

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона  
Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

До захисту допущено

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Олексій КАГЛЯК

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту освітнього ступеня **бакалавр**

зі спеціальності **131 Прикладна механіка**

на тему:

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛАЗЕРНОГО РОЗДІЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Студент групи МЛ-81 \_\_\_\_\_ Андрій КОТАЛЕВИЧ

Керівник \_\_\_\_\_ Віктор ДУБНЮК

Рецензент \_\_\_\_\_ Денис СТЕПАНОВ

Київ 2022 р.

# Зміст

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Завдання .....                                                                            | 3  |
| Вступ.....                                                                                | 5  |
| 1. Постановка задачі.....                                                                 | 7  |
| 1.1. Опис оброблюваних деталей.....                                                       | 7  |
| 1.2. Матеріал заготовки .....                                                             | 10 |
| 2. Опис процесу газолазерного різання .....                                               | 12 |
| 2.1. Загальна характеристика процесів лазерного розділення металів.....                   | 12 |
| 2.2. Вплив режимів обробки на якісні показники різання .....                              | 12 |
| 2.3. Вплив оптичних параметрів на результати різання.....                                 | 15 |
| 2.4. Вплив газодинамічних параметрів подачі газу на результати лазерного<br>різання ..... | 22 |
| 2.5. Особливості ГЛР вуглецевих та нержавіючих сталей .....                               | 30 |
| 3. Розробка технологічного процесу ГЛР .....                                              | 34 |
| 3.1. Визначення режимів різання.....                                                      | 34 |
| 3.2. Опис технологічного процесу.....                                                     | 35 |
| 3.3. Виготовлення набору деталей з листової заготовки .....                               | 37 |
| 4. Лазерний технологічний комплекс для ГЛР .....                                          | 41 |
| 4.1. Структурна схема .....                                                               | 41 |
| 4.2. Компонівка ЛТК.....                                                                  | 42 |
| 4.3. Вибір технологічного лазера.....                                                     | 43 |
| 4.4. Стіл технологічний.....                                                              | 46 |
| 4.4. Завантажувач – система подачі листових заготовок .....                               | 50 |
| 4.4.1. Бункер завантажувача.....                                                          | 50 |
| 4.4.2. Розрахунок пневматичного захвату завантажувача .....                               | 52 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.3. Розрахунок конічної зубчастої передачі приводу підйомника бункера .... | 54 |
| 4.4.4. Розрахунок гвинтового механізму приводу підйомника бункера .....       | 59 |
| 4.5. Об'єктив .....                                                           | 62 |
| 4.6. Лазерний технологічний комплекс.....                                     | 63 |
| Література .....                                                              | 64 |

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 2    |

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
**"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**  
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона  
**КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 131 ПРИКЛАДНА МЕХААНІКА**

**"Затверджую"**

В. о. завідувача кафедри ЛТФТ

\_\_\_\_\_ Олексій КАГЛЯК  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.

## **Завдання**

на дипломний проєкт студента  
**Коталевича Андрія Віталійовича**

1. Тему проєкту **"Розробка технології та обладнання лазерного різання листових матеріалів"** та керівник проєкту ст. викл. Дубнюк Віктор Леонідович затверджено наказом № \_\_\_\_\_ по університету від " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.
2. Термін здачі студентом завершеного проєкту: 13 червня 2022 р.
3. Дані до проєкту:
  1. Кресленики деталей, що обробляються.
  2. Перелік матеріалів, з яких виготовлено оброблювані деталі.
  3. Товщина металевого листа у межах 2...10 мм.
  4. Технічна документація на лазерне та інше технологічне обладнання.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
  1. Основи лазерного різання вуглецевих і нержавіючих сталей.
  2. Технологія лазерного різання та компонування лазерних технологічних комплексів.
  3. Розробка технологічного процесу та розрахунок параметрів різання.
  4. Лазерний технологічний комплекс для впровадження розробленого процесу.
  5. Розрахунок та конструювання системи фокусування лазерного проміння.
  6. Розрахунок та конструювання системи завантаження заготовок.
- 5 Перелік графічного матеріалу:
  1. Кресленики оброблюваних деталей.
  2. Технологічний процес лазерного розділення матеріалів.
  3. Оптична система, яка забезпечує лазерне різання листового металу.
  4. Система завантаження заготовок.
  6. Компонування та загальний вигляд лазерного технологічного комплексу.
6. Дата видачі завдання: 02 травня 2022 р.

Керівник проєкту \_\_\_\_\_

Завдання прийнято до виконання \_\_\_\_\_

## 7. Календарний план:

| №<br>пп | Найменування етапу дипломного проекту                                     | Термін<br>виконання<br>етапу проекту | Примітки |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| 1       | Аналіз особливостей процесу лазерного розділення металів                  | 02.05.22 р.-<br>-08.05.22 р.         |          |
| 2       | Розробка та розрахунок технологічного процесу лазерного різання           | 09.05.22 р.-<br>-15.05.22 р.         |          |
| 3       | Розробка оптичної системи концентрації лазерного проміння                 | 16.05.22 р.-<br>-22.05.22 р.         |          |
| 4       | Розробка та розрахунок технологічного оснащення та пристосувань           | 23.05.22 р.-<br>-29.05.22 р.         |          |
| 5       | Проектування комплексу для проведення розробленого технологічного процесу | 30.06.22 р.-<br>-05.06.22 р.         |          |
| 6       | Оформлення пояснювальної записки і підготовка графічної частини проекту   | 06.06.22 р.-<br>-13.06.22 р.         |          |

Студент-дипломник \_\_\_\_\_

Керівник проекту \_\_\_\_\_

## Вступ

Різання металевих матеріалів широко застосовується як в заготівельних цехах, так і для подальшого їх оброблення для виготовлення деталей машин і приладів.

В даний час для обробки важко оброблюваних матеріалів застосовуються електрофізичні та електрохімічні методи, до яких відносяться анодно-механічне, електроерозійне, плазмове, електронно-променеве та лазерне різання.

За допомогою електронно-променевого різання, що базується на випаровуванні оброблюваного матеріалу електронним променем у вакуумі, можна різати як металеві, так і неметалеві матеріали. Процес забезпечує порівняно високу продуктивність, малі ширину різку і зону термічного впливу (ЗТВ), високу якість різку. Можлива обробка по складному контуру.

Недоліками електронно-променевої обробки є необхідність поміщати деталі у вакуумну камеру; застосування складного і незручного в експлуатації обладнання та спеціальних захисних пристроїв від рентгенівського випромінювання.

Плазмове та кисневе різання широко застосовується для розкрою листового металу. При різанні нелегованих та низьколегованих сталей товщиною більше 5...10 мм найбільш вигідно застосовувати кисневе різання. Плазмове різання використовується для важко оброблюваних металів та легованих сталей товщиною 5...150 мм.

Для визначення доцільності застосування того чи іншого методу різання необхідно розглядати три параметри:

- 1) конкурентоспроможність;
- 2) межі застосування;
- 3) переваги в порівнянні з іншими методами.

Найбільш доцільно лазерне різання застосовувати при розкрої листів із сталей, титанових сплавів та кольорових металів товщиною до 5...10 мм,

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 5    |

неметалевих матеріалів товщиною до 20 мм для дрібних та середніх партій деталей (до 1000 шт.), Особливо при обробці по складному контуру.

При обробці дрібних партій деталей витрати зменшуються в 2...4 рази в порівнянні з розділенням гільйотинними ножицями або штампуванням за рахунок усунення операції розмітки. Значно знижуються відходи матеріалу.

Переваги лазерного різання в порівнянні з іншими методами обробки:

- можливість обробки широкої номенклатури матеріалів;
- мала ширина різу;
- висока продуктивність;
- незначна зона термічного впливу та деформація;
- легка автоматизація процесу.

Тому лазерне різання вважається високоефективним та маловідходним процесом розрізання матеріалів, а в ряді випадків єдиним методом отримання унікальних мікропазів та різів, особливо у важко оброблюваних матеріалах.

Область застосування лазерного різання обмежена досягнутим в даний час рівнем потужності лазерних установок та поширюється на металеві матеріали товщиною до 30 мм.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 6    |

# 1. Постановка задачі

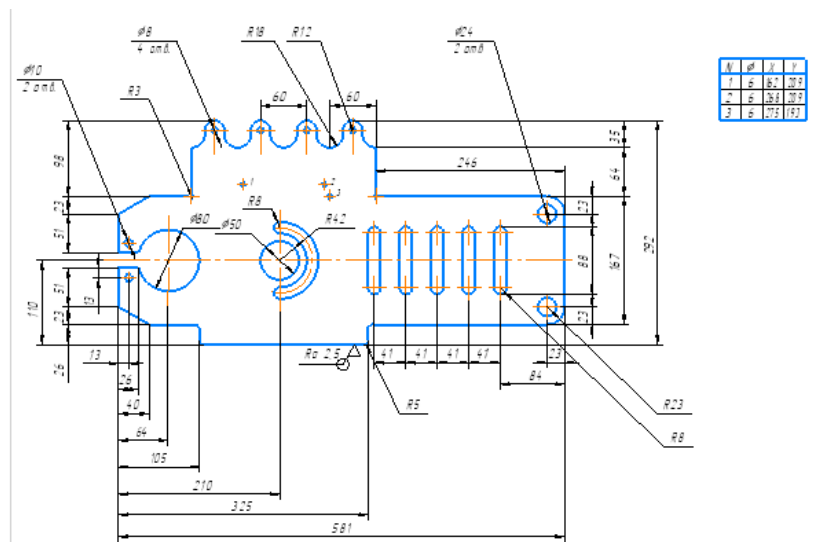
## 1.1. Опис оброблюваних деталей

У даному дипломному проєкті пропонується розробити технологічний процес газолазерного різання листових заготовок максимального розміру 2500\*1250 мм з вуглецевих та нержавіючих сталей товщиною 2...10 мм, а також спеціалізований лазерний технологічний комплекс та обладнання для забезпечення розроблюваного процесу обробки. Приклади оброблюваних заготовок наведено на рисунку 1. Перелік деталей, розміщених на металевих листах, та їх кількість наведені у таблиці 1.

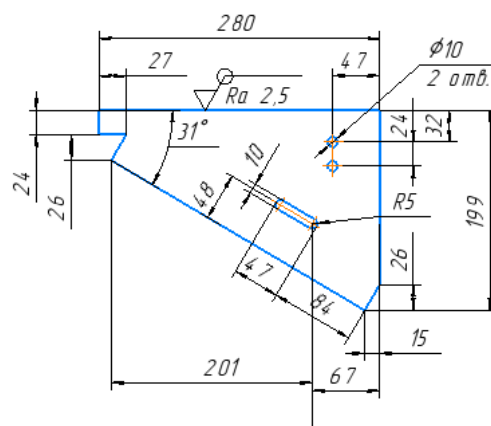
Заготовки представляють сталеві листи розмірів 2500\*1250 мм, товщина 2,0 мм. Деталі на листі розташовані найбільш оптимальним чином, що забезпечує найбільш повне використання матеріалу заготовки. Таке розташування проводиться спеціальними пакетами програм для персональних комп'ютерів.

Таблиця 1. Деталі, що вирізаються з листових заготовок.

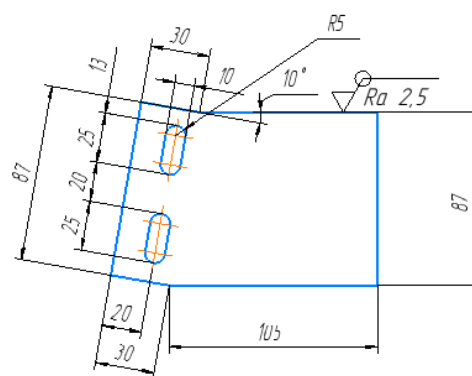
| № п/п | Найменування деталей, що виготовляються | Площа деталі, мм <sup>2</sup> | Маса, кг | Кількість деталей, шт |
|-------|-----------------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------|
| 1     | плита фланцева                          | 115139,3                      | 3,483    | 3                     |
| 2     | стінка бічна                            | 34396,61                      | 1,135    | 18                    |
| 3     | кронштейн                               | 11107,81                      | 0,369    | 16                    |
| 4     | основа                                  | 180231,73                     | 5,841    | 1                     |
| 5     | рама                                    | 171231,98                     | 5,716    | 5                     |
| 6     | фланець                                 | 5026,55                       | 0,151    | 2                     |
| 7     | кришка                                  | 9575                          | 0,319    | 10                    |



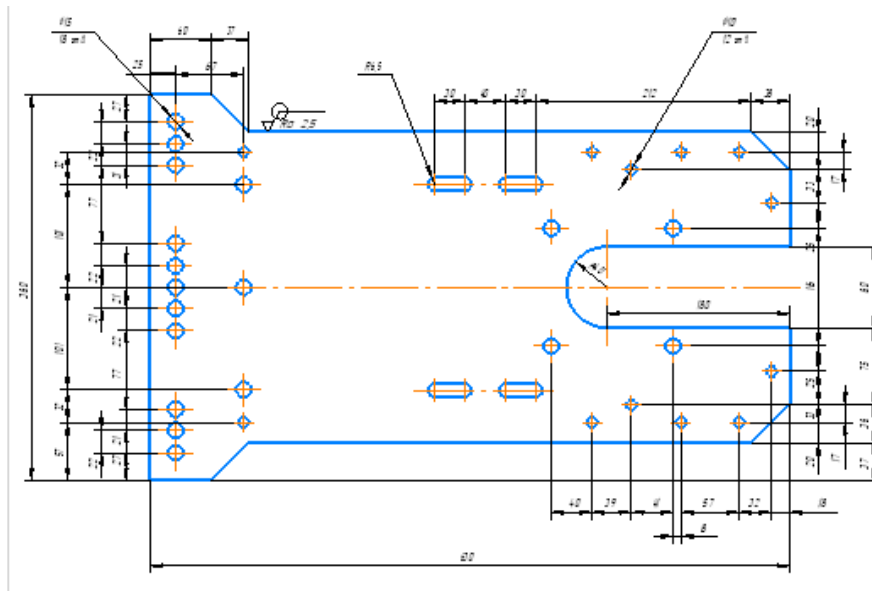
а



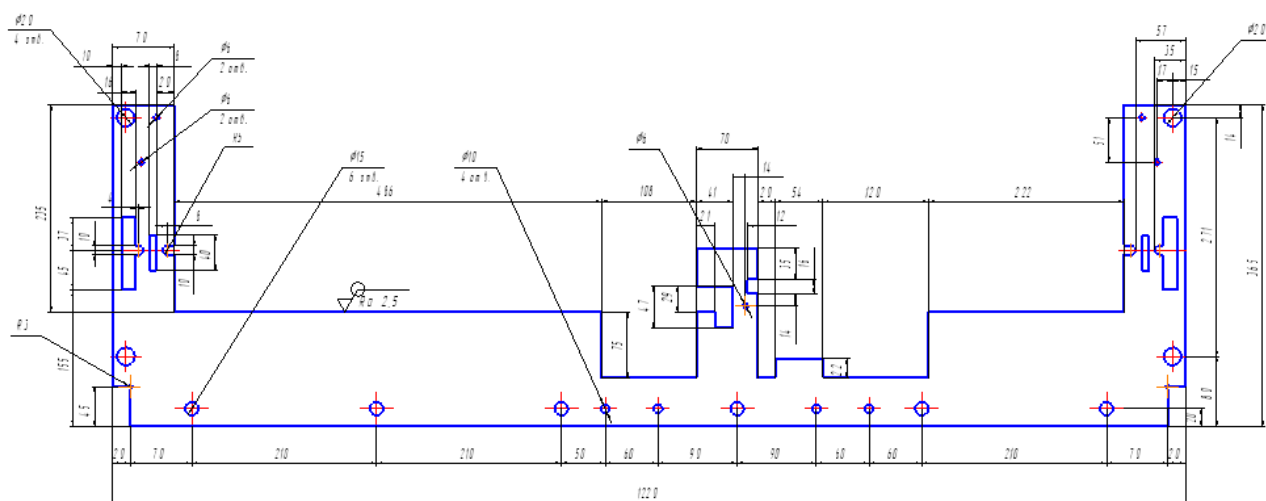
б



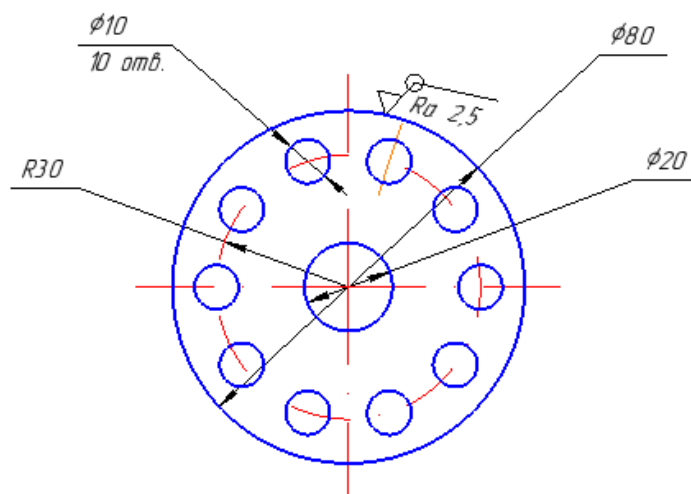
в



Г



Д



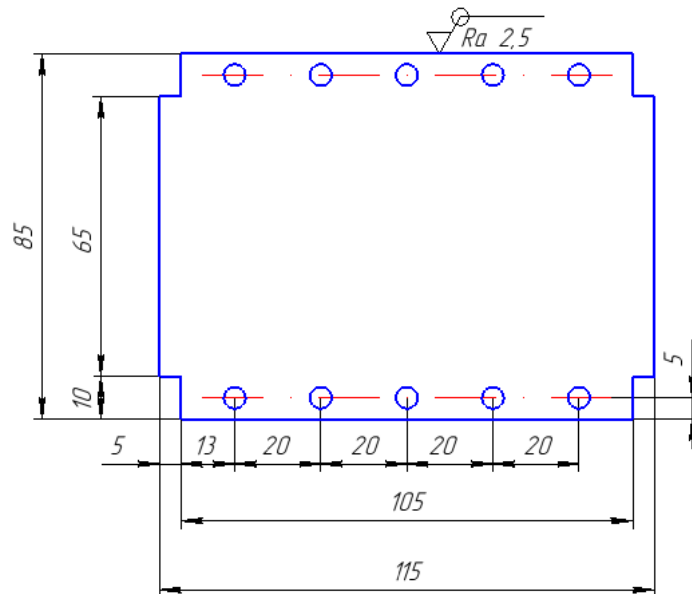
Е

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

МЛ81.00.00.000.ПЗ

Арк.

9



е

Рис. 1. Деталі, які необхідно виготовляти зі сталевих листів розміру 2500×1250×2,0 мм: а) Плита фланцева; б) Стінка бічна; в) Кронштейн; г) Основа; д) Рама; е) Фланець; є) Кришка.

## 1.2. Матеріал заготовки

Вуглецева сталь – сплав заліза з вуглецем (0,06...0,8 %) містить деяку кількість постійних домішок: марганець (до 0,7 %), кремній (до 0,4 %), сірка (до 0,06 %), фосфор (до 0,07 %) та газу.

Вуглецева сталь має високі механічні властивості, технологічність у обробці, що найбільшою мірою визначає працездатність, тобто стійкість та надійність деталей та конструкцій. Крім того, вуглецеві сталі є найбільш дешевими конструкційними матеріалами.

До вуглецевої сталі відносяться сталі звичайної якості (Ст1сп, БСт6сп), сталі для холодного штампування, цементовані (15, 20Х), покращувані (45, 40Х) тощо.

Наведемо приклад хімічного складу для вуглецевої сталі марки 20:

- вуглець – 0,17...0,24 %;
- марганець – 0,35...0,65 %;

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 10   |

- кремній – 0,17...0,37 %.

Нержавіючі (корозійностійкі) сталі відносяться до легованих сталей. Сталь називається легованою, якщо в процесі виплавки до неї додають легуючі елементи в підвищеній кількості – хром, нікель, ванадій, марганець, кремній тощо. Крім того, легована сталь відрізняється від вуглецевої меншим розміром зерна під час нагрівання при загартуванні; більшою прокалюваністю (можливість застосування деталей великого перерізу); можливістю використання при загартуванні менш агресивних середовищ для охолодження – олива, гарячі середовища (менша деформація деталі); більш високими механічними властивостями.

Нержавіюча сталь має стійкість проти електрохімічної корозії. Корозією називається процес поверхневого руйнування металу під впливом навколишнього середовища. У результаті корозії металів виходить з ладу велика кількість обладнання, транспортних засобів, металоконструкцій, що завдає величезної шкоди промисловості та транспорту.

До нержавіючих сталей відносяться хромисті (40X13, 08X17T) та хромонікелеві (12X18Н9, 10X14Г14Н3) сталі.

Наведемо приклад хімічного складу для нержавіючої сталі марки 10X14Г14Н3:

- вуглець – 0,09...0,14 %;
- марганець – 13,0...15,0 %;
- хром – 12,5...14,0 %;
- нікель – 2,8...3,5 %.

Вуглецеві та нержавіючі сталі широко використовуються в промисловості для виготовлення деталей, що відрізняються високою тривалістю терміну експлуатації, хорошою оброблюваністю та невисокою вартістю.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 11   |

## 2. Опис процесу газолазерного різання

### 2.1. Загальна характеристика процесів лазерного розділення металів

Лазерне різання засновано на тепловому впливі лазерного проміння та відбувається при безперервному або періодичному переміщенні джерела тепла, що сформовано у пляму з високою густиною потужності за допомогою спеціальної оптичної системи. У даний час для розкрою матеріалів більшого поширення набуло використання лазерів безперервної дії. При цьому можуть відбуватися різноманітні додаткові процеси: випаровування матеріалу, плавлення з додатковим видаленням розплаву із зони різку, хімічні реакції горіння, розкладання з виділенням летючих сполук тощо. Різання матеріалів безперервним промінням особливо ефективно при подаванні разом із лазерним променем струменя газу для видалення продуктів руйнування металу, а в деяких випадках ініціюючого хімічні реакції в місці впливу проміння на матеріал (газолазерне різання). У першому випадку використовують інертні або нейтральні гази (аргон, азот, вуглекислий газ), у другому – кисень або стиснене повітря. При подачі в зону обробки кисню на поверхні металу утворюється окисна плівка, що підвищує поглинальну здатність поверхні металу; тепло, що виділяється під час реакції горіння, разом з промінням витрачається на подальше руйнування металу; струмінь газу несе продукти руйнування та забезпечує приплив кисню безпосередньо до фронту горіння. Крім того, струмінь газу перешкоджає надмірному нагріванню оброблюваної деталі.

### 2.2. Вплив режимів обробки на якісні показники різання

Вивчення мікрорельєфу поверхні різку, виконаного за допомогою безперервного лазерного випромінювання в різних металах дозволяє простежити взаємозв'язок режимів обробки з якісними характеристиками отриманих різів. Поверхня різку при невисоких швидкостях обробки являє

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 12   |

собою сукупність порівняно рівномірно розташованих борозен. Для швидкостей, що перевищують певну межу (близько 2,5 м/хв.), різ виходить більш гладким. Для процесу газолазерного різання (ГЛР) металів можна виділити основні фактори, що визначають продуктивність та якісні показники процесу. Серед них основними є:

- густина потужності та потужність лазерного випромінювання;
- швидкість різання;
- тиск та склад газу для різання;
- розміри та конфігурація сопла для подачі газу;
- відстань від сопла до оброблюваної поверхні;
- поглинальна здатність поверхні заготовки;
- вигляд, склад та властивості оброблюваного матеріалу.

Густина потужності пучка, що підводиться в зону обробки, залежить у свою чергу, від потужності лазерного випромінювання, його модового складу, поляризації та умов фокусування (фокусної відстані лінзи, величини та напрямку розфокусування).

Поняття якості при ГЛР металів має досить багато загальних характеристик з іншими термічними способами різання. Якість визначають наступні показники (рис. 2):

- точність різання, обумовлена збігом розмірів вирізаної деталі із заданими розмірами;
- шорсткість  $R_z$ ;
- неперпендикуляр-

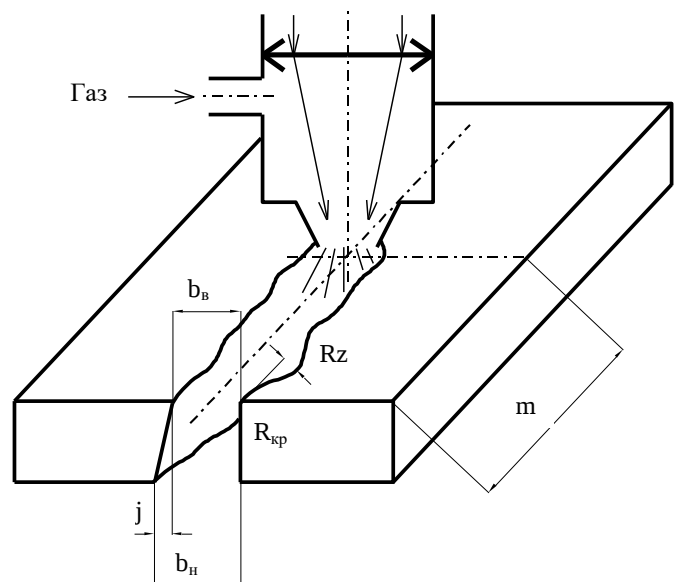


Рис. 2. Параметри різ:  $R_z$  – шорсткість;  $j$  – неперпендикулярність;  $b_v$  та  $b_n$  – відповідно ширина різу вверху та внизу різ;  $R_{кр}$  – радіус оплавлення верхньої кромки;  $m$  – довжина різ.

ність (клиноподібність)  $j$ ;

- протяжність зони термічного впливу  $b_{зТВ}$ ;
- ширина різу  $b$ ;
- відставання лінії різу;
- кількість грату (напливи на нижній кромці різу);
- радіус оплавлення верхньої кромки  $R_{кр}$ .

При ГЛР металів на поверхні різу утворюються поглиблення (борозенки), що розташовуються рівномірно одне за іншим. Борозенки характеризуються трьома показниками: глибиною, частотою та формою (викривленням або так званим відставанням лінії різу), які в своїй сукупності визначають мікрогеометрію (шорсткість) поверхні різу. Ці борозенки відіграють роль концентраторів напружень, що впливають на втомну міцність металів. Для конкретного металу шорсткість залежить від теплових характеристик джерела теплоти, тобто лазерного випромінювання, параметрів струменя ріжучого газу та похибки координатного пристрою. На поверхні різу можна виділити три основні зони, що відрізняються одна від одної різним нахилом борозен та по відношенню до напрямку обробки та шорсткості (рис. 3).

Наявність зони I на поверхні різу характеризує руйнування, що періодично протікає від верхньої кромки всередину металу. Розташована нижче зони II хоч і формується безперервно, але також має борозневу структуру (менш виражену) внаслідок періодичного видалення продуктів руйнування із зони I. Нахил борозен зони II в напрямі, протилежному напрямку різання, визначається нахилом поверхні безупинно викликаного руйнування.

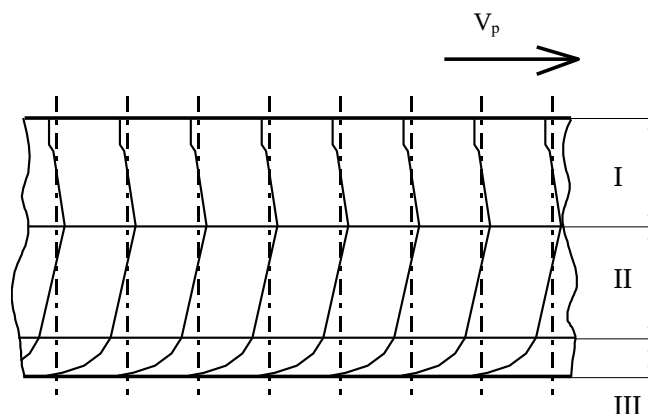


Рис. 3. Схема розташування борозен на поверхні різу на вуглецевій сталі.

При зниженні швидкості різання нахил борозен зменшується як для зони I, так і для зони II.

Наявність зони III на поверхні різу вказує на продовження процесу різання, але без участі лазерної енергії, а тільки лише за рахунок струменя газу та видудання з неї перегрітого розплавленого металу. При цьому швидкість прорізання металу різко знижується, про що свідчить значний нахил борозенок до крайки металу і, відповідно, знижується якість кромки різу. Основні закономірності лазерного різання якісно описуються теорією Свіфта-Хука-Джіка. Так при високій ефективності лазерного різання, коли втрати на теплопровідність значно нижче витрат на нагрівання та плавлення, ця теорія дає просте співвідношення для балансу енергії:

$$hV_p b (c\rho T_{пл} + L_{пл}) = \eta P_{\Sigma}, \quad (1)$$

де  $h$  – товщина оброблюваного металу;  $V_p$  – швидкість різання;  $b$  – ширина різу;  $c$  – питома теплоємність;  $\rho$  – густина металу;  $T_{пл}$  – температура плавлення;  $L_{пл}$  – питома енергія плавлення металу;  $P_{\Sigma}$  – сумарна потужність лазерного випромінювання та екзотермічної реакції окислення;  $\eta = \eta_e \eta_t$  – ефективність процесу ( $\eta_e$  – ефективний ККД,  $\eta_t$  – термічний ККД).

### 2.3. Вплив оптичних параметрів на результати різання

Оптичні параметри, що характеризують технологічний процес ГЛР, діляться на параметри: лазерної установки, системи фокусування та матеріалу.

До параметрів установки відносяться:

- радіус променя на виході з резонатора  $r_{п}$ ;
- розбіжність лазерного пучка  $\theta$ ;
- ступінь поляризації проміння;
- модовий склад проміння  $TEM_{mn}$ .

Параметри системи фокусування:

- фокусна відстань  $f$ ;
- радіус плями сфокусованого пучка  $r_0$ ;

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 15   |

- кут сходження променів після системи фокусування;
- глибина фокуса (довжина перетинки)  $z_f$ ;
- величина та напрям осьового зміщення фокальної площини системи фокусування відносно поверхні деталі, що розрізається.

Параметри матеріалу: відбивальна здатність, що залежить від природи матеріалу та стану його поверхні.

Розбіжність лазерного пучка залежить від параметрів оптичного резонатора. У дальній зоні ( $z \gg \pi r_n^2 / \lambda$ ) розбіжність для моди  $TEM_{00}$  визначається за формулою:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi r_n} \quad (2)$$

Для найбільш поширених типів технологічних лазерів розбіжність лазерного випромінювання знаходиться в межах: для  $CO_2$ -лазерів та рубінових лазерів – 1...10 мрад; для лазерів на ітрій-алюмінієвому гранаті з іонами неодиму – 2...20 мрад.

Для отримання оптимальних кількісних і якісних параметрів при ГЛР листового матеріалу необхідно мати плоско поляризований пучок з можливістю автоматичного обертання площини поляризації в залежності від напрямку різання. Таке обертання площини поляризації повинно виконуватися перед системою фокусування. Якщо відсутній пристрій обертання осі поляризації, то доцільно використовувати проміння з круговою поляризацією. В іншому випадку це може привести до небажаного нахилу кромки різку.

Одномодовий режим генерації вважається кращим у порівнянні з іншими формами розподілу, оскільки дозволяє здійснювати фокусування в пляму найменшого діаметру, тим самим досягається максимальна щільність потужності.

Це справедливо при різанні металів малої товщини, коли товщина листа порівняна з глибиною фокусу. При переході до різанні великих товщин отримання занадто вузьких різів, що визначаються малим діаметром пучка,

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 16   |

пов'язано зі збільшенням опору каналу видалення розплавленого металу із зони обробки. Це знижує якість обробки та може призвести до заплавлення різу. Наприклад, при збільшенні товщини листа з 2,5 до 7,5 мм, рекомендується збільшувати діаметр лазерного пучка з 0,1 до 0,2 мм. Таким чином, при різанні матеріалів великих товщин велике значення мають такі параметри, як кут сходження пучка та розподілення густини потужності.

Лазерний пучок може бути одно- або багатомодовим. Такий пучок на відміну від пучка моди  $TEM_{00}$  має складну структуру та більший кут розходження, що викликає збільшення діаметра пучка у фокусі. Для оцінки діаметра сфокусованого пучка можна скористатися виразом:

$$r_0 = f\theta(2m+1) = \frac{f\lambda}{\pi r_n}(2m+1) \quad (3)$$

Аналогічно розбіжність пучка на виході з резонатора зростає у відношенні  $(2m+1)$  зі збільшенням порядку моди, у порівнянні з модою  $TEM_{00}$ .

На рисунку 4 показані графіки зміни максимально досяжної глибини якісно виконаного різу у вуглецевих сталях від швидкості обробки при різних умовах фокусування. Як видно з графіку, зменшення фокальної плями викликає

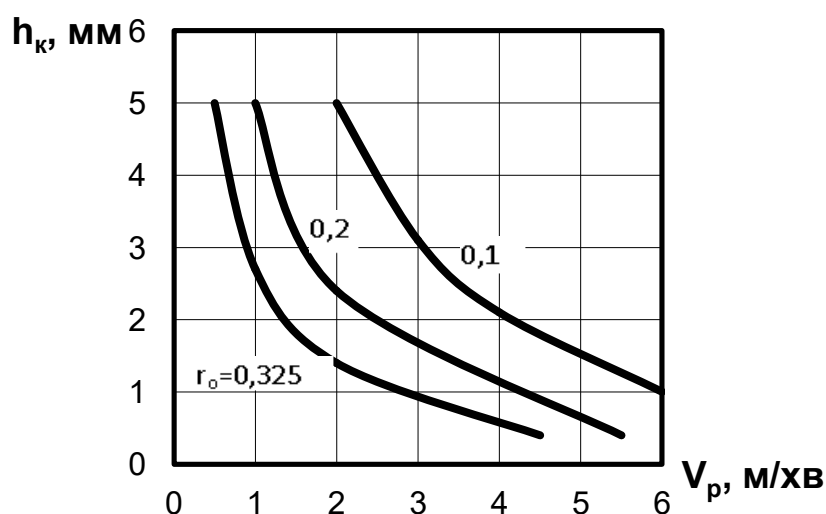


Рис. 4. Залежність глибини якісно виконаного різу від швидкості різання при різних умовах фокусування проміння.

зростання глибини якісно виконаного різь. Основною причиною такого зростання різь є підвищення густини потужності в зоні обробки.

Тому при різанні вуглецевих сталей необхідно прагнути до фокусування проміння в пляму меншого діаметру (використовувати випромінювачі з малою розбіжністю лазерного пучка, що працюють в одномодовому режимі, застосовувати короткофокусні лінзи) з метою підвищення густини потужності в зоні різання.

Трохи інакше впливають умови фокусування на глибину різь при обробці нержавіючих сталей. Залежності зміни найбільшої глибини  $h$  різь, але з низькою якістю його поверхні і глибини  $h_k$  різь з підвищеною якістю від швидкості обробки наведено на рисунках 5 та 6.

Для нержавіючих сталей глибина різь  $h$  зростає зі зменшенням діаметра плями фокусування з одночасним зниженням його якості. Глибина ж якісно виконаного різь для низьких швидкостей обробки значно вище при  $r_0=0,325$  мм, ніж при  $r_0=0,2$  мм: у першому випадку якісним є різь по всій глибині – зони I та II (рис. 3), а в другому – лише його верхня частина – зона I. Для різання товстолистового матеріалу доцільно обирати довгофокусні (до 300 мм) лінзи

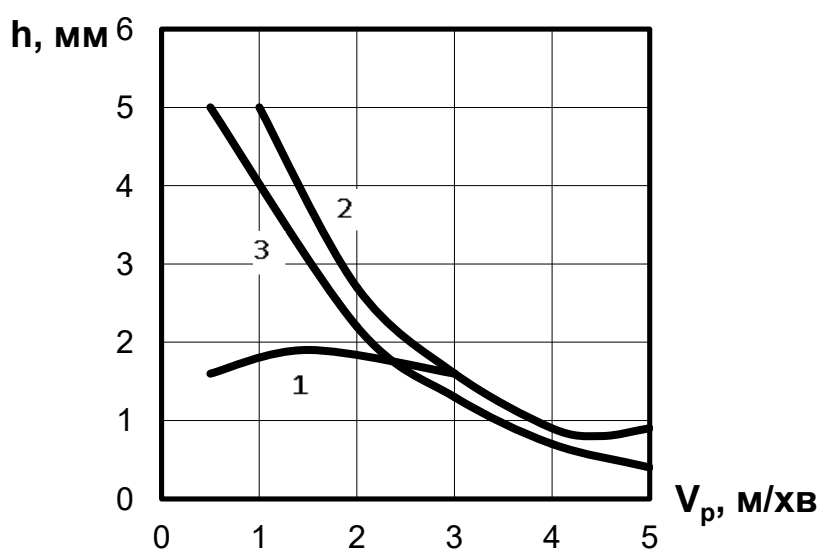


Рис. 5. Вплив швидкості обробки на глибину різь у нержавіючій сталі при різних умовах фокусування: 1 –  $h_k$  при  $r_0=0,2$  мм; 2 –  $h$  при  $r_0=0,2$  мм; 3 –  $h_k$  при  $r_0=0,325$  мм.

або об'єктиви, що забезпечують більшу глибину перетинки сфокусованого пучка. Використання лінз з малими фокусними відстанями (менше 50 мм) небажане через зростання ймовірності пошкодження лінзи внаслідок викидів матеріалу із зони обробки, а також через високу сферичну аберацію.

Оптимальне значення фокусної відстані  $f_{\text{опт}}$ , що відповідає мінімальному розміру плями фокусування тонкою плоско-опуклою лінзою з КСІ (хлориду калію) пучка діаметром  $2r_{\text{п}}$ :

$$f_{\text{опт}} = \left( \frac{2\pi K r_n^4}{\lambda} \right)^{1/3}; \quad (4)$$

де  $K$  – константа, що залежить від форми лінзи та показника заломлення матеріалу лінзи. Для плоско-опуклої лінзи з КСІ з показником заломлення  $n=1,46$   $K=0,235$ .

На практиці при виборі фокусної відстані  $f$  лінзи іноді користуються простою умовою забезпечення плями малого діаметру: відношення фокусної відстані  $f$  до діаметру лазерного пучка на апертурі лінзи має бути близько 2: 1.

Глибина фокусу – відстань від площини найменшого розміру пучка (площина перетинки) до площини, на якій відбувається задане збільшення

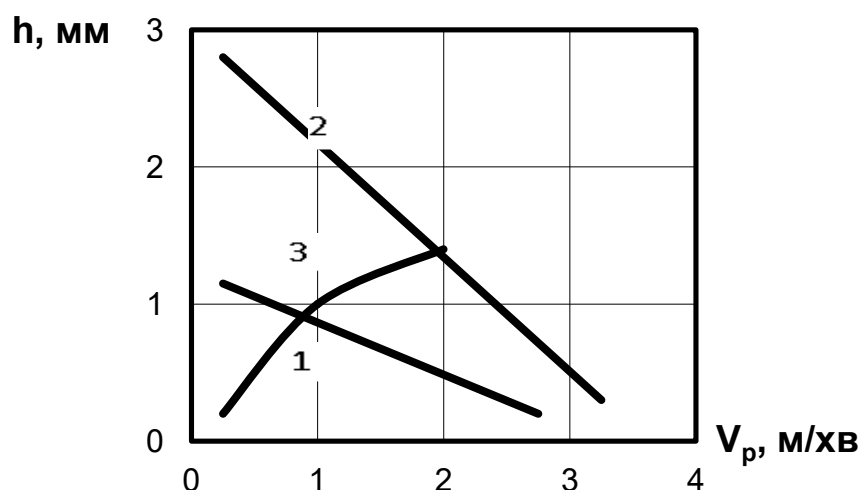


Рис. 6. Залежність глибини різання у титані від швидкості різання при різних умовах фокусування: 1 –  $h_k$  при  $r_0=0,2$  мм; 2 –  $h$  при  $r_0=0,2$  мм; 3 –  $h_k$  при  $r_0=0,325$  мм.

діаметра пучка. Збільшення діаметра пучка на 10 % в порівнянні з величиною  $2r_0$  в перетинці відповідає переміщенню щодо перетинки уздовж осі пучка на:

$$z_f = \pm \frac{0,46\pi r_0^2}{\lambda}. \quad (5)$$

Важливу роль при досягненні оптимальних умов фокусування лазерного проміння грає положення фокальної площини відносно поверхні, що розрізається. Розмірні характеристики різів в значній мірі визначаються цим зміщенням.

Залежності зміни розмірних параметрів різу в вуглецевих сталях від величини розфокусування  $\Delta f$  в обидві сторони від положення перетинки сфокусованого лазерного пучка для лінзи з фокусною відстанню  $f=100$  мм показані на рисунку 7. Як видно, оптимальні параметри різу (найбільша глибина та найменша ширина) відповідають розташуванню деталі в деякій зоні навколо перетинки пучка. Наявність такої зони з незмінними розмірними характеристиками (в даному випадку  $\pm 1,0$  мм) дозволяє не пред'являти вимог підвищеної точності до умов фокусування при лазерному різанні. Крім того, це

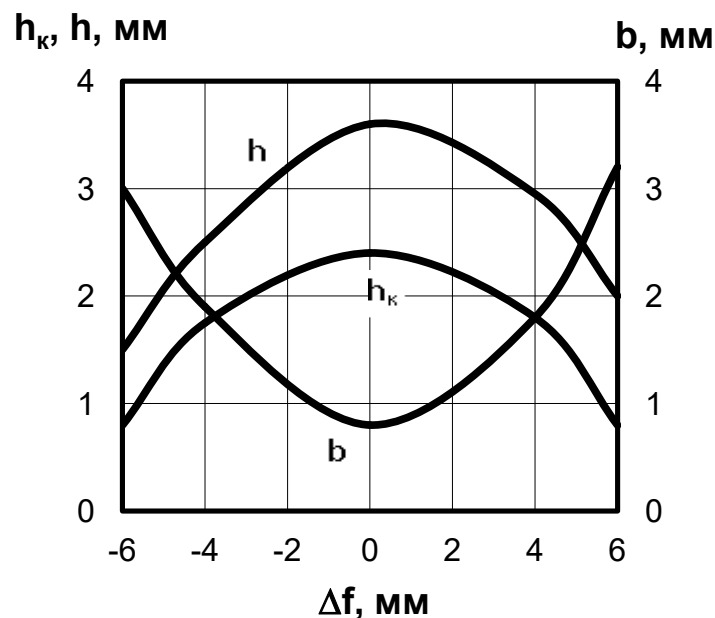


Рис. 7. Змінення глибини різу та його ширини в залежності від умов фокусування лазерного пучка.

дає можливість без спеціальних пристосувань та пристроїв розрізати деформовані листи, деформація яких не перевищує глибини зазначеної зони.

Великий вплив на параметри різання оброблюваного металу надає поглинальна здатність його поверхні. Поглинання проміння істотно залежить від мікрогеометрії поверхні (шорсткості), наявності оксидів, положення площини поляризації, довжини хвилі проміння та можливості утворення поглинаючої плазми.

Збільшення шорсткості поверхні металу призводить до збільшення її поглинальної здатності.

Тому піскоструминна обробка гладкої поверхні дозволяє підвищити швидкість обробки при різанні металів.

Поглиналину здатність поверхні можна збільшити за рахунок застосування спеціальних покриттів (фосфатування, оксидування). Однак збільшення поглинальної здатності таким чином грає роль тільки в початковий момент руйнування. Потім лазерне випромінювання руйнує тонку плівку покриття на поверхні матеріалу, і тому при подальшому поширенні руйнування вглиб металу стан його поверхневого шару не грає ніякої ролі.

Ширина різу більшою мірою, ніж його глибина, залежить від стану поверхні. З ростом поглинальної здатності поверхні металу, що розрізається, ширина різу істотно збільшується, тому що при цьому збільшується густина поглиненої верхньою кромкою лазерної потужності.

## 2.4. Вплив газодинамічних параметрів подачі газу на результати лазерного різання

Для виконання обов'язкової умови ГЛР – видалення рідкого розплаву (оксидів) із зони різання – необхідно створити уздовж всієї передньої стінки різку градієнт тиску  $\Delta p$ .

Мінімальний тиск газу, при перевищенні якого глибина різку не зростає, може бути визначено за формулою:

$$p_{\min} = \frac{1}{2} \frac{P^2 V_p^2}{b^2 \rho (ca)^2 \left( T_{nl} + \frac{L_{nl}}{c} \right)^2}; \quad (6)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності даного металу;  $P$  – потужність лазерного проміння.

Підвищуючи тиск та швидкість газу, можна не побоюватися зниження ефективності процесу ГЛР через охолодження металу.

Збільшення тиску інертного газу в струмені збільшує напругу течії, а, отже, й швидкість стікання рідкого розплаву. Це знижує витрати теплоти за рахунок теплопровідності та процес різання виходить на максимально можливу за даних умов швидкість, лімітуються лише стадії прогріву до температури плавлення, плавлення та теплові втрати (рис. 8, крива 1, витрата газу змінюється за рахунок змінення тиску газу).

Інша ситуація виникає при різанні в струмені хімічно активного газу, що окислює поверхню металу. Із зростанням товщини рідкого розплаву збільшується швидкість стікання оксидної плівки, що призводить до збільшення її товщини і, отже, до збільшення тепловиділення від хімічної реакції окислення металу. Це посилює вплив потужності лазерного випромінювання на швидкість різання.

При використанні кисню поліпшуються умови здування рідкого розплаву, що забезпечує необхідну витрату оксиду при меншій товщині оксидної плівки, що в свою чергу збільшує швидкість окислення та

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 22   |

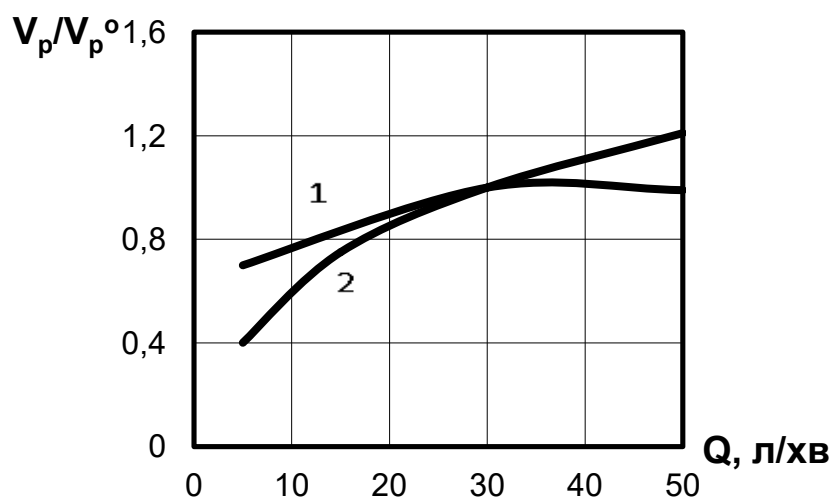


Рис. 8. Залежність швидкості різання від розходу технологічного газу ( $V_p$  – швидкість різання при  $Q=30$  л/хв): 1 – інертний газ; 2 – кисень.

тепловиділення, в результаті чого швидкість різання монотонно зростає (рис. 8, крива 2).

При обробці вуглецевих та нержавіючих сталей в зону обробки як допоміжний газу доцільно подавати кисень, тому що при використанні інертних газів або стисненого повітря глибина прорізання металу за інших рівних умов значно знижується. Наприклад, при різанні вуглецевої сталі на режимах  $P=900$  Вт,  $V_p=1$  м/хв та тиску піддування кисню  $p_o=0,15$  МПа глибина різку становить  $h=5,3$  мм, тоді як при використанні аргону глибина різку становить лише  $0,85$  мм, тобто у 6 разів менше.

Характер витікання газу при ГЛР не залежить від роду оброблюваного металу та визначається лише параметрами сопла та геометрією різку, що утворюється під дією лазерного проміння.

При перевищенні потоком газу швидкості звуку (при тиску газу всередині сопла  $p_o>0,2$  МПа) від поверхні, що розрізається, відходить стрибок ущільнення, що обмежує максимально досягну швидкість газу на вході в канал різку значенням швидкості звуку. Дана обставина є чинником, що також обмежує зверху ефективність різання металів в струмені інертного газу. При

різанні металів в струмені активного газу газодинамічні параметри потоку визначають кінетику окислення поверхні металу, для розрахунку реакцій якого необхідно мати більш детальне уявлення про структуру струменя, ніж при різанні металів хімічно інертних по відношенню до газу.

Відповідно до теорії кисневого різання струмінь кисню складається з ядра та прикордонного шару, що стикається з поверхнею різ у металі (рис. 9). У ядрі струменя 3 характер перебігу завжди турбулентний, оскільки число Рейнольдса (Re) для всіх можливих комбінацій граничних значень параметрів різання (температура  $T=1000...1900$  К, швидкість витікання газу  $V_r=100...500$  м/с, густина газу  $\rho_r$  та діаметр струменя  $D_{стр}=1...3$  мм), розраховано за формулою:

$$Re = 0,86 V_r D_{стр} \rho_r T^{-1/2}$$

завжди більше 2320.

У прикордонному шарі зон 5 та 5' існує зона ламінарної течії 2 товщиною

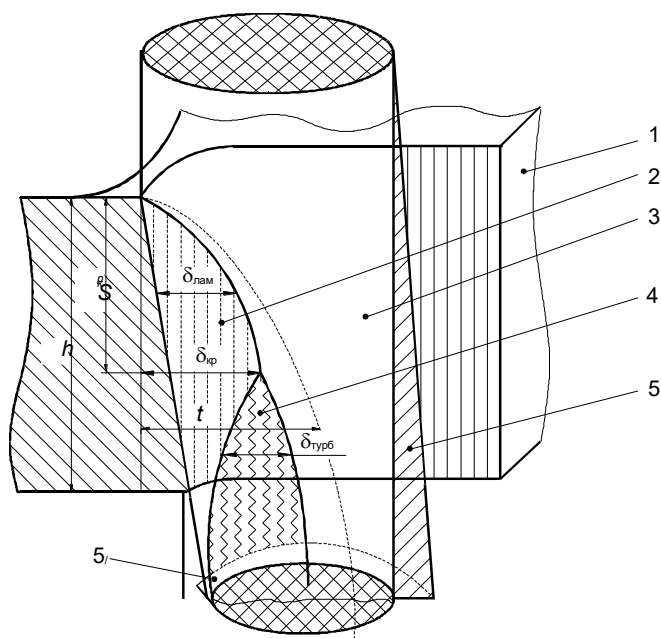


Рис. 9. Схема стікання кисню всередину каналу різ у: 1 – основний метал; 2 – зона струменю з ламінарною течією; 3 – ядро струменю; 4 – зона струменю з турбулентною течією; 5 та 5' – зони зміщення.

$\delta_{\text{лам}}$  та зона турбулентної течії 4 товщиною  $\delta_{\text{турб}}$ . По мірі просування струменя кисню у глиб металу товщина ламінарного прошарку нарастає по довжині  $S_{\text{кр}}$  до значення  $\delta_{\text{кр}}$ , після чого відбувається перетворення ламінарного шару 2 у турбулентний 4 при  $Re > 4,85 \cdot 10^5$ .

Максимально можлива товщина прикордонного шару характеризується співвідношенням:

$$\delta_{\text{погр}} \leq \delta_{\text{кр}} + \delta_{\text{турб}}. \quad (7)$$

Значення  $\delta_{\text{кр}}$  та  $\delta_{\text{турб}}$  визначаються виразами:

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{4,73 \cdot 10^3 T^{1/2}}{V_2 \rho}; \quad (8)$$

$$\delta_{\text{турб}} = \frac{0,37 S_{\text{погл}}}{Re}; \quad (9)$$

де  $S_{\text{погр}}$  – довжина прикордонного шару.

Розрахунки показали, що товщина прикордонного шару  $\delta_{\text{погр}}$  завжди менше товщини шару кисневого струменя  $t'$ , що бере участь в реакції окислення металу поверхні різь. Тому можна вважати, що в області ядра кисневого струменя 3 швидкість його витікання приблизно постійна.

Характер закінчення кисневого струменя залежить від його температури. Температурні умови в струмені непостійні. При розширенні кисню з

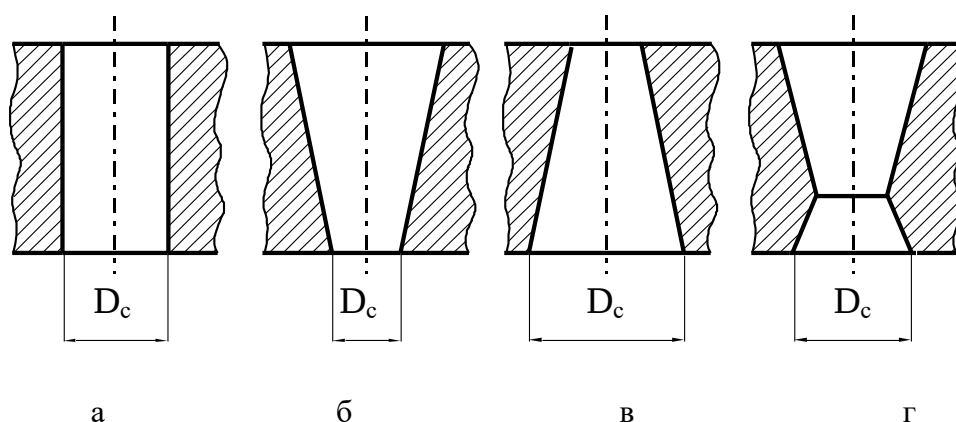


Рис. 10. Повздовжній профіль сопел для подачі технологічного газу: а) циліндричне;

початковим тиском  $P_0=0,4...1,0$  МПа у отворі сопла термодинамічна температура газу становить  $T_{\text{гд}}=188...137$  К. У результаті адіабатичного гальмування струменя при зіткненні його з поверхнею різку температура в прикордонному шарі підвищується до значення  $T'$ , що залежить від швидкості витікання  $V_z$  та теплоємності газу  $c_z$ :

$$T' = T_{\text{гд}} + 2,12 \cdot 10^{-4} V_z^2 / c_z. \quad (10)$$

Розрахункові значення  $T'$ , обчислені за наведеним рівнянням, складають 266...286 К. Завдяки високому ступеню турбулентності газу в поперечному перерізі струменя відбувається подальше підвищення його температури внаслідок передачі теплоти від розплаву з температурою  $T_{\text{пл}}$  на поверхні різку. Температура на виході струменя з нижньої частини різку становить 300...420 К.

Газодинамічні параметри струменя газу, що подається в зону обробки при ГЛР, визначаються:

- конструкцією сопла, що направляє газ у область різання;
- умовами витікання газу;
- параметрами газу.

У конструкції сопла (циліндричне (рис. 10, а), таке що звужується (рис. 10, б), що розширюється (рис. 10, в), комбіноване (рис. 10, г)) найбільш

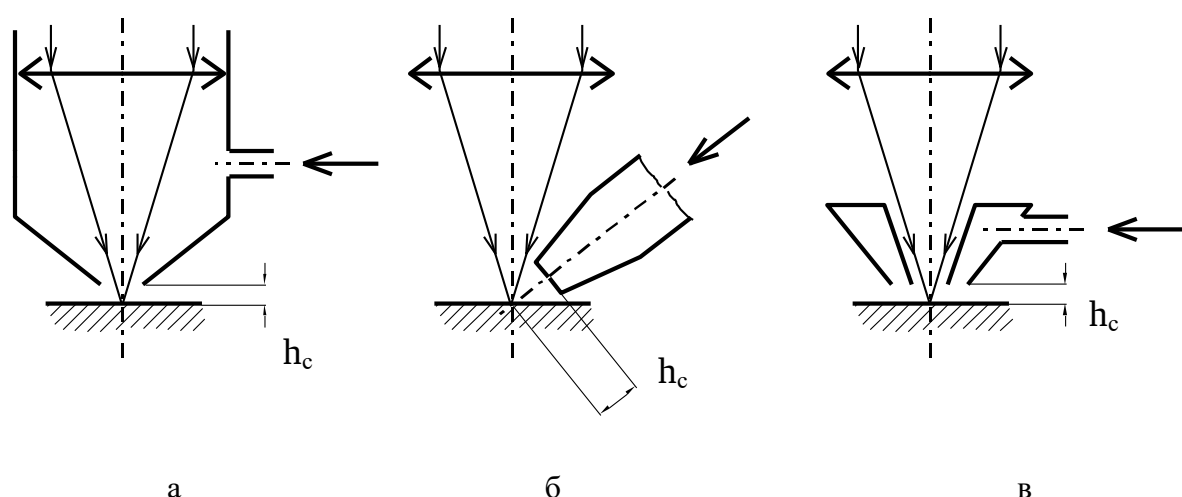


Рис. 11. Схеми подавання газу у зону різання: а) співвісне з лазерним пучком; б) бічне; в) кільцеве.

важливими характеристиками є його повздовжній профіль та вихідний діаметр  $D_c$ .

Умови витікання газу визначаються схемою подачі газу в зону обробки (співвісне з лазерним променем (рис. 11, а), збоку (рис. 11, б), кільцеве або у вигляді збіжних струменів (рис. 11, в)), а також відстанню  $h_c$  між вихідним отвором сопла та поверхнею металу, що розрізається.

Параметри газу характеризуються тиском  $P_0$  всередині сопла і родом газу.

Похідними від цих параметрів є: швидкість газу  $V_r$ , залежна від профілю сопла, тиску газу  $P_0$ , роду газу; витрата газу, що залежить від діаметру сопла  $D_c$ , профілю сопла, роду та тиску газу  $P_0$ .

Оптимальне поєднання цих параметрів не є однозначним. Воно визначається товщиною оброблюваного металу та вимогами до продуктивності процесу та якості поверхні різь.

Збільшення тиску кисню  $P_0$  до 0,3...0,4 МПа призводить до пропорційного зростання глибини різь у вуглецевій сталі (рис. 12). При подальшому зростанні тиску глибина різь стабілізується, а потім й дещо знижується.

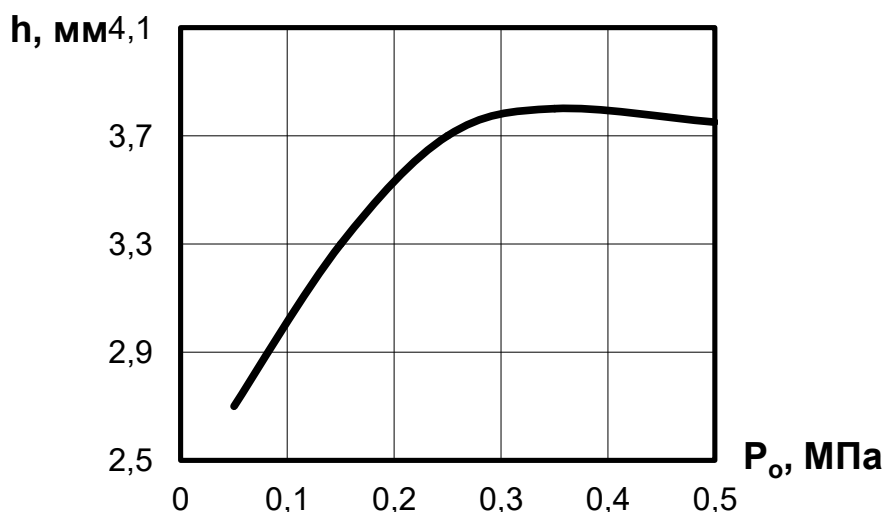


Рис. 12. Вплив тиску кисню на глибину різь у вуглецевій сталі.

Аналогічна залежність максимально досягнутої швидкості різь від тиску кисню (рис. 13). Це пов'язано із зростанням динамічного впливу

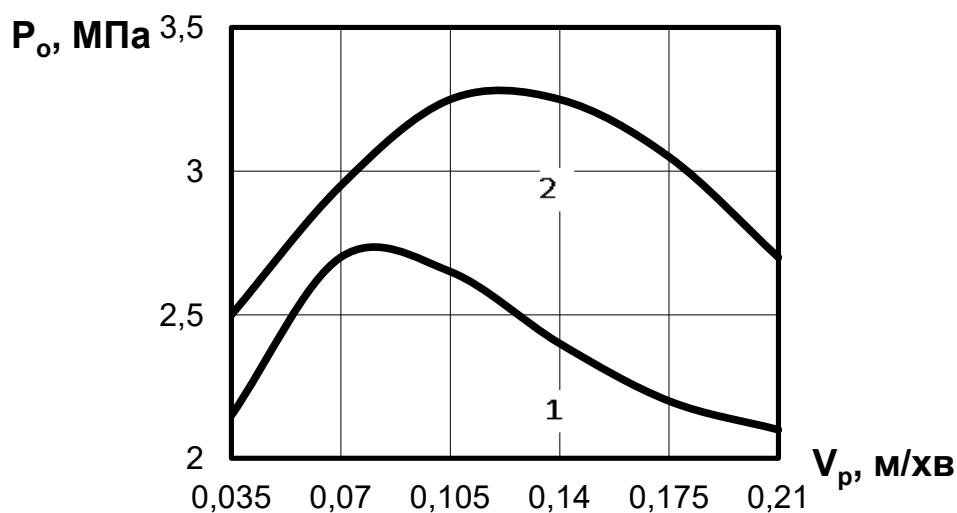


Рис. 13. Вплив тиску кисню на максимально можливу швидкість різання вуглецевої сталі: 1 –  $P=1,5$  кВт; 2 –  $P=1,7$  кВт;  $h=3$  мм.

струменю газу у зоні обробки, що призводить до більш інтенсивного виносу продуктів реакції горіння сталі та до підсилення екзотермічної реакції.

Наступне зниження глибини прорізування (швидкості різання) зі збільшенням тиску  $P_o$  пов'язане з утворенням стрибка ущільнення та зниженням у зв'язку з цим швидкості потоку газу та кінетичної енергії струменя. Тому для підвищення продуктивності обробки та глибини прорізування тиск струменя піддування газу слід встановлювати рівним 0,35...0,45 МПа.

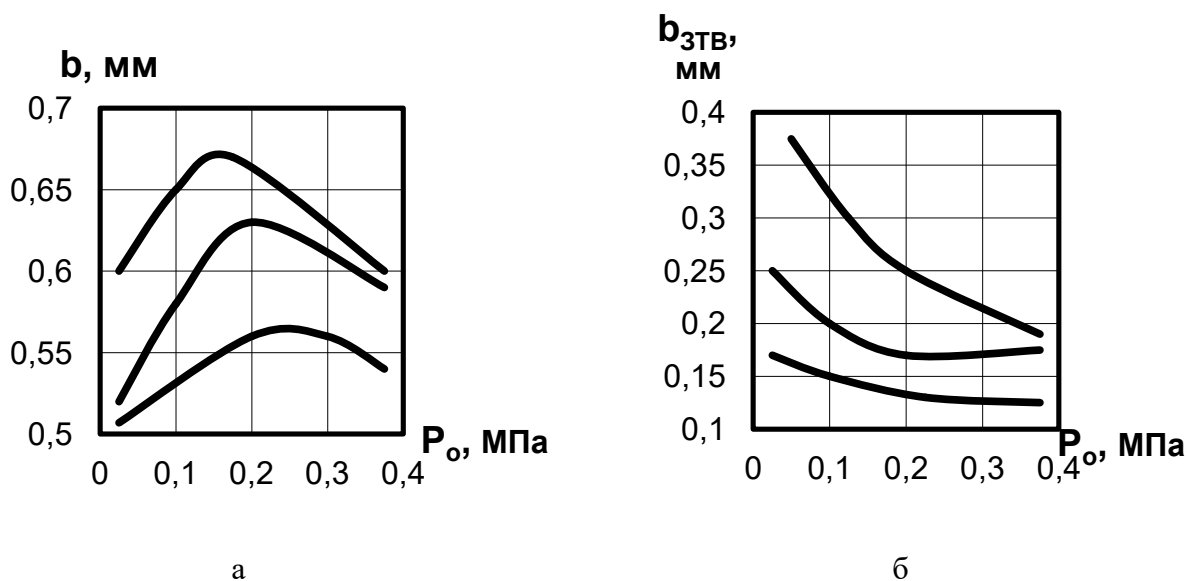


Рис. 14. Залежність а) ширини різу  $b$  та б) глибини ЗТВ  $b_{зТВ}$  у вуглецевій сталі від тиску кисню при різних швидкостях різання: 1 –  $V_p=1$  м/хв; 2 –  $V_p=2$  м/хв; 3 –  $V_p=3$  м/хв.

Із зростанням тиску кисню до 0,25...0,30 МПа зростає й ширина  $b$  лазерного різу (рис. 14, а), а глибина зони термічного впливу  $b_{ЗТВ}$  знижується при підвищенні тиску аж до 0,4 МПа (рис. 14, б), причому при низьких швидкостях різання такі закономірності виявляються більш інтенсивно.

У діапазоні тисків 0,25...0,40 МПа із зростанням значень  $P_0$  ширина різів, навпаки, знижується. Тому для отримання вузьких різів та різів з малою ЗТВ тиск робочого газу слід підвищувати.

Розміри області, в якій можлива якісна різка вуглецевої сталі, багато в чому визначається тиском кисню (рис. 15; I – область автогенного режиму різання; II – область отримання якісних різів; III – область режимів з низькою якістю). З його зростанням не тільки звужується область стійкого руйнування при різанні вуглецевих сталей, а й дещо погіршується шорсткість різів (рис. 16).

Ступінь відповідності точності різання, параметрів якості та ефективності різання багато в чому залежать від форми та параметрів струменя газу, які задаються та формуються соплами, входять до складу лазерного різача.

Діаметр сопла  $D_c$  повинен бути достатньо великим для того, щоб проходити через нього співвісно з газовим струменем та лазерний промінь не

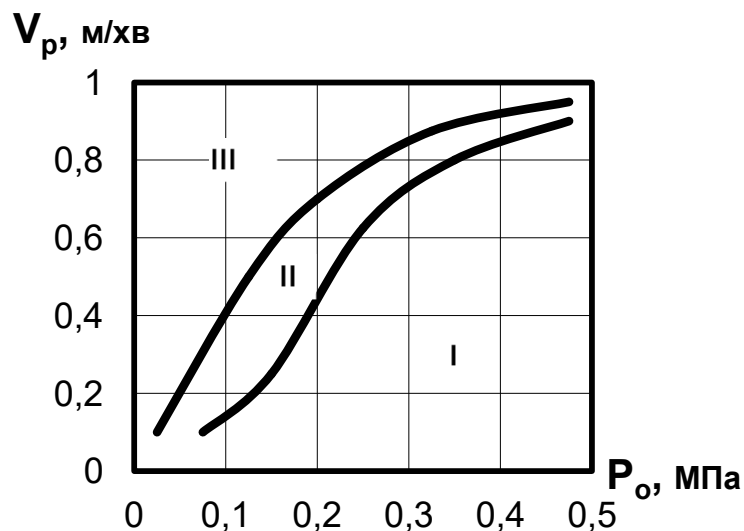


Рис. 15. Вплив тиску кисню на розміри області якісного різання вуглецевих сталей:  $h=3$  мм;  $P=0,45$  кВт. I – область автогенних режимів; II – область якісного різання; III – режими з низькою якістю.

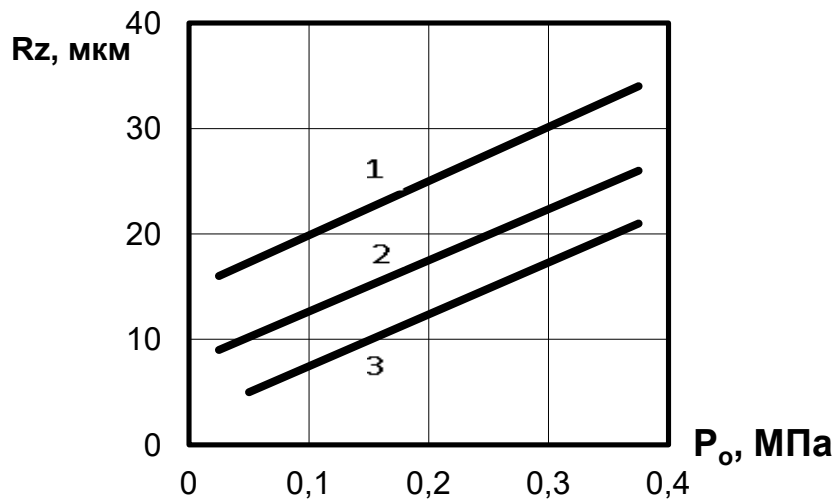


Рис. 16. Залежність шорсткості поверхні різі вуглецевої сталі від тиску кисню при різних швидкостях різання: 1 –  $V_p=1$  м/хв; 2 –  $V_p=2$  м/хв; 3 –  $V_p=3$  м/хв.

зачіпав його краю. З іншого боку, діаметр сопла повинен бути мінімально можливим для зменшення нераціональної витрати газу, що не потрапляє в канал різі. Найбільш широко застосовуються конічні сопла.

## 2.5. Особливості ГЛР вуглецевих та нержавіючих сталей

Технологічний процес, розроблюваний у даному дипломному проєкті, стосується обробки заготовок з вуглецевих і нержавіючих сталей, тому розглянемо вплив технологічних параметрів на якість обробки саме цих матеріалів докладніше.

При різанні сталей для швидкостей різання, що перевищують певну межу, різ утворюється гладким, без явно видимих борозен. Утворення борозен спостерігається при швидкостях обробки більше 2,5 м/хв. Занадто малим швидкостям обробки (менше 0,5 м/хв.) відповідає режим самостійного (автогенного) різання. Різ при цьому виходить значної ширини, яка визначається діаметром струменя кисню, а не діаметром сфокусованого лазерного променя. Шорсткість поверхні різі, що має борозну структуру, висока.

Ширина різку на вуглецевих сталях у верхньої кромки більше, ніж в середній його частині. Наявність на поверхні різку зони III (рис. 3) обумовлює значне розширення різку на цій ділянці, у нижньої кромки різку.

У вуглецевій сталі зона I має найменше значення шорсткості  $R_z$  (рис. 17). При низьких швидкостях обробки на поверхні різку в заготовках певної товщини характерна наявність лише зони I та II. З підвищенням швидкості різання на поверхні різку з'являється зона III з найвищою шорсткістю.

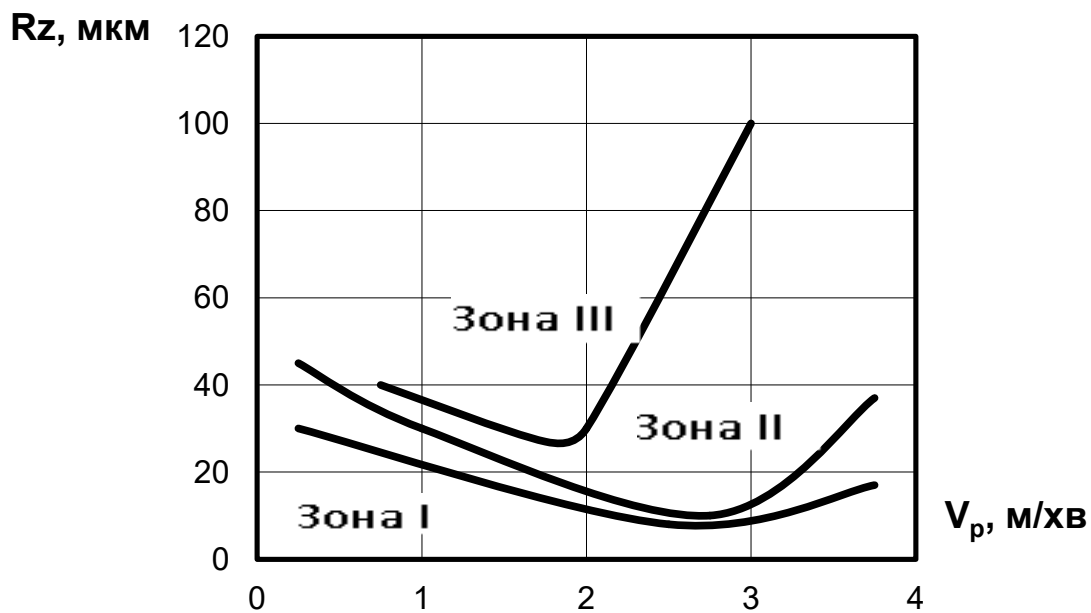


Рис. 17. Залежність шорсткості поверхні різку у вуглецевій сталі від швидкості різання при  $P=0,9$  кВт та  $P_0=0,15$  МПа.

Отже, для зменшення шорсткості поверхні до  $R_z=40\ldots50$  мкм, необхідно обмежувати швидкість різання щоб уникнути утворення на поверхні різку зони III. Таким чином, при різанні вуглецевих сталей режими високопродуктивної обробки (зони I, II та III) відрізняються від режимів, що забезпечують підвищену якість різів (зони I та II).

На рисунку 18 показані залежності досяжних швидкостей різання від товщини заготовок з вуглецевих сталей для лазера потужністю 1 кВт. Область I відповідає автогенного процесу різання; II – отриманню якісних різів; III – високопродуктивній обробці, але з низькою якістю різку; IV – неповного прорізання заготовки.

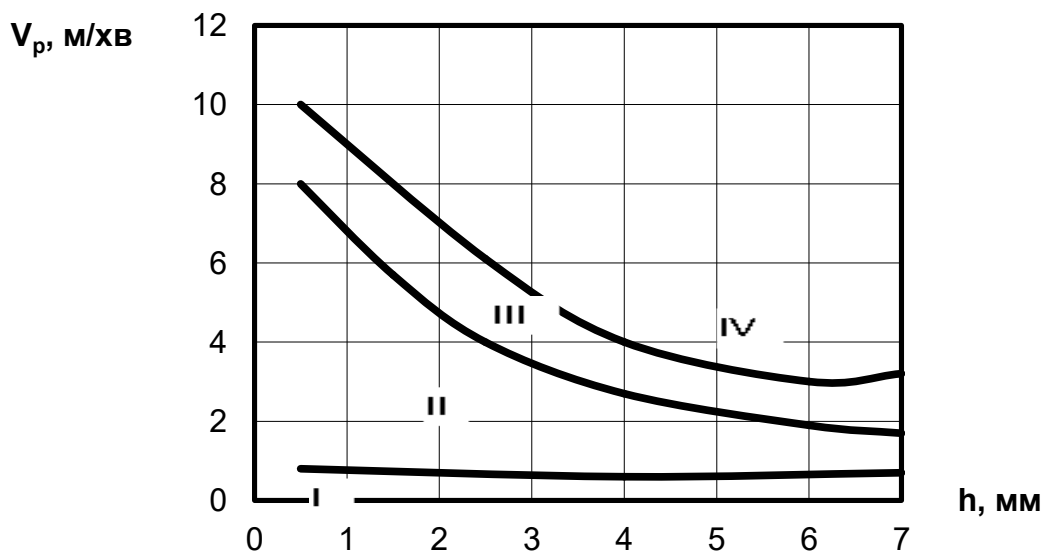


Рис. 18. Змінення досягнутих швидкостей різання вуглецевих сталей з різною якістю в залежності від товщини заготовки ( $P=1,0$  кВт).

З графіків видно, що оптимальні режими якісного різання деталей, що відповідають максимальній продуктивності процесу, знаходяться поблизу верхньої межі зони II, а режими найбільш продуктивного різання, але з низькою якістю — поблизу верхньої межі зони III. Режими обробки, що відповідають зонам I та IV, технологічно недоцільні.

У нержавіючих сталях процес утворення різку протікає трохи інакше, ніж у вуглецевих сталях. Борозниста структура в них виражена менш чітко. На поверхні різку виділяються в основному дві зони періодичного та безперервного руйнування (рис. 3). Це явище подібне автогенному (некерованому) процесу різання, характерному для вуглецевих сталей. Самозаймання металу не відбувається, тому що на поверхні утворюється тугоплавкий оксид. Зменшення густини потужності в зоні різання веде, як й при обробці вуглецевих сталей, до зміщення процесу некерованого руйнування у область менш високих швидкостей різання.

Залежності шорсткості поверхні різку кожної із зон від швидкості обробки при різних значеннях густини потужності, що досягаються за рахунок різних

умов фокусування лазерного проміння в листах завтовшки  $h=2,2$  мм у нержавіючій сталі, показані на рисунку 19.

При різанні нержавіючих сталей, так само як й при різанні вуглецевих сталей, при високих густини потужності та низьких швидкостях різання (менше 2 м/хв) розрізняють глибину різ з високою якістю кромки (зона I) та максимально допустиму глибину різ, але з низькою якістю (зони I та II). На високих швидкостях різання (більше 2 м/хв) різ виходить якісним при будь-яких значеннях густини потужності, що забезпечує наскрізне прорізання металу.

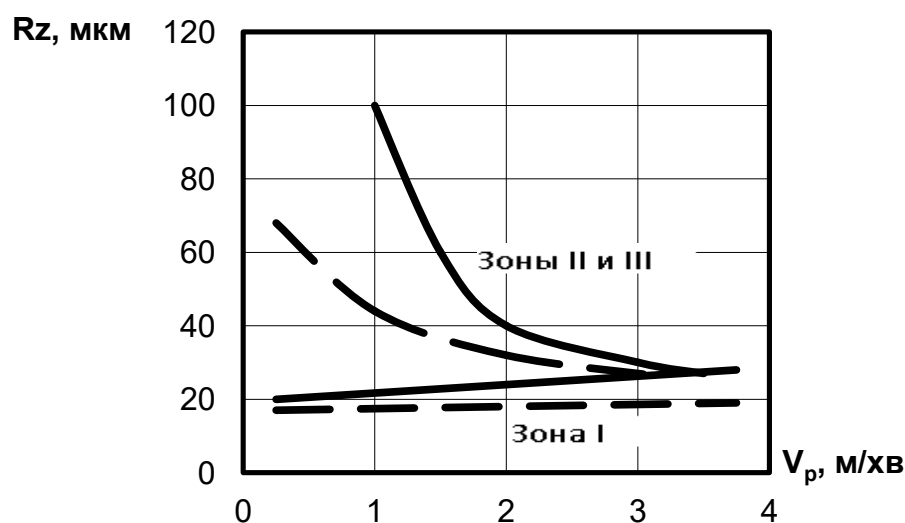


Рис. 19. Залежність шорсткості поверхні різання нержавіючої сталі від швидкості різання при фокусуванні проміння у пляму радіусом:  
 - - - - -  $r_f=0,2$  мм; ————  $r_f=0,325$  мм.

Точність різання з підвищенням швидкості обробки дещо зростає. Отже, для підвищення точності процесу ГЛР металевих заготовок обробку необхідно проводити на максимальних швидкостях, при яких ще можливе різання деталей заданої товщини.

### 3. Розробка технологічного процесу ГЛР

#### 3.1. Визначення режимів різання

На підставі наведених вище залежностей та закономірностей зміни глибини якісної  $h_k$  та максимально досяжної глибини  $h$  різку, ширини різку, розмірів ЗТВ на крайках різку, шорсткості його поверхні від технологічних факторів для вуглецевих та нержавіючих сталей, можна зробити наступні висновки:

1. Значення параметра  $h_k$  зростає із збільшенням тиску піддування газу, причому при малих швидкостях різання вплив тиску позначається більшою мірою.

2. Глибина різку  $h$  при виконанні найбільш глибоких різів, але низької якості зростає з підвищенням потужності лазерного проміння, тиску піддування газу та зі зменшенням швидкості обробки.

3. Для забезпечення мінімальної ширини різку, ЗТВ на його кромках та шорсткості поверхні різку обробку слід проводити на максимальних швидкостях, при яких ще можливе різання деталей заданої товщини для встановлених значень потужності проміння та тиску подаваного газу.

4. Надмірний тиск технологічного газу з метою підвищення якості обробки при різанні вуглецевих сталей повинен бути невисоким  $P=0,05...0,15$  МПа, а при різанні нержавіючих сталей його слід підвищувати до  $P=0,2...0,3$  МПа.

Деякі режими та результати різання вуглецевих та нержавіючих сталей випромінюванням  $CO_2$ -лазера наведено у таблиці 2.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 34   |

Таблиця 2. Режими ГЛР вуглецевих та нержавіючих сталей.

| Матеріал                                          | Товщина листа,<br>мм | Потужність<br>проміння, кВт | Швидкість<br>різання, м/хв | Тиск газу, МПа | Параметри різу |                    |                    |
|---------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
|                                                   |                      |                             |                            |                | Ширина, мм     | Глибина<br>ЗТВ, мм | Шорсткість,<br>мкм |
| Вуглецева сталь (вміст вуглецю від 0,06 до 0,8 %) | 1,0                  | 0,5                         | 2,23                       | 0,15           | 0,64           | 0,12               | 14,5               |
|                                                   | 1,0                  | 1                           | 6,0                        | 0,15           | 0,41           | 0,081              | —                  |
|                                                   | 1,0                  | 1                           | 8,0                        | 0,15           | 0,37           | 0,06               | —                  |
|                                                   | 2,0                  | 0,5                         | 1,66                       | 0,15           | 0,67           | 0,17               | 21,0               |
|                                                   | 2,0                  | 1                           | 2,17                       | 0,15           | 0,73           | 0,17               | 22,4               |
|                                                   | 3,0                  | 0,5                         | 1,25                       | 0,15           | 0,69           | 0,22               | 27,4               |
|                                                   | 3,0                  | 1                           | 1,69                       | 0,15           | 0,76           | 0,21               | 27,9               |
|                                                   | 3,3                  | 1                           | 2,0                        | 0,15           | 0,51           | 0,26               | —                  |
|                                                   | 5,0                  | 0,5                         | 0,63                       | 0,15           | 0,72           | 0,31               | 40,2               |
|                                                   | 5,0                  | 1                           | 1,01                       | 0,15           | 0,79           | 0,30               | 39,3               |
|                                                   | 5,2                  | 1                           | 1,0                        | 0,15           | 0,51           | 0,26               | —                  |
|                                                   | 5,2                  | 1                           | 2,5                        | 0,15           | 0,46           | 0,165              | —                  |
|                                                   | 8,0                  | 1                           | 0,3                        | 0,15           | 0,83           | 0,42               | 56,8               |
|                                                   | 8,0                  | 1                           | 0,98                       | 0,15           | 0,79           | 0,30               | 80,0               |
|                                                   | 10,0                 | 1                           | 0,37                       | 0,15           | 0,82           | 0,40               | 80,0               |
| Нержавіюча<br>сталь                               | 2,0                  | 1                           | 3,5                        | 0,15           | 0,39           | 0,098              | —                  |
|                                                   | 2,0                  | 1                           | 3,0                        | 0,15           | 0,40           | 0,088              | —                  |
|                                                   | 3,0                  | 0,5                         | 0,67                       | 0,15           | 0,60           | 0,24               | 27,4               |
|                                                   | 3,0                  | 1                           | 1,70                       | 0,15           | 0,61           | 0,20               | 80,0               |
|                                                   | 5,0                  | 1                           | 0,91                       | 0,15           | 0,64           | 0,27               | —                  |

### 3.2. Опис технологічного процесу

#### І. Підготовка металевих листових заготовок.

Листова вуглецева та нержавіюча сталь підлягає попередній правці згідно ОСТ 5.9091-80. Поверхня листа повинна бути очищена від окалини, іржі, оливи та інших покриттів згідно ОСТ 5.9829-90. Проводиться операція на спеціальному столі з використанням металевої щітки та шабера.

## **II. Подача заготовки в зону обработки.**

Виправлену та очищену заготовку по транспортному рольгангу подають до перевантажувача, який перекладає заготовку з рольганга на робочий стіл лазерного технологічного комплексу.

## **III. Базування та закріплення заготовки.**

Заготовля за допомогою спеціального пристрою орієнтується відповідним чином та фіксується в робочому положенні пристроєм закріплення.

## **IV. Газолазерне різання.**

Технологічний лазер включений та підготовлений до роботи. Система управління випромінювачем та оптичною системою перевірені та підготовлені до роботи. У систему числового програмного керування введено програму обробки виробів. Випромінювач налаштований на задані технологічні параметри.

Лазерний різак підведений до заготовки на задану відстань, згідно обраним умовам фокусування проміння, яка контролюється за допомогою спеціального щупа. Одночасно з включенням випромінювача, починається подача робочого газу в лазерний різак з заданим тиском та включається привод переміщення лазерного різак вздовж поверхні заготовки за заданою програмою.

Після виконання програми ЧПК, вимикається подача проміння в зону обробки, відключається подача робочого газу та різак повертається у вихідне положення.

## **V. Видалення вирізаних деталей та відходів з робочої зони.**

Деталі звільняються з пристрою закріплення.

Вирізані деталі та залишки металевого листа видаляються із зони обробки перевантажувачем або вручну, з використанням спеціальних пристосувань, щипців та рукавиць.

## **VI. Контроль якості та точності виготовлення деталей.**

Після видалення вирізаних деталей із зони обробки проводиться контроль їх розмірів та якості обробки на спеціальному столі за допомогою спеціальних

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 36   |

шаблонів та вимірювального інструменту. Вироби, які не пройшли контроль на якість відбраковуються або у разі можливості усунення браку, відправляються на доопрацювання.

## **VII. Складування готових деталей.**

Готові деталі, що пройшли контроль якості, складаються в спеціальні контейнери, в яких транспортуються на склад або до місця подальшої обробки.

Для проведення розробленого технологічного процесу газолазерного різання необхідно розробити та спроектувати потрібне технологічне устаткування та оснащення. Опис застосовуваного технологічного устаткування, його розробка та розрахунок наведено у наступному розділі.

### **3.3. Виготовлення набору деталей з листової заготовки**

Проведемо розрахунок технологічних параметрів для розкрою трьох листових заготовок, показаних на рис. 1.

Товщина листового матеріалу – 2,0 мм. Розміри оброблюваного листа 2500\*1500 мм. Густина матеріалу – 7,85 кг/дм<sup>3</sup>.

Оптимізація розміщення деталей на листі проводилася за контуром деталей та по ширині ділянок між деталями 10 мм.

Для проведення розрахунків вихідні дані приймаємо наступними:

- прискорення переміщення різача вздовж поверхні заготовки – 1 м/с<sup>2</sup>;
- швидкість різання – 3,6 м/хв;
- максимальна швидкість позиціонування – 80 м/хв;
- контур різання – замкнутий;
- час прошивки листа лазерним пучком – 0,2 с.

У таблиці 3 наведено найменування вирізуваних деталей, розташовуваних на трьох листах (рис. 1) та периметр вирізуваного контуру. Виходячи з цього визначаємо час вирізання однієї деталі за формулою:

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 37   |

$$t_{\partial} = \frac{L_{\partial}}{V_p},$$

де  $L_{\partial}$  – периметр деталі.

Час вирізання:

- 1) плита фланцева  $t_1=3,6/60 \cdot 7,128=118,8$  с;
- 2) стінка бічна:  $t_2=3,6/60 \cdot 1,728=28,8$  с;
- 3) кронштейн:  $t_4=3,6/60 \cdot 1,08=18,0$  с;
- 4) основа:  $t_5=3,6/60 \cdot 9,936=165,6$  с;
- 5) рама:  $t_6=3,6/60 \cdot 9,936=165,6$  с;
- 6) фланець:  $t_7=3,6/60 \cdot 2,58=43,0$  с;
- 7) кришка:  $t_9=3,6/60 \cdot 2,16=36,0$  с.

Результати обчислень часу вирізання зведено у таблицю 3.

Таблиця 3. Периметр та час вирізання деталей.

| №<br>п/п | Назва деталі   | Периметр деталі,<br>м | Час вирізання<br>однієї деталі, с |
|----------|----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1        | плита фланцева | 7,128                 | 118,8                             |
| 2        | стінка бічна   | 1,728                 | 28,8                              |
| 3        | кронштейн      | 1,08                  | 18,0                              |
| 4        | основа         | 9,936                 | 165,6                             |
| 5        | рама           | 9,936                 | 165,6                             |
| 6        | фланець        | 2,58                  | 43,0                              |
| 7        | кришка         | 2,16                  | 36,0                              |

Тепер визначимо час розкрою листа (рис. 1).

3 листа вирізаються:

- плита фланцева в кількості 3 штук;
- стінка бічна ..... 18 шт;
- кронштейн ..... 16 шт;
- основа ..... 1 шт;
- рама ..... 5 шт;
- фланець ..... 2 шт;

– кришка ..... 10 шт.

1). Плита фланцева:

Загальна площа, яку вони займають дорівнює

$$S_{\Sigma 1} = k_1 S_1 = 3 \cdot 0,099 = 0,297 \text{ шт},$$

де  $k_1$  – кількість плит фланцевих на листі;  $S_1$  – площа, займана однією деталлю (табл. 1).

Час вирізання всіх плит фланцевих дорівнює:

$$t_{\Sigma 1} = k_1 t_1 = 3 \cdot 118,8 = 356,4 \text{ с} = 5,94 \text{ хв.}$$

2). Стінка бічна:

$$S_{\Sigma 2} = k_2 S_2 = 18 \cdot 0,033 = 0,594 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 2} = k_2 t_2 = 18 \cdot 28,8 = 518,4 \text{ с} = 8,6 \text{ хв.}$$

3). Кронштейн:

$$S_{\Sigma 3} = k_3 S_3 = 16 \cdot 0,01 = 0,160 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 3} = k_3 t_3 = 16 \cdot 18,0 = 288,0 \text{ с} = 4,8 \text{ хв.}$$

4). Основа:

$$S_{\Sigma 4} = k_4 S_4 = 1 \cdot 0,169 = 0,169 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 4} = k_4 t_4 = 1 \cdot 165,6 = 165,6 \text{ с} = 2,76 \text{ хв.}$$

5). Рама:

$$S_{\Sigma 5} = k_5 S_5 = 5 \cdot 0,160 = 0,800 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 5} = k_5 t_5 = 5 \cdot 165,6 = 828,0 \text{ с} = 13,8 \text{ хв.}$$

6). Фланець:

$$S_{\Sigma 6} = k_6 S_6 = 2 \cdot 0,004 = 0,008 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 6} = k_6 t_6 = 2 \cdot 43 = 86,0 \text{ с} = 1,43 \text{ хв.}$$

7). Кришка:

$$S_{\Sigma 7} = k_7 S_7 = 10 \cdot 0,009 = 0,09 \text{ шт};$$

$$t_{\Sigma 7} = k_7 t_7 = 10 \cdot 36,0 = 360,0 \text{ с} = 6,0 \text{ хв}$$

Повна площа, займана деталями на листі дорівнює:

$$S_{\Sigma} = \Sigma S_{\Sigma i},$$

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 39   |

де  $S_{\Sigma i}$  – площа, займана  $i$ -ми деталями.

$$S_{\Sigma} = 0,297 + 0,594 + 0,160 + 0,169 + 0,800 + 0,008 + 0,090 = 2,208 \text{ м}^2.$$

Використання матеріалу листової заготовки визначаємо за формулою:

$$U = \frac{S - S_{\Sigma}}{S} \cdot 100,$$

де  $S$  – площа листа.

$$U = \frac{3,125 - 2,208}{3,125} \cdot 100 = 29,34 \text{ \%}.$$

Результати розрахунку деталей, що розміщені на металевому листі зведено у таблицю 4.

На цьому розрахунок параметрів технологічного процесу можна вважати закінченими.

Таблиця 4. Дані по оброблюваних деталях.

| № п/п                                         | Назва вирізної деталі | Кількість на листі, шт | Площа деталей на листі, м <sup>2</sup> | Час вирізання деталей, с |
|-----------------------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| 1                                             | плита фланцева        | 3                      | 0,297                                  | 356,4                    |
| 2                                             | стінка бічна          | 18                     | 0,594                                  | 518,4                    |
| 3                                             | кронштейн             | 16                     | 0,160                                  | 288,0                    |
| 4                                             | основа                | 1                      | 0,169                                  | 165,6                    |
| 5                                             | рама                  | 5                      | 0,800                                  | 828,0                    |
| 6                                             | фланець               | 2                      | 0,008                                  | 86,0                     |
| 7                                             | кришка                | 10                     | 0,09                                   | 360,0                    |
| Повна площа листа, м <sup>2</sup>             |                       |                        | 3,125                                  |                          |
| Повна площа, займана деталями, м <sup>2</sup> |                       |                        | 2,208                                  |                          |
| Час вирізки всіх деталей аркуша, хв.          |                       |                        | 43,34                                  |                          |
| Процентна кількість відходів, %               |                       |                        | 29,34                                  |                          |

## 4. Лазерний технологічний комплекс для ГЛР

### 4.1. Структурна схема

У лазерному технологічному комплексі (ЛТК) планується використовувати волоконний лазер, що є основним блоком комплексу. Структурну схему ЛТК показано на рис. 20.

Лазерний пучок випромінювача 1 перетворюється системою фокусування 2 та направляється на оброблювану заготовку 7. Установка та закріплення заготовки в робочому положенні та її переміщення здійснюються пристроєм 6. Блок числового програмного керування 9 відповідно до заданої програми обробки подає електричні сигнали виконавчому механізму 5 для управління переміщенням рухомого блоку 6, а також сигнали блоку електроживлення 12 для керування режимом роботи випромінювача. Як показано на структурній схемі, рухливим блоком може бути не тільки пристрій 6, але й випромінювач 1 та система фокусування 2.

З метою збільшення ефективності процесу використовується технологічний газ. Для підготовки технологічного газу та подачі його в зону обробки слугує система 3. Густина потужності проміння регулюється датчиком 8. Сигнал з датчика слугує для контролю та керування режимом

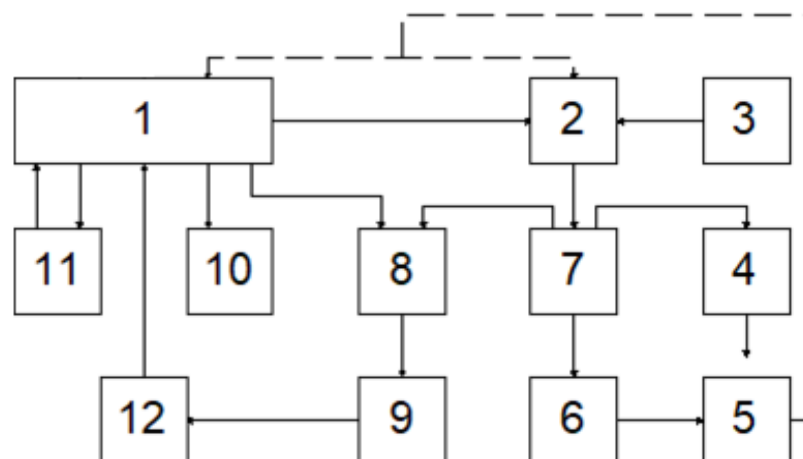


Рис. 20. Структурна схема лазерного технологічного комплексу: 1 – випромінювач; 2 – система фокусування; 3 – система подавання технологічного газу; 4 – вентиляційна система; 5 – виконавчий механізм; 6 – рухомий блок; 7 – заготовка; 8 – вимірювач потужності; 9 – числове програмне керування; 10 – контролюючий блок; 11 – блок охолодження; 12 – блок електроживлення.

опромінення. Утворені в процесі лазерної обробки продукти ерозії видаляються вентиляційною системою 4. Оптимальний тепловий режим випромінювача забезпечується блоком охолодження 11. Параметри лазерного проміння контролюються блоком 10.

## 4.2. Компоновка ЛТК

Основними особливостями лазерного обладнання є безконтактність формоутворення, відсутність зусиль обробки на базових деталях та направляючих, можливість передачі лазерного пучка на значні відстані від випромінювача. Останнє визначає принципову відмінність компоновань ЛТК від компоновань інших видів технологічного обладнання для обробки матеріалів.

Сукупність відносних рухів лазерного пучка та оброблюваної заготовки, необхідні для утворення заданої поверхні деталі, додаткових рухів та зв'язків між ними визначають кінематичну структуру, яка є основою компоновання ЛТК. Установка має блокову структуру та складається з одного стаціонарного та кількох рухомих блоків, які з'єднані між собою послідовно або паралельно лінійними напрямними. Система фокусування та блок, що несе заготовку, у компонованні завжди є крайніми блоками. Послідовне з'єднання рухомих блоків застосовується для створення відносного переміщення лазерного пучка та заготовки за складними просторовими траєкторіями, паралельне – для одночасної роботи кількох систем фокусування.

Поняття про блокову структуру та способи сполучення блоків дозволяє позначити будь-яку компоновку за допомогою структурних формул. Вісь Z суміщена з віссю сфокусованого лазерного пучка, її напрям – від заготовки до системи фокусування. Вісь Y спрямована вздовж осі випромінювача, а вісь X – перпендикулярно до неї. Стаціонарний блок має позначку О, чим підкреслюється відсутність руху. Блок фокусування позначається літерою F, випромінювач лазера – літерою L. В структурній формулі позначення

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 42   |

записуються в порядку розташування блоків. Блок, що несе заготовку, у формулі записується крайнім ліворуч, а блок фокусування проміння – крайнім праворуч. Стаціонарний блок О розділяє рухи, виконувані заготовкою та блоком фокусування. Від положення стаціонарного блоку залежить розподіл елементарних рухів між заготовкою та блоком фокусування.

В даний час для різання матеріалів найбільшого поширення набули двокоординатні лазерні установки, які містять послідовно з'єднані два рухомих блоки та один стаціонарний.

Для розроблювального ЛТК обираємо схему компоновання, що відповідає формулі  $XYO_{LFZV}$ , тобто випромінювач та система фокусування встановлено нерухомо на стаціонарному блоці, а переміщуватиметься заготовка вздовж осей X та Y.

### 4.3. Вибір технологічного лазера

До складу лазерного технологічного комплексу входить технологічний лазер, який формує лазерний промінь з певними характеристиками, та допоміжні системи, які забезпечують стабільна роботу випромінювача.

Для розкрою листових матеріалів використовуються зазвичай твердотілі та газові лазери. У твердотілих лазерах проміння генерується у активному елементі, зазвичай у формі стрижня з кристалу штучного рубіну, скла з іонами неодиму  $Nd^{3+}$  або ітрій-алюмінієвого гранату (ІАГ) з додаванням тих же іонів неодиму або хрому  $Cr^{3+}$ . У газових лазерах активним середовищем є гази або суміш газів. На даний час більш поширені газові лазери на двоокису вуглецю  $CO_2$ , із значною вихідною потужністю, відносно високим ККД та стабільними параметрами проміння.

Пропонується застосувати волоконний лазер YLR-1500-U (рис. 21).

Серія YLR-U включає в себе останні досягнення в провідній у світі технології упаковки діодів промислових насосів IPG і є єдиними герметично закритими лазерами середньої потужності на ринку, які можуть працювати в

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 43   |

умовах надзвичайно високої вологості до 90% відносної вологості. Варіанти дистанційного керування включають аналоговий, RS-232 або Ethernet, а також вбудовану самодіагностику з підключенням до Інтернету. Зручна конфігурація для монтажу в стійку є найбільш економічно ефективним і адаптованим рішенням для інтеграції в виробничі лінії Industry 4.0, Smart Manufacturing. Лазери YLR-U ідеально підходять для широкого спектру різання та зварювання металів.

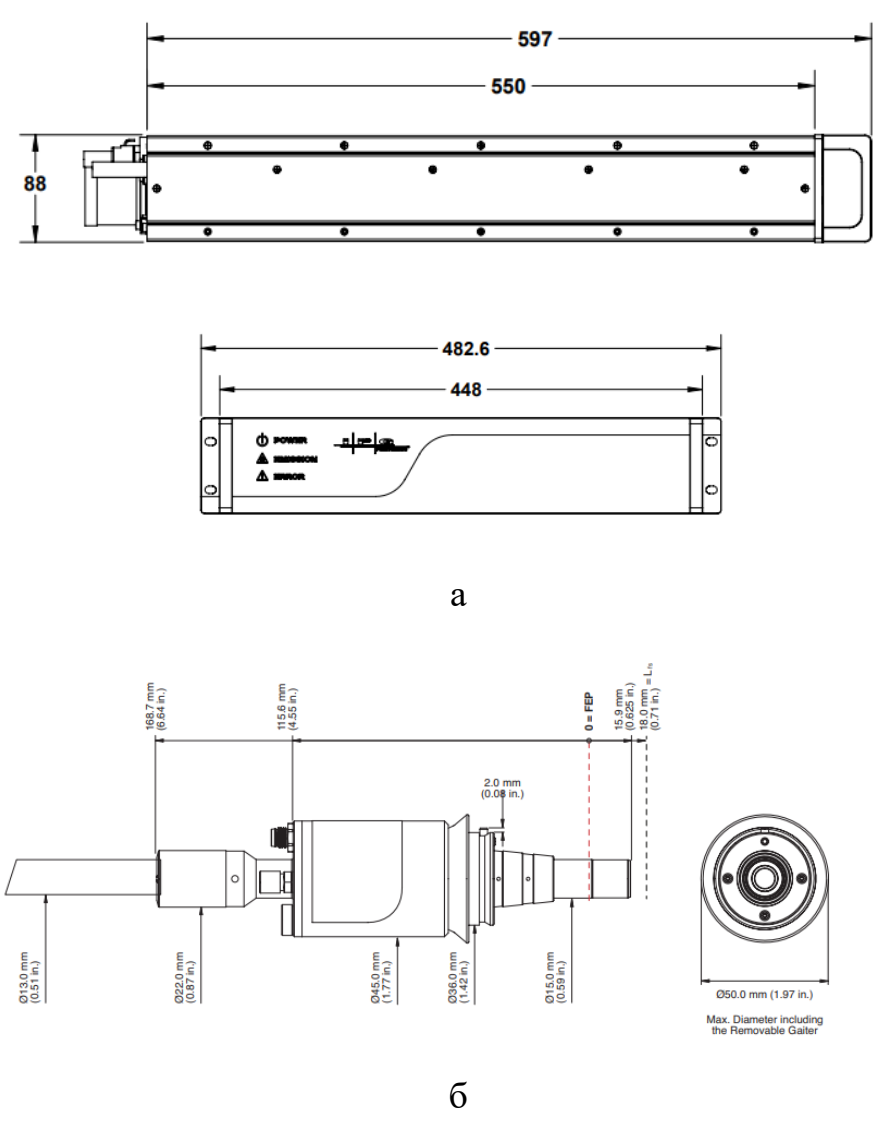


Рис. 21. а) Волоконний лазер YLR-1500-U; б) Оптичне волокно HLC-8

**Технічні характеристики лазера:**

|                                               |                     |
|-----------------------------------------------|---------------------|
| Максимальна вихідна потужність, не менше, кВт | 1,5                 |
| Довжина хвилі лазерного проміння, мкм         | 10,6                |
| Частота модуляції, кГц                        | до 50               |
| Перебудова потужності, %                      | 10-100              |
| Стабільність вихідної потужності, %           | ±0,5                |
| Вихідний діаметр серцевини волокна, мкм       | 50, 100 і 200       |
| Якість променя, ВРР мм × мрад                 | 2, 5, 10            |
| Загальні характеристики                       |                     |
| Розміри*, Ш×Д×В, мм                           | 448×550×88          |
| Вага, кг                                      | <30                 |
| Охолоджуюча вода                              |                     |
| Напруга живлення, 50/60 Гц, VAC               | Однофазний, 200-240 |
| Споживана потужність, Вт                      | 3700                |
| Діапазон робочої вологості, %                 | від 10 до 90        |
| Діапазон робочих температур, °C               | від 10 до 40        |

**Технічні характеристики чіллера:**

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Розміри, Ш×Д×В, мм                   | 1093×815×1952          |
| Додаткова глибина електрошафа, Ш×Д   | 211×500                |
| Вага:                                |                        |
| Без наповнення водою, кг             | 480                    |
| З наповненням водою, кг              | 600                    |
| Робоча напруга                       | 460 В / 3 фази / 60 Гц |
| Потужність охолодження, кВт          | 38,8                   |
| Теплове навантаження на повітря, кВт | 52,2                   |
| Температура повітря на вході, °C     | + 33                   |
| Потік повітря, м <sup>3</sup> / год  | 12000                  |
| Електричні дані:                     |                        |
| Середня споживана потужність, кВт    | 21,0                   |

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 45   |

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| Макс. споживана потужність, кВт | 24,9                   |
| Напруга підключення, В          | 460 В / 3 фази / 60 Гц |

#### Технічні характеристики оптичного волокна:

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| Максимальна потужність, кВт             | 3          |
| Діаметр оптики, мм                      | 12         |
| Байонетний тип                          | HLC-8      |
| Діаметр серцевини вхідного волокна, мкм | 50         |
| Вихідний діаметр волокна**, мкм         | 100 - 1000 |
| Вага, кг                                | 2,4        |
| Охолодження                             | повітря    |

### 4.4. Стіл технологічний

Спроектовано технологічний координатний стіл який має таку компоновку, при якій оброблювана заготовка переміщається за двома координатами.

Виходячи з розмірів оброблюваних заготовок максимального розміру робоча зона столу становить 2500×1250 мм (рис. 22). Загальний розмір поверхні столу становить 2600×1350 мм, що має забезпечити розташування на ньому допоміжних пристосувань, зокрема, затискачів.

Основою столу технологічного є рама 1 (рис 22). На рамі 1 закріплено два механізми переміщення 2 та 3, які оснащені кульково-гвинтовими механізмами (КГМ) 8 та 9 з кроковими електродвигунами з редукторами 7. Рухомі частини КГМ закрито кожухами 6. На механізми переміщення 3 встановлено робочий стіл 4, який оснащено двома затискачами 5.

Таким чином, листова заготовка розміщується на робочій поверхні технологічного столу та закріплюється за допомогою затискачів 5. Переміщення заготовки відбувається за допомогою двох КГМ 8 та 9, які мають

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 46   |

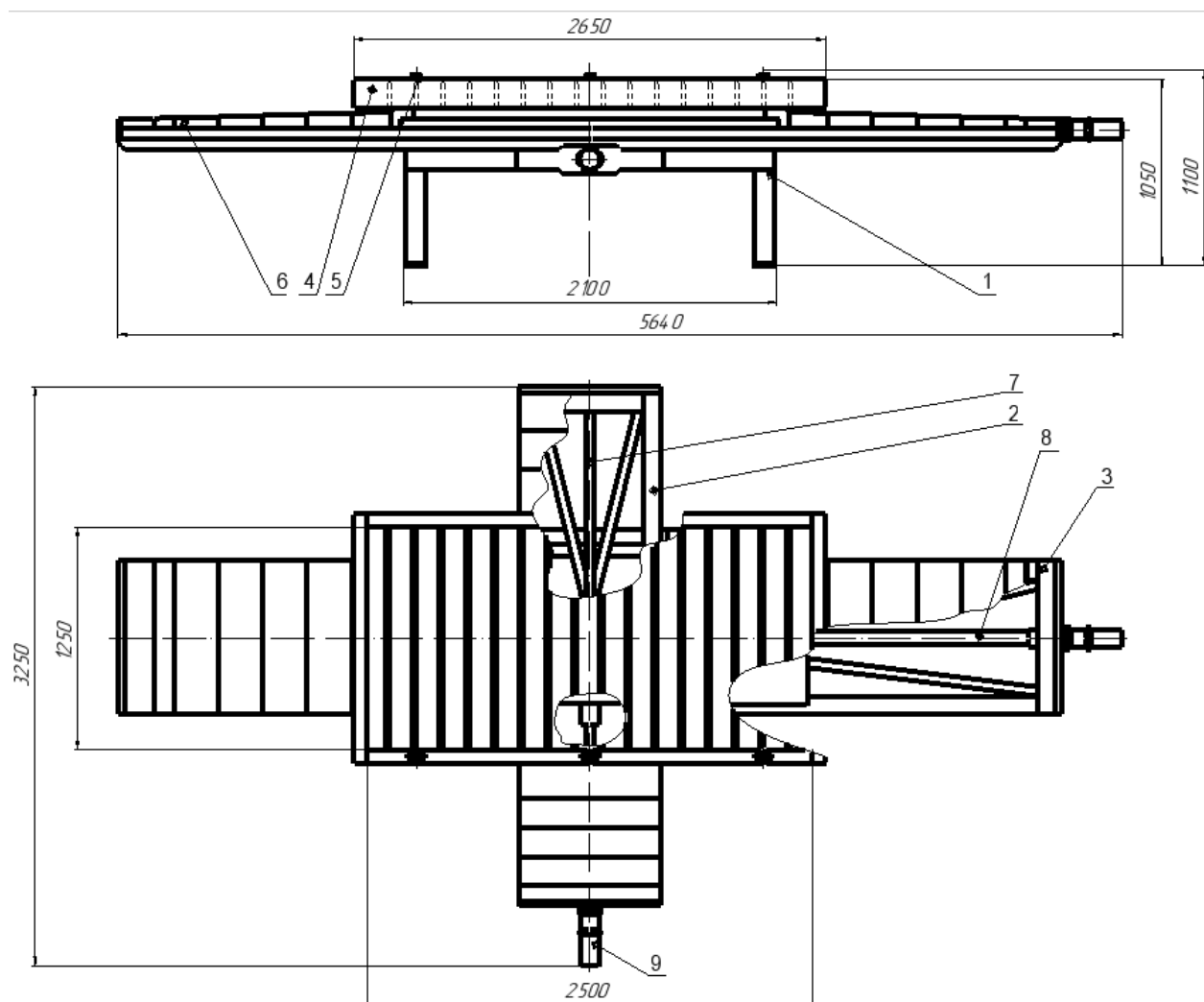


Рис. 22. Стіл координатний: 1 – рама; 2 – механізм переміщення осі X; 3 – механізм переміщення осі Y; 4 – робочий стіл; 5 – затискач; 6 – кожух захисний; 7 – гвинтовий механізм осі X; 8 – гвинтовий механізм осі Y; 9 – кроковий електродвигун з редуктором

однакову конструкцію та приводяться у рух кроковими електродвигунами з редукторами 7.

Автоматизоване керування столом технологічним під час обробки заготовок відбувається пультом ЧПК комплексу, окрім цього рухи налаштування виконуються за допомогою окремого пульта столу.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 47   |

### Технічні характеристики столу координатного:

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| Максимальний розмір оброблюваного листа, м | 2,5×1,25   |
| Вантажопідйомність, кг                     | 1500       |
| Переміщення по осях:                       |            |
| X, мм                                      | 2500       |
| Y, мм                                      | 1250       |
| Точність позиціонування по всій довжині:   |            |
| X, мм                                      | ± 0,05     |
| Y, мм                                      | ± 0,05     |
| Максимальна швидкість переміщення, м/хв.   | 15         |
| Точність швидкості переміщення, %          | ± 0,05     |
| Кількість одночасно керованих координат    | 2          |
| Точність повторного позиціонування, мм     | 0,02...0,1 |
| Вживана потужність, кВт                    | 20         |
| Габаритні розміри:                         |            |
| довжина, мм                                | 5640       |
| висота, мм                                 | 1100       |
| ширина, мм                                 | 3250       |

Крім перерахованих характеристик, які цілком задовольняють умовам розробленого технологічного процесу, даний стіл має ще ряд переваг, які мають вирішальні значення для застосування його в лазерному технологічному

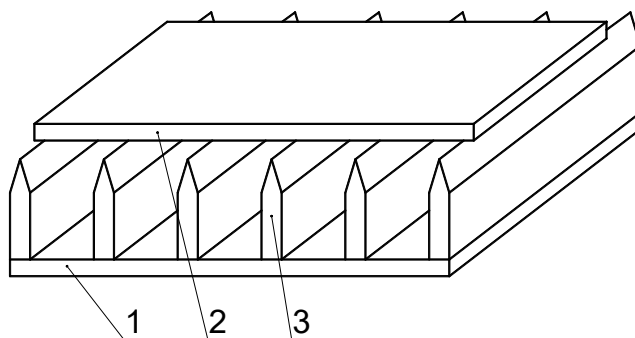


Рис. 23. Робоча поверхня технологічного столу.

Робоча поверхня технологічного столу 1 (рис. 23) та поверхня оброблюваної листової заготовки 2, що повернена до столу, не повинні піддаватися впливу лазерного проміння. Тому робочу поверхню стола виконано у вигляді ребер 3 – тонких загострених металевих пластин. Саме таке використання швидкозмінних ребер столу використовується при усіх інших видах термічного різання матеріалів – ацетиленокисневому та плазмовому

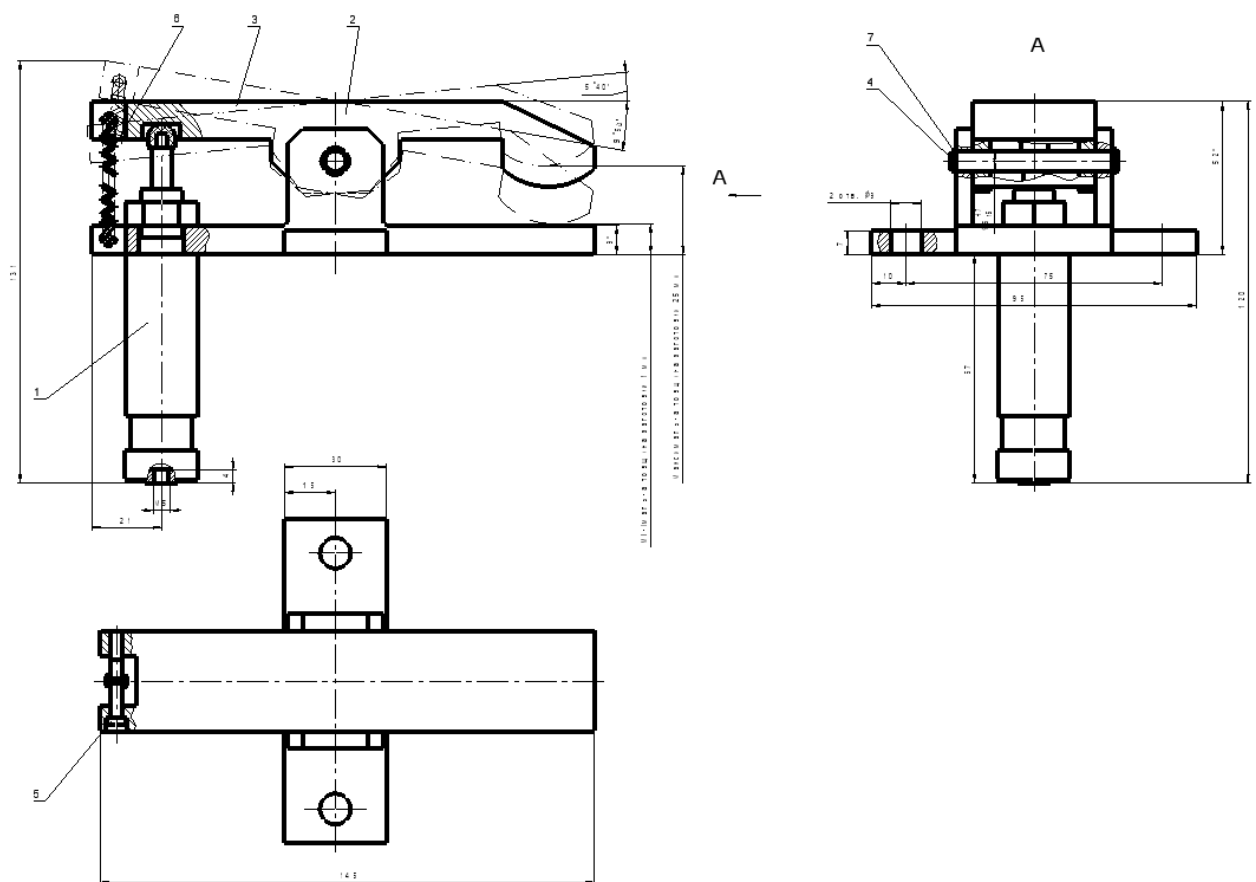


Рис. 24. Затискач: 1 – зворотна пружина; 2 – шток пневмоциліндру; 3 – важіль;  
4 – пневмоциліндр; 5 – корпус; 6 – вісь важеля; 7 – затискна поверхня; 8 – ребро

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                   | 49   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

різанні.

Затискач 5 (рис. 22), що фіксує оброблювану листову заготовку на робочій поверхні технологічного столу, та забезпечує притискання заготовки до ребер столу.

Затискач (рис. 24) складається з важеля 3, корпусу 5 та пневматичного циліндру 4.

При подаванні стисненого повітря шток 2 пневмоциліндру 3 рухається вгору та, впираючись у важіль 3, змушує інший кінець важеля, який має спеціальну затискну поверхню 7, притискати оброблюваний лист до швидкозмінних ребер 8 технологічного столу. Зворотний рух важеля 3 забезпечується пружиною 1.

#### **4.4. Завантажувач – система подачі листових заготовок**

Система подачі листових заготовок у зону обробки представляє собою завантажувач з бункером, пневматичним столом та маніпулятором з присосками (рис. 25).

Завантажувач призначений для підняття стопки листових заготовок до рівня столу з кульковою поверхнею.

Маніпулятор з пневматичними присосками захоплює листові заготовки та за допомогою електроприводу переносить їх на кульковий стіл, з якого потім заготовки переміщуються на технологічний стіл.

##### **4.4.1. Бункер завантажувача**

Бункер – це зварна коробчата конструкція для складання оброблених листових заготовок. У бункері встановлено платформу 7, на якій розміщуються листові заготовки. За допомогою приводу підйомника 5 платформа з пачкою заготовок здатна здійснювати вертикальні переміщення, піднімаючи заготовки на рівень кулькового столу 6. Підйом платформи здійснюється за допомогою

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
|     |      |          |        |      |                   | 50   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

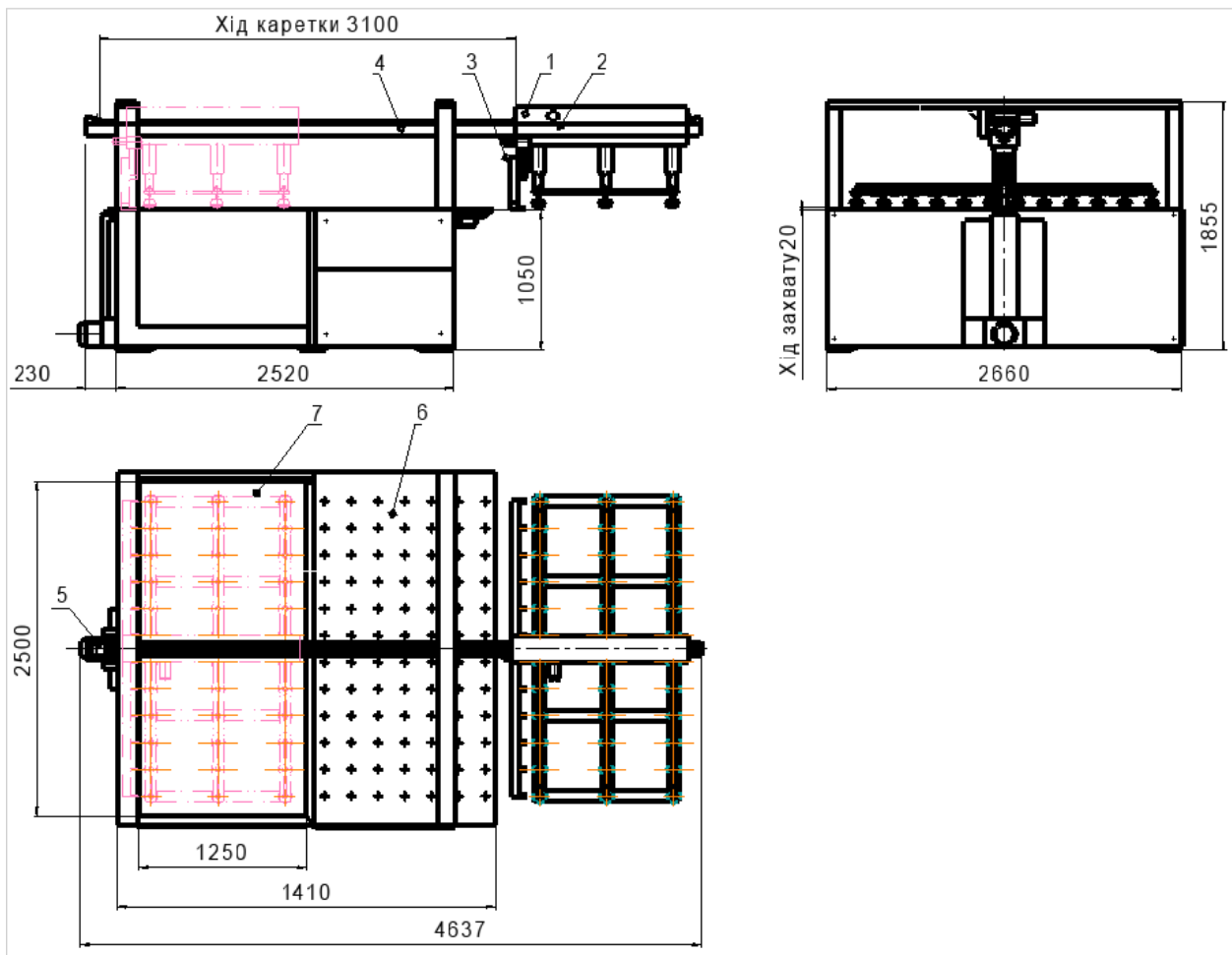


Рис. 25. Завантажувач: 1 – каретка захвату; 2 – захват пневматичний; 3 – штовхач;  
4 – траверса; 5 – привод підйомника; 6 – стіл кульковий; 7 – платформа підйомник

гвинтового механізму. Зупинка платформи може відбуватися автоматично або вручну.

Переміщення листової заготовки на кульковий стіл 6 й далі на технологічний стіл здійснюється за допомогою каретки захоплення 1, що переміщується по траверсі 4. Каретку 1 оснащено пневматичним захватом 2 з пневматичними присосками та штовхачем 3. Присоски захоплюють лист, після чого він піднімається над пакетом й потім штовхач 3 переміщує її на поверхню кулькового столу 6. У пневматичному столі встановлено кулькові опори під які підсувається стиснене повітря для полегшення обертання кульок. Це значно зменшує тертя між поверхнею столу та заготовкою, що забезпечує легке подальше переміщення листової заготовки на технологічний стіл.

#### 4.4.2. Розрахунок пневматичного захвату завантажувача

Пневматичний захват діє за принципом присмоктування до переміщуваного виробу, яке відбувається створенням низького тиску у відповідній порожнині пристрою (рис. 26).

Пневматичні присоски 1 закріплено на поперечному кронштейні 2, який з'єднано з вертикальним важелем 3. Всередині важеля 3 та кронштейну 2 виготовлено повітряні канали 4. Всередині присоски знаходиться вакуумна порожнина 5, всередині якої й утворюється знижений тиск, який утримує заготовку кромками 6.

Визначимо діаметр внутрішньої порожнини вакуумної камери пневматичного захвату з ущільнювачем з губчастої гуми ТУ109-РГИ шириною  $b=10$  мм, який потрібен для переміщення листа фанери розміром  $a=841$ ,  $b=1189$  мм та висотою  $h=18$  мм при пересуванні маніпулятора з прискоренням  $a_{\max}=4$  м/с<sup>2</sup> та горизонтальним розташуванням робочої поверхні присоски.

Визначимо вагу листа:

$$m = abh\gamma.$$

де  $\gamma$  – густина сталевोї заготовки, приймаємо  $\gamma=17500$  кг/м<sup>3</sup>, тоді

$$m = 2,5 \cdot 1,25 \cdot 0,02 \cdot 17500 = 1094 \approx 1100 \text{ кг.}$$

Сила підйому листа дорівнює

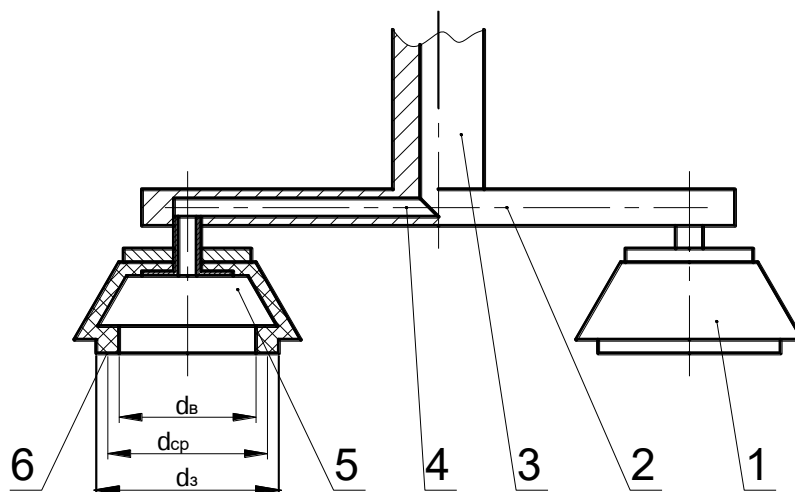


Рис. 26. Пневматичний захват: 1 – пневматична присоска; 2 – кронштейн;  
3 – вертикальний важіль; 4 – повітряні канали; 5 – вакуумна порожнина;  
6 – утримуюча кромка

$$R_z = mg = 1100 \cdot 9,81 = 10791 \approx 11 \text{ кН.}$$

Сила зсуву листової заготовки зі стопи

$$R_x = \frac{R_z a_{\max}}{g} = 10791 \cdot \frac{4}{9,81} = 4400 \text{ Н.}$$

Крутний момент, що діє у місці захвату заготовки

$$M = R_x \cdot h/2 = 4400 \cdot 100/2 = 220000 \text{ Н·м,}$$

де  $h$  – максимальна відстань від присоски до краю листової заготовки.

Потрібна сила присмоктування  $P$  пневматичного захвату, з умови відсутності зсуву заготовки вздовж площини робочої поверхні присоски

$$P = \frac{K_x R_x}{\mu} + K_z R_z = 2 \cdot \frac{220000}{0,4} + 3 \cdot 11000 = 1133000 \text{ Н,}$$

де  $K_x$ ,  $K_z$  та  $K_m$  – відповідно, коефіцієнти запасу по силі зсуву, силі відриву та моменту;  $\mu$  – коефіцієнт тертя. Приймаємо  $K_x = 2$ ;  $K_z = K_m = 3$ ;  $\mu = 0,4$ .

З формули

$$P = S k_p (P_a - P_b) = \frac{\pi (d_{cp} - b)^2}{4} K_o (P_a - P_b)$$

знаходимо середній діаметр  $d_{cp}$  ущільнювача пневматичної присоски

$$d_{cp} = \sqrt{\frac{4P}{\pi K_p (P_a - P_b)}} + b_n.$$

де  $(P_a - P_b)$  – граничне розрядження у вакуумній камері присоски;  $b_n$  – ширина кромки обода присоски. Приймаємо  $(P_a - P_b) = 9 \text{ Н/см}^2$ ;  $K_p = 0,85$ ;  $b_n = 1 \text{ см}$ , тоді

$$d_{cp} = \sqrt{\frac{4 \cdot 666,9}{3,14 \cdot 0,85 \cdot 9}} + 1 = 10,54 + 1 = 11,54 \text{ см.}$$

Приймаємо середній діаметр присоски  $d_{cp} = 120 \text{ мм}$ . Зовнішній діаметр кромки присоски  $d_3 = d_{cp} + b = 120 + 10 = 130 \text{ мм}$ . Внутрішній діаметр вакуумної камери присоски  $d_b = d_{cp} - b = 120 - 10 = 110 \text{ мм}$ .

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 53   |

#### 4.4.3. Розрахунок конічної зубчастої передачі приводу підйомника бункера

Механізм приводу підйомника (рис. 27) включає в себе електричний двигун 1, зубчастий конічний редуктор 3 та гвинтову передачу. Ходовий гвинт 6, обертаючись, забезпечує поступальний рух кульковій гайці 7, яка поєднана з підйомною плитою 8 підйомника.

Конічна шестерня 4 редуктора через муфту 2 з'єднана з валом електродвигуна 1. Зубчасте конічне колесо 5 встановлено безпосередньо на шийці ходового гвинта 6 підйомника.

Вихідними даними для розрахунку приводу є наступні.

Електродвигун характеризується обертовим моментом на валу  $M_{\max}=46 \text{ Н}\cdot\text{м}$  та максимальною частотою обертання валу  $n_1=1000 \text{ хв}^{-1}$ ; частота обертання вихідного валу редуктора  $n_2=750 \text{ хв}^{-1}$ ; термін служби передачі  $t=500 \text{ год.}$ ; навантаження реверсивне з помірними коливаннями, клас навантаження  $H0,4$ ; ступінь точності 8.

Передавальне відношення редуктора

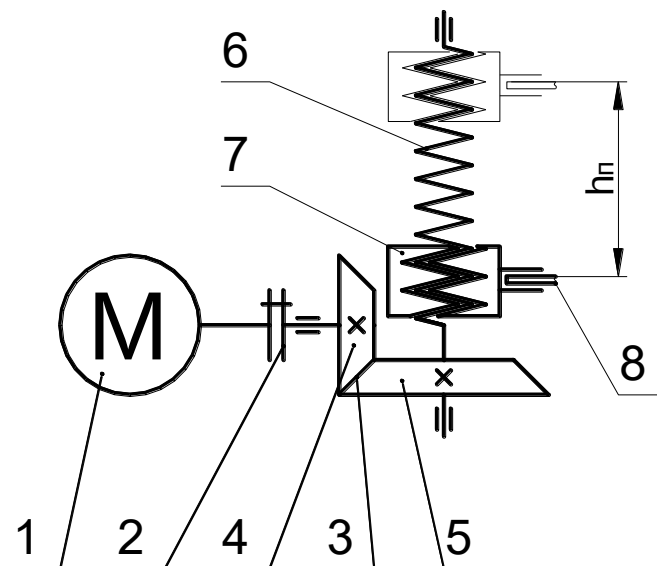


Рис. 27. Механізм приводу підйомника: 1 – електричний двигун; 2 – муфта; 3 – зубчастий конічний редуктор; 4 – конічна шестерня; 5 – конічне колесо; 6 – ходовий гвинт; 7 – гайка; 8 – платформа

$$U = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1000}{750} = 1,33.$$

Матеріал зубчастих коліс – сталь 45 з термообробкою – нормалізація, у результаті отримана твердість HB=180,  $\tau_T=320$  МПа.

Попереднє значення міжосьової відстані  $a'$  визначаємо за формулою:

$$a' = (u + 1) \sqrt[3]{\left(\left(\frac{270}{[\tau_n]}\right)^2 \frac{M_p}{\psi_a}\right)}.$$

Крутний момент

$$M_p = M_{\max} \cdot K_{H\partial} \cdot K_H.$$

Коефіцієнт довговічності

$$K_{H\partial} = K_{He} \sqrt[3]{\frac{N}{N_{HB}}} \leq 1;$$

Коефіцієнт еквівалентності  $K_{He}=0,4$ .

Твердість зубчастих коліс однакова, тому розрахунок будемо робити за більш навантаженою шестернею.

Напрацювання шестерні:

$$N = t \cdot 60 \cdot n_1 = 500 \cdot 60 \cdot 1000 = 30 \cdot 10^6 \text{ циклів.}$$

Оскільки навантаження реверсивне, напрацювання зменшується у два рази:  $N = 15 \cdot 10^6$  циклів. Базове число циклів  $N_{HB}$  при твердості HB 180  $N_{HB} = 10 \cdot 10^6$  циклів.

Тоді:

$$K_{H\partial} = 0,4 \sqrt[3]{\frac{15 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6}} = 0,49.$$

Коефіцієнт навантаження визначаємо за формулою:

$$K'_H = K'_{H\alpha} K'_{H\beta} K'_{H\nu},$$

де  $K'_{H\alpha}$  – коефіцієнт розподілення навантаження;  $K'_{H\beta}$  – коефіцієнт концентрації навантаження;  $K'_{H\nu}$  – коефіцієнт динамічності навантаження. Приймаємо:  $K'_{H\alpha} = 1,08$ .

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 55   |

Попередня окружна швидкість:

$$v = \frac{n_1}{10^3} \cdot C_v \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{\max}}{n^2 \cdot \Psi'_a}}.$$

Приймаємо  $\Psi'_a=0,2$ ;  $C_v=13$ . Тепер розрахуємо окружну швидкість:

$$v' = \frac{1000}{10^3 \cdot 13} \sqrt[3]{\frac{46 \cdot 10^3}{1,33 \cdot 0,2}} = 3,9 \text{ м/с.}$$

Відношення ширини колеса до діаметра шестерні:

$$\frac{b}{d_1} = \Psi'_a \cdot \frac{n+1}{2} = 0,2 \cdot \frac{1,33+1}{2} = 0,233.$$

Коефіцієнт концентрації  $K_{H\beta}$  або твердості колеса при  $\beta_2 < 35^\circ$

$$K_{H\beta} = K_{H\beta}^0 (1-x) + x.$$

Коефіцієнт режиму

$$K = \sum \frac{M_i}{M_{\max}} \cdot \frac{N_i}{N}.$$

Для класу навантаження H0,4 отримаємо:

$$X = \frac{M_{\max}}{M_{\max}} \cdot \frac{0,05N}{N} + \frac{0,4M_{\max}}{M_{\max}} \cdot \frac{0,2N}{N} + \frac{0,1M_{\max}}{M_{\max}} \cdot \frac{0,75N}{N} = 0,05 + 0,08 + 0,075 = 0,205.$$

Початковий коефіцієнт концентрації  $K_{H\beta}^0=1,8$ .

Коефіцієнт концентрації  $K_{H\beta}$

$$K'_{H\beta} = 1,8(1-0,205) + 0,205 = 1,636.$$

Коефіцієнт динамічності  $K_{Hv}=1,15$ . Знаходимо коефіцієнт навантаження

$$K'_{Hv} = 1,08 \cdot 1,636 \cdot 1,15 = 2,03.$$

Розрахунковий момент

$$M_p = 46 \cdot 0,99 \cdot 2,03 = 92,4 \text{ Н·м.}$$

Допустиме контактне напруження

$$[\tau_n] = \frac{\tau_n^0}{S_n} = \frac{2HB + 70}{S_n} = \frac{2,180 + 70}{1,1} = 391 \text{ МПа.}$$

Визначаємо попередню міжосьову відстань:

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 56   |

$$a' = (1,33 + 1)^3 \sqrt{\left( \frac{270}{391 \cdot 1,33} \right) \cdot \frac{92,4 \cdot 10^3}{0,2}} = 116,64 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $a' = 125 \text{ мм.}$

Ширина колеса  $b_2 = a' \Psi_a' = 125 \cdot 0,2 = 25 \text{ мм.}$

Дійсна швидкість  $v$ :

$$v = \frac{2 \cdot a \cdot \pi \cdot n}{(1,33 + 1) \cdot 60} = \frac{2 \cdot 0,125 \cdot 3,14 \cdot 1000}{(1,33 + 1) \cdot 60} = 5,6 \text{ м/с.}$$

Оскільки  $v > v'$  уточнюємо коефіцієнт  $K_{H\alpha}$  та  $K_{H\beta}$ :  $K_{H\alpha} = 1,1$ ;  $K_{H\beta} = 1,22$ .  
Значення коефіцієнта концентрації не змінилося. Остаточний коефіцієнт навантаження

$$K_H = 1,1 \cdot 1,636 \cdot 1,22 = 2,196.$$

Фактичне контактне напруження розраховуємо за формулою

$$r_k = 270 \frac{u + 1}{a \cdot n} \sqrt{\frac{u + 1}{b_2} \cdot M_p};$$

$$r_k = 270 \frac{1,33 + 1}{125 \cdot 1,33} \sqrt{\frac{1,33 + 1}{25} \cdot 92,4 \cdot 10^3} = 351 \text{ МПа};$$

$$r_k < [C_n] = 391 \text{ МПа.}$$

Таким чином, контактна витривалість зубців забезпечена.

Визначаємо модуль зубчастого зачеплення за формулою

$$m = \frac{5 \cdot F_t \cdot K_{FD} \cdot K_F}{b_1 \cdot [\tau_F]}.$$

Коефіцієнт довговічності  $K_{FD}$  визначаємо за формулою:

$$K_{FD} = K_{FE} \cdot \sqrt[6]{\frac{N}{N_{FG}}} \leq 1.$$

При реверсивному режимі роботи напруження не зменшують  
 $N = 300 \cdot 10^6$  циклів. Коефіцієнт навантаження розраховуємо так:

$$K_F = K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fv}.$$

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 57   |

Коефіцієнт розподілу навантаження  $K_{F\alpha}=1$ , коефіцієнт концентрації при  $b/d_1 = 0,233$  дорівнює  $K_{x\beta}^0=1,61$ . Коефіцієнт динамічності  $K_{Hv}=1,54$ .

Тоді:

$$K_H=1 \cdot 1,61 \cdot 1,54=2,48.$$

Допустимі напруження на вигин вибираємо

$$[\tau_F] = \frac{\tau_F^0}{S_F} = \frac{1,8 \overline{HB}}{S_F} = \frac{1,8 \cdot 180}{1,75} = 194 \text{ МПа.}$$

Ширина шестерні

$$b_1=1,12 \cdot b_2=1,12 \cdot 25=28 \text{ мм.}$$

Попереднє значення модуля

$$m' = \frac{5 \cdot 644,7 \cdot 1 \cdot 2,48}{28 \cdot 194} = 1,47 \text{ мм.}$$

Приймаємо найближче більше стандартне значення  $m=1,6$  мм.

Сумарне число зубів будемо визначати за формулою:

$$z'_\Sigma = z_2 + z_1 = \frac{2a}{m} \cos \beta.$$

Для прямозубої конічної передачі  $\beta=0$ . З огляду на це, визначаємо число зубців:

$$z'_\Sigma = \frac{2 \cdot 125}{1,6} = 156,25.$$

Приймаємо  $z_\Sigma=156$ .

Знайдемо число зубів шестерні:

$$z'_1 = \frac{z_\Sigma}{n+1} = \frac{156}{1,33+1} = 66,9.$$

Приймаємо  $z_1=67$ .

Число зубців колеса  $z_2=z_\Sigma-z_1=156-67=89$ .

Перевіряємо фактичне напруження вигину зубців шестерні:

$$\tau_{F1} = \frac{Y_{F1} \cdot Y_\beta}{b_1 \cdot m} F_t \cdot K_{Fd} \cdot K_c \cdot$$

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 58   |

Коефіцієнт форми зуба  $Y_{F1}=3,616$ .

Коефіцієнт нахилу зуба  $Y_{\beta}=1$ , тоді

$$\tau_{F1} = \frac{3,616 \cdot 1}{28 \cdot 1,6} 644,7 \cdot 1 \cdot 2,48 = 129 \text{ МПа} < [\tau_F] = 194 \text{ МПа}.$$

Ділильні діаметри шестерні та колеса

$$d_1 = m \cdot z_1 = 1,6 \cdot 67 = 107,2 \text{ мм};$$

$$d_2 = m \cdot z_2 = 1,6 \cdot 89 = 142,4 \text{ мм}.$$

Діаметри вершин зубів визначаються:

$$d_a = d + 2m(1+x).$$

Для некорегованих зубців  $X=0$ , отже:

$$d_{a1} = d_1 + 2m = 107,2 + 3,2 = 110,4 \text{ мм};$$

$$d_{a2} = d_2 + 2m = 142,4 + 3,2 = 145,6 \text{ мм}.$$

Діаметр вершин зубців розраховуємо за формулою:

$$d_f = d - 2m(1,25-x);$$

$$d_{f1} = d_1 - 2,5m = 107,2 - 2,5 \cdot 1,6 = 103,2 \text{ мм};$$

$$d_{f2} = d_2 - 2,5m = 142,4 - 2,5 \cdot 1,6 = 138,4 \text{ мм}.$$

#### 4.4.4. Розрахунок гвинтового механізму приводу підйомника бункера

Проведемо розрахунок гвинтового механізму підйомника (рис. 15), який забезпечує вертикальне переміщення пачки листових заготовок.

Вибираємо матеріал гвинта та гайки. Для гвинта вибираємо нормалізовану сталь 45 ( $\tau_T=390$  МПа), для гайки бронзу – Бр010Ф1.

Допустимі напруження для матеріалу гвинта при  $[n_T]=3$ :

$$[\tau] = \frac{\tau_T}{[n_T]} = \frac{390}{3} = 130 \text{ МПа}.$$

Оскільки механізм підйому повинен забезпечити точне позиціонування, то середній допустимий тиск між робочими поверхнями гвинта та гайки для

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 59   |

пари сталь – бронза приймаємо заниженими:  $[p]=6$  МПа. Вибираємо для гвинта механізму трапецеїдальну однозаходну різьбу.

Для усунення осьового зазору гайка повинна бути здвоєною. Навантаження завжди передається через одну гайку, для якої приймаємо  $K=1,15$ .

Середній діаметр різьби трапецеїдального профілю дорівнює

$$d_2 \geq \sqrt{\frac{2 \cdot Fa}{\pi \cdot K \cdot [p]}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6229}{3,14 \cdot 1,25 \cdot 6}} = 23 \text{ мм.}$$

Згідно ГОСТ 9484-81 стандартне значення  $d_2=23,5$  мм. При цьому навантажений діаметр гвинта  $d=26$  мм.

Для технології виготовлення ходових гвинтів істотне значення має відношення його довжини до зовнішнього діаметра  $d$ , яке має становити  $l/d \leq 25$ . Перевіримо це співвідношення для нашого випадку

$$\frac{l}{d} = \frac{750}{26} = 28,8.$$

Зовнішній діаметр різьби гвинта визначаємо зі співвідношення для нашого випадку:

$$\frac{l}{d} = 25;$$

$$d \geq \frac{l}{25} = \frac{750}{25} = 30 \text{ мм.}$$

Згідно ГОСТ 9484-81 підбираємо найближче значення різьби гвинта:

- зовнішній діаметр різьби  $d=32$  мм;
- середній діаметр  $d_2=29$  мм;
- внутрішній діаметр  $d_3=25$  мм;
- крок різьби  $S=6$  мм.

Кут підйому різьби:

$$\Psi = \arctg \frac{S}{\pi \cdot d_2} = \arctg \frac{6}{3,14 \cdot 29} = 3^{\circ}46'.$$

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 60   |

Наведений кут тертя для сталі по олов'яно-фосфорній бронзі приймаємо  $\rho=5^{\circ}43'$ . Оскільки  $\psi < \rho$ , передача гвинт-гайка з тертям ковзання самогальмівна та має достатній запас по самогальмуванню (різниця між  $\rho$  та  $\psi$  приблизно  $2^{\circ}$ ).

Оскільки гвинт піддається стисканню, перевіримо виконання відповідної умови міцності та стійкості. Для цього за знайденим значенням  $d_3=25$  мм визначаємо гнучкість гвинта:

$$\lambda = \frac{vl}{L} = \frac{4vl}{d_3};$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot 1 \cdot 750}{25} = 120.$$

Кінці гвинта закріплені у радіально-однорядних упорних підшипниках, тому приймаємо  $\nu=1$ .

Для даної гнучкості знаходимо коефіцієнт зменшення основного допустимого напруження  $\varphi=0,3$ , тоді допустиме напруження

$$\tau = \frac{4Fa}{\pi d_3^2} \leq \varphi[\tau_{on}];$$

$$\tau = \frac{4 \cdot 6229}{3,14 \cdot 25^2} = 12,7 \leq 0,3 \cdot 130 = 39.$$

Визначимо параметри гайки.

Висоту гайки знайдемо за формулою

$$H_r = Kd_2 = 1,25 \cdot 29 = 36,25 \text{ мм.}$$

Число витків різьби у гайці:

$$z = \frac{H_r}{S'} = \frac{36,25}{6} = 6.$$

ККД гвинтової передачі

$$\eta_{bm} = 0,95 \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg}(\psi + \rho)};$$

$$\eta_{bm} = 0,95 \frac{\operatorname{tg} 3^{\circ} 46'}{\operatorname{tg}(3^{\circ} 46' + 5^{\circ} 43')} = 0,37.$$

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 61   |

## 4.5. Об'єктив

Для концентрації лазерного проміння на поверхні оброблюваної заготовки застосовується оптична система – об'єктив (рис. 28).

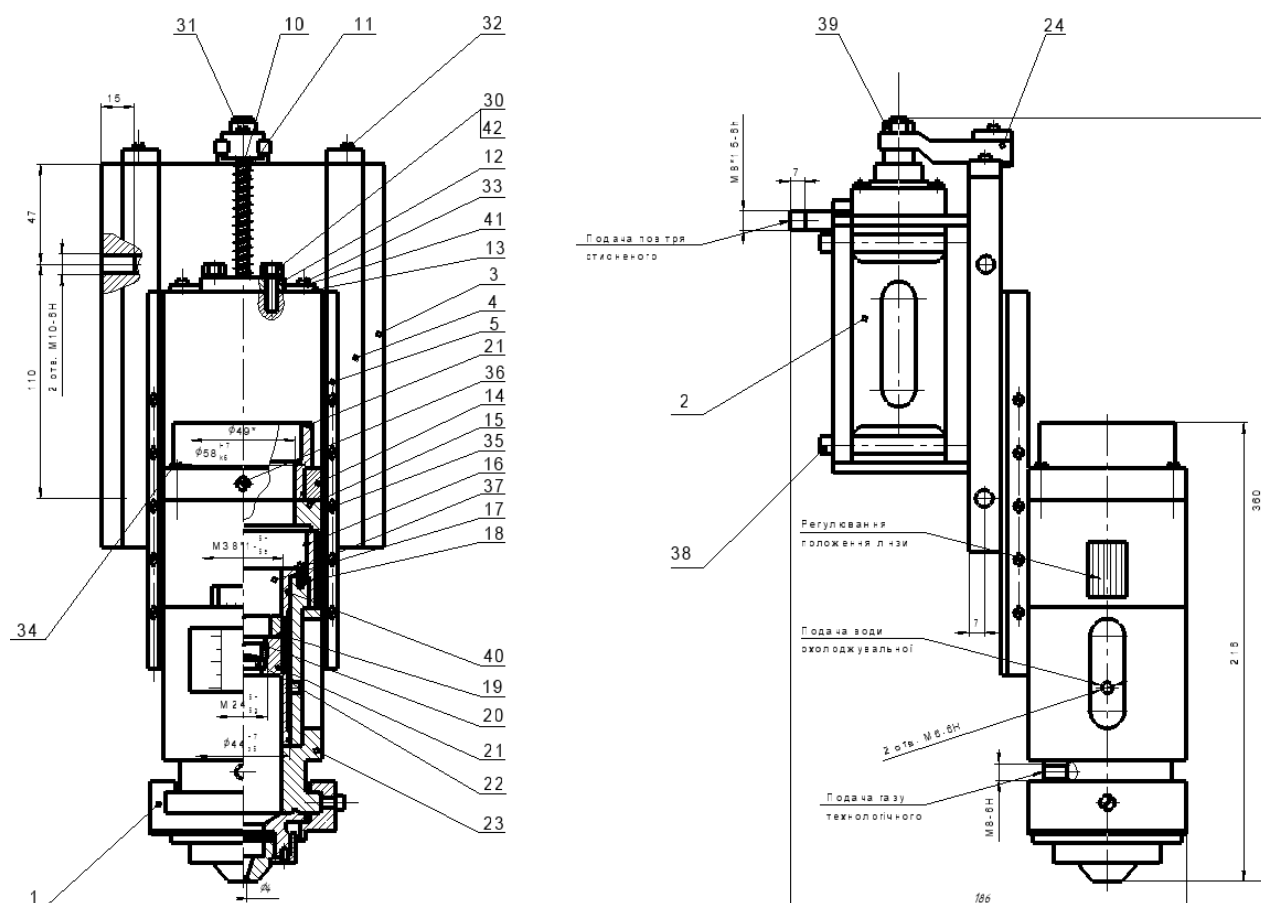


Рис. 28. Об'єктив – оптична система для концентрації лазерного проміння: 1 – Блок сопловий; 2 – циліндр пневматичний; 3 – корпус; 4 – направляючі; 5 – салазки;

## 4.6. Лазерний технологічний комплекс

В результаті проведення проєктування та розрахунку елементів лазерного технологічного комплексу отримали автоматизовану систему для розкрою листових металевих заготовок (рис. 17)

### РИСУНОК ЛТК

Рис. 17. Спроектований лазерний технологічний комплекс:

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 63   |

## Література

1. Малоотходные процессы резки лучом лазера./ В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. - Киев: Техника, 1987, 112 с.
2. Справочник по технологии лазерной обработки./ В. С. Коваленко, В. П. Котляров, В. П. Дятел и др.; Под общей ред. В. С. Коваленко.- К.: Техніка, 1985.- 167 с.
3. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов.- М.: Энергоатомиздат, 1985.- 208 с.
4. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов.- М.: Машиностроение, 1985,- 496 с.
5. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов.- М.: Мир, 1986,- 504 с.
6. Промышленное применение лазеров./ Под ред. Г. Кебнера; Пер. с англ. А. Л. Смирнова; Под ред. И. В. Зуева.- М.: Машиностроение, 1988,- 280 с.
7. Вычислительная оптика: Справочник./ М. М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др. Под ред. М. М. Русинова.- Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984,- 423 с., ил.
8. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності "Машини і технологія вискоєфективних процесів обробки"./ Укл. А. Е. Розенплентер, М. Г. Білецька, Т. В. Панішева.- К.: КПІ, 1993, 16 с.
9. Сванидзе Э. Н., Харлампович О. Я. Технологические лазеры: Экономичность и границы эффективности.- М.: Машиностроение, 1990.- 80 с.
10. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов./ А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов; Под ред. А. Г. Григорьянца.- М.: Высш. шк., 1988.- 127 с.
11. Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л. Оборудование и технология газоплазменной обработки металлов и неметаллических материалов. Учебник для студентов вузов.- М.: Машиностроение, 1974.- 312 с, ил.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 64   |

12. Степанов А. Г., Сабарно Р. В. Техника безопасности при эксплуатации лазерных установок.- К.: Техніка, 1989.- 109 с.

13. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация/ Г. А. Абильсиитов, В. Г. Голубев, В. Г. Гонтарь и др.; Под общ. ред. Г. А. Абильсиитова.- М.: Машиностроение, 1991.- 432 с.: ил.

14. Ковалев Н. А. Теория механизмов и детали машин. Изд. 2-е. Учебник для вузов.-М.: Высшая школа, 1974.- 319 с.: ил.

15. Методические указания по обеспечению лазерной безопасности для студентов всех специальностей/ Сост. А. Г. Степанов, В. В. Зацарный, Р. В. Сабарно, Д. Ф. Иванчук.- Киев: КПИ, 1986.- 44 с.

16. Методические указания по разработке мероприятий в дипломных проектах и работах по защите от инфракрасных излучений. Для всех специальностей./ Сост. Д. Ф. Иванчук, А. Г. Степанов, Р. В. Сабарно, К. М. Шевченко.- Киев: КПИ, 1982.- 36 с.

17. Положительное решение патентной экспертизы по заявке № 4951652/08/044349/ от 10.07.92 г. Анализатор распределения интенсивности пучков лазерного излучения./ М. Н. Чернавский, И. И. Штома, В. П. Котляров и др.

|     |      |          |        |      |                   |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|     |      |          |        |      | МЛ81.00.00.000.ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 65   |