg\left(\frac{1}{8}\right) = 7,125$$

або

$$\gamma = 7^{\circ}07'30''.$$

Діаметр вершин витків черв'яка (при коефіцієнті висоти головки 1), мм:

$$d_{a1} = d_1 + 2 * m, \quad (2.109)$$

$$d_{a1} = 25,2 + 2 * 3,15 = 31,5.$$

Діаметр впадин витків черв'яка (при коефіцієнті радіального зазору  $0,2 * m$ ), мм:

$$d_{f1} = d_1 - 2,4 * m, \quad (2.110)$$

$$d_{f1} = 25,2 - 2,4 * 3,15 = 17,64.$$

Довжина нарізаної частини однозахідного черв'яку, мм:

$$b_1 \geq (11 + 0,06 * z_2) * m, \quad (2.111)$$

$$b_1 \geq (11 + 0,06 * 32) * 3,15 = 40,7.$$

Приймаємо  $b_1 = 41$  мм.

Ділильний діаметр черв'ячного колеса, мм:

$$d_2 = z_2 * m, \quad (2.112)$$

$$d_2 = 32 * 3,15 = 100,8.$$

Діаметр вершин зубів черв'ячного колеса (при коефіцієнті висоти головки 1), мм:

$$d_{a2} = d_2 + 2 * m, \quad (2.113)$$

$$d_{a2} = 100,8 + 2 * 3,15 = 107,1.$$

Діаметр впадин зубів черв'ячного колеса (при коефіцієнті радіального зазору  $0,2 * m$ ), мм:

$$d_{f2} = d_2 - 2,4 * m, \quad (2.114)$$

$$d_{f2} = 100,8 - 2,4 * 3,15 = 93,24.$$

Найбільший діаметр черв'ячного колеса, мм:

$$d_{aM2} \leq d_{a2} + \frac{6 * m}{z_1 + 2}, \quad (2.115)$$

$$d_{aM2} \leq 85 + \frac{6 * 3,15}{1 + 2} = 91,3.$$

Приймаємо  $d_{aM2} = 91$  мм.

Ширина вінця черв'ячного колеса при однозахідному черв'яку, мм:

$$b_2 \geq 0,75 * d_{a1}, \quad (2.116)$$

$$b_2 \geq 0,75 * 31,5 = 23,63.$$

Приймаємо  $b_2 = 24$  мм.

Виконаємо розрахунок попереднього ККД черв'ячного редуктора.

Колова швидкість черв'яка, м/с:

$$v_1 = \frac{\pi * n_1^{\max} * d_1}{60}, \quad (2.117)$$

$$v_1 = \frac{\pi * 64 * 0,0252}{60} = 0,084.$$

Передача з невеликими короткочасними навантаженнями та коловою

швидкістю черв'яка менше 1,5 м/с, тому приймаємо ступінь точності передачі 9 (зниженої точності). Черв'як шліфувати не потрібно.

Колова швидкість черв'ячного колеса, м/с:

$$v_2 = \frac{\pi * n_2^{\max} * d_2}{60}, \quad (2.118)$$

$$v_2 = \frac{\pi * 2 * 0,1008}{60} = 0,011.$$

Швидкість ковзання, м/с:

$$v_s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}, \quad (2.119)$$

$$v_s = \sqrt{0,084^2 + 0,011^2} \approx 0,085.$$

Для сталюого черв'яка, який не зазнав фінішного шліфування або полірування, та чавунного черв'ячного колеса приймаємо коефіцієнт тертя  $f' = 0,1$  [31]. Тоді приведений кут тертя визначається за формулою, °:

$$\rho' = \frac{180}{\pi} * \arctg(f'), \quad (2.120)$$

$$\rho' = \frac{180}{\pi} * \arctg(0,1) = 5,71.$$

Попередній коефіцієнт корисної дії з урахуванням втрат в зачепленні та опорах (в т.ч. при змащенні):

$$\eta = 0,96 * \frac{\operatorname{tg}(\gamma_q)}{\operatorname{tg}(\gamma_q + \rho')}, \quad (2.121)$$

$$\eta = 0,96 * \frac{\operatorname{tg}(7,125)}{\operatorname{tg}(7,125 + 5,71)} = 0,96 * \frac{\operatorname{tg}(7,125)}{\operatorname{tg}(12,835)} = 0,527.$$

Таким чином, попередній ККД редуктора  $\eta \approx 53\%$ .

Розрахуємо сили, що діють на ділильних колах в черв'ячному зачепленні (рис. 2.28).

Тангенціальна сила колеса та осьова черв'яка, Н:

$$F_2 = F_{x1} = \frac{2 * M_{BT}}{d_2}, \quad (2.122)$$

$$F_2 = F_{x1} = \frac{2 * 34,4}{0,1008} = 683.$$

Радіальні сили колеса та черв'яка, Н:

$$F_{r2} = F_{r1} = F_2 * \operatorname{tg}(\alpha_q), \quad (2.123)$$

$$F_{r2} = F_{r1} = 683 * \operatorname{tg}(20^\circ) = 249.$$

Осьова сила колеса та тангенціальна черв'яка, Н:

$$F_{x2} = F_1 = \frac{2 * M_{BT}}{u * d_1}, \quad (2.124)$$

$$F_{x2} = F_1 = \frac{2 * 34,4}{32 * 0,0252} = 85,3.$$

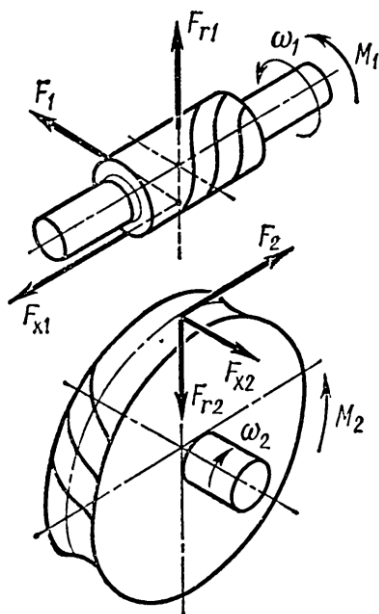


Рис. 2.28. Сили, що діють в черв'ячному зачепленні

Перевіримо зуби черв'ячного колеса на контактну витривалість та на витривалість при згинанні [61, 62].

Зуби черв'ячного колеса є розрахунковим елементом зачеплення, бо вони мають меншу поверхневу та загальну міцність, ніж витки черв'яка. Розрахунок на контактну міцність повинен забезпечити не лише відсутність вифарбовування робочих поверхонь зубів, а й відсутність заїдання, що призводить до задираків.

Розрахунок на контактну витривалість.

Коефіцієнт характеру зміни навантаження та деформації черв'яка:

$$K_\beta = 1 + \left( \frac{z_2}{\Theta} \right)^3 * (1 - X_H), \quad (2.125)$$

де  $\Theta = 72$  – коефіцієнт деформації черв'яка в залежності від  $z_1$  та  $q$ ;

$X_H = 0,6$  – коефіцієнт характеру зміни навантаження (незначні коливання). Тоді:

$$K_\beta = 1 + \left( \frac{32}{72} \right)^3 * (1 - 0,6) = 1,035.$$

Коефіцієнт динамічності навантаження в залежності від ступеня точності передачі (9) та швидкості ковзання (до 1,5 м/с):

$$K_v = 1,25.$$

Коефіцієнт навантаження для черв'ячних передач:

$$K = K_\beta * K_v, \quad (2.126)$$

$$K = 1,035 * 1,25 = 1,294.$$

Контактні напруження, МПа:

$$\sigma_H = \frac{475}{d_2} * \sqrt{\frac{M_{BT} * K}{d_1}} \leq [\sigma_H], \quad (2.127)$$

$$\sigma_H = \frac{475}{100,8} * \sqrt{\frac{34400 * 1,294}{25,2}} = 198,$$

$$198 \approx 196.$$

Розраховані контактні напруження перевищують допустимі лише на 1%. Контактна витривалість забезпечується.

В разі необхідності збільшити контактну витривалість на 23% черв'ячне колесо може бути виготовлене з вінцем з олов'янистої бронзи марки БрО10Ф1 (табл. 2.12) та встановлене в редуктор замість чавунного. В пікових режимах (табл. 2.13) допускаються контактні перевантаження редуктора: для чавуну – в 1,5 рази; для олов'янистої бронзи – 2,3 рази.

ГКД марки T22xxLC дозволяє забезпечити крутний момент, що переважає розрахунковий на 39%.

Розрахунок на витривалість за напруженнями згинання.

Приведене число зубів:

$$z_v = \frac{z_2}{\cos^3(\gamma_q)}, \quad (2.128)$$

$$z_v = \frac{32}{\cos^3(7,125)} = 32,75.$$

Коефіцієнт форми зуба, що вибирається за  $z_v$ :

$$Y_F = 1,69.$$

Допустиме напруження згинання при роботі зубів обома сторонами (реверсивна передача), МПа:

$$[\sigma_{-1F}] = \sigma_{-1F0} * K_{FL}, \quad (2.129)$$

де  $\sigma_{-1F0} = 51$  МПа – межа витривалості згинання (табл. 2.12),

$K_{FL} = 1,5$  – коефіцієнт довговічності для розрахунку напружень згинання (режим роботи привода близький до ручного). Тоді:

$$[\sigma_{-1F}] = 51 * 1,5 = 76,5.$$

Розрахункове напруження згинання зубів черв'ячного колеса, МПа

$$\sigma_F = \frac{Y_F * F_2 * K}{1,3 * m^2 * q} \leq [\sigma_{-1F}], \quad (2.130)$$

$$\sigma_F = \frac{1,69 * 683 * 1,294}{1,3 * 3,15^2 * 8} = 14,5.$$

$$14,5 < 76,5$$

Витривалість за напруженнями згинання забезпечується.

Результати перевірки представлені в табл. 2.14.

Таблиця 2.14. Силові запаси черв'ячного редуктора

| № з.п. | Найменування елемента    | Запас за напруженнями зубів |          |
|--------|--------------------------|-----------------------------|----------|
|        |                          | контактними                 | згинання |
|        |                          | %                           |          |
| 1      | Черв'ячне колесо (чавун) | -1                          | 81       |

В пікових режимах (табл. 2.13) допускаються перевантаження редуктора за напруженнями згинання зубу: для чавуну – в 1,6 рази; для олов'янистої бронзи – 2,2 рази.

Виконаний силовий розрахунок та перевірка на міцність та жорсткість ключових вузлів УЗО при навантаженні 14 кг показали, що слабке місце конструкції – цапфа валу траверси (мін. запас –21 %) та черв'ячне колесо редуктора (чавун – запас -1%, бронза – запас +23%). Рішення проблеми – застосування

мотор-редукторів з обох боків траверси. Навантаження можна збільшити багаторазово.

#### 2.4.5. Силовий розрахунок ножичного підйомника та вибір привода.

Ножичний підйомник (підйомний стіл) – це вантажопідйомний пристрій циклічної дії для вертикального переміщення на платформі. Підйом платформи здійснюється важільним механізмом ножичного типу. Для підйому на невелику висоту використовується одна пара ножиць.

Ножичний підйомник складається з парних дволанкових вузлів, що об'єднані в секцію для забезпечення стійкості. Кожен дволанковий вузол має центральний шарнір, що дозволяє ланкам повертатися в площині. З одного боку всі ланки закріплені на нерухомих шарнірах з другого – на рухомих. Нижні шарніри з'єднані з опорною плитою, а верхні – з вантажною платформою. В якості привода використовується лінійний механізм, який в залежності від його розміщення (на опорі або на платформі) зв'язаний з однією з осей рухомих шарнірів. Принципова схема секції ножичного підйомника наведена на рис. 2.29, а; розрахункова схема – на рис. 2.29, б.

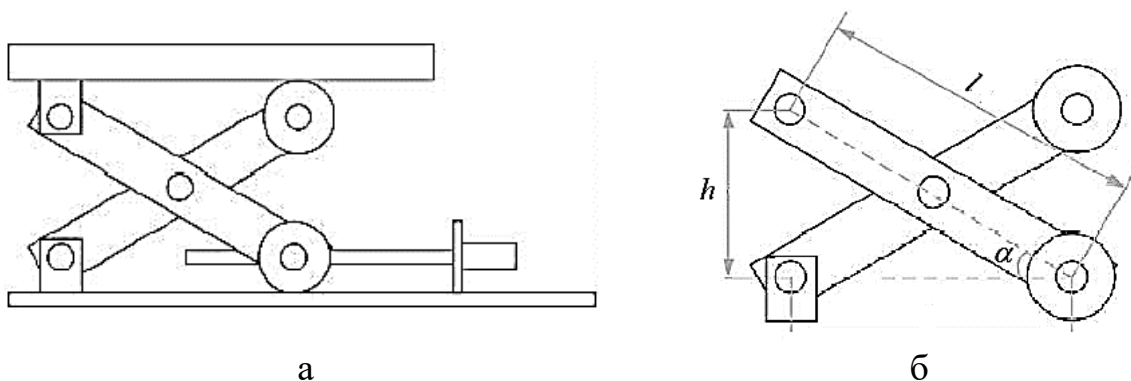


Рис. 2.29. Схема ножичного підйомника:

а – принципова; б – розрахункова

Залежність вантажопідйомності від сили лінійного механізму виведена в роботі [71]:

$$G_{HM} = F_a * \frac{h * \sqrt{l^2 - h^2}}{l^2}, \quad (2.131)$$

Зв'язок переміщення вантажної платформи від руху лінійного механізму носить нелінійний характер, що приводить к різким прискоренням та гальмуванням, а також до низької точності позиціонування вантажу по висоті. Уникнути цих недоліків можна за рахунок керованого переміщення привода [71, 72].

Для цієї задачі оптимально підходить ГKD. В якості приводного лінійного механізму приймаємо пару гвинт-ходова гайка. Матеріал гайки – антифрикційний чавун, гвинта – сталь 45. Довжина ланки –  $l = 0,4$  м. Розрахункове навантаження ножичного підйомника приймаємо  $G_{HM} = 2$  кН.

Для пари гвинт-гайка визначено: різьблення  $Tr20 \times 4$ , радіальна сила (вага ходової гайки)  $F_r \approx 1,3$  Н, коефіцієнт тертя в парі гвинт-ходова гайка  $f = 0,13$ .

Кут підйому різьблення, град:

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{P}{\pi * d_2} \right), \quad (2.132)$$

де  $P = 4$  мм – крок різьблення,

$d_2 = 18$  мм – середній діаметр різьблення. Тоді

$$\psi = \frac{180}{\pi} \arctg \left( \frac{4}{\pi * 18} \right) = 4,05.$$

Кут тертя в різьбленні, град:

$$\rho = \frac{180}{\pi} * \arctg(f), \quad (2.133)$$

$$\rho = \frac{180}{\pi} \arctg(0,13) = 7,41.$$

В зв'язку з вертикальним рухом вантажу необхідно забезпечити самогальмування передачі, щоб уникнути самовільний рух привода після вимкнення живлення ГKD.

Перетворення поступального руху в обертальний можливо за наступної умови:

$$\psi \geq 2 * \rho, \quad (2.134)$$

$$4,05 < 2 * 7,41 = 14,82.$$



Умова не виконується, передача самогальмуюча.

Виразим осьову силу гвинта з формули 2.129:

$$F_a = \frac{G_{HM} * l^2}{h * \sqrt{l^2 - h^2}}. \quad (2.135)$$

З формули 2.135 випливає, що при  $h = 0$  та  $h = l$  осьова сила  $F_a \rightarrow \infty$ .

Отже залежність  $F_a(h)$  носить параболічний характер (рис. 2.30) та має в діапазоні  $h = [0 \dots l]$  мінімум осьової сили, а також для будь-якого  $\Delta h = (h_2 - h_1) < l$  можна знайти такі  $h_1$  та  $h_2$ , щоб виконувалась рівність  $F_a(h_1) = F_a(h_2)$ . Таким чином, осьова сила на гвинті в вихідному та кінцевому положеннях буде максимальна та однакова. Саме цю силу і потрібно обирати в якості розрахункової. Приймаючи до уваги громіздкість аналітичного рішення, знайдемо розрахункову силу та відповідні значення вихідної та кінцевої висоти графічним способом.

Графічна залежність  $F_a(h)$

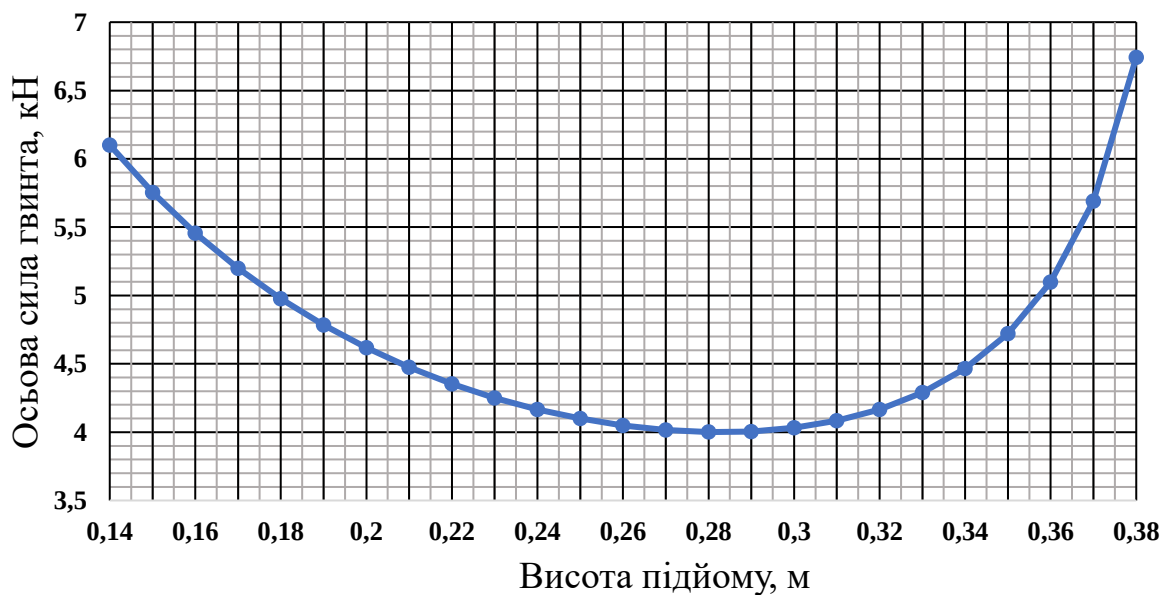


Рис. 2.30. Залежність осьової сили гвинта від висоти ножичного підйомника

За результатами приймаємо наступні розрахункові параметри:

$h_1 = 0,165$  м,  $h_2 = 0,365$  м,  $F_a = 5,3$  кН.

Умова забезпечення зносостійкості різьблення:

$$p_{Tr} = \frac{F_a}{\pi * d_2 * h_r * z_r} \leq [p], \quad (2.136)$$

де  $h_r = 0,5 * P = 0,5 * 4 = 2$  мм – робоча висота витку;

$$z_r = \frac{2 * d_2}{P} = \frac{2 * 18}{4} = 9 - \text{кількість витків в різьбленні гайки};$$

$[p] = 6$  МПа – допустимий тиск в парі незагартована сталь-чавун. Тоді:

$$p_{Tr} = \frac{5300}{\pi * 18 \cdot 10^{-3} * 2 \cdot 10^{-3} * 9} = 5,21 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$5,21 \text{ МПа} < 6 \text{ МПа}.$$

Умова забезпечення зносостійкості різьблення виконується.

Крутний момент гвинта визначається за формулою, Н·м:

$$T = \frac{d_2}{2} * [F_a * \operatorname{tg}(\psi + \rho) + f * F_r], \quad (2.137)$$

$$T = \frac{0,018}{2} * [5300 * \operatorname{tg}(4,05 + 7,41) + 0,13 * 1,3] = 9,67.$$

Момент інерції гвинта визначається за формулою, кг·м<sup>2</sup>:

$$I_{xг} = \frac{1}{2} * m_{xг} * \left(\frac{d_2}{2}\right)^2, \quad (2.138)$$

де  $m_{xг} = 0,6$  кг – маса гвинта. Тоді

$$I_{xг} = \frac{1}{2} * 0,6 * \left(\frac{0,018}{2}\right)^2 = 2,43 \cdot 10^{-5}.$$

Момент інерції ротору ГКД повинен бути більшим за інерцію гвинта, як мінімум, на порядок.

Характеристики ГКД, вибраного для механізму переміщення ПЕ вздовж осі Y, наведені в табл. 2.15.

Таблиця 2.15. Характеристики ГKD приводу ножичного підйомника

| Модель*                              | Момент утримання<br>±10% | Крутний момент в<br>діапазоні до 100 об/с | Маса             | Момент інерції<br>ротора | Розміри                  |                     | Допустиме на-<br>вантаження на<br>вал** |        |
|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------------------|--------|
|                                      |                          |                                           |                  |                          | Статор                   | Хвостовик<br>ротору |                                         |        |
|                                      |                          |                                           |                  |                          | <i>B-H</i><br>x <i>L</i> | <i>D</i> x <i>l</i> | радіа-<br>льне                          | осьове |
|                                      | Н·м                      | кг                                        | Г·м <sup>2</sup> | мм                       | Н                        |                     |                                         |        |
| Механізм переміщення ПЕ вздовж осі X |                          |                                           |                  |                          |                          |                     |                                         |        |
| N42xxLF-L                            | 20,6                     | 14,5                                      | 8,34             | 1,09                     | 110<br>x<br>183          | 21<br>x<br>55       | 489                                     | 1800   |

\* Моделі обирались з ряду за мінімальним фазним струмом.

\*\* Максимальне навантаження валу базується на 20 тис. год. роботи при 1500 об/хв.

### Висновки.

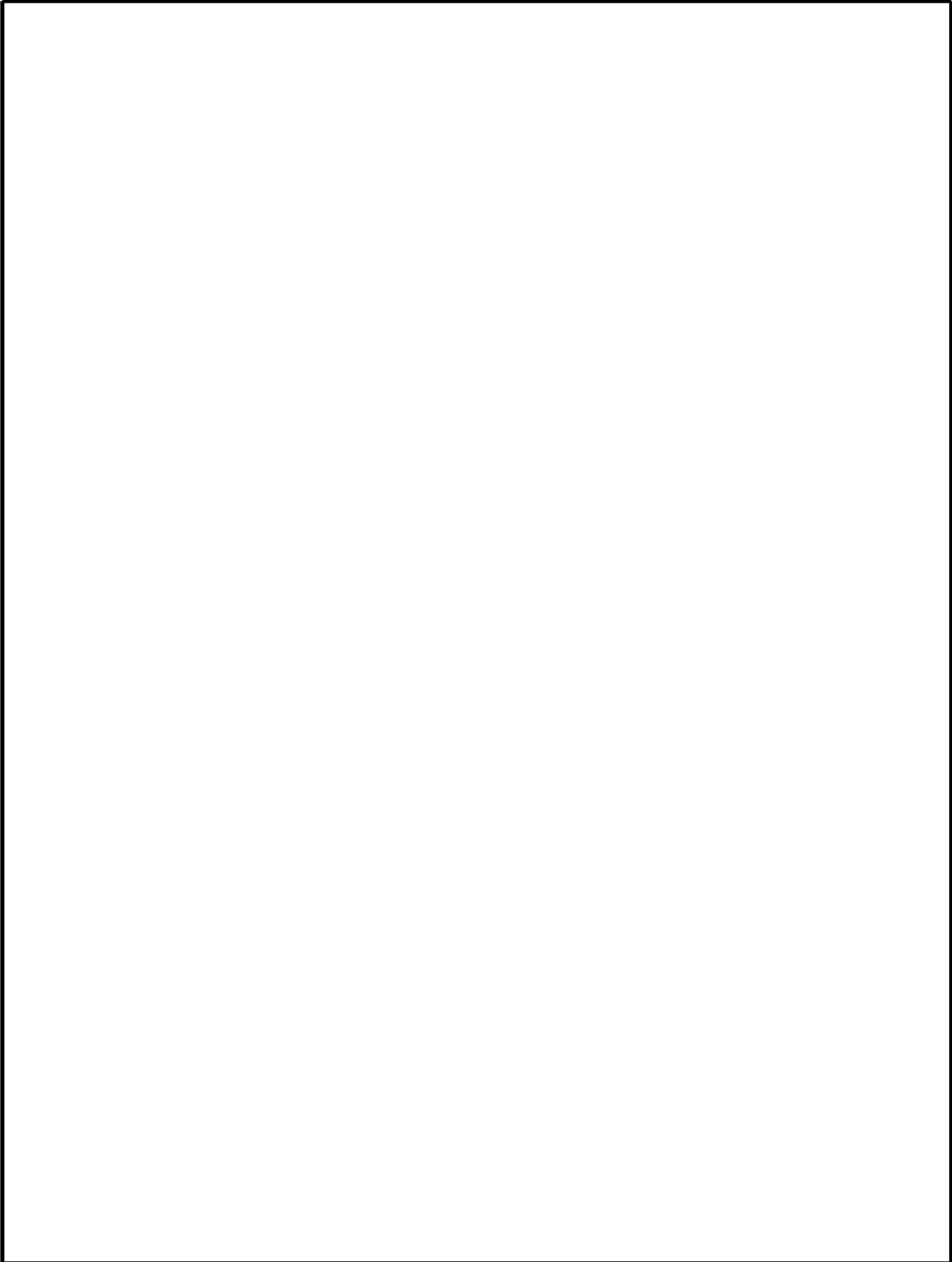
1. Сформульовані вимоги до маніпуляторів ПЕ та деталі, отримані вихідні дані для розрахунків. Визначено, що маніпулятор ПЕ – глугольного типу, 3-координатний з максимальними ходами 400 мм. Маніпулятор деталі – універсальний зварювальний обертач 2-координатний, встановлений на ножичному підйомнику з ходом 200 мм для корекції висоти робочого столу. Для переміщення затискних пристроїв вантажопідйомність маніпулятора деталі в розрахунковому діапазоні складає 14 кг.

2. Намічені заходи з додаткового оснащення установки з метою розширення номенклатури деталей . Вибраний пересувний горизонтальний обертач з задньою бабкою та роликові опори з регулюванням по висоті і ширині.

3. Виконана конструктивна проробка маніпуляторів, виготовлені ескізи механічної частини устаткування. Конструкція зварного типу з вуглецевої сталі, в якості антифрикційного матеріалу застосований чавун. Привод лінійних переміщень – гвинтова пара.

4. Складені розрахункові схеми, виконана перевірка на міцність та жорсткість: встановлені силові запаси розрахункових елементів конструкції. Проаналізована динаміка ножичного механізму. Графічним методом визначені граничні висоти діапазону найменших осьових сил. В якості електроприводу механізмів вибрані крокові двигуни за головними критеріями: високим моментом інерції ротора та низьким фазним струмом.

5. Пророблена можливість подальшого розвитку конструкції маніпулятора деталі з метою збільшення вантажу. Визначені нескладні заходи, які дозволяють при необхідності розширити «вузькі місця».



|          |             |          |          |      |                                                                                                                                          |  |  |  |                              |      |         |    |
|----------|-------------|----------|----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|------------------------------|------|---------|----|
|          |             |          |          |      | КР131.6121м.06.04.03.ПЗ                                                                                                                  |  |  |  |                              |      |         |    |
| Зм..     | Арк.        | № докум. | № Докум. | Дата |                                                                                                                                          |  |  |  |                              |      |         |    |
| Студент  | Зверев А.В. |          |          |      | Дослідження технології наплав-<br>лення конструкційних сталей пуч-<br>ком електродів з використанням<br>макету автоматизованої установки |  |  |  | Літ.                         | Арк. | Аркушів |    |
|          |             |          |          |      |                                                                                                                                          |  |  |  |                              |      | 90      | 22 |
| Викладач | Драган С.В. |          |          |      |                                                                                                                                          |  |  |  | НУК<br>ім. адмірала Макарова |      |         |    |

### 3.1. Аналіз залежності струму наплавлення від складу пучка електродів.

Силу струму при зварюванні нижньому положенні, як правило, визначають за емпіричною залежністю, А:

$$I_{нп} = K_d * d_{ел}, \quad (3.1)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт струму, що залежить від діаметру електроду, А/мм.

Значення коефіцієнту струму наведені в табл. 3.1 [18, 69].

Таблиця 3.1. Залежність коефіцієнта струму від діаметра електроду

| Параметр | Од. вим | Значення |         |         |         |         |         |
|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $d_{ел}$ | мм      | 1        | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| $K_d$    | А/мм    | 20...25  | 25...30 | 30...45 | 35...50 | 40...55 | 45...60 |

Результати досліджень Володіна В. С., показали, що зварювальний струм при плавленні пучка однорідних електродів значно перевищує струм, який досягається при веденні процесу одним електродом (табл. 3.2), за рахунок цього зростає продуктивність наплавлення [20, 21, 52].

Таким чином, неможливо користуватися даним табл. 3.1 для розрахунку режимів НПЕ при розробці технологічних процесів та проведенні дослідницьких робіт. Необхідно отримати загальну формулу для попереднього розрахунку струму при НПЕ в залежності від діаметру та кількості електродів. Впливом відмінності електричного опору стрижнів різних марок і сортamentів електродів та конфігурацій пучків можна в першому наближенні знехтувати.

Після 50-их років минулого століття в літературі відсутні данні про дослідження в даному напрямку. Приймаючи до уваги витратність таких досліджень, для оціночних розрахунків можна скористуватись даними, наведеними в роботах [20, 21, 52].

Узагальнені середні значення зварювального струму для пучків різного складу та конфігурації за даними Володіна В. С. наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Зварювальний струм для ПЕ різного складу та конфігурації

|                             | $n_{ел},$ | Кількість електродів в пучка, шт. |        |        |        |   |     |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------|--------|--------|---|-----|
|                             |           | 1                                 | 2      | 3      | 4      | 5 | 6   |
| $d_{ел}$                    |           | Зварювальний струм, А             |        |        |        |   |     |
| Діаметр<br>електроду,<br>мм | 3         | -                                 | -      | 275±25 | 285±35 | - | -   |
|                             | 4         | 130±10                            | 220±30 | 300±50 | -      | - | 500 |
|                             | 5         | 170±10                            | 300±50 | 400±50 | -      | - | 700 |
|                             | 6         | 300                               | 350±50 | 460±30 | 600    | - | -   |

За даними табл. 3.1 та 3.2 була отримана апроксимаційна формула для струму НПЕ в залежності від діаметру та кількості електродів, яка з задовільною точністю дозволяє попередньо виконати оцінку його рівня.

Струм наплавлення пучком електродів, А:

$$I_H = 21 * d_{ел} * n_{ел}^{0,45} * e^{0,174 * d_{ел}}. \quad (3.2)$$

За формулою 3.2 розрахована та побудована графічна залежність  $I_H = f(d_{ел}, n_{ел})$ , представлена на рис. 3.1, яка може бути рекомендована для використання при складанні технологічних процесів НПЕ.

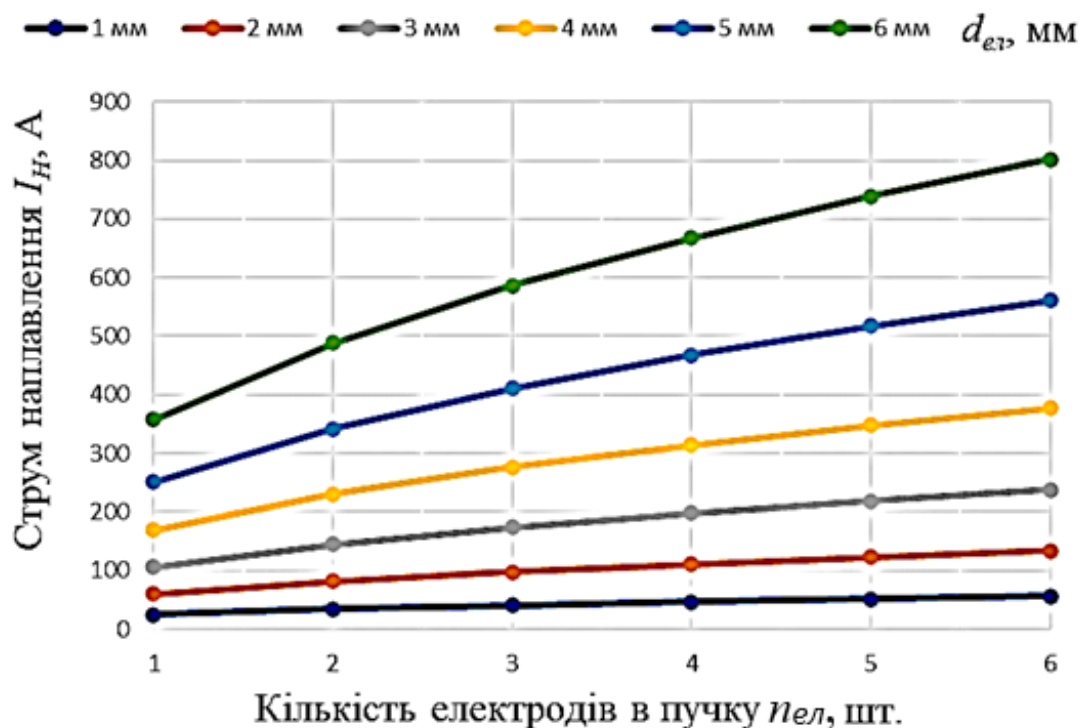


Рис. 3.1. Струму НПЕ в залежності від діаметру та кількості електродів.

### 3.2. Принциповий технологічний процес наплавлення деталей різної форми.

#### I. Загальні вимоги.

1. Даний типовий технологічний процес поширюється на відновлення методом дугового наплавлення пучком електродів (далі – НПЕ) зношених деталей з низьковуглецевих або низьколегованих конструкційних сталей.

2. Роботи виконувати на автоматизованому верстаті НПЕ, який пройшов перевірку на технологічну точність згідно з діючими стандартами.

3. До НПЕ допускається зварювальник, який атестований відповідно до діючої нормативної документації та який має в посвідченні допуск на роботу на верстаті НПЕ.

4. При виконанні робіт з НПЕ дотримуватись вимог охорони праці згідно з діючою інструкцією.

5. Відновлення деталі виконується НПЕ за рішенням технічної наради з відміткою в обліковому журналі.

6. Перевірити підготовлення деталей під НПЕ відповідно до вимог стандарту підприємства на відсутність масел, емульсій, окалини та ін. забруднень.

7. Заокруглити гострі краї на поверхнях, що підлягають НПЕ.

8. Поверхні, що підлягають НПЕ та прилеглі поверхні на ширину  $10^{+5}$  мм повинні бути зачищені до металевого блиску.

9. Безпосередньо перед НПЕ знежирити зачищені поверхні за допомогою чистого ганчір'я, що змочена в рафінаці бензольного риформінгу ТУ 38.5901471.

10. Перед НПЕ наявні на відновлюваній поверхні деталі отвори, пази і канавки, які потрібно зберегти, закласти мідними, графітовими або вугільними вставками. Поверхні деталі, які необхідно захистити від бризок розплавленого металу, закрити сухим або мокрим азбестом.

11. На верстаті НПЕ виконується відновлення зношених поверхонь невеликих деталей, тому рекомендовано –  $d_{el} = 3 \dots 5$  мм.

12. Зварювальне устаткування – випрямляч зварювальний ВД-506Т чи інший, аналогічний.



## II. Вимоги до зварювальних матеріалів.

1. Для НПЕ використовувати електроди марки УОНІ-13/45 або УОНІ-13/55 ГОСТ 9466-75.

2. Хімічний склад наплавленого металу повинен відповідати вимогам табл. 3.3

Таблиця 3.3. Хімічний склад наплавленого металу

| Марка<br>електроду | Хімічний елемент мас.% |             |             |         |         |
|--------------------|------------------------|-------------|-------------|---------|---------|
|                    | C                      | Si          | Mn          | S       | P       |
| УОНІ-13/45         | ≤ 0,11                 | 0,20...0,30 | 0,45...0,80 | ≤ 0,030 | ≤ 0,035 |
| УОНІ-13/55         |                        | 0,18...0,50 | 0,65...1,20 |         |         |

3. Механічні властивості наплавленого металу повинні відповідати вимогам табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Механічні властивості наплавленого металу (не гірше)

| Марка<br>електроду | Хімічний елемент мас.%     |                                 |                             |                     |                                           |
|--------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
|                    | Т-ра ви-<br>пробу-<br>вань | Тимчасо-<br>вий опір<br>розриву | Відносне<br>подов-<br>ження | Ударна<br>в'язкість | KCV>34<br>Дж/см <sup>2</sup><br>при т-рі. |
|                    | °C                         | Н/мм <sup>2</sup>               | %                           | Дж/см <sup>2</sup>  | °C                                        |
| УОНІ-13/45         | +20                        | 410                             | 22                          | 147                 | -30                                       |
| УОНІ-13/55         |                            | 490                             | 20                          | 127                 |                                           |

4. Перед початком роботи електроди, незалежно від терміну їх виготовлення, прожарити в печі при температурі 300...350 °C на протязі 2...2,5 годин.

## III. Поверхні, для яких допускається відновлення методом НПЕ.

1. Відновлення НПЕ допустимо на всіх поверхнях, крім робочих поверхонь з особливими властивостями, що не можна забезпечити електродами, які передбачені даним техпроцесом.

2. Також не підлягають НПЕ поверхні, що прилягають до поверхонь з особливими властивостями на відстань ближче 20 мм.

#### IV. Товщина наплавленого шару.

Товщина наплавленого шару, мм:

$$\delta_H = \delta_{zn} + \delta_0, \quad (3.3)$$

де  $\delta_{zn}$  – знос, мм;

$\delta_0$  – припуск на наступну механічну обробку, мм.

Співвідношення між товщиною наплавленого шару, рекомендованим діаметром електроду та кількістю шарів наплавлення наведені в табл. 3.5 [68].

Таблиця 3.5. Вибір електроду від товщини та кількості шарів

| Параметр наплавлення        | Од. вим. | Значення параметру |       |       |
|-----------------------------|----------|--------------------|-------|-------|
| Товщина наплавленого шару   | мм       | < 1,5              | < 5   | > 5   |
| Діаметр електроду           |          | 3                  | 4 – 5 | 5 – 6 |
| Кількість шарів наплавлення | шт.      | 1                  | 1 – 2 | > 2   |

При відновленні плоских та порожніх деталей необхідно враховувати товщину стінки деталі (табл. 3.6) [68].

Таблиця 3.6. Співвідношення між товщиною стінки деталі та діаметром електроду

| Параметр наплавлення | Од. вим. | Значення параметру |        |         |       |
|----------------------|----------|--------------------|--------|---------|-------|
| Товщина деталі       | мм       | 1...3              | 4...10 | 12...24 | > 30  |
| Діаметр електроду    |          | 2...3              | 3...5  | 5...6   | 6...7 |

#### IV. Техніка НПЕ.

1. Встановити підготовлену деталь на робочій стіл верстату НПЕ або в спеціальне додаткове оснащення.

2. Виконати НПЕ згідно з індивідуальним технологічним режимом:

- струм постійний;
- полярність зворотна;
- діаметр та кількість електродів в гребінці визначаються, виходячи з

технічних умов на конкретну деталь;

- струм НПЕ попередньо визначити за графічною залежністю (рис. 3.1) та при необхідності уточнити на спеціальних зразках.

3. НПЕ виконується поздовжньою або поперечною гребінкою кутом назад.

При поздовжній гребінці кут нахилу від вертикалі складає  $20...30^\circ$ , валик широкий з амплітудою поперечного переміщення  $b = (2...4) * d_{ел.}$

Такий прийом збільшує ширину валика, сприяє уповільненню охолодження зварювальної ванни, що зменшує можливість появи непроварів, шлакових включень і пір. Валики накладаються після видалення шлаку так, щоб кожен наступний перекривав попередній на  $1/2...1/3$  його ширини (рис. 3.2). Поверхня наплавлення виходить рівною, припуск на механічну обробку становить  $2...3$  мм. При значному зносі деталі наплавлення виробляється кілька шарів.

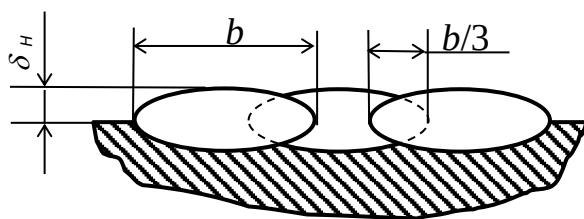


Рис. 3.2. Схема накладення валиків

кових включень і пір. Валики накладаються після видалення шлаку так, щоб кожен наступний перекривав попередній на  $1/2...1/3$  його ширини (рис. 3.2). Поверхня наплавлення виходить рівною, припуск на механічну обробку становить  $2...3$  мм. При значному зносі деталі наплавлення виробляється кілька шарів.

При поперечній гребінці кут нахилу від вертикалі складає  $10...20^\circ$ , коливання не виконуються.

4. НПЕ виконувати короткою дугою:

$$l_d = (0,5...1,1) * d_{ел.} \quad (3.4)$$

При підвищеному шлакоутворенні можна рекомендувати:

$$l_d = (0,8...1,1) * d_{ел.} \quad (3.5)$$

5. Швидкість подавання ПЕ повинна бути рівномірною та підбирається на спеціальних зразках з метою забезпечення стійкого горіння дуги.

6. Не допускати різкого відриву електроду по закінченню наплавлення.

7. Мати в розпорядженні, як мінімум дві насадки під потрібний діаметр електроду: одна – в роботі, друга – в спорядженому стані для швидкої заміни.

8. Процес НПЕ вести по можливості безперервно. При зміні насадки новий ПЕ підпалювати швидко, не втрачаючи тепла, отриманого від згорання попереднього.

9 . Шлак та бризки, що утворюються при НПЕ необхідно видаляти за допомогою зубила, молотку та металічної щітки.

## **V. Термообробка.**

1. Діапазон температур нагріву при відпалі для зняття напруги такий самий, як і при високотемпературній відпустці. Після завершення НПЕ весь наплавлений валик або його частина нагрівається до 550~650°C, потім достатня витримка та повільне охолодження до температури не вище 100°C. Час витримки сталі загального призначення розраховується як 2,5 хв на 1 мм товщини, але не менше 15 хв. При товщині понад 50 мм необхідно додати 15 хвилин на кожні додаткові 25 мм.

2. Твердість наплавленого металу забезпечується технологічно. Значення твердості шару HB/HRC повинно бути в діапазоні 140...210 [68].

## **VI. Контрольна.**

1. Визначення якості наплавлення здійснювати зовнішнім оглядом за допомогою лупи 4...7 кратного збільшення. Наявність тріщин, пір і шлакових включень не допускається.

2. Контроль проводиться двічі – до та після термічної обробки.

3. Дефекти, виявлені в наплавленні, дозволяється обробляти і знову заварювати, виконуючи всі вимоги щодо підготовки, наплавлення та контролю цього техпроцесу.

### **3.3. Контроль якості наплавлення, виправлення дефектів.**

Всі наплавлені деталі незалежно від інших методів контролю піддають зовнішньому огляду, який слід проводити при хорошому освітленні. Зовнішнім оглядом можна виявити підрізи, напливи, нерівномірності формування та геометричних розмірів наплавленого шару, а також тріщини та пори, які виходять на поверхню наплавленого металу. Тріщини та пори, що виходять на поверхню, визначають також капілярними (кольоровим, люмінесцентним) та магнітним методами. Для виявлення внутрішніх дефектів використовують

ультразвукові та радіаційні методи контролю.

Для виявлення тріщин і пір, що виходять на поверхню наплавленого металу, застосовують метод капілярної дефектоскопії з використанням рідин, що проникають, або магнітний метод. При використанні методу капілярної дефектоскопії наплавлену поверхню покривають спеціальною рідиною (пенетрантом), проникнення якої у тріщини, що виходять на поверхню, і раковини дозволяє виявити ці дефекти. В даний час багато підприємств освоїли випуск комплектів матеріалів для такої дефектоскопії в аерозольній упаковці. Комплект, як правило, складається з трьох компонентів (змивки, пенетранта та проявника) і для користування ним немає необхідності у спеціальному навчанні. Контрольовану поверхню попередньо очищають змивкою від різноманітних забруднень. Потім на очищену поверхню наносять пенетрант, який проникає у дефекти, що виходять на поверхню. Після деякої витримки пенетрант видаляють із контрольованої поверхні та на неї наносять проявник. У місцях виходу дефектів на поверхню проявник забарвлюється, що дає можливість виявити та класифікувати дефекти.

Магнітний метод контролю менш універсальний та зручний, тому що його можна застосовувати тільки для магнітних матеріалів і для нього необхідний залізний порошок.

При виявленні внутрішніх дефектів позитивні результати дає ультразвукова дефектоскопія. Для неї застосовують поперечні (коливання частинок середовища відбуваються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі) і поздовжні (коливання частинок середовища відбуваються вздовж напрямку поширення хвилі) ультразвукові хвилі. Введення ультразвукових коливань у виріб здійснюється прямими та похилими шукачами. Введені у виріб у вигляді зондувального імпульсу ультразвукові коливання, зустрівшись з несучільністю (дефектом), відбиваються від неї під кутом, рівним куту падіння. Частина ультразвукової енергії після відображення повертається до шукача та фіксується дефектоскопом. Відбита енергія за інших рівних умов буде залежати від

розміру, орієнтації, форми та характеру дефекту.

Чутливість сучасних ультразвукових дефектоскопів дозволяє виявляти в сталі дефекти з еквівалентною площею 2...3 мм<sup>2</sup> на глибині до 100 мм.

Для радіаційних методів контролю використовують рентгенівські та гамма-промені. У процесі контролю пучок рентгенівських або гамма-променів спрямовується на контрольовану поверхню наплавленої деталі. Проходячи через наплавлений шар, промені частково поглинаються і діють на фотоплівку або люмінесцентний екран. Дефекти наплавленого металу внаслідок їх меншої поглинаючої здатності пропускають більше променів, ніж бездефектні ділянки. Відмінність інтенсивності променів фіксує відповідний індикатор. На фотоплівці та екрані дефекти відображаються у вигляді смуг та плям, що дозволяє визначити їх характер та місцезнаходження. Рентгенівські та гамма-промені надають шкідливий вплив на людський організм, тому при радіаційній дефектоскопії необхідно суворо дотримуватися правил техніки безпеки.

Досить часто якість наплавленого металу, його властивості характеризується твердістю. Твердість наплавлених деталей контролюють самих деталей чи зразках-свідках. Твердість вимірюють за Роквеллом (HRC, HRB), Віккерс (HV), Брінеллю (HB) і Шору (HS, HD). Всі способи вимірювання твердості, за винятком способу по Шору, полягають у статичному вдавлюванні в наплавлений шар алмазної пірамідки, конуса або сталеві кульки. Розмір відбитка, що залишається, характеризує твердість наплавленого металу. Існують стаціонарні та переносні прилади для вимірювання твердості.

Вимірювання твердості по Шору полягає у скиданні з певної висоти на виріб стрижня з алмазним наконечником або сталеві кульки та вимірювання висоти відскоку.

Дефекти у вигляді пір, тріщин та шлакових включень, якщо вони неприпустимі, попередньо необхідно повністю видалити та провести повторне наплавлення. Для ремонтного наплавлення застосовують наплавні матеріали того самого типу, що і для основного процесу. Технологія наплавлення,

режими попереднього підігріву та подальшої термообробки повинні бути такими ж, як і під час виконання основного процесу наплавлення [6, 70].

### 3.4. Розрахунок дослідного режиму НПЕ.

Для натурного моделювання процесу автоматизованого НПЕ потрібно виконати експериментальне механізоване наплавлення на макетній установці, створеній на основі трикоординатного маніпулятора верстату електроімпульсного копіювально-прошивального моделі 4Б723М (рис. 3.3).

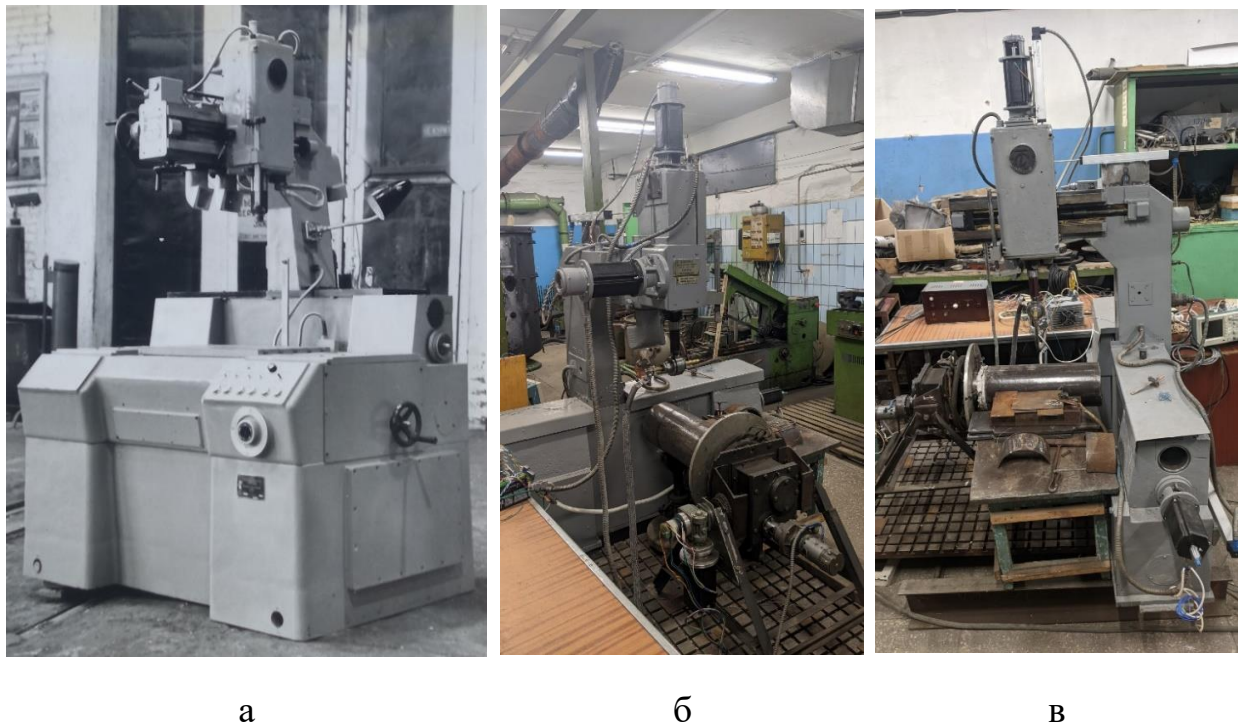


Рис. 3.3. Експериментальна макет для механізованого наплавлення ПЕ:

а – верстат-прототип 4Б723М;

б та в – діючий макет НПЕ відповідно види спереду та збоку

В процесі експерименту планується здійснити наплавлення плоского зразку з конструкційної якісної сталі 20 для наступного виконання металографічних досліджень.

Вихідні дані для експерименту:

1. Розміри зразку: 100x150x10 мм.

2. Склад гребінки: три електроди УОНІ–13/45 з розмірами  $\varnothing 3 \times 300$  мм.
  3. Подавання та робоче переміщення ПЕ – за допомогою крокових двигунів, які будуть керуватись від генераторів імпульсів.
  4. Робоче переміщення ПЕ – з постійною швидкістю, для чого на генераторі відповідного ГКД встановлюється необхідна стала частота.
  5. Подавання ПЕ – з змінною швидкістю за допомогою ручного коригування частоти генератора відповідного ГКД. Струм наплавлення контролюється візуально за амперметром та згідно з необхідним значенням наплавник змінює частоту генератора.
  6. Джерело живлення дуги – зварювальний випрямляч ВД-306 з діапазоном регулювання струму  $30 \dots 315$  А та номінальною робочою напругою  $\geq 32$  В.
- Мета даного розрахунку – отримати необхідні для проведення експерименту величини струму наплавлення та швидкості переміщення ПЕ.



а



б

Рис. 3.4 Дослідний зразок з конструкційної сталі:

а – до експерименту; б – після НПЕ з видаленням шлаком

При дуговому напавленні покритими електродоми до параметрів режиму відносяться діаметр електроду, сила струму, напруга дуги, швидкість переміщення електроду вздовж валика (швидкість напавлення), рід струму, полярність та ін. З перерахованих параметрів в операційних і технологічних картах вказуються тільки діаметр електроду і сила струму.



Характер робіт з наплавлення обумовлює необхідність отримання шару за рахунок можливо більшої кількості електродного металу при мінімальній глибині проплавлення основи, тому для таких робіт слід віддати перевагу постійному струму і вести технологічний процес на зворотній полярності, що забезпечує більш високу продуктивність і меншу глибину проплавлення поверхні деталі.

Діаметр електрода, мм, вибирають в залежності від товщини металу, що наплавляється, форми поверхні, що наплавляється, і положення валика в просторі. При виборі діаметра електрода можна використовувати орієнтовні дані, представлені в табл. 3.5.

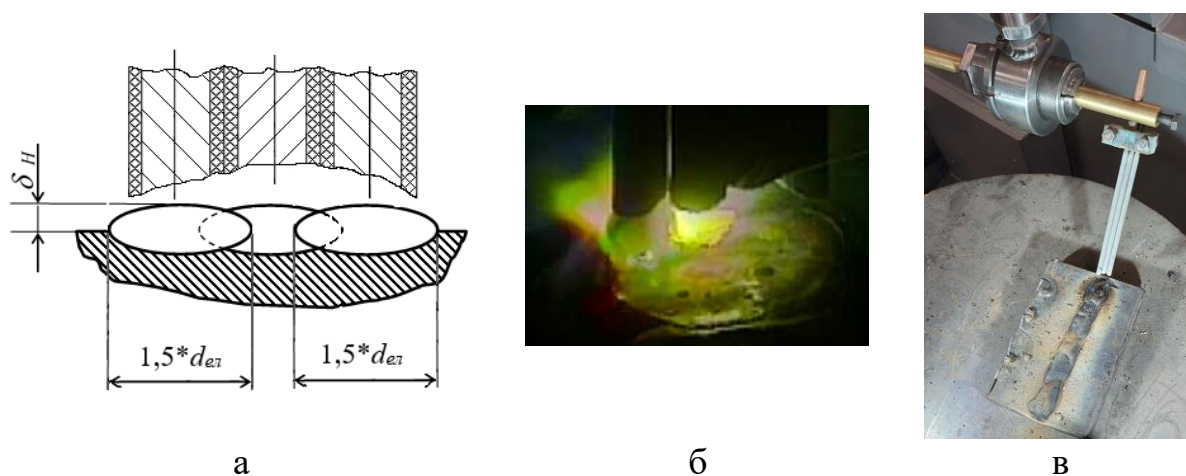


Рис. 3.5. Ширина валика при наплавленні гребінкою:

а – теоретична схема формування валика; б – експериментальна перевірка ширини зварювальної ванни; в – валик покритий шлаком після НПЕ

НПЕ виконується, як правило, тільки в нижньому положенні без коливальних рухів гребінки. Як згадувалося раніше, для одиничного електрода ширина валика в таких умовах становить 1,5 стрижня електрода. При виборі кількості електродів в пучку слід виходити з геометричних розмірів поверхні, встановлений практично факт, що ширина валика трохи перевищує ширину гребінки.

Нехтуючи товщиною покриття, для розрахунків можна прийняти формулу для ширини валика при НПЕ поперечним пучком, мм:

$$b_g = (n_{el} + 0,75) * d_{el}, \quad (3.6)$$

де  $d_{el} = 3$  мм – діаметр стрижня електроду;

$n_{el} = 3$  – кількість електродів в гребінці,

$$b_g = (3 + 0,75) * 3 = 11,3.$$

Розрахувати величину струму наплавлення можна за формулою 3.2, А:

$$I_H = 21 * 3 * 3^{0,45} * e^{0,174 * 3} = 174.$$

Отримане значення струму наплавлення знаходиться в робочому діапазоні випрямляча ВД-306.

Автоматичний режим НПЕ дозволяє вести процес з чітким дотриманням довжини дуги, яка повинна бути як можна коротше. Однак процес НПЕ характеризується підвищеним шлакоутворенням, що при мінімальній дузі може привести до переходу дугового процесу в електрошлаковий або затіканню шлаку на основний метал перед ПЕ. Занадто коротка дуга викликає «залипання» електроду, дуга переривається, порушується процес наплавлення. Тому дугу необхідно підтримувати короткою, але довжиною, більше середньої, яка визначена в формулі 3.5.

Приймаємо:

$$l_d = 2,9 \pm 0,4 \text{ мм.}$$

Довжина дуги впливає на якість наплавленого шару та його геометричну форму. Довга дуга горить нестійко, з характерним «шипінням». При занадто довгій дузі послаблюється захист зварювальної ванни, метал інтенсивно насичується киснем та азотом повітря, збільшується розбризкування металу та у відновленому шарі можуть виникати пори.

Напруга при дугових зварювальних процесах покритими електродами залежить від багатьох факторів: типу та товщини покриття, складу та діаметра стрижня електрода, положення шву та довжини дуги.

Як правило, значення напруги дуги знаходиться в межах 20...36 В. Для більшості марок електродів, що використовуються при зварювальних процесах на вуглецевих та легованих конструкційних сталях величина напруги дуги складає 22...28 В.

Точне значення напруги дуги в залежності від струму наплавлення розраховують по формулі, В:

$$U_{\delta} = 20 + 0,04 * I_H, \quad (3.7)$$

$$U_{\delta} = 20 + 0,04 * 174 = 27.$$

Отримане значення мінімальної напруги дуги з урахуванням втрат напруги на перехідних контактних опорах може бути забезпечено випрямлячем ВД-306.

Площа поперечного перерізу наплавленого металу за один прохід, мм<sup>2</sup>:

$$F_H = \delta_H * b_{\epsilon} * a_F, \quad (3.8)$$

де  $\delta_H = 1,4$  мм – товщина наплавленого шару (табл. 3.5);

$a_F = 0,65$  – коефіцієнт відхилення від прямокутності (0,6...0,7),

$$F_H = 1,4 * 11,3 * 0,65 = 10,3.$$

Швидкість наплавлення розраховується за формулою, мм/с:

$$V_H = \frac{\alpha_H * I_H}{3,6 * \rho_{\epsilon} * F_H}, \quad (3.9)$$

де  $\alpha_H = 9,5$  г/(А·ч) – коефіцієнт наплавлення;

$\rho_{\epsilon} = 7,85$  г/см<sup>3</sup> – щільність наплавленого металу, г/см<sup>3</sup>;

$F_H$  – площа поперечного перерізу валика за один прохід, мм<sup>2</sup>,

$$V_H = \frac{9,5 * 174}{3,6 * 7,85 * 10,3} = 5,7.$$

Маса наплавленого валика за один прохід, г:

$$G_H = F_H * L_H * \rho_{\epsilon}, \quad (3.10)$$

де  $L_H = 15$  см – довжина валика, що обмежено повним ходом подавання ПЕ на макеті, який дорівнює 185 мм,

$$G_H = 20,44 \cdot 10^{-2} * 15 * 7,85 = 24,1.$$

Витрата електродів за один прохід, г:

$$G_{el} = G_H * k_{el}, \quad (3.11)$$

де  $k_{el} = 1,6$  – коефіцієнт витрати електродів на 1 кг наплавленого металу,

$$G_{el} = 24,1 * 1,6 = 38,6.$$

Час горіння дуги за один прохід, год:

$$t_0 = \frac{G_H}{\alpha_H * I_H}, \quad (3.12)$$

$$t_0 = \frac{24,1}{9,5 * 174} = 14,6 \cdot 10^{-3}.$$

Повний час наплавлення, год:

$$T = \frac{t_0}{k_n}, \quad (3.13)$$

де  $k_n = 0,53$  – коефіцієнт використання зварювального поста (0,50...0,55),

$$T = \frac{14,6 \cdot 10^{-3}}{0,53} = 27,5 \cdot 10^{-3}.$$

Витрата електроенергії, кВт·год:

$$W_{дж} = \frac{U_d * I_H}{\eta * 1000} * t_0 + W_0 * (T - t_0), \quad (3.14)$$

де  $\eta = 0,73$  – ККД зварювального випрямляча (0,7...0,75);

$W_0 = 0,3$  кВт – енергія холостого ходу випрямляча (0,2...0,4 кВт);

$$W_{дж} = \frac{27 * 174}{0,73 * 1000} * 14,6 \cdot 10^{-3} + 0,3 * (27,5 \cdot 10^{-3} - 14,6 \cdot 10^{-3}) = 0,098.$$

Значення технологічних параметрів, необхідних для експериментального механізованого наплавлення ПЕ визначені.

Розрахунок був проведений за методикою [68, 69].

### 3.5. Експериментальні дослідження процесу НПЕ

З метою дослідження дугового процесу на макеті була створена система відеоспостереження (рис. 3.6). До складу системи входять: цифрова відеокамера, персональний комп'ютер та два світлодіодних прожектора.

Відеокамера встановлюється на штативі та спрямовується в зону наплавлення (рис. 3.6, а). За допомогою регулювання об'єктиву налаштовується необхідна різкість. Перед об'єктивом закріплюється пакет скла з маски зварювальника: попереду захисне, а за ним фільтрувальне.

На робочому столі (рис. 3.6, б) розміщуються світлодіодні прожектори із захисним склом. Спектральна температура свічення прожекторів повинна бути на рівні 6,5 тис. К, що приблизно відповідає температурі стовпа дуги. Це необхідно, щоб покращити видимість процесу наплавлення.

За допомогою системи відеоспостереження було отримане візуальне уявлення про характер міграції дуги, краплевідділення, шлакоутворення, ширину зварювальної ванни, арочний спосіб топлення гребінки та інше.

Характерні кадри процесу наплавлення ПЕ наведені на рис. 3.7.



а



б

Рис. 3.6. Система відеоспостереження за процесом НПЕ:

а – загальний вигляд; б – підсвічування робочої зони.

Аналіз отриманого відеозображення показав нестабільний характер краплеперенесення, велику кількість шлаку в зоні наплавлення та важливість підтримання стабільної довжини дуги для отримання якісного наплавленого шару.

Без використання осцилятора при ручному способі ведення робіт дуга часто згасає, нерідко виникає залипання електродів пучка, часто лунають «постріли», звук дуги нерівний. Пучок іноді занурюється в розтоплений шлак і

тоді міграція дуги стає не видимою і шлак все заливає. Коли відстань збільшується та дуга знову починає бігати по кінцях електродів та краплям, то шлак розганяється і добре видно зварювальну ванну та величину крапель та бризки.

При використанні осцилятора дуга становиться дуже еластичною, горить практично безперервно, що дозволяє отримати добру форму валика. Але при занадто «довгій» дузі на поверхні валика багато пір та нерівностей.

Одним із перспективних напрямків є організація керованого краплепереносу при виконанні НПЕ. Це дозволить отримати стабільний продуктивний процес наплавлення та високу якість відновлених поверхонь.

Застосування повздовжнього розміщення пучка дозволяє виконувати коливання поперек валика, регулюючи його ширину. Крім того, представляє інтерес наплавлення кутом вперед з накладенням валика на похилій поверхні (кут підйому – прибіл.  $5^{\circ}$ ), це дозволить не тільки стримати затікання шлаку, але й зменшити проплавлення деталі (чи зразку) та знизити частку участі основного металу в наплавленому.

Система відеоспостереження надає простий та ефективний засіб контролю правильності прийнятих рішень.

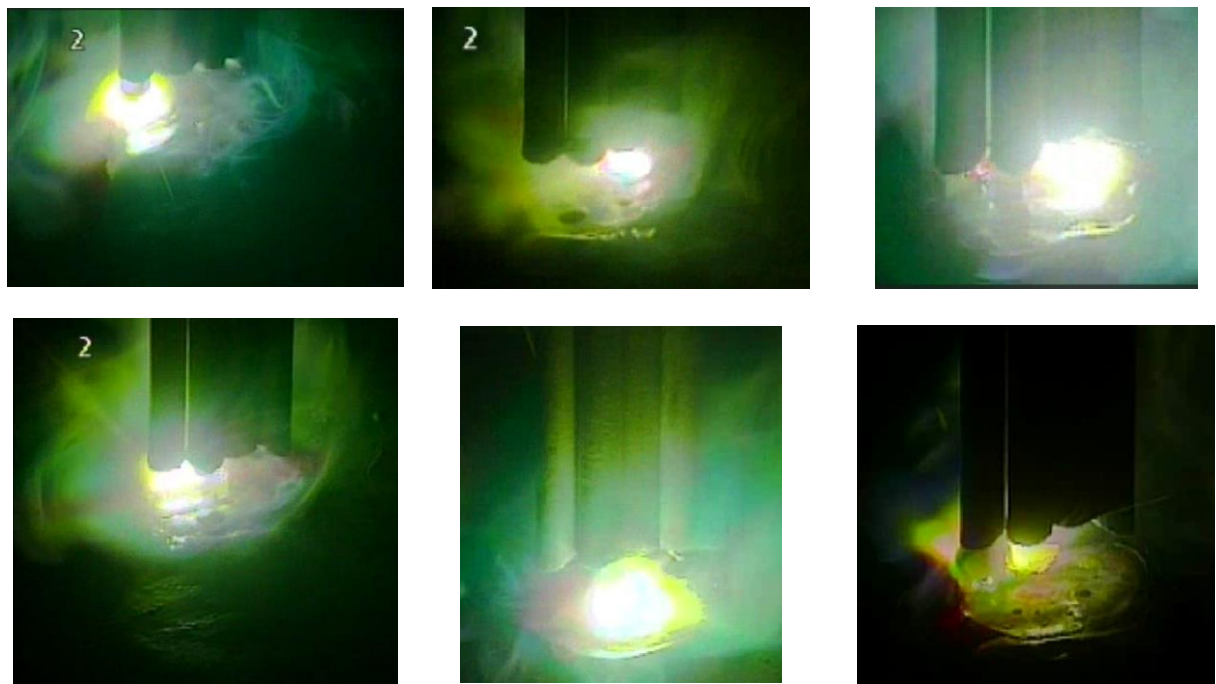


Рис. 3.7. Міграція зварювальної дуги при НПЕ



В ручний спосіб було виконане заплавлення отворів Ø30 мм в пластинах з сталі 20 товщиною 25 мм. Заплавлення виконувалось електродами УОНІ-13/45 діаметром 4 мм в кількості 3 шт., які були складені в пучку трикутником. Зварювальний струм складав 270 А. Струм – постійний, полярність – зворотна. В якості джерела живлення дуги використовувався Kemppi Marc 500Hf (Фінляндія).



а



б



в



г

Рис. 3.8. Стадії ручного заплавлення отворів методом НПЕ:

а – охолоджуєма плита з підкладкою; б – зразки, виставлені перед НПЕ;  
в, г – зразки після НПЕ, відповідно з шлаковою кіркою та без неї

НПЕ проводилось з мідною підкладкою, яка охолоджувалась водою, що дозволило коріння наплавленого металу вивести за межі пластини. Заміна пучка електродів після його вироблення виконувалась швидко, що не дати застигнути шлаку. Процес заплавлення фактично проводився під шлаком, тому візуально контролювати його було неможливо. Процес був наближений до електрошлакового. Зварювальник подавав пучок та здійснював кругові рухи всередині отвору. На заплавлення одного отвору було використано два пучка. На

першому зразку не вдалося швидко продовжити роботу після закінчення пучка, тому заплавити отвір металом не вдалося (рис. 3.8, в та г).

Процес вирізнявся великим задимленням та проводився прямо під парасоллю витяжної вентиляції.

Термообробка після наплавлення не проводилася.



а



б

Рис. 3.9. Зразок з заплавленим отвором:

а – після різання для виготовлення шліфу; б – макрошліф після травлення

Після різання зразку (рис. 3.9, а) були виготовлені та протравлені макрошліфи (рис. 3.9, б). Візуально в наплавленому металі були виявлені пори. Випробування на твердість за Брінеллем показали наступні значення: валик – 167 НВ; основа – 140 НВ; ЗТВ – 149 НВ. Твердість після НПЕ відповідає значенням при наплавленні одиночним електродом.



а



б

Рис. 3.10. Зразок з наплавленням плоскої поверхні:

а – після різання для виготовлення шліфу; б – макрошліф (x2)



Пори в заплавленому отворі утворилися з-за неправильної техніки НПЕ. Для успішного виконання подібних робіт потрібне автоматичне ведення процесу наплавлення.

На макеті автоматизованої установки в механізований спосіб було виконано НПЕ плоского зразку згідно з розрахунком в п.3.4 режимом. Після підготовки шліфів були досліджені макро- та мікроструктури зразка (рис. 3.10).

Металографічні дослідження встановили, що основа має структуру фериту и перліту (рис. 3.11, а), ЗТВ – та ж сама структура, але укрупнена (рис. 3.11, б), валик поблизу ЗТВ – структура фериту (рис. 3.11, в).

В цілому при напавленні ПЕ конструкційних або низьколегованих сталей структура в принципі відповідає технологічним вимогам.

Автоматизація потрібна, головним чином, для реалізації оптимальних технік ведення робіт з наплавлення.

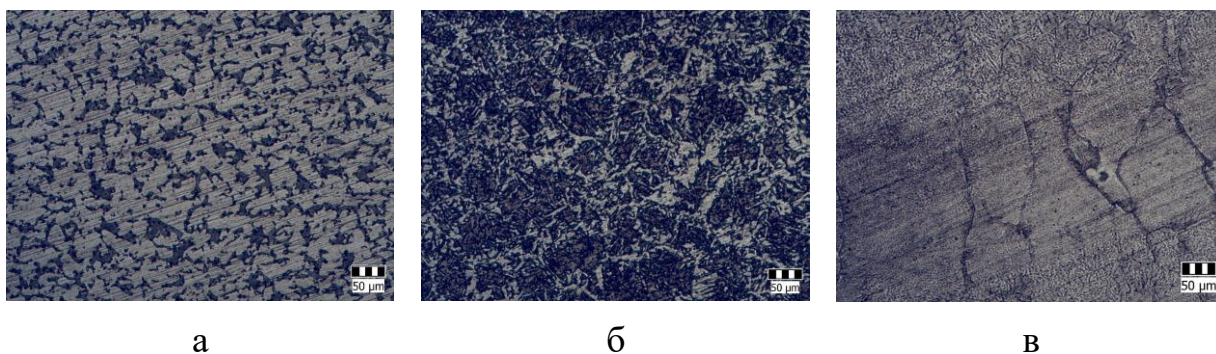


Рис. 3.11. Мікроструктура шліфа плоскої поверхні, що наплавлена ПЕ  
а – основа, б – ЗТВ, в – валик

## Висновки.

1. Проведено аналіз літературних даних та отримана апроксимаційна залежність струму наплавлення від діаметру електрода та їх кількості в пучку. За даними розрахунків побудовані графіки, які дозволяють з задовільною для практики точністю визначати струм наплавлення для електродів в діапазонах діаметрів 1...6 мм та кількості 1...6 шт. Формула рекомендована для використання при складанні технологічних процесів НПЕ

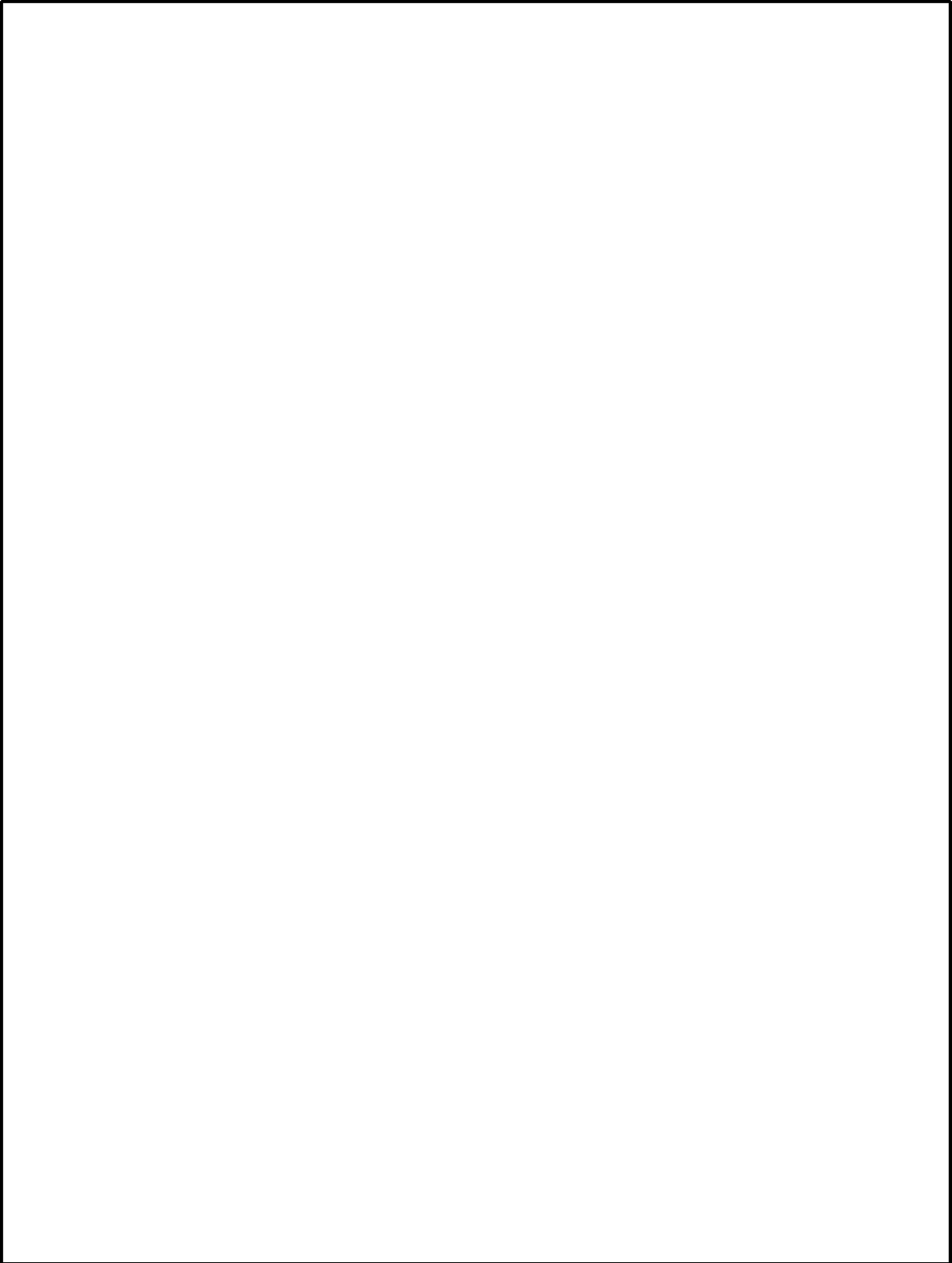
2. Розроблено принциповий технологічний процес, в якому визначені

критерії, якими слід керуватись при технологічній проробці робіт з НПЕ.

3. На базі маніпулятора верстату 4Б723М створено діючу макетну установку НПЕ, виконано розрахунок режиму наплавлення на ній зразку в механізований спосіб.

4. Створено систему відеоспостереження за процесом НПЕ, виконано аналіз отриманих зображень та намічений напрямок подальшої роботи.

5. Виконано ручне дугове заплавлення отвору та механізоване наплавлення плоскої поверхні зразку з сталі 20 методом ПЕ. Металографічні дослідження показали: макро- та мікроструктури – аналогічні звичайному процесу; ЗТВ – збільшена; лінія сплавлення – значна нерівномірність вздовж та поперек валика; в наплавленому металі присутні пори та шлакові включення. Причини дефектів: коливання довжини дуги та швидкості пучка (в ручному режимі), неоптимальна техніка наплавлення. Рішення – автоматизоване ведення процесу НПЕ.



|          |      |             |          |      |                                                             |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |
|----------|------|-------------|----------|------|-------------------------------------------------------------|--|--|--|--|------------------------------|--|------|---------|--|--|--|
|          |      |             |          |      | КР131.6121м.06.04.04.ПЗ                                     |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |
| Зм..     | Арк. | № докум.    | № Докум. | Дата |                                                             |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |
| Студент  |      | Зверев А.В. |          |      | Техніка безпеки та охорона<br>праці при роботі на установці |  |  |  |  | Літ.                         |  | Арк. | Аркушів |  |  |  |
|          |      |             |          |      |                                                             |  |  |  |  |                              |  | 112  | 19      |  |  |  |
|          |      |             |          |      |                                                             |  |  |  |  | НУК<br>ім. адмірала Макарова |  |      |         |  |  |  |
|          |      |             |          |      |                                                             |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |
| Викладач |      | Драган С.В. |          |      |                                                             |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |
|          |      |             |          |      |                                                             |  |  |  |  |                              |  |      |         |  |  |  |

#### 4.1. Аналіз шкідливостей та небезпечностей при дуговому наплавленні електродами.

РДНПЕ завдяки своїй простоті та маневреності є широко поширеним способом термічного з'єднання металів. Зварювальна дуга є джерелом утворення променистої енергії. Спектр променистої енергії складається з інфрачервоних променів довжиною понад 1,5 мкм, променів Фохту (1,5...0,7 мкм), світлових променів (0,7...0,4 мкм) та ультрафіолетових променів (далі – УФП) (0,4... 0,18 мкм).

Інтенсивність випромінювання залежить головним чином від температури дуги – інтенсивність з підвищенням температури збільшується. Яскравість видимої частини спектру досягає 16 000 стильбів, що у тисячі разів перевищує фізіологічно переносиму дозу. УФП з довжиною хвилі менше 0,4 мкм можуть викликати професійне захворювання очей, зване електроофтальмією та опік відкритих частин шкіри зварювальника. Електроофтальмія починається після невеликого прихованого періоду тривалістю кілька годин. Потім з'являється різь і біль в очах, відчуття в них стороннього тіла, світлобоязнь, слезотеча, головний біль, що супроводжується безсонням. Ці явища обумовлені впливом УФО на слизову оболонку очей. Іноді процес захоплює рогову оболонку очей. Часте повторення захворювання на електроофтальмію призводить до зниження чутливості рогівки, хронічного кон'юнктивіту, підвищеної стомлюваності очей. Електроофтальмія частіше спостерігається у підсобних робітників, які не користуються захисними світлофільтрами.

РДНПЕ виконується електродами різних марок, що відрізняються хімічним складом дротів та покриттів, до складу яких в залежності від призначення електродів входять: феромарганець, марганцева руда, металевий марганець, плавиловий шпат, електродний мармур, феросиліцій, кварцовий пісок та ін. Чисельність електродів складає 182 марки.

За експериментальними даними питома кількість пилю, що утворюється при спалюванні різних електродів, становить для електродів з покриттям

руднокислого типу (марганцеве) 18,6...36,5 г/кг; основного типу (фтористо-кальцієвого) – 11,3...13,5 г/кг; рутилового або рутил-карбонатного – 7,1...15,3 г/кг. Гранично допустимі концентрації (далі – ГДК) у повітрі робочої зони основних шкідливих речовин (у формі аерозолів та газів) встановлюються державною нормативною документацією.

Тривалий (10...20 років) вплив зварювального аерозолі (ГДК – 4 мг/м<sup>3</sup>) може спричинити профзахворювання у електрозварювальників – пневмокніозу. У цьому захворюванні уражаються органи дихання, особливо легені, у яких еластична легенева тканина замінюється грубої сполучної тканиною. Скарги при цьому захворюванні незначні і виявляється хвороба головним чином при рентгенівському обстеженні. Захворювання протікає повільно, доброякісно, зрідка ускладнюється туберкульозом. Своєчасне виявлення цього захворювання дозволяє загальмувати розвиток процесу та правильно працевлаштувати зварювальника.

Загальний вміст пилу, оксидів марганцю, фтористих і хромовмісних сполук у робочій зоні визначається складом зварюваного металу, стрижня електродів та обмазки, силою зварювального струму та діаметром електродів, положенням тіла зварювальника щодо дуги, конфігурацією виробів, що зварюються, ефективністю вживаних протипилових заходів.

Наплавлення електродом з фтористо-кальцієвим покриттям супроводжується меншим виділенням марганцю (ГДК у перерахунку на MnO<sub>2</sub> – 0,3 мг/м<sup>3</sup>), але у складі зварювального факелу при спалюванні цих електродів містяться фтористі сполуки (фтористий водень, чотирифтористий кремній та ін.), концентрація яких у зоні дихання зварювальників іноді буває досить значною.

Фтор (ГДК у перерахунку на HF – 1 мг/м<sup>3</sup>) та хромовмісні аерозолі у підвищених концентраціях можуть стати причинами подразнення та запалення слизових оболонок носа та носоглотки, якщо не дотримуються запобіжних заходів, не працює місцева вентиляція, не застосовуються засоби

індивідуального захисту (далі – ЗІЗ).

Зварювання хромовмісними електродами характеризується значним забрудненням зони дихання зварників аерозолем (виділення зварювального пилу 10,65...30 г/кг). Важливою з гігієнічної точки зору особливістю цих електродів є виділення оксидів хрому, концентрація яких, залежно від умов зварювання, коливається в суттєвих межах. Вміст зварювального пилу шестивалентних сполук хрому (ГДК для яких у перерахунку на  $\text{CrO}_3$  становить 0,01 мг/м<sup>3</sup>) у 2,5...3,5 рази перевищує вміст тривалентних сполук (ГДК – 1 мг/м<sup>3</sup>). Двоокис кремнію в зварювальних пилах становить 0,9...1,08%.

Дисперсність зварювального аерозолю надзвичайно велика. Дослідження показали, що 90...99% частинок мають розміри до 1 мкм, тому вони мають малу тенденцію до осідання та глибоко проникають у дихальні органи.

Принципово важливим і значною мірою зумовлює вміст аерозолю в зоні дихання зварника є фіксація місця зварювання. На постійних робочих місцях у складально-зварювальних цехах легше організувати місцеву вентиляцію і тим самим різко знизити вміст токсичних речовин у зоні дихання зварювальника.

Особливо несприятливий стан виробничої атмосфери створюється при наплавленні у виробках із замкнутими та напівзамкненими контурами – блоках, баках, цистернах та ін. з високими концентраціями пилу, оксидів марганцю та фтористих сполук у поєднанні з несприятливими метеорологічними умовами, відсутністю природного умови праці електрозварювальників у замкнутих просторах.

Хронометраж показує, що 55...70% робочого часу зварювальники зайняті безпосередньо наплавленням, а решта часу – виконанням допоміжних операцій. Зварювання вимагає від зварювальника підвищеної напруги уваги та зору. Вона виконується часто у вимушеній позі, що супроводжується підвищеною статичною напругою м'язів рук та тіла.

До небезпечних виробничих факторів (далі – НВФ) при наплавленні

відносяться вплив електричного струму, іскри та бризки, викиди розплавленого металу та шлаку; можливість вибуху балонів та систем, що знаходяться під тиском; рухомі механізми та вироби; підйомно-транспортне встаткування.

При наплавленні можуть мати місце засмічення та поранення очей, опіки тіла, забиті місця, поранення. Опіки і ураження очей найчастіше спостерігаються при РДНПЕ, особливо при струмах малої щільності. Причиною є викид великої кількості іскор та бризок розплавленого металу. Небезпека опіків зростає при зварюванні іржавої, забрудненої, замасленої або забарвленої поверхні, а також при зволоженому покритті електроду.

Крім небезпеки опіків від рідкого металу, що викидається, можливі опіки і поранення в результаті відскакування від поверхні шва частинок шлакової кірки, що ще не охолола, наприклад, при випадковому дотику руками до неостиглого виробу. Опіки можуть мати місце також при підігріванні виробів перед наплавленням, при користуванні паяльними лампами для сушіння поверхні, при випадковому торканні розігрітого електрода, при видаленні електродного недогарка.

Мають місце порізи рук гострими кромками деталей, удари деталями, що падають, та інші травми, що є, як правило, наслідком необережності при виконанні зварювальних або підготовчих робіт. Для зачистки швів, усунення дефектів поверхні, зняття задирок і шару металу після вогневого різання, припасування та підготовки поверхні під наплавлення застосовують механізований інструмент – пневмозубіла, переносні шліфувальні машинки з електро- або пневмоприводом. При порушенні правил безпеки при роботі з цим інструментом можливі травми різного характеру.

При виконанні робіт з наплавлення на висоті та відсутності відповідних засобів та огорож можливе падіння працюючих, що веде до забитих місць, а також до тяжкого травматизму, у тому числі до нещасних випадків з летальним кінцем [41...43].

#### 4.2. Розрахунок місцевої вентиляції.

Вентиляція – процес повітрообміну у виробничих приміщеннях, який забезпечує нормовані значення параметрів мікроклімату та чистоту повітря.

Вентиляційна система та її обладнання повинні:

1. Забезпечувати необхідну чистоту повітря та параметри мікроклімату виробничого приміщення в відповідності з ДСТ 12.1.005-88.
2. Не створювати додаткових шкідливих і небезпечних факторів (переохолодження, перегрів, шум, вібрація, пожежовибухонебезпека).
3. Забезпечувати ефективний баланс між об'ємами повітря, що надходять в приміщення та видаляються з нього.
4. Не заважати рухові внутрішньоцехового транспорту, не знижувати продуктивність праці, не впливати на якість зварювання.
5. Забезпечувати економічність та надійність при експлуатації.

Згідно з ДСТУ 2456-94 дугове зварювання (наплавлення) покритими електродами повинно виконуватись в спеціальних кабінах з використанням місцевої вентиляції.

Місцева вентиляція – це витяжна система вентиляції, що через мережу повітроводів видаляє за допомогою вентилятора забруднене повітря, яке перед викидом в атмосферу очищається. При цьому в приміщенні створюється знижений тиск, внаслідок чого повітря підсмоктується зовні через вікна, двері, нещільності конструкції або із суміжних приміщень. Її доцільно застосовувати: у випадках, коли шкідливі виділення даного приміщення не повинні поширюватися на інші; для приміщень із короткочасним перебуванням людей та при невеликих кількостях витяжного повітря, що характерно для ремонтних діляниць та підприємств.

Вибір конструкції місцевого витяжного пристрою (відсмоктувача), об'єму повітря, що відсмоктується, методу очищення повітря, а також оптимальна вартість обладнання залежать від способу ведення робіт, марки матеріалів, форми виробу, об'єму приміщення, кількості зварювальних постів та



деяких інших факторів [42].

Найбільш практичними є пересувні фільтровентиляційні агрегати (далі – ФВА), які дозволяють видаляти забруднене повітря з мінімальної відстані від місця зварювання, очищати і повертати в приміщення (рис. 4.1, а) або викидати за його межі (рис. 4.1, б).

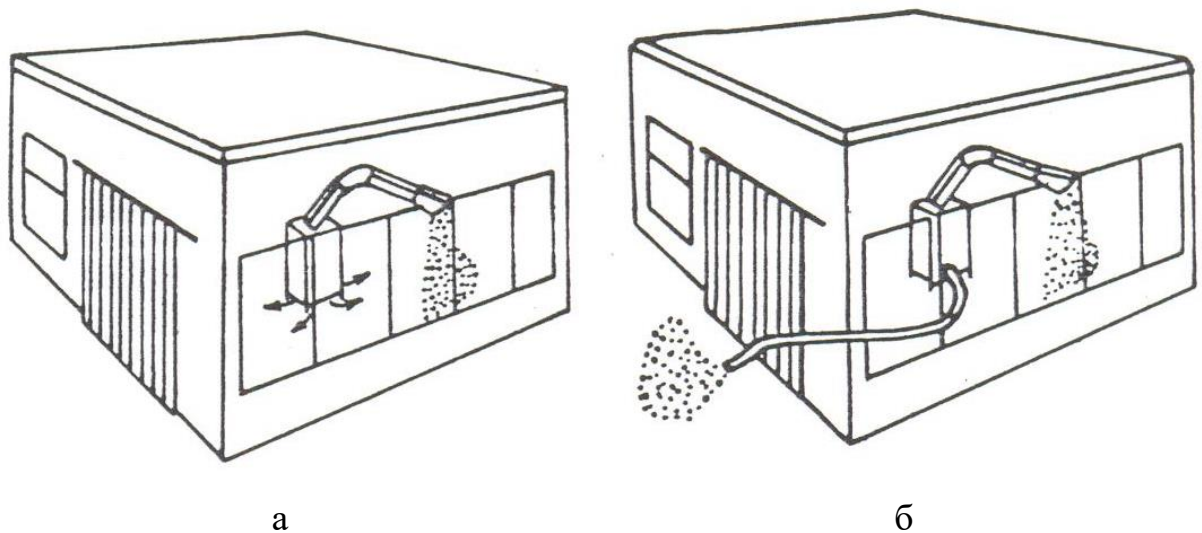


Рис. 4.1. Пересувні фільтровентиляційні агрегати:

а – з поверненням очищеного повітря;

б – з викидом повітря за межі приміщення.

Для використання пересувних ФВА не треба виконувати монтажні роботи, їх можна переміщувати в будь-яке місце, а всмоктуючий отвір повітропроводу, шляхом його згинання і повертання завдяки спеціальному фіксуючому механізму, можна встановлювати на мінімальній відстані від зварювальної дуги (рис. 4.2). ФВА характеризуються високим ступенем уловлювання шкідливих речовин та економією енергії за рахунок рециркуляції повітря.

Проведемо аналіз питомих показники виділення забруднюючих речовин при зварюванні та наплавленні металів (на одиницю маси зварювальних матеріалів, що витрачаються) для основних та рутилових електродів [50, 51], що наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1.Забруднюючі викиди покритих електродів

| Марка електроду   | Найменування та питома кількість забруднюючих речовин,<br>що виділяються, г/кг |              |                                |                                                 |                                   |                  |                                                        |               |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------|---------------|
|                   | зварювальний аеро-<br>золь                                                     | в тому числі |                                |                                                 |                                   | фтористий водень | NO <sub>x</sub> (в перерахунку<br>на NO <sub>2</sub> ) | оксид вуглецю |
|                   |                                                                                | заліза оксид | марганець та<br>його з'єднання | пил неорганічна,<br>що містить SiO <sub>2</sub> | фториди (в пере-<br>рахунку на F) |                  |                                                        |               |
| Основне покриття  |                                                                                |              |                                |                                                 |                                   |                  |                                                        |               |
| УОНІ-13/45        | 16,31                                                                          | 10,69        | 0,92                           | 1,40                                            | 3,3                               | 0,75             | 1,50                                                   | 13,3          |
| УОНІ-13/55        | 16,99                                                                          | 13,90        | 1,09                           | 1,0                                             | 1,0                               | 0,93             | 2,70                                                   | 13,3          |
| УОНІ-13/65        | 7,5                                                                            | 4,49         | 1,41                           | 0,80                                            | 0,80                              | 1,17             | -                                                      | -             |
| Рутилове покриття |                                                                                |              |                                |                                                 |                                   |                  |                                                        |               |
| АНО-3             | 17,0                                                                           | 15,42        | 1,58                           | -                                               | -                                 | -                | -                                                      | -             |
| АНО-4             | 17,8                                                                           | 15,73        | 1,66                           | 0,41                                            | -                                 | -                | -                                                      | -             |
| АНО-6             | 16,7                                                                           | 14,97        | 1,73                           | -                                               | -                                 | -                | -                                                      | -             |

ГДК у повітрі робочої зони основних шкідливих речовин (у формі аерозолів та газів), що утворюються під час зварювання, наведені в табл. 5.2 [53].

Таблиця 4.2. ГДК шкідливих речовин в робочій зоні

| № зп                  | Речовина                                         | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| Зварювальний аерозоль |                                                  |                        |
| 1                     | Заліза оксиди (у перерахунку на залізо)          | 6                      |
| 2                     | Марганець до 20 %                                | 0,2                    |
| 3                     | Кремнію діоксид аморфний                         | 1                      |
| 4                     | Фтороводневої кислоти солі (за фтором)           | 1                      |
| Гази                  |                                                  |                        |
| 1                     | Фтористий водень (у перерахунку на F)            | 0,5                    |
| 2                     | Азоту оксиди (у перерахунку на NO <sub>2</sub> ) | 5                      |
| 3                     | Вуглецю оксид                                    | 20                     |

Розрахунок об'єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією для різних марок електродів, виконаємо для пучка трьох електродів діаметром 5 мм, як для найбільш «навантаженого» варіанту.

Погонна швидкість плавлення пучка електродів, мм/с:

$$v_{ПЕ} = \frac{l_{0ПЕ}}{t_{0ПЕ}}, \quad (4.1)$$

де за даним [52, табл. 5]  $l_{0ПЕ} = 320$  мм – робоча довжина пучка електродів,  $t_{0ПЕ} = 106$  с – час плавлення пучка електродів.

$$v_{ПЕ} = \frac{320}{106} = 3,02 \text{ мм/с.}$$

Час плавлення стандартного пучка електродів, с:

$$t_{ПЕ} = \frac{l_{ел} - l_{нд}}{v_{ПЕ}}, \quad (4.2)$$

де  $l_{ел} = 450$  мм – довжина стандартного електроду [25],  $l_{нд} = 50$  мм – нормативна довжина недогарка електроду [50].

$$t_{ПЕ} = \frac{450 - 50}{3,02} = 132,5 \approx 133 \text{ с.}$$

Маса робочої частини пучка електродів стандартної довжини, кг:

$$m_{ПЕ} = n_{ел} * m_{ел} * (1 - n_{нд}^{сер}), \quad (4.3)$$

де  $n_{ел} = 3$  – кількість електродів в пучку,  $m_{ел} = 0,092$  кг – маса одного електроду діаметром 5 мм,  $n_{нд}^{сер} = 0,01$  – середній норматив утворення недогарків (з урахуванням нерівномірності).

$$m_{ПЕ} = 3 * 0,092 * (1 - 0,01) = 0,248 \text{ кг.}$$

Під час плавлення пучка електродів на установці зварювальник безпосередньо не знаходиться в робочій зоні, ведучи спостереження з безпечної відстані. Він підходить лише після остигання шлакової кірки і виконує заміну відпрацьованого пучка електродів, очистку валика та навколошовної зони від побіглості, окалини, шлаку. Включення зварювальник відбиває молотком,

заодно знімаючи внутрішню напругу, прибирає залишки кірки щіткою (вручну або насадкою на кутовій шліфмашинці чи дрилі), а також виконує грубу зачистку та видаляє надлишковий наплавлений метал або пори тощо. Зварювальник знаходиться в робочій зоні після наплавлення для виконання допоміжних робіт перед наступним валиком на протязі часу, який дорівнює основному робочому процесу. Таким чином, при автоматичному наплавленні між надходженнями шкідливих речовин в робочу зону існують проміжки, під час яких зварювальник потрапляє під вплив їх залишків в повітрі. Тоді, відношення загального часу наплавлення валика до часу плавлення пучка електродів  $k_{зч} = 2$ .

Середня масова витрата пучка електродів при виконанні технологічного процесу, кг/год:

$$G_{ПЕ} = 3600 * \frac{m_{ПЕ}}{k_{зч} * t_{ПЕ}}, \quad (4.4)$$

$$G_{ПЕ} = 3600 * \frac{0,248}{2 * 133} = 3,36.$$

Кількість шкідливих речовин, локалізованих місцевою вентиляцією має становити для місцевих відсмоктувачів не більше 75 %. Залишена кількість шкідливостей повинна бути розведена до ГДК за допомогою загальнообмінної вентиляції на виробничій ділянці [51].

Об'ємна витрата повітря, яку необхідно забезпечити місцевою вентиляцією, м<sup>3</sup>/год:

$$V_{MB} = G_{ПЕ} * \frac{1000 * C_{ШР}}{C_{ГДК}} * \eta_{MB}, \quad (4.5)$$

де  $C_{ШР}$  – питома кількість шкідливої речовини, що виділяється при плавленні електроду, г/кг (табл. 4.1.);  $C_{ГДК}$  – гранично допустима концентрація шкідливої речовини в робочій зоні, мг/м<sup>3</sup> (табл. 4.2.);  $\eta_{MB}=0,75$  коефіцієнт ефективності місцевої вентиляції.

Результати розрахунку за формулою 4.5 об'ємних витрат повітря для пучків, складених з різних марок електродів, представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Продуктивність МВ для пучка (3 x Ø5) в залежності від марки електродів

| Марка електроду   | Необхідна продуктивність місцевих відсмоктувачів для видалення окремих шкідливих викидів, м <sup>3</sup> /год |                             |                                              |                              |                  |                                                     |               |                      |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|---------------|----------------------|
|                   | заліза оксид                                                                                                  | марганець та його з'єднання | пил неорганічна, що містить SiO <sub>2</sub> | фториди (в перерахунку на F) | фтористий водень | NO <sub>x</sub> (в перерахунку на NO <sub>2</sub> ) | оксид вуглецю | Максимальне значення |
| Основне покриття  |                                                                                                               |                             |                                              |                              |                  |                                                     |               |                      |
| УОНІ-13/45        | 4490                                                                                                          | 11592                       | 3528                                         | 8316                         | 3780             | 756                                                 | 1676          | <b>11592</b>         |
| УОНІ-13/55        | 5838                                                                                                          | 13734                       | 2520                                         | 2520                         | 4687             | 1361                                                | 1676          | <b>13734</b>         |
| УОНІ-13/60        | 1886                                                                                                          | 17766                       | 2016                                         | 2016                         | 5897             | -                                                   | -             | <b>17766</b>         |
| Рутилове покриття |                                                                                                               |                             |                                              |                              |                  |                                                     |               |                      |
| АНО-3             | 6476                                                                                                          | 19908                       | -                                            | -                            | -                | -                                                   | -             | <b>19908</b>         |
| АНО-4             | 6607                                                                                                          | 20916                       | 1033                                         | -                            | -                | -                                                   | -             | <b>20916</b>         |
| АНО-6             | 6287                                                                                                          | 21798                       | -                                            | -                            | -                | -                                                   | -             | <b>21798</b>         |

Розрахуємо параметри місцевого відсмоктувача, виходячи з розмірів робочої зони та умови забезпечення потрібної швидкості руху повітря.

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, при ручному зварюванні покритими електродами повинна бути не менше 0,5 м/с [51], а максимальна швидкість руху повітря в робочій зоні для холодного періоду року не повинна перевищувати 0,5 м/с, для теплого – 0,6 м/с [53]. Тому для подальших розрахунків приймаємо швидкість руху повітря  $w_{PI} = 0,55$  м/с.

Щоб не ускладнювати експлуатацію устаткування та проведення технологічного процесу, найбільш доцільно розмістити дві прямокутні витяжні парасолі обабіч консолі установки. Тоді відстань  $H_{MB}$  між поверхнею наплавлення та приймальним отвором відсмоктувача буде сягати  $0,6 \pm 0,2$  м.

За параметрами операційного простору установки (максимальні переміщення  $h_X = h_Y = 0,4$  м; радіус план-шайби  $R_{ПШ} = 0,2$  м; довжина вступних та вивідних планок  $l_{nl} = 0,1$  м; відстань між бічними гранями консолі та станини в нульовій точці  $b_{X0} = 0,2$  м) конструктивно визначимо потрібні розміри отвору кожної витяжної парасолі.

Довжину витяжної парасолі розраховуємо за формулою, м:

$$l_{ВП} = h_Y + 2 * (R_{ПШ} + l_{nl}), \quad (4.6)$$

$$l_{ВП} = 0,4 + 2 * (0,2 + 0,1) = 1.$$

Ширину витяжної парасолі розраховуємо за формулою, м:

$$b_{ВП} = h_X + b_{X0}, \quad (4.7)$$

$$b_{ВП} = 0,4 + 0,2 = 0,6.$$

Для отворів витяжних пристроїв з гострими краями прямокутної форми швидкість всмоктування повітря розраховується за формулою, м/с:

$$w_O = \frac{w_{ПП} * H_{MB}}{k_{ec} * b_{ВП}}, \quad (4.8)$$

де  $k_{ec} = 0,16$  – коефіцієнт умов всмоктування в отворі ( $\psi = 360^\circ$ ).

Формулу (4.8) можна використовувати при [54]:

$$H_{MB} > \frac{b_{ВП}}{2}, \quad (4.9)$$

$$0,6 > \frac{0,6}{2} = 0,3.$$

Умова 4.9 виконується. Тоді за формулою 4.8:

$$w_O = \frac{0,55 * 0,6}{0,16 * 0,6} = 3,44 \text{ м/с.}$$

Площа відкритого перерізу однієї витяжної парасолі місцевого відсмоктувача, м<sup>2</sup>:

$$F_O = l_{ВП} * b_{ВП}, \quad (4.10)$$

$$F_O = 1 * 0,6 = 0,6.$$

Продуктивність рухомого місцевого відсмоктувача установки, м<sup>3</sup>/год:

$$V_{MB} = 3600 * n_O * F_O * w_O, \quad (4.11)$$

де  $n_O = 2$  – кількість парасоль у відсмоктувачі. Тоді

$$V_{MB} = 3600 * 2 * 0,6 * 3,44 = 14861 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Існує багато способів регулювання продуктивності систем вентиляції, при тому найпростіші з них – це неекономічні способи напускання повітря в лінію відкачування перед відсмоктувачем та перекривання частини перетину повітропроводу за допомогою заслінки. Найбільш прогресивні методи – це регулювання швидкості обертання вентилятора, застосування декількох вентиляторів, декількох ліній відкачки тощо, але всі вони пов'язані зі значними капітальними витратами, що не підходить для малих ремонтних підприємств.

На рис.4.2 наведена продуктивність місцевого відсмоктувача в залежності від відстані між поверхнею наплавлення та приймальним отвором при умові забезпечення швидкості повітря в робочій зоні  $0,55 \pm 0,05$  м/с.

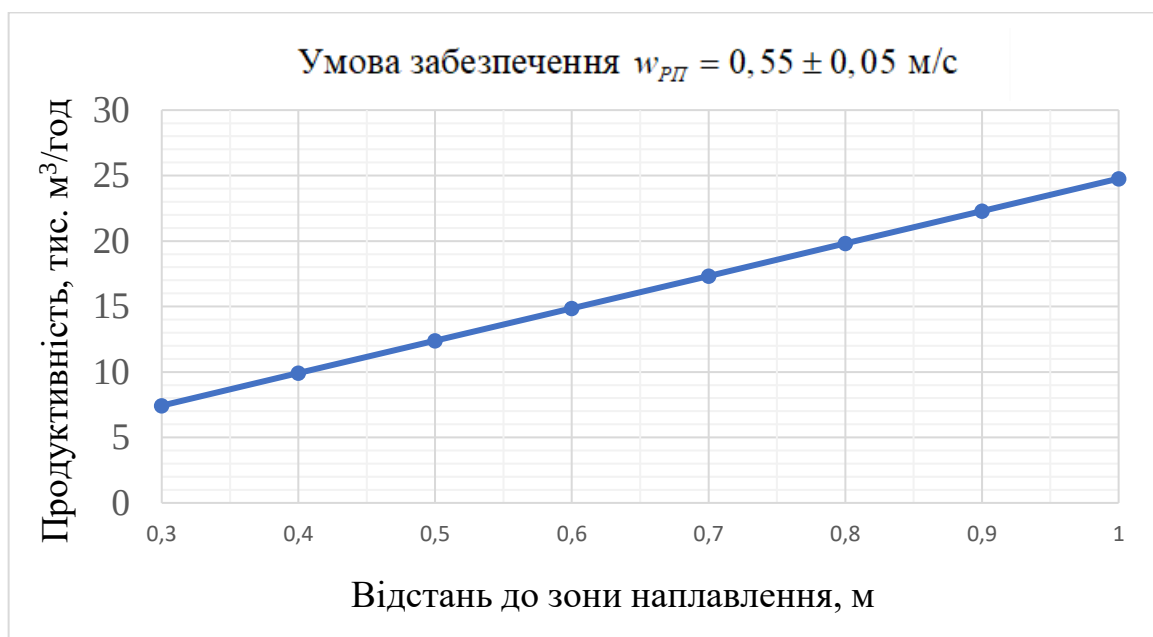


Рис. 4.2. Залежність потрібної продуктивності від відстані до зони наплавлення

Розрахований відсмоктувач забезпечує весь діапазон необхідної

продуктивності, визначений в табл. 4.3., але при цьому необхідно коригувати положення по висоті поверхні деталі, що пов'язано не тільки з значними незручностями, але й часто фізично неможливо, або допускати коливання в широких межах швидкості повітря в робочій зоні, що також не завжди припустимо. Все це може призвести до суттєвого зниження стабільності технологічного процесу та значного обмеження застосування автоматизованого наплавлення пучком електродів.

Аналіз даних табл. 4.3 та залежності рис. 4.2 показує, що можливим рішенням цієї проблеми для малих ремонтних підприємств може стати застосування для НПЕ електродів марок УОНІ-13/45, УОНІ-13/55, які спричиняють мінімальні викиди шкідливих речовин. При можливості слід уникати при НПЕ великих діаметрів електродів, або використовувати не більше двох в пучку, що знизить необхідну продуктивність місцевої вентиляції на третину. Це дозволить замість громіздких енергоємних стаціонарних відсмоктувачів використовувати пересувні фільтровентиляційні агрегати (далі – ФВА), які виробляються в Україні.

ФВА не розраховані на потужні викиди від пучків електродів, але мають несумнівні переваги, які викликають до них увагу.



Рис. 4.3. Пересувний фільтровентиляційний агрегат «ТЕМП-2000».

Наприклад, ФВА «ТЕМП-2000» (рис. 4.3) забезпечує значну економію (60...70%) електричної та теплової енергії за рахунок рециркуляції теплого повітря у виробничому приміщенні та комплектується змінними фільтрами. Тришарові фільтруючі

елементи підвищеної площі виготовлені з тканин українського виробництва



(6В19КТ, голкопробивна, багатошаровий поліпропілен тощо) і дозволяють забезпечити практично повне очищення повітря від зварювального аерозолію.

Технічні характеристики ФВА «Темп-2000» наведені в табл. 4.4 [45].

Таблиця 4.4. Технічні характеристики ФВА «Темп-2000»

| № з.п. | Найменування                                  | Одиниця виміру      | Величина         |
|--------|-----------------------------------------------|---------------------|------------------|
| 1      | Максимальна продуктивність вида-лення повітря | м <sup>3</sup> /год | 2000, 3000, 4000 |
| 2      | Ступінь очищення повітря                      | %                   | ≥ 99,5           |
| 3      | Розрідження на вході в повітропро-від         | Па                  | 1500             |
| 4      | Потужність електродвигуна                     | кВт                 | 1,1; 1,5; 2.2    |
| 5      | Напруга живлення                              | В                   | 380 (220)        |
| 6      | Строк служби фільтра                          | міс.                | 1...4            |
| 7      | Габаритні розміри                             | мм                  | 1000 x 750 x 500 |
| 8      | Маса                                          | кг                  | 55               |

Аналіз даних табл. 4.4 показує, що існуючі пересувні ФВА не забезпечу-ють необхідну продуктивність, визначену в табл. 4.3. Для НПЕ необхідно роз-робляти спеціальні ФВА.

#### 4.3. Охорона навколишнього середовища.

Найбільшу небезпеку для навколишнього середовища при наплавленні покритими електродами утворюють викиди зварювальних аерозолів (далі – ЗА) та забруднення її окалиною, шлаком, недогарками та іншими продуктами технологічного процесу.

Рівні виділень і хімічний склад зварювальних аерозолів (далі – ЗА), які утворюються при зварюванні покритими електродами, визначаються рядом основних факторів: вмістом в шлаковому розплаві, що утворюється в

результаті плавлення покриття на торці електрода, хімічних елементів чи сполук з високою пружністю пари, які вносять великий вклад в утворення аерозолів; характеристикою основності (кислотності) шлаку, від якої залежить інтенсивність випаровування окремих його складових; окиснювальним потенціалом атмосфери дуги; діаметром електрода і режимом зварювання (сила зварювального струму та напруга дуги).

Найбільші виділення аерозолу характерні для електродів з целюлозним покриттям. За ними йдуть електроди з покриттям основного типу. Електроди з кислим, рутиловим і ільменітовим покриттям за рівнем виділення ЗА розрізняються між собою незначно, а порівняно з електродами з целюлозним та основним покриттям характеризуються значно меншим виділенням аерозолу (рис. 4.4).

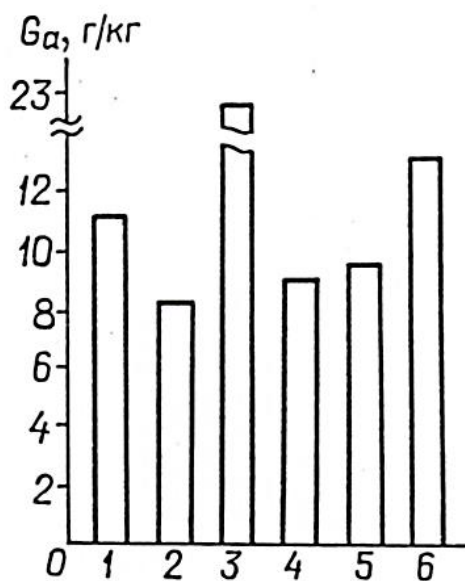


Рис. 4.4. Питомі виділення ЗА

при  $d_e = 5$  мм,  $I = 230$  А

та типі покриття:

- 1 – ільменітове;
- 2 – рутил-карбонатне;
- 3 – целюлозне;
- 4 – рутилове;
- 5 – кисле;
- 6 – основне.

Високий рівень виділення ЗА при наплавленні електродами з основним покриттям обумовлено наявністю в покритті летучих сполук фтору ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) і високою основністю шлакової фази, яка сприяє більш інтенсивному надходженню в ЗА сполук лужних металів. Великий вміст карбонатів (мармуру, крейди, вапняку, магнезиту, доломіту) в покритті сприяє стисненню дуги вуглекислим газом, який утворюється при їх розкладанні, що також призводить до підвищення інтенсивності виділення ЗА.

Основою ЗА при наплавленні електродами з рутиловим покриттям є оксиди заліза. Із шлакової фази в ЗА переходять, переважно,  $\text{SiO}_2$  (20...30 %),  $\text{K}_2\text{O}$  (5...10 %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (6...10 %). Вміст у ЗА сполук кальцію, магнію, алюмінію та титану незначний: 0,1...0,8 %  $\text{CaO}$ ; 0,1...3 %  $\text{MgO}$ ; 0,1...0,3 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,1...2 %  $\text{TiO}_2$ . Вміст найбільш токсичної складової ЗА – сполук марганцю – при наплавленні електродами загального призначення складає 5...10 %. Це є результатом випаровування його, переважно, з металічного розплаву, в якому концентрація марганцю при зварюванні електродами різних марок також змінюється в порівняно вузькому інтервалі.

Склад ЗА при наплавленні електродами з покриттям основного типу істотно відрізняється: наявністю великої кількості розчинних і нерозчинних фторидів (10...20 % в перерахунку на фтор); більш високою порівняно зі рутиловими електродами кількістю сполук лужних і лужно-земельних металів (6...25 %  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 5...30 %  $\text{K}_2\text{O}$ ; 7...15 %  $\text{CaO}$ ; 0...8 %  $\text{MgO}$ , причому сума  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  складає 20...40 %, а їх співвідношення визначається, головним чином, складом зв'язуючого – рідкого скла); більш низьким вмістом оксидів кремнію (4...12 %) та заліза (10...20 %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ці відмінності обумовлені, в першу чергу, наявністю фторидів у складі основного покриття і високою основністю шлаків, що утворюються при плавленні покриття електродів. Крім того, при зварюванні електродами з покриттям основного виду поряд з фторидами у складі ЗА в повітрі присутні також токсичні газоподібні фториди (фтористий водень, тетрафторид кремнію тощо). Вміст оксидів марганцю в ЗА, що утворюється при зварюванні електродами з основним покриттям, нижчий, ніж при зварюванні електродами інших видів, і складає звичайно 3...5 %. Це пояснюється більш низьким вмістом феромарганцю в покритті основного виду.

Найбільш шкідливими речовинами, які входять до складу ЗА, що утворюються при наплавленні вуглецевих і низьколегованих сталей з рутиловим покриттям є марганець, а при використанні електродів з покриттям основного виду – сполуки фтору (особливо газоподібні).

Одночасно з ЗА та газоподібними сполуками фтору в складі аерозолів можуть бути і такі шкідливі гази, як оксиди азоту та монооксид вуглецю.

Шкідливі речовини у вигляді газів нейтралізуються, переважно, поглинанням рідкими реагентами (абсорбцією) і твердими речовинами (адсорбцією). Деякі газоподібні речовини нейтралізуються спаленням (окисненням).

Очищення повітря від пилу (аерозолів) здійснюється за допомогою спеціального обладнання різних конструкцій в залежності від розмірів частинок пилу: грубе очищення (10...50 мкм), середнє (більше 1 мкм) і тонке (менше 1 мкм). Для цього застосовуються циклони та пилоосаджувальні камери, принцип дії яких базується на використанні сил тяжіння та інерції; волокнисті (тканинні) та рукавні фільтри, виготовлені із натуральних матеріалів (бавовна, льон, вовна) та синтетичних (поліамідні, поліпропіленові та інші волокна); ротаційні пиловловлювачі (у вигляді радіальних вентиляторів); електрофільтри, що уловлюють аерозолі за рахунок заряджання їх частинок в електричному полі і подальшому осаджуванні.

Циклони застосовуються для грубого очищення від пилу з розміром частинок 15...20 мкм (ступінь очищення – 95...99%), тому для уловлювання зварювальних аерозолів не можуть використовуватись. Їх можна застосовувати лише для попередньої очистки і установлювати перед апаратами більш тонкого очищення, наприклад перед електрофільтрами. В рукавних фільтрах досягається високий ступінь очищення повітря (98...99%) від тонкодисперсного пилу (аерозолів) з діаметром частинок більше 1 мкм. Електростатичні фільтри здатні забезпечити тонке очищення повітря (до 95% і вище) від пилу, в тому числі зварювальних аерозолів, з діаметром частинок від 0,005 до 0,01 мкм.

Існують також масляні і ультразвукові фільтри для тонкого очищення відносно чистого повітря при подачі повітря в приміщення (ефективність очищення повітря складає 90-99,9%).

Для уловлювання зварювальних аерозолів в системах вентиляції та фільтровентиляційних агрегатах застосовуються електростатичні, тканинні, паперові та комбіновані фільтри [42].

В результаті виконання технологічного процесу НПЕ утворюються не-догарки електродів, абразивні круги, абразивно-металевий пил, шлаки зварю-вальні тощо. Всі вони відносяться до промислових відходів 4-го класу небез-пеки (мало небезпечні) [45...47]. Утилізацію таких відходів виконують спеці-алізовані переробні підприємства, які мають на цей вид діяльності відповідні ліцензії.

### **Висновки.**

1. Порівняно з одиничним електродом шкідливі викиди при НПЕ суттєво збільшують вентиляційні навантаження та коливаються в залежності від складу гребінки.

2. Отримана графічна залежність продуктивності місцевого відсмокту-вача від відстані між поверхнею наплавлення та приймальним отвором при умові забезпечення швидкості повітря в робочій зоні  $0,55 \pm 0,05$  м/с.

3. Стаціонарними відсмоктувачами неможливо якісно забезпечити  $w_{PI} = 0,55$  м/с.

4. При НПЕ конструкційних вуглецевих сталей слід надавати перевагу маркам електродів з меншими викидами, наприклад, УОНІ-13/45, УОНІ-13/55.

5. Слід уникати при НПЕ великих діаметрів електродів, або використовувати не більше двох в пучку, що знизить необхідну продуктивність місцевої ве-нтиляції на третину.

6. Існуючі пересувні вітчизняні ФВА не забезпечують необхідну проду-ктивність. Для НПЕ потрібно розробляти спеціальні ФВА та жорстко регламе-нтувати перебування людини в робочій зоні.

## Загальні висновки.

1. З'ясовано: покриті електроди складають 78% зварювальних матеріалів в Україні; наплавлення методом ПЕ дозволяє збільшити продуктивність в два рази, а автоматизація НПЕ – усунути недоліки процесу. Автоматизація НПЕ – актуальне завдання.

2. Сформульовані ТВ до установки автоматизованого НПЕ. Переміщення ПЕ: три лінійні координати; хід – до 400 мм; точність – не гірше  $\pm 0,25$  мм; швидкість – до 10 мм/с. ПЕ: форма – гребінка; кількість електродів – три; діаметр електродів – 3...5 мм; тримач – змінна насадка для кожного сортаменту. Загальний струм наплавлення – до 500 А. Переміщення деталі: обертання – кут  $360^\circ$ , частота – до 10 об/хв; нахил: кут – від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , частота – до 2 об/хв; точність позиціонування планшайби та шпинделя –  $\pm 1^\circ$ , хід підйомника – 200 мм.

3. Виконаний силовий розрахунок та перевірка на міцність та жорсткість ключових вузлів при навантаженні 14 кг показали, що слабке місце конструкції – цапфа валу траверси (мін. запас –21 %) та черв'ячне колесо редуктора (чавун – запас -1%, бронза – запас +23%). Рішення проблеми – застосування мотор-редукторів з обох боків траверси. Навантаження можна збільшити багаторазово.

4. Складено загальний технологічний процес, отримана апроксимаційна залежність струму наплавлення від електродів діаметром до 6 мм та кількістю до 6 штук. Виконаний розрахунок режиму НПЕ для гребінки  $\varnothing 3 \times 3$ . Створено діючий макет установки на базі верстату 4Б723М та систему відеоспостереження процесу НПЕ. Отримані зображення краплевідокремлення та міграції дуги.

5. Виконано ручне дугове заплавлення отвору та напіваавтоматичне наплавлення плоскої поверхні зразку з сталі 20 методом ПЕ. Металографічні дослідження показали: макро- та мікроструктури – аналогічні звичайному процесу; ЗТВ – збільшена; лінія сплавлення – значна нерівномірність вздовж та поперек валика; в наплавленому металі присутні пори та шлакові включення.

Причини дефектів: коливання довжини дуги та швидкості пучка, неоптимальна техніка наплавлення. Рішення – автоматизоване ведення процесу НПЕ.

6. Встановлено: шкідливі викиди суттєво збільшують вентиляційні навантаження та коливаються в залежності від складу ПЕ; стаціонарними відсмоктувачами неможливо якісно забезпечити  $w_{PI} = 0,55$  м/с. Існуючі пересувні ФВА не забезпечують необхідну продуктивність. Для НПЕ необхідно розробляти спеціальні ФВА та жорстко регламентувати перебування людини в робочій зоні.

## Список використаних джерел інформації.

1. Лашенко Г. І. Сучасні технології зварювального виробництва / Київ: «Екотехнологія», 2012. – 720 с.
2. Воцанов К. П. Ремонт обладнання зварюванням / Москва: «Машинобудування», 1967. – 192 с.
3. Костін О. М., Ярослав О.О., Ярослав Ю.О., Савенко О.В. Комплекс УПЕ-500 для визначення зварювально-технологічних характеристик покритих електродів // Київ: Автоматичне зварювання, 2021. № 8. С. 47 – 52.
4. Технологія електричного зварювання металів та сплавів плавленням / Під ред. акад. Б. Є. Патона // Москва: «Машинобудування», 1974. – 768 с.
5. Малишев Б. Д., Мельник В. І., Гетія І. Г. Ручне дугове зварювання / Москва: «Будвидат», 1990. – 320 с.
6. Рябцев І. О., Сенченков І. К. Теорія та практика наплавних робіт / Київ: «Екотехнологія», 2013. – 400 с.
7. Андрєєв С. Б., Головченко В. С., Горбач В. Д., Русо В. Л. Основи зварювання суднових конструкцій // СПб.: «Суднобудування», 2006. – 552 с,
8. Черноіванов В. І., Голубев І. Г. Відновлення деталей машин (Стан та перспективи) / Москва: «Росінформагротех», 210. – 376 с.
9. Щербаков Ю. В., Кашфуллін А. М. Сучасні способи відновлення та зміцнення деталей: навчальний посібник / Перм: ИПЦ «Прокрость», 2018. – 191 с.
10. Балякін О. К. Технологія та організація судноремонту / Москва: «Транспорт», 1974. – 352 с.
11. Малиновський М. А. Технологія та організація судноремонту / Москва: «Транспорт», 1973. – 264 с.
12. Покудін В. Г., Віхров М. М. Технологія судноремонту: Підручник / СПб: «ПаркКом», 2007. – 424 с.
13. Кондратьєв Є. Т., Кондратьєв В. Є. Відновлення наплавленням деталей сільськогосподарських машин / Москва: «Агрпромвидат», 1989. – 95 с.



14. Гуменюк І. В., Іваськів О. Ф., Гуменюк О. В. Технологія електродугового зварювання: Підручник / Київ: «Грамота», 2006. – 512 с.
15. Лупачьов В. Г. Ручне дугове зварювання: Підручник / Мінськ: «Вища школа», 2006. – 416 с.
16. Мазель О. Г. Технологічні властивості електрозварювальної дуги / Москва: «Машинобудування», 1969. – 178 с.
18. Овчиников В. В. Ручне дугове зварювання (наплавлення, різання) покритим електродом, що плавиться: Підручник / Москва: «Академія», 2019. – 208 с.
19. Меліков В. В. Багатоелектродне наплавлення / Москва: «Машинобудування», 1988. – 144 с.
20. Володін В. С. Метод ручного дугового електрозварювання пучком електродів / Москва: «Машгвид», 1947. – 24 с.
21. Володін В. С., Головінцев М. Г. Способи швидкісного дугового електрозварювання та досвід їх застосування / Москва: «Держпалтехвид», 1952. – 68 с.
22. Нємцева Е. П. Досвід застосування метода зварювання пучком електродів на судноремонтному заводі імені Паризької Комуні / Москва: «Морський транспорт», 1955. – 28 с.
23. Фрумін І. І. Автоматичне електродугове наплавлення / Харків: «Металургвид», 1961. – 421 с.
24. Віноградов В. С. Обладнання і технологія дугового автоматичного та механізованого зварювання: Підручник / Москва: «Академія», 1997. – 319 с.
25. ГОСТ 9466–75 Електроди покриті металеві для ручного дугового зварювання сталей та наплавлення. Класифікація і загальні технічні умови.
26. Офіційний сайт групи компаній «ПлазмаТек» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://plasmatec-weld.com.ua>.
27. Офіційний сайт Державного підприємства "Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона

Національної академії наук України" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://paton-ozsm.com.ua/pro\\_zavod.html](http://paton-ozsm.com.ua/pro_zavod.html).

28. Офіційний сайт Товариства з обмеженою відповідальністю «Суми-Електрод» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://frunze-elektrod.com>.

29. Рентюк В. Крокові двигуни: промислові рішення / СПб: «Компоненти та технології», 2014. № 8. С. 113–116.

30. Рентюк В. Крокові двигуни та особливості їх застосування / СПб: «Компоненти та технології», 2013. № 10 С. 71–78.

31. Драган С. В. Розрахунки вузлів і механізмів складально-зварювальної оснастки: навчальний посібник / Миколаїв: НУК, 2020. – 108 с.

32. Севбо П. І. Конструювання та розрахунок механічного зварювального устаткування / Київ: «Наукова думка», 1978. – 400 с.

33. Карпенко А. С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві : навчальний посібник / Київ : «Арістей», 2005. – 268 с.

34. Євстифеев Г. О., Веретенников І. С. Засоби механізації зварювального виробництва. Конструювання та розрахунок / Москва: «Машинобудування», 1977. – 96 с.

35. Чвертко А. І., Патон В. Є., Тимченко В. А. Обладнання для механізованого дугового зварювання та наплавлення / Москва: «Машинобудування», 1981. – 264 с.

36. Технологія електричного зварювання металів та сплавів плавленням / під ред. акад. Б. Є. Патона // Москва: «Машинобудування», 1974. – 768 с.

37. HYUNDAI WELDING CONSUMABLES. 15<sup>th</sup> edition [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

[https://www.hyundaiwelding.com/data/file/download/product/Catalogue%20\(English%2015th%20Edition\)\\_eng.pdf](https://www.hyundaiwelding.com/data/file/download/product/Catalogue%20(English%2015th%20Edition)_eng.pdf)

38. Моравецький С. І. Відокремлюваність шлакової кірки при дуговому зварюванні (Огляд). Ч.1. Механізм хімічного зціплення шлакової кірки з металом шву // Київ: Автоматичне зварювання, 2011. № 1. С. 32 – 36.

39. Моравецький С. І.. Відокремлюваність шлакової кірки при дуговому зварюванні (Огляд). Ч.2. Характер впливу основних факторів на відокремлюваність шлакової кірки // Київ: Автоматичне зварювання, 2011. № 2. С. 22 – 26.

40. Офіційний сайт Товариства з обмеженою відповідальністю Виробничо-комерційне підприємство «Українська Південна компанія» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrodes.prom.ua/ua/>

41. Чижииков Г. І., Гринь О. Г., Менафова Ю. В. Короткий курс лекцій по дисципліні «Охорона праці в галузі» для студентів спеціальності зварювальне виробництво / Краматорськ: ДДМА, 2005. – 179 с.

42. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник / Київ: КПІ, 2018. – 181 с.

43. Брауде М. З., Воронцова О. І., Некрилов В. П., Тамбовцев В. О., Ландо С. Я. Охорона праці при зварюванні в машинобудуванні / Москва: «Машинобудування», 1978. – 144 с.

44. Писаренко В. Л., Рогинський М. Л. Вентиляція робочих місць в зварювальному виробництві / Москва: «Машинобудування», 1981. – 120.

45. Офіційний сайт Кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/07/ФВА-Темп-2000.pdf>

46. Закон України «Про відходи» від 5 березня 1998 року № 187/98-ВР.

47. Державний Класифікатор відходів ДК 005–96.

48. ДСанПіН 2.2.7.029–99 «Гігієнічні вимоги поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення».

49. Бурлака В. В., Гулаков С. В. Пристрій для збудження та стабілізації зварювальної дуги // Київ: Автоматичне зварювання, 2016. № 11. С. 48 – 51.

50. Методика розрахунку виділень (викидів) забруднюючих речовин в атмосферу при зварювальних роботах (на основі питомих показників) / СПб: НДІ «Атмосфера», 1997. – 39 с.

51. СП 1009–73 «Санітарні правила при зварюванні, наплавленні та

різанні металів» / Москва: Мінздрав, 1973. – 28 с.

52. Володін В. С., Щеканенко А. С. Швидкісний метод ручного дугового електрозварювання пучком електродів / Москва: «Вуглетехвидат», 1947. – 13 с.

53. ДСТ 12.1.005–88 Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони.

54. Торговніков Б. М., Табачник В. Ю., Єфанов Є. М. Проектування промислової вентиляції: Довідник / Київ: «Будівельник», 1983. – 256 с.

55. Офіційний сайт фірми Kollmorgen (USA) [Електронний ресурс]. –

Режим доступу:

[https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/public\\_downloads/Nema\\_42\\_N4\\_K4\\_Stepper\\_Systems\\_TB.pdf](https://www.kollmorgen.com/sites/default/files/public_downloads/Nema_42_N4_K4_Stepper_Systems_TB.pdf)

56. Kollmorgen Stepper Solutions Catalog including AC Synchronous Motors 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

[https://www.mecapedia.uji.es/catalogos/motor\\_electrico/kollmorgen.1.pdf](https://www.mecapedia.uji.es/catalogos/motor_electrico/kollmorgen.1.pdf)

57. ISO 281:2007(E) Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life: Second edition, 2007-02-15.

58. Спіцин М. О., Яхін Б. О., Перегудов В. Н., Забулонов І. М. Розрахунок та вибір підшипників кочення: Довідник / Москва: «Машинобудування», 1974. – 56 с.

59. Єрьомін В. Д., Стрельников Г. П. Геометричні характеристики плоских фігур: Практикум / Ростов-на-Дону: ДДТУ, 2024. – 44 с.

60. Кауров П. В., Петров С. Г. Визначення геометричних характеристик плоских фігур: Посібник / СПб: ВШТЕ, 2019. – 40 с.

61. Чернавський С. О., Боков К. М., Чернин І. М., Іцкович Г. М., Козинцов В. П. Курсове проектування деталей машин: Посібник / Москва: «Машинобудування», 1988. – 416 с.

62. Чернилевський Д. В. Курсове проектування деталей машин та механізмів / Москва: «Вища школа», 1980. – 238 с.

63. Чернавський С. О., Снесарев Г. А., Козинцов В. П., Боков К. М.,

Іцкович Г. М., Чернилевський Д. В. Проектування механічних передач: Посібник / Москва: «Машинобудування», 1984. – 560 с.

64. ДСТ 2144–76 Передачі черв'ячні циліндричні. Основні параметри.

65. ДСТ 2675–80 Патрони самоцентруючі трикулачкові. Основні розміри.

66. ДСТ 3890–82 Патрон чотирикулачковий з незалежним переміщенням кулачків. Основні та приєднувальні розміри.

67. ДСТ 16518–87 Лещата верстатні з ручним та механізованим приводами. Загальні технічні вимоги.

68. Лузін В. М., Смольянинов А. В. Технологія конструкційних матеріалів. Розділ «Відновлення зношених деталей». Частина 1: Методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань / Омськ: ОДУШС., 2005. 26 с.

69. Корчагін І. Б., Пешков В. В. Розрахунок параметрів режиму електродугового зварювання (наплавлення): методичні вказівки / Воронеж: Вид-во ВДТУ, 2021. 21 с.

70. Троїцький В. О. Короткий посібник з контролю якості зварних з'єднань / Київ: Фенікс, 2006. 320 с.

71. Довнар А. Д., Рогач О. Ю. Кінематика та динаміка ножичного підйомника: матеріали МНК «Інформаційні технології та системи 2021» / Мінськ: БДУіР, 2021. С. 34 – 35.

72. Рогач О. Ю. Система керування ножичним підйомником: матеріали 58-ої НК «Інформаційні технології та управління 2022» / Мінськ: БДУіР, 2022. С. 11–12.