

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА
ЗВАРЮВАННЯ ІМЕНІ Є. О. ПАТОНА
КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ О. Д. Кагляк
“ ____ ” _____ 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: «Розробка технології та устаткування для виготовлення та зміцнення
поверхневих шарів прес-форм»

Виконав: студент II курсу, групи ФП-21мп

Купчак Денис Васильович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____ д. т. н., доцент Анякін М. І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____ д. т. н., доцент Пащенко В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2024 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет: Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона

Кафедра: Лазерна техніка та фізико-технічні технології

Рівень вищої освіти – другий (мігістр)

Спеціальність (спеціалізація): Прикладна механіка (Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Кагляк О.Д.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«16» січня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт (роботу) студенту

Купчаку Денису Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи): Розробка технології та устаткування для виготовлення та зміцнення поверхневих шарів прес-форм.

керівник проєкту (роботи) _____ ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» листопада 2023 р. №5159-с

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
	Пошук патентів, публікацій.	25.04-27.04.2023	
	Аналіз публікацій.	28.04-15.05.2023	
	Робота над пояснювальною запискою	16.05-16.05.2023	
	Робота над графічною частиною	16.06-01.07.2023	
	Загальна верстка	02.07-02.09.2023	
	Робота над презентацією	03.10-13.10.2023	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» спеціальності 131 прикладна механіка спеціалізації – Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки. Купчак Денис Васильович. Керівник Анякін Микола Іванович. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, кафедра «Лазерної техніки та фізико-технічних технологій». Група ФП-21мп. 2024. –91 с.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновку, переліку посилань із 12 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 91 с. основного тексту, 20 рисунків, 8 таблиць.

Метою даного проєкту є дослідження та розробка обладнання для відновлення та зміцнення прес-форм, компонентів прес-форм. Виконання робіт з відновлення цих деталей пов'язане з низкою проблем, які вимагають значних витрат часу, ресурсів та технічного оснащення і призводять до збільшення як матеріальних, так і фізичних витрат.

В даний час однією з найбільш перспективних ідей вважається відновлення деталей за допомогою лазерної газопорошкової обробки поверхні. В даній роботі досліджено причини пошкодження прес-форм, розглянуто новітні види ремонту, наведено схему установки лазерної обробки та деяких її елементів, проаналізовано її відповідність вимогам охорони праці, а потім запропоновано спосіб ремонту деталі з використанням лазерної газопорошкової обробки поверхні. Графічна частина дипломного проєкту містить п'ять креслень формату А1, включаючи постановку задачі, схему технологічного процесу, огляд обладнання лазерної технології, креслення пристрою для закріплення деталі та креслення компонентів оптичної системи.

ABSTRACT

Diploma project of educational and qualification level "Master" specialty 131 applied mechanics specialization - Laser technology and computerized processes of physical and technical processing. Kupchak Denys. The head is Anyakin Mykola. KPI them. Igor Sikorsky. Mechanical Engineering Institute, Department of Laser Engineering and Physical and Technical Technologies. Group Fp-21mp. 2024. –91 p.

The explanatory note consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of references from 12 titles. The total volume of work is 91 p. main text, 20 figures, 8 tables.

The method of this project is the research and development of a method for restoring and strengthening the mold and components of the mold. The performance of work to restore the time of these parts is associated with a low problem that requires significant costs, resources and technical equipment and leads to an increase in both material and physical costs.

Currently, one of the most promising ideas is the restoration of parts using laser gas powder surface treatment. In this work, the causes of damage to the mold are investigated, the latest types of repair are given, a diagram of the installation of laser treatment and some of its elements is given, its compliance with labor protection requirements is analyzed, and then a method of repairing parts using laser gas powder surface treatment is proposed. The graphic part of the diploma project contains five drawings in A1 format, including the statement of the problem, the diagram of the technological process, an overview of the laser technology equipment, the attachment of the device for fixing the parts, and the drawing of the components of the optical system.

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
Вступ.....	8
1. ОПИС ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	10
1.1 Опис деталі.....	10
1.2 Проблеми	11
1.3 Можливі методи ремонту.	12
1.4 Електродугове наплавлення.	15
1.5 Пічна пайка.....	19
1.6 Лазерне наплавлення.....	20
1.7 Використанням сфокусованого лазерного випромінювання.....	25
1.7 Матеріал.....	27
Висновки	29
2. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	30
2.1 Особливості лазерного наплавлення	30
2.2 Обладнання.....	32
2.3 Переваги впровадження.	37
2.4 Недоліки лазерного наплавлення	38
Висновки	41
3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	42
3.1 Розрахунок пристрою затискання.....	42
3.2 Розрахунок оптичної системи	45
3.3 Розрахунок розмірів зони термічного впливу.....	51
Висновки	78
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ.	79
4.1 Загальні відомості.....	79
4.2 Електробезпеку.	80
4.3 Освітлення приміщення	81

4.4 Шум.....	82
4.5 Пожежна безпека	82
4.6 Лазерна безпека.....	84
4.7 Виробнича санітарія	87
4.8 Заходи безпеки при експлуатації лазерного технологічного комплексу.....	88
Висновки	89
Загальний висновок.....	90
Список використаних джерел:	91

Вступ

Прес-формами називають форми для виготовлення моделей. Їх класифікують за способами виготовлення, механізації складання та розбирання, за матеріалом та кількістю гнізд. При індивідуальному та одиничному виробництві застосовуються одномісні прес-форми, при масовому - багатомісні. Для складно-профільних художніх виливків прес-форми виготовляють із гіпсу, ласу та гуми.

Класифікація прес-форм

Прес-форми *прямого пресування*. У прес-формі прямого пресування завантажувальна камера є продовженням матриці. Матеріал завантажують у матрицю, де він, нагріваючись, набуває пластичності, а потім ущільнюється під дією пуансону. Прес-форма прямого пресування повністю стуляється, коли остаточно оформлено виріб. Такий клас прес-форм застосовують для малих партій найпростіших по конфігурації виробів.

Прес-форми *ливарного пресування*. У прес-формі ливарного пресування завантажувальна камера виконується окремо від формотворчої порожнини і перед заповненням її матеріалом прес-форма повністю зімкнута. Прес-матеріал надходить із завантажувальної камери у формотворну порожнину через литникові отвори (канали). Прес-форми ливарного пресування виконуються з верхньою або нижньою камерою завантаження. Такий клас прес-форм використовують для виробництва виробів практично будь-якої складності.

На даний час запропоновано декілька технологій відновлення, основна це аргонно -дугове наплавлення, яке характеризується складністю та тривалим процесом при відновленні деталі і механічною обробкою після наплавлення.

Найперспективнішим методом на даний момент є лазерне газопорошкове осадження.

Хоча використовуваний металевий порошок схожий на той, що використовується в дроті для пошарового аргонодугового зварювання, у технології порошкового наплавлення є багато відмінностей у процесі формування контурів деталей.

Порошок подається через сопло, співвісне з випромінюванням, і плавиться безпосередньо на обробленій поверхні. Цей процес дозволяє досягти досить високої точності, створюючи шари матеріалу товщиною від 0,1 міліметра до кількох сантиметрів. У процесі наплавлення відбувається металургійне з'єднання.

Технологія лазерного наплавлення може використовуватися як для пошарового нарощування деталей, так і для ремонту або виправлення наявних дефектів.

Постійний розвиток адитивних технологій надає можливість виготовляти функціональні деталі та компоненти за один раз. З кожним роком асортимент використовуваних матеріалів, точність виготовлення і якість деталей зростає, відкриваючи нові можливості для дизайнерів і виробників.

1. ОПИС ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

1.1 Опис деталі.

Прес-форма (рисунок 1.1) [1] — пристрій, що формує метал, пластмасу, гуму та інші матеріали у виробі різної форми під тиском, створюваним ливарною машиною. Використовуються для лиття під тиском металевих і полімерних матеріалів, а також для лиття розплавлених моделей і пресування полімерних матеріалів. Штампова матриця складається з нерухомої частини (основи) і рухомої частини (пуансона). Зважаючи на високу складність виготовлення та вартість, прес-форми використовуються переважно для серійного та масового виробництва. Обладнання працює в умовах високого навантаження (високий тиск і температура).



Рис. 1.1 – Прес-форма.[1]

1.2 Проблеми

Основними причинами руйнування прес-форми є термічна втома, знос і зміни форми та розміру деталей, що виготовляють форму.

Зношування поверхні деталі відбувається внаслідок тертя між матеріалом, що обробляється, і корозії, викликаній високими температурами і взаємодією з хімічно активними елементами, що містяться в ньому. Через такий знос погіршиться якість поверхні виробу, збільшиться шорсткість, зміняться розміри. [2]

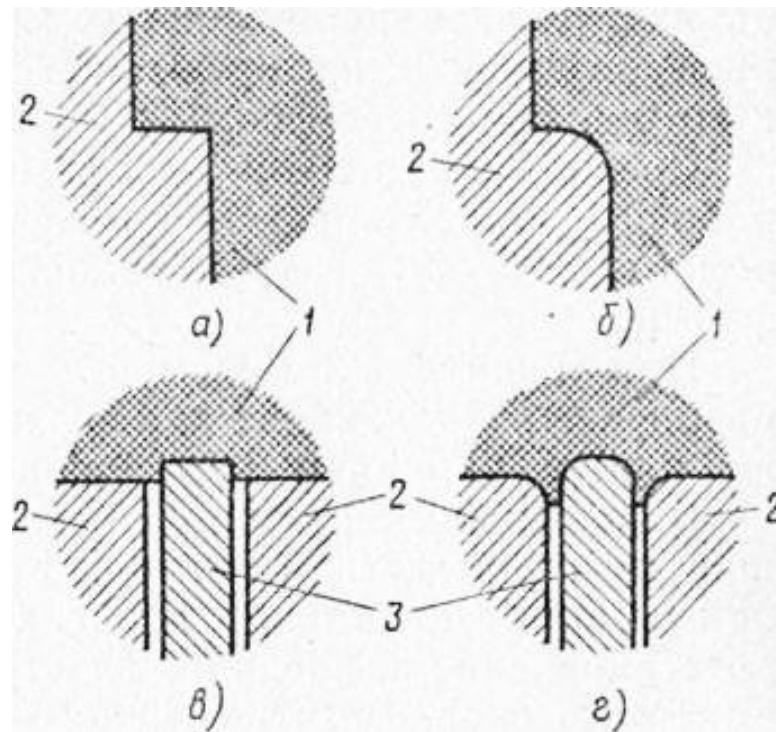


Рисунок 1.2 Формоутворення порожнини нової (а і в) зношеної (б і г) прес-форм:

1 - матеріал виробу, 2 - прес-форма, 3 – стрижень [2]

Нагрівання деталей прес-форми до високої температури і зміни частини нагрівання та охолодження можуть спричинити термічну напругу та термічну втому деталей. Також спостерігалось корозійне розтріскування та втома. Ці явища призводять до появи тріщин на поверхні лиття. У своєму разі вони створюють виступи матеріалів у вигляді гребінців на поверхні виробу. Іншим дефектом

формотворчих поверхонь прес-форми є сітка розпалу, яка з'являється як результат термічної втоми. Цей дефект проявляється на виробі у вигляді сітки заток.

Під час роботи форми матеріал деформується на чисельних швах. Такі дефекти з'являються в стиках матриця - стрижень, матриця - виштовхувач і ін. (рис 1). Вони можуть спричинити появу облоя на продукті, видалення яких потребує багато часу та праці, а також може зменшити якість продукту.

При роботі прес-форми відбувається поступове зминання, викривлення і зміна форми стрижнів, виштовхувачів, що беруть участь в формуванні виробу. Дуже часто прес-форма виходить з ладу через налипання і приварювання матеріалу до формоутворюючих поверхонь, виникнення на них вм'ятин.

Зазначені численні дефекти унеможливають подальшу експлуатацію прес-форми і вимагають її ремонту. Крім перерахованих дефектів, обумовлених зносом прес-форми, в практиці є випадки виходу її з ладу внаслідок недбалого або невмілого поводження з нею.[2]

1.3 Можливі методи ремонту.

Залежно від ступеня складності розрізняють види ремонту прес-форм: профілактичний, середній, капітальний і аварійний. Перші три види ремонту є плановими.

Для того, щоб передати прес-форму на ремонт, необхідно скласти звіт про дефект або звіт про подію. Ці документи є підставою для оформлення замовлення на ремонт. Дефекти, які необхідно усунути, вказані в наряді. Для комплексного ремонту ключових частин прес-форми можуть бути розроблені технологічні процеси та ремонтні креслення.

Під час *профілактичного* обслуговування залишків напруга усувається відповідно до термічної обробкою, а оксиди на поверхні сформованих деталей видаляються обробленим металом. Замініть деталі, які найбільше зношуються,

наприклад срижні. Такий ремонт виконується в інструментальній зоні майстерні. Зазвичай трудомісткість поточного ремонту не перевищує 10-15% трудомісткості виготовлення прес-форми.

Середній ремонт це може бути заміна однієї з основних робочих частин прес-форми. Трудомісткість середнього ремонту 25-30% відповідає трудомісткості виготовлення прес-форми.

При *капітальному* ремонті прес-форму повністю розбирають. Проводять заміну матриць, перешліфовувати плити, замінюють зношені механізми.

В даний час при всіх видах ремонту деталі прес-форми які вийшли з ладу, підлягають заміні. І тільки у випадках із ремонті унікальних дорогих прес-форм виконують відновлення поламаних деталей. Наприклад, вм'ятину, скол будь-якого елементу можна усунути шляхом наплавлення відповідного матеріалу в цьому місці і подальшої слюсарної обробки.

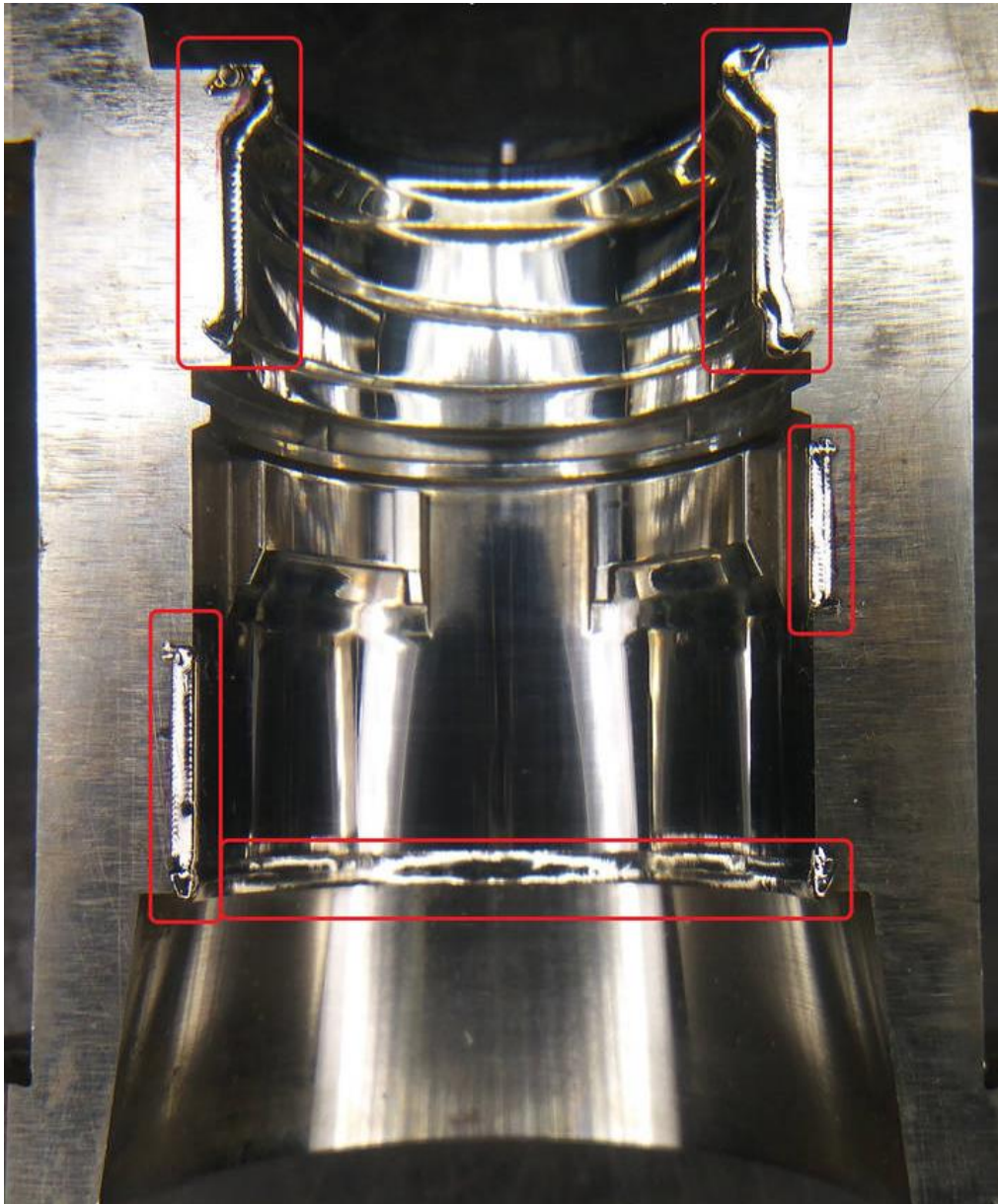


Рис.1.3 -Ремонт прес-форми лазерним наплавленням[3]

Також пропонується для підвищення зносостійкості операція локально селективного осадження з перехідним шаром (TL) з використанням процесу прямого енергетичного осадження (DED) .

Концепція технології локально-селективного осадження Рис. 1.3 ілюструє концепцію технології локально-селективного осадження за допомогою TL. Процес DED виготовляє деталі за допомогою почергового осадження кульок . Намистини створюються за допомогою процесу лазерного плакування за допомогою коаксіальної насадки. Запропонована технологія створює TL між нанесеним шаром

і підкладкою для зменшення теплової втоми, викликаній відмінностями теплових властивостей.

Після видалення зношених ділянок на підкладці утворюються TLs шляхом осадження змішаного порошку, що складається з підкладки та нанесеного матеріалу. Запропонована технологія дозволяє мінімізувати шари в TL за рахунок розведення шарів поблизу з'єднаних областей

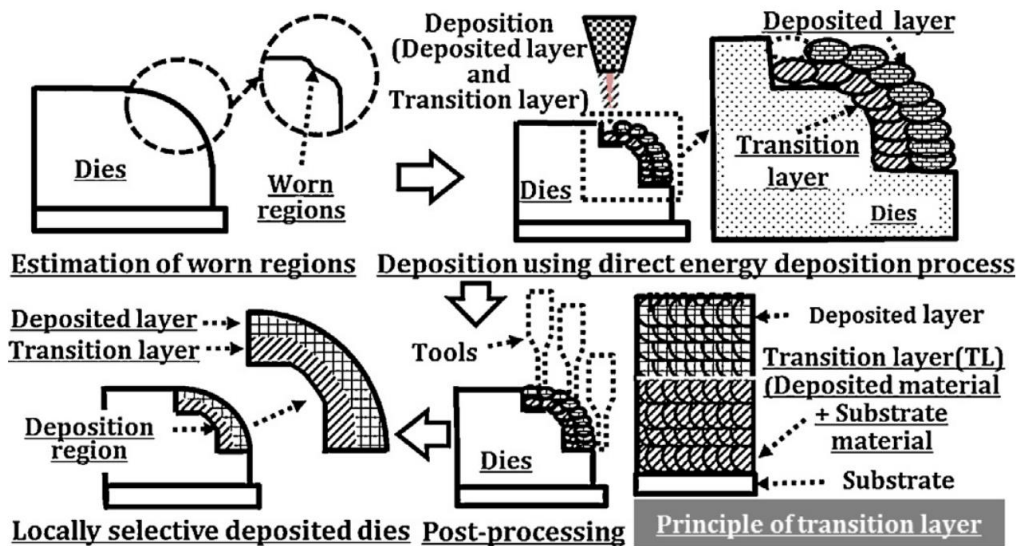


Рис.1.4 - Концепція технології локально-селективного осадження [5]

TL та нанесений шар виготовляються за допомогою процесу DED. Нарешті, проводиться пост-обробка для створення прес-форм потрібної якості.

1.4 Електродугове наплавлення.

Значна частина загального обсягу ремонтних робіт, які виконуються ремонтними компаніями, здійснюється методом обшивки. Так, 32% - це наплавлення під шаром флюсу, 20% - в середовищі CO₂, 12% - вібродугове наплавлення, 10% - зварювання порошковим дротом без захисту від флюсу і газу, 1,5% - плазмове наплавлення.

Наплавлення — це вид зварювання, при якому шар розплавленого металу наноситься на поверхню вихідної заготовки. У більшості випадків для відновлення первинних розмірів і форми зношених виробів використовується наплавка. Однак у деяких випадках він використовується як процес зміцнення при виготовленні нових (біметалічних) деталей, замінюючи високолеговану вуглецеву сталь у виробі шляхом нанесення на виріб високолегованого зносостійкого шару. Це дозволяє отримати на поверхні деталі шар необхідної товщини і необхідного хімічного складу, що володіє високою твердістю і зносостійкістю. Вирішальне значення для отримання необхідних експлуатаційних властивостей відновлюваних виробів мають правильно вибрані наплавні матеріали і способи наплавлення. Так, для підвищення зносостійкості при механічному зношуванні необхідно максимальне підвищення твердості робочих поверхонь, для усунення теплового зношування - підвищення жаростійкості, а для попередження пошкоджуваності в результаті захоплювання необхідно вести наплавку присадним матеріалом, що володіє малою схильністю до захоплювання.

При напавленні шару з особливими властивостями необхідно враховувати, що напавлений метал внаслідок перемішування з основним металом і взаємодії з атмосферою дуги відрізняється за складом від електродного металу. Частка основного металу в напавленому шарі зазвичай виражається у відсотках і коливається в широких межах, що залежать від способу і режиму напавлення (табл. 1.1). Аргонодугове напавлення (рис.1.5) застосовується при відновленні та ремонті конструкцій з жароміцних і корозійностійких сталей, а також з кольорових металів танталу, нікелю, титану, алюмінію, магнію, міді та сплавів на їх основі в однорідні і різнорідному середовищі. Товщина напавленого шару коливається від 1,5 мм до 3 мм в залежності від типу електрода.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика способів наплавлення

Способи наплавлення	Продуктивність , кг/год	Частка основного металу, %	Товщина наплавленого шару, мм
Газова з присадкою прутків або дроту	0,5...1,5	1	0,8...5,0
Газопорошкова	0,5...3,0	1	0,3...3,0
Аргонодугова	1,0...7,0	10...30	2,5...5,0
Ручна дугова, покритими електродами	0,8...3,0	20...50	2,0...5,0
Під флюсом одним дротом	2,0...12	30...60	3,0...5,0
Під флюсом багатоелектродно	5,0...40	15...30	5,0...8,0
Під флюсом стрічкою	5,0...40	10...20	2,5...5,0
Дугова самозахисним дротом	2,0...9	25...50	2,5...5,0
Електрошлакова двома електродними стрічками	10...60	5,0...15	1,5...5,0
Електрошлакова електродними дротами	20...60	10...20	6,0...50
Плазмове порошкове	0,8...6,0	5...15	0,3...6,0
Індукційне	2,0...15	5...15	0,4...3,0

Аргоннодугове наплавлення характеризується великою зоною термічного впливу, грубозернистої структурою, що вимагає термічної обробки, та частими оплавленнями країв виробу внаслідок перегріву.

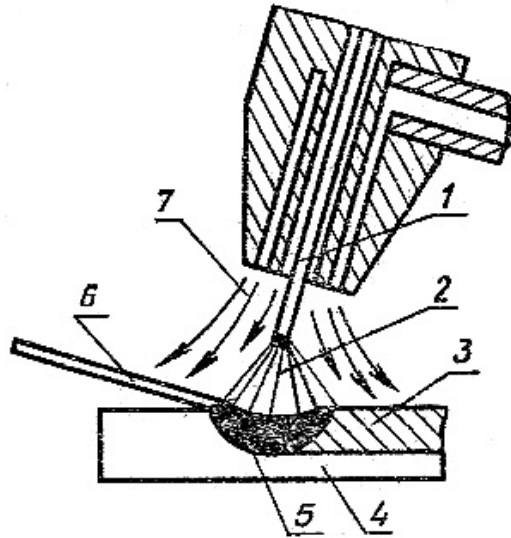


Рис. 1.5 – Аргонно-дугове наплавлення: 1-електрод, 2-дуга, 3-наплавлений метал, 4-основний метал, 5-ванна розплаву, 6-присадний дріт, 7-аргон.

До недоліків наплавлення в захисному газі відносять:

- підвищене розбрикування металу (5...10%) та втрати захисного газу;
- обмежене легування наплавлення металу;
- зниження зносостійкості та втоми міцності на 10...20%;
- відкрите світлове випромінювання дуги.

При виконанні наплавочних робіт (рис.1.6) [10] в якості газу зазвичай використовують ацетилен або пропан-бутанова суміш.

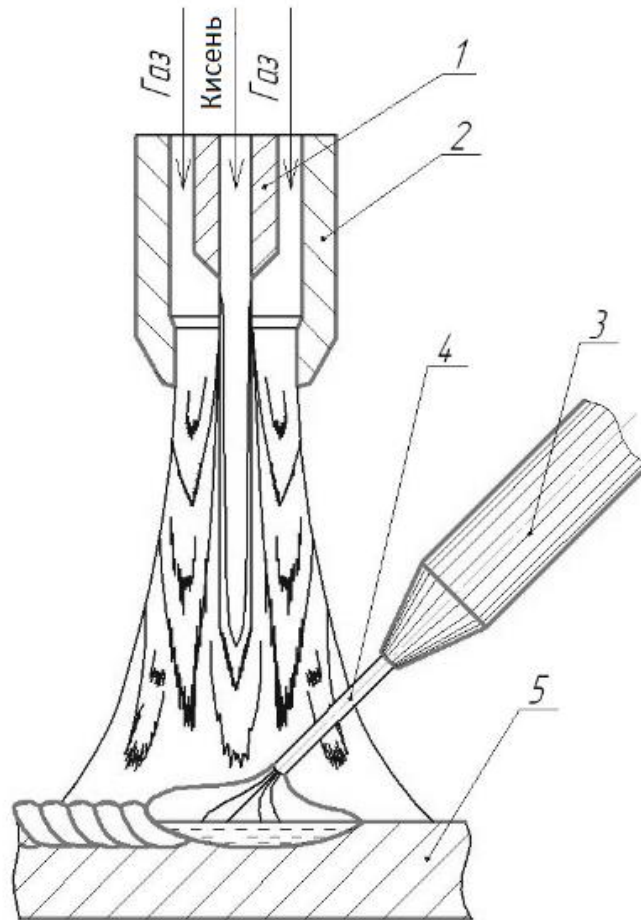


Рис.1.6 – Наплавлення з газо-полум'яним захистом: 1 – сопло для подачі кисню; 2 – сопло для подачі газу; 3 – мундштук; 4 – присадний дріт; 5 – деталь. [10]

При відновленні, в тому числі прес-форм, застосовують ручні (газову і електродугову) і механізовані види наплавлення: напівавтоматичне і автоматичну під шаром флюсу, в середовищі захисних газів, вібро-дугове та інші.

1.5 Пічна пайка.

При пічній та інших видах групової пайки готовий припой наноситься в процесі складання дозованими порціями за допомогою заготовок, що представляють собою кільця, виготовлені з дроту, шайби, штамповані з фольги або стрічки, і т.д. При газополум'яному паянні припой подається в зону шва з кінця

прутка, що плавиться. При паянні паяльником припій наноситься на поверхню облудженої поверхні частини жала паяльника.

Для методу пічної пайки характерні трудомісткість процесу підготовки і велика, ймовірність браку внаслідок непропала (особливо на криволінійних профілях). Пічна пайка не завжди дає позитивні результати через порівняно високою тривалістю процесу, що призводить до утворення широкої дифузійної зони і до втрат міцності паяного з'єднання.

1.6 Лазерне наплавлення

Особливістю лазерного наплавлення є його мінімальна зона впливу та швидка обробка, що зменшує нагрівання деталей та призводить до майже повного пошкодження викривленням та ослабленням прилеглого металу. Зона обробки. Щоб запобігти окисленню розплавленого металу, область насіння захищають інертним газом, наприклад сумішшю аргону та гелю. При ручному лазерному наплавленні наповнювач подається вручну оператором. У конкретному випадку у цьому методі в якості добавок використовують дроти діаметром від 0,15 до 0,8 мм, матеріал яких вибирається в залежності від завдання, що вирішується (рис. 1.7) [4]. Наплавлений матеріал може мати такі ж і інші властивості, як підкладка, утворюючи, наприклад, функціональний шар з підвищеною твердістю. Ручне лазерне наплавлення найбільше підходить для усунення дрібних локальних дефектів, таких як пори, відколи, задирки та ін. Залежно від конфігурації лазерні верстати для ручної наплавлення можуть працювати як з невеликими деталями, ремонт яких, як правило, проводиться на самому верстаті, так і з багатотонними деталями, для обробки яких використовують лінійки мобільних верстатів.

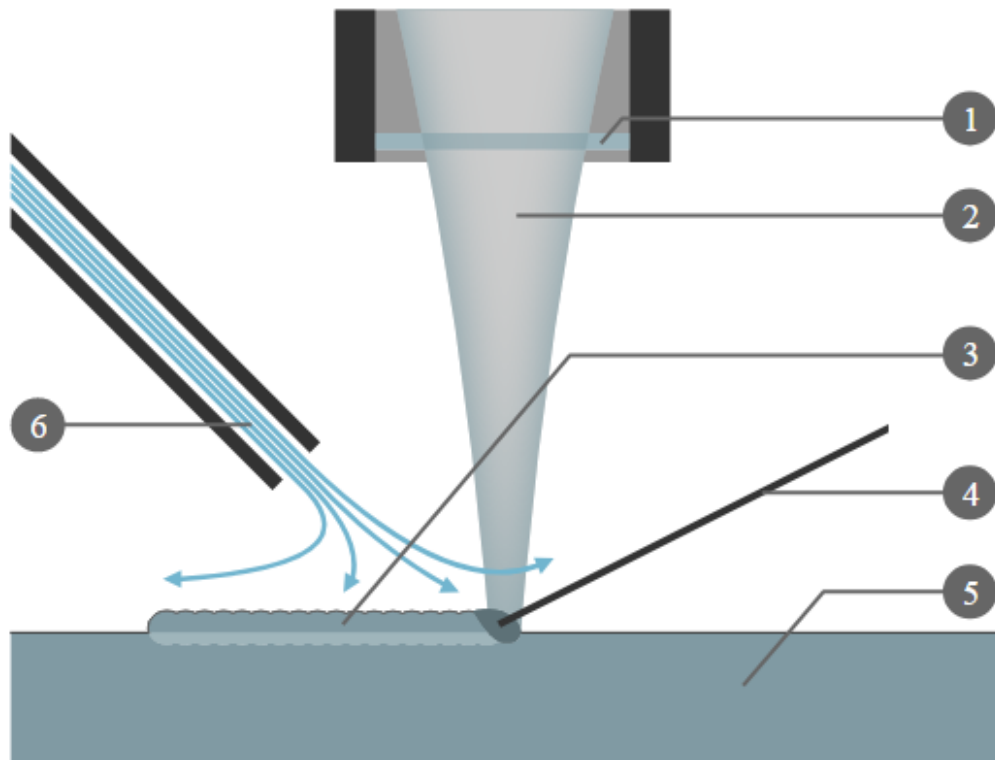


Рис.1.7 - Схема процесу лазерного наплавлення з подачею присадного дроту. 1. Захисне скло об'єктива. 2. Лазерне випромінювання. 3. Наплавлений матеріал. 4. присадний дріт. 5. Деталь. 6. Захисний газ. [4]

Автоматичне лазерне наплавлення характеризується механізованою подачею наповнювача. Серед них можна виділити металевий дріт, який автоматично запускається в зону обробки, і металевий порошок, який подається в зону плавлення через спеціальне сопло (рис. 1.8) [4]. Другий спосіб має високу продуктивність і використовує для виконання наплавлених робіт великої кількості матеріалу, наприклад при ремонті повітряних гвинтів. Час обробки для операцій на основі порошку тривалий через обмеження швидкості подачі, швидкості сканування та товщини тонкого шару. Для порівняння, наплавлення дроту має порівняно високу швидкість масового потоку (осадження). Тому процеси на основі порошку вважаються придатними для більшості невеликих деталей, тоді як процеси на основі дроту вважаються придатними для деталей великого розміру, як правило, вагою понад 10 кг. Висока якість обробки поверхні та можливість

створювати складні компоненти вважаються особливою цінністю процесів на основі порошків завдяки малому розміру частинок їхніх компонентів. Крім того, використання лазерів і електронних пучків дозволяє контролювати подачу порошку, а також процес плавлення і затвердіння порошкового шару, що забезпечує високу точність розмірів. Фактори, що впливають на якість поверхні порошкової системи, включають тип сплаву, форму, розмір і морфологію порошку, розмір зони опромінення лазером або електронним променем та інші технологічні і конструктивні параметри. Як згадувалося вище, процеси на основі дроту з високою швидкістю осадження і можливістю виготовлення великих деталей характеризуються великими розплавленими ваннами, які складаються з великих шаруватих крапель зварювального шва з відповідною шорсткою бісерною поверхнею. Геометрія, нанесена за допомогою дротяної сировини, часто вимагає механічної обробки для досягнення бажаної форми сітки, тоді як процеси на основі порошку часто надають геометрію і властивості, які вимагають мікро обробки для досягнення функціональної форми. Як і при традиційних методах, використання різних наповнювачів дозволяє формувати не тільки шари з ідентичними властивостями до основи, але й складні покриття, які подовжують термін служби і змінюють технічні властивості деталі. У порівнянні з традиційними методами, лазерне наплавлення має ряд переваг Завдяки високій концентрації енергії в зоні нагріву можливі більш високі швидкості обробки. При цьому мінімальний розмір сфокусованого променя - 0,2-0,3 мм в діаметрі - мінімізує об'єм розплаву і відповідно зменшує теплові втрати. Це мінімізує деформацію під час обробки і дозволяє витримувати геометричні розміри деталі в межах встановленого діапазону допусків (в мікрометровому діапазоні).

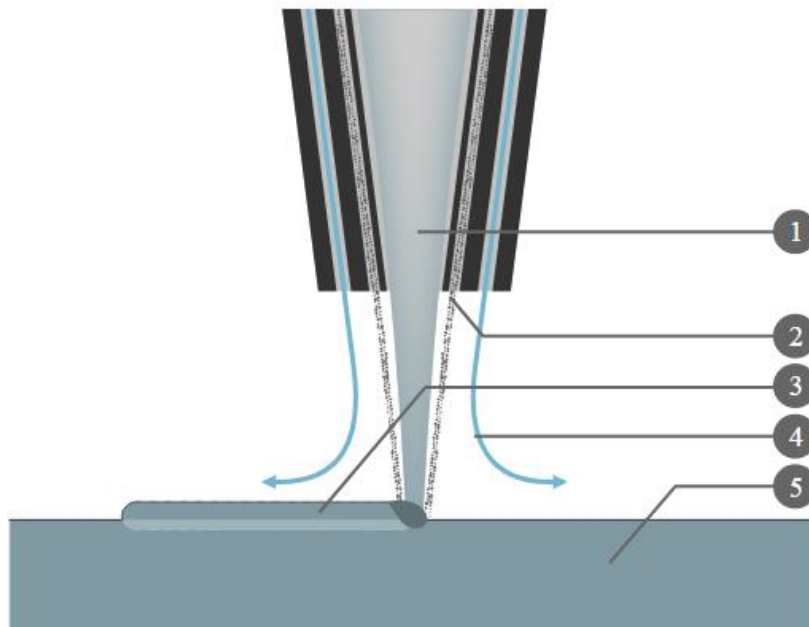


Рис.1.8 - Схема процесу лазерного наплавлення з подачею порошку в якості присадного матеріалу.

1. Лазерне випромінювання. 2. Подача порошку. 3. Наплавлений матеріал. 4. Подача захисного газу. 5. Деталь. [4]

Використання імпульсного лазерного випромінювання (час опромінення в мілісекундах) дозволяє отримати мінімальну зону термічного впливу, в результаті чого зона відпуску не перевищує декількох десятків мікрометрів. При цьому підкладка залишається практично холодною, а швидкість охолодження рідкої фази розплаву металу досягає $10^3 \dots 10^4$ град/с., градусів в секунду, що дозволяє реалізувати режим автозміцнення і формувати надзвичайно тонкі структури.

При ремонті методом імпульсної лазерної обробки поверхні правильний вибір присадного матеріалу забезпечує твердість наплавленого шару на рівні твердості основного металу. У поєднанні з мінімальною зоною термічного впливу в більшості випадків можна уникнути подальшої термічної обробки.

1.7 Використання сфокусованого лазерного випромінювання

Сканування сфокусованого лазерного випромінювання передбачає використання концентрованого лазерного променя для точного зображення та вимірювання. Цей метод широко застосовується в різних галузях, включаючи промислову метрологію, медичну візуалізацію та тривимірне (3D) сканування. Нижче наведено огляд ключових аспектів, пов'язаних зі скануванням сфокусованого лазерного випромінювання:

Лазерне фокусування:

Процес починається з фокусування лазерного променя на невелику, чітко визначену точку на поверхні цільового об'єкта. Зазвичай це досягається за допомогою лінз або оптичних систем, призначених для концентрації лазерного світла.

Взаємодія з об'єктом:

Сфокусований лазерний промінь взаємодіє з цільовим об'єктом, і характеристики взаємодії, такі як відображення або розсіювання, надають інформацію про поверхню об'єкта.

Виявлення відбитих сигналів:

Фотодетектори або датчики вловлюють сигнали, відбиті від поверхні. Ці детектори здатні вимірювати інтенсивність та інші властивості відбитого лазерного світла.

Параметри вимірювання:

Вимірюються різні параметри, включаючи відстань до точки фокусування, кут відбиття та інтенсивність відбитого світла. Ці вимірювання сприяють створенню детального профілю сканованої області.

Обробка даних:

Зібрані дані проходять складну обробку за допомогою комп'ютерних алгоритмів. Ця обробка передбачає аналіз та інтерпретацію відбитих сигналів для створення точних тривимірних моделей або зображень сканованого об'єкта.

Застосування:

Сфокусоване лазерне сканування знаходить застосування в таких сферах, як контроль якості виробництва, зворотне проектування, медична візуалізація (наприклад, оптична когерентна томографія) і збереження культурної спадщини.

Переваги:

Висока точність: сфокусовані лазерні промені дозволяють проводити дуже точні вимірювання та зображення.

Безконтактний: Техніка є неруйнівною та безконтактною, що робить її придатною для делікатних або чутливих об'єктів.

Швидке отримання даних: лазерне сканування може забезпечити швидкий і детальний збір даних порівняно з традиційними методами.

Мінуси:

Властивості поверхні: відбивна здатність і характеристики поверхні цільового об'єкта можуть впливати на якість вимірювань.

Фактори навколишнього середовища: на процес сканування можуть впливати зовнішні фактори, наприклад навколишнє освітлення або атмосферні умови.

Таким чином, сканування сфокусованого лазерного випромінювання є потужною технологією з різноманітними застосуваннями, що дозволяє отримати детальне зображення та вимірювати об'єкти з високою точністю.

1.8 Матеріал

В даному дослідженні рекомендовано використання порошку Stellite 1. Завдяки своїй зносостійкості, ударостійкості, жаростійкості та високій корозійній стійкості, сплави на основі кобальту та хрому з добавками вольфраму або молібдену широко використовуються для обробки поверхонь лісозаготівельних ножів, фрезерних верстатів та ножових дисків для деревообробних верстатів. Однак, оскільки ці сталі містять високу частку дорогого кобальту і хрому, для їх виробництва бажано використовувати економні методи осадження. Лазерне наплавлення дозволяє значно заощадити матеріал і скоротити кількість етапів обробки. Порошок має сферичну форму (рис.1.9) [5] розмір частинок в межах 15-45 мкм.

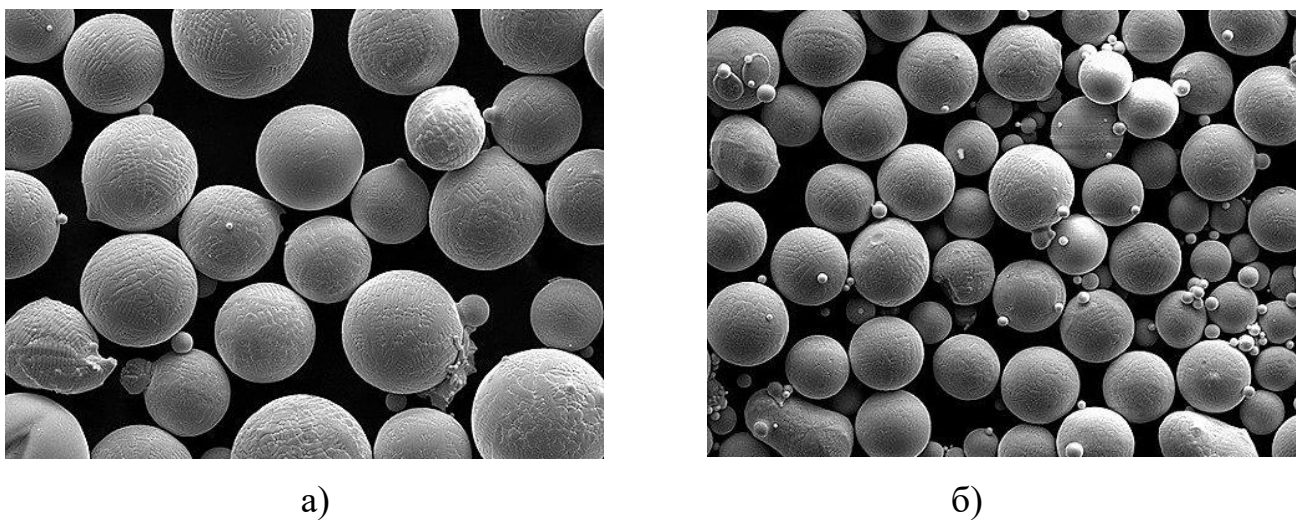


Рис.1.9 - Форма порошку Stellite 1 а)200 мкм, б)100 мкм. [5]

Стеллітові сплави мають видатні показники твердості і в'язкості, а також зазвичай дуже стійкі до корозії. Як правило, стеллітова деталь - це саме такий випадок, що необхідна лише мінімальна обробка. Через дуже високу твердість багато сплавів стелліту в основному обробляються шліфуванням, оскільки операції різання деяких сплавів спричиняють значний знос інструменту навіть при карбідній вставці. Сплави також мають надзвичайно високий рівень температури плавлення завдяки вмісту кобальту та хрому.

Хімічний склад

Таблиця 1.2 Хімічний склад сталі Stellite 1

Chemical Composition(%)	Co	Cr	C	W	Mo	Ni	Si	Fe	Mn
Stellite 1	Bal	29.5	2.5	12.5	1	3	1.2	3	1

Stellite 1 вміщає високий процент твердих, зносостійких первинних карбідів. Вони роблять сплав підходящим для областей, зв'язаних з високою ерозійною стікістю і сильним тертям , при деякій втраті у в'язкості.

Механічні властивості

Таблиця 1.3 Механічні та фізичні властивості сталі Stellite 1

Назва сплава	Плотність, г/см ³	σ_T , Мпа	σ_B , Мпа	Температура Плавлення, °C	Твердість HRC	ϕ , %	λ , Вт/м×К
Stellite 1	9.16	-	618	1255-1290	55	1	-

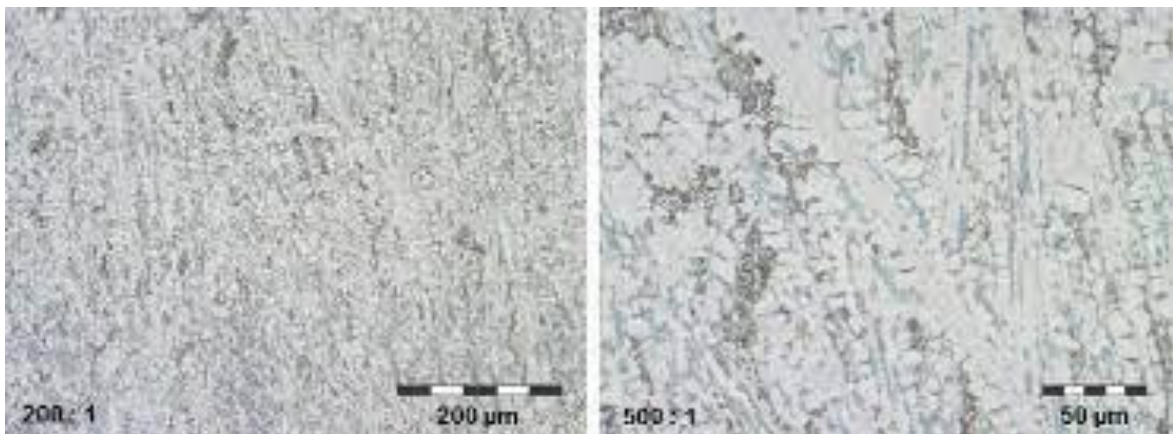


Рис.1.10 - Мікроструктура наплавленого порошку Stellite

Висновки

Таким чином, лазерна обробка та аргонодугова обробка поверхні багато в чому схожі в тому, що на матеріал впливає локалізоване джерело тепла з високою щільністю потужності. В обох випадках відбувається плавлення, затвердіння, фазові перетворення, залишкові напруження і деформації. Процес обробки поверхні та механізми, що лежать в основі кожного з цих ефектів, однакові. Інші відмінності між компонентами аргонодугової обробки поверхні, як правило, пов'язані з процесами лазерної обробки поверхні та методами обробки поверхні на основі дроту з високим ступенем осадження. Використовуються ті ж самі джерела тепла і методи, і хоча при швидкому нанесенні порошкових шарів можна досягти більш високих швидкостей охолодження, ніж при звичайному зварюванні, в більшості випадків з металургійної точки зору їх можна вважати однаковими процесами. З точки зору обробки, лазерна обробка поверхні завжди контролюється комп'ютером, тоді як обробка поверхні аргонодуговим зварюванням може бути ручною або комп'ютерною, залежно від вимог, що впливає на рівномірність осадження, точність і контроль геометрії ванни розплаву. Якість поверхні відрізняється між лазерною та аргонодуговою обробкою поверхні, причому якість поверхні, як правило, знижується зі збільшенням товщини шару та швидкості осадження. Важливо відзначити, що процес лазерної обробки поверхні порошку не дає кращої якості поверхні, ніж середній розмір частинок порошку в сировині, через прилипання частинок-сателітів до поверхні. Сфокусоване лазерне сканування - це потужна технологія, яка може бути використана для широкого спектру застосувань, дозволяючи зображати і вимірювати об'єкти з високою точністю і деталізацією.

2. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

2.1 Особливості лазерного наплавлення

Зростаючі вимоги в обробній промисловості вимагають розвитку таких технологій, як нові методи ремонту, інноваційні матеріали та методи проектування, а також нові виробничі процеси. Одним з таких напрямків у виробництві компонентів є розробка та впровадження адитивних технологій. Адитивні технології об'єднують методи, засновані на принципі "додавання" матеріалів під час виробничого процесу. Багато традиційних методів, заснованих на принципі "витягування" матеріалу, таких як точіння і фрезерування, добре відомі і широко використовуються в усьому світі. Сьогодні методи адитивного виробництва використовуються для спрощення виробничих процесів в енергетиці та приладобудуванні, де потрібні вироби зі складною геометрією та "зростаючими" металевими деталями. Лазерне наплавлення - одна з найперспективніших технологій в обробній промисловості. Метод використовує висококонцентроване лазерне випромінювання як джерело тепла для відновлення деталей від пилу.

Механічні властивості наплавленого матеріалу відповідають, а іноді й перевищують властивості матеріалів, отриманих традиційними методами. Використання лазерного наплавлення є найбільш перспективним для високолегованих і важкооброблюваних матеріалів, таких як жароміцний нікель і нержавіюча сталь. Особливий інтерес ця технологія представляє для виробництва деталей з титанових сплавів. Це пов'язано з тим, що традиційні методи виробництва є складнішими, а матеріальні витрати вищими. Деякі сплави важко піддаються механічній обробці через притаманні їм властивості, такі як низька теплопровідність, висока хімічна реактивність і висока стійкість до деформації та

сил різання, що неминуче призводить до значного підвищення цін на компоненти і часу обробки.

Технологія лазерного наплавлення дозволяє створювати складні деталі та конструкції без необхідності використання додаткового обладнання, налагодження або налаштування устаткування. Для виробництва конструктивно надійних і бездефектних деталей необхідно зрозуміти доступні варіанти процесу, фізичні явища, що лежать в його основі, сировину, методи контролю процесу, як оцінити джерело різних поширених дефектів і як їх усунути. У цій главі представлено процес лазерної обробки поверхонь, з особливим акцентом на фундаментальних основах процесу. Лазерна обробка - це складна технологія, яка характеризується великою кількістю параметрів процесу. Ці параметри можна розділити на контрольовані і неконтрольовані.

До контрольованих факторів відносяться потужність лазера, тип сопла, швидкість переміщення, швидкість подачі порошку, діаметр зони опромінення, товщина шару, фракція порошку і параметри процесу, такі як траєкторія осадження, де також необхідно враховувати величину шару і перекриття.

Некеруємі фактори включають тиск навколишнього середовища та інші фізичні параметри. Особливо важливими факторами є термічні та технологічні властивості порошкового сплаву.

Пряме лазерне осадження є багатопараметричним процесом, тому на результат процесу впливає низка технологічних параметрів. Серед цих параметрів можна виділити основні характеристики, які в першу чергу визначають процес. Основні параметри процесу перераховані в таблиці 2.1, причому перші чотири параметри є основними.

Таблиця 2.1 Параметри процесів лазерного наплавлення.

Параметри процесу	Продуктивність	Стабільність процесу	Коефіцієнт використання	Шорсткість	Глибина проплавлення
Потужність лазера	Не основний	Не основний	Основний	Не основний	Основний
Зона опромінення	Основний	Не основний	Основний	Не основний	Основний
Швидкість переходу	Основний	Основний	Основний	Не основний	Основний
Витрати порошку	Основний	Основний	Не основний	Основний	Основний
Висота шару	Не основний	Основний	Не основний	Не основний	Не основний
Подача газу			Основний	Основний	
Фракція порошку	Не основний		Основний		

Якість технології вирішує низку проблем сучасної інженерії, підвищує ефективність технологічних операцій у 10 разів та знижує вартість виготовлення деталей у 3–5 разів.

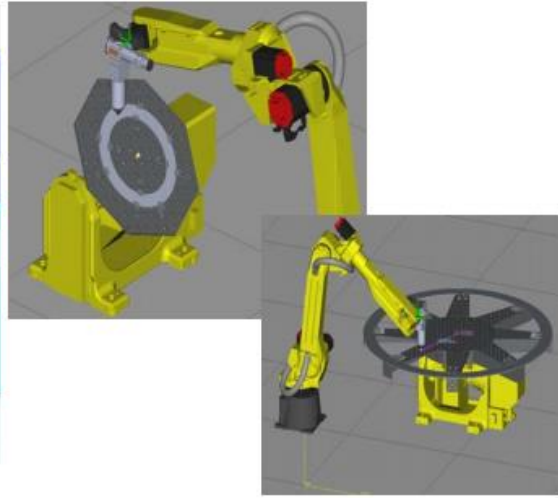
2.2 Обладнання

Для виконання цієї операції можуть бути використані наступні види технічних пристроїв: пристрої з використанням лінійних приводів (рисунок 2.1 а) [6] або роботів (рисунок 2.1 б) [6] для переміщення робочого інструменту і управління рухом підкладки за допомогою ротаторів, встановлених в захищеній камері; пристрої на базі обладнання обробних систем з ЧПК (в) [6] на рисунку 2.1) [6], в яких робочий інструмент може бути безпосередньо замінений на спеціальний інструмент для лазерного осадження, а робоча камера може бути

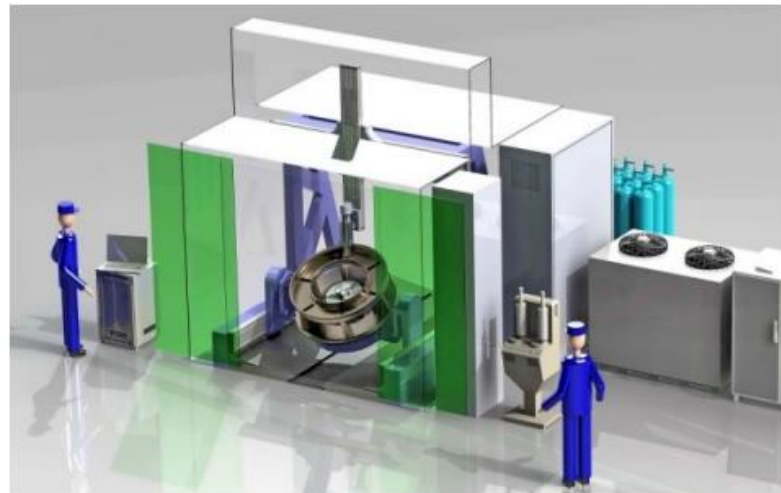
заповнена інертним газом [6];



а)



б)



в)

Рис.2.1 Установки для лазерного наплавлення: а) з лінійним приводом; б) з маніпулятором; в) з камерою наповненою інертним газом. [6]

Технологія лазерного наплавлення - це метод формування металевих виробів шляхом часткового розплавлення підкладки лазерним променем і використання струменів із стисненого газового порошку для транспортування його коаксіально або під кутом до лазерного променя та до поверхні підкладки. Розплав утворює рідку ванну розплаву на мінімальній глибині. Металевий порошок транспортується до підкладки і частково розплавляється. Тверді вироби утворюються шляхом накладання шарів один на одного. Їх форма визначається

технічною траєкторією руху рухомої головки відносно виробів. Під час процесу можна змінювати склад змішаного порошку. Це дозволяє створювати вироби з градуйованими властивостями.

Розроблене обладнання може працювати в камері, заповненій захисним газом (рисунок 2.2) [7], що повністю виключає окислення металевих деталей. Технічний засіб, що поєднує лазерну оптичну головку та порошкове сопло, встановлене на промисловому робот-маніпуляторі, дозволяє необмежено змінювати максимальний розмір кінцевого продукту, що виробляється.



Рис.2.2 Лазерне технологічне обладнання [7]

Особлива увага приділялася конструкції насадки. Вона утворює газо-порошковий струмінь і, таким чином, має визначальний вплив на процес DLD. При дослідженні використовували два типи насадок (рис.2.3) [7]: коаксіальні та аксіально-асиметричні (бічні чи не осьові). Основним недоліком бічної насадки є сталість осадженого шару лише в одному напрямку, наприклад, пряма лінія з рухомою головкою лазера або тіло обертання з обертовою підкладкою (рис.2.3,а)

[7]. Тому, незважаючи на високу продуктивність, він майже не використовується у виробництві обладнання. Для розробленого обладнання використовували чотирьох струмінні та кільцеві порошкові форсунки.



а)

б)

в)

Рис.2.3 Лазерні насадки: а) бічна насадка; б) коаксіальна чотирьох-струменева; в) коаксіальна з кільцевим зазором. [7]

Технологічні головки, оснащені коаксіальними соплами, характеризуються незалежністю параметрів процесу від напрямку руху інструменту. Якщо потік порошку транспортується коаксіально з лазерним променем, коаксіальне сопло подачі не залежить від напрямку руху, оскільки всі напрямки руху підкладки знаходяться в площині, перпендикулярній до напрямку потоку порошку. В цьому випадку можна виготовляти більш складні форми. Форма газопилового струменя залежить не тільки від конструкції сопла. Кут збіжності, ширина апертури струменя і рівномірність розподілу порошку відносно осі лазерного променя мають значний вплив на ефективність і стабільність процесу з використанням коаксіальних сопел. Дослідження показали, що основним фактором, що визначає ширину газового струменя на виході з сопла, є ширина отвору сопла. Багатоструменеві сопла мають від трьох до шести окремих каналів, які формують струмись порошку. Їх конструкція складніша, але забезпечує більшу гнучкість у керуванні формою

струменя порошку (рис. 2.3, б) [7]. Під час обробки вихідний отвір струменя розташовується близько до розплавленого басейну, створеного лазерним променем, що проходить через центральний отвір сопла. Подальшим технологічним розвитком є сопла з кільцевою порожниною (рис. 2.3, в) [7]. Струмінь газоподібного порошку подається через зазор між двома конічними поверхнями, які спрямовують і фокусують його. Оскільки пил рівномірно розподіляється по колу кільцевої щілини, досягається висока симетрія та ізотропність відносно напрямку руху.

Розроблені насадки

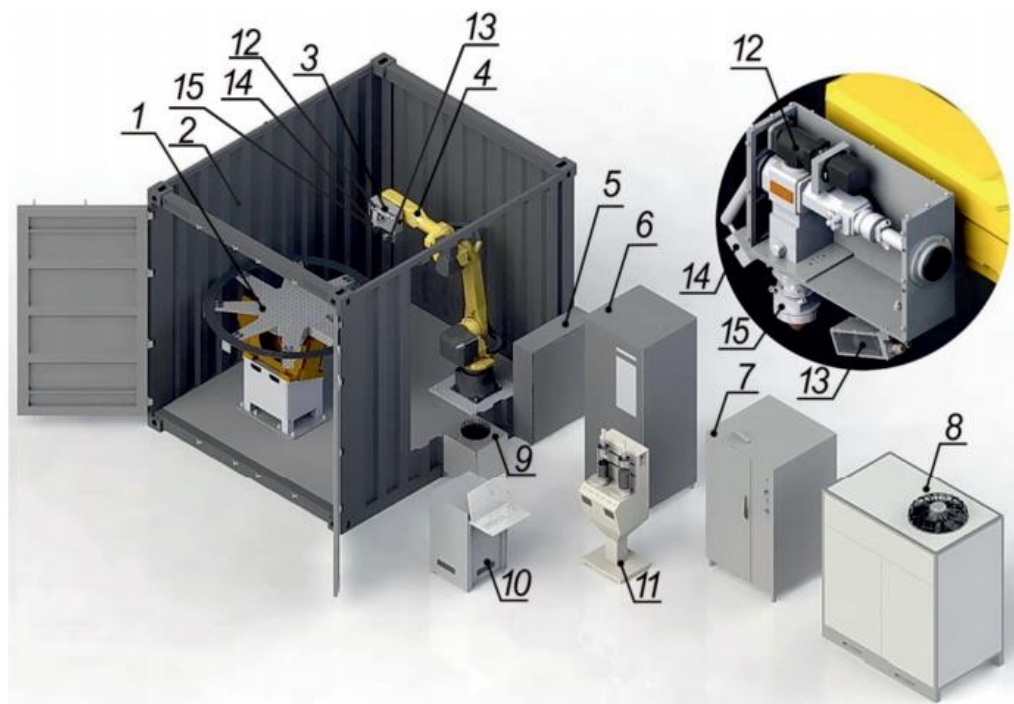


Рис.2.4 Загальна схема обладнання для реалізації технологій лазерного наплавлення: 1–Двох координатний стіл; 2–Робоча камера; 3–Лазерна голова; 4–робото технічний маніпулятор; 5– Вузол підготовки та подачі газової суміші; 6–пристрій очищення та сушіння газу; 7– Волоконний лазер; 8–Охолоджувач; 9–система охолодження; 10–Пульти управління; 11– Пристрій для подачі порошку; 12–Система управління; 13–Система відеоспостереження; 14– Система моніторингу площі обробки; 15–Насадка. [7]

були використані для виготовлення ряду машин, що реалізують процес DLD. В результаті теоретичних, технологічних та конструкторських робіт було здійснено загальний принцип побудови обладнання (рис.2.4) [7]. Вище перераховані компоненти комплексу для здійснення прямого лазерного осадження:

2.3 Переваги впровадження.

Процес адитивного лиття створює тривимірні (3D) деталі шляхом поступового додавання тонких шарів матеріалу під контролем цифрової моделі. Ця унікальна особливість дозволяє ремонтувати складні або виготовлені на замовлення деталі безпосередньо з проекту без використання дорогих форм та інструментів, зменшуючи потребу в багатьох традиційних процесах обробки. Складні деталі, які залишаються вірними дизайну, можна відремонтувати за один крок без використання традиційних методів обробки (наприклад, прямих розрізів або круглих отворів). Крім того, деталі можна виготовляти повторно, тим самим зменшуючи запаси запасних частин і час виготовлення критично важливих або застарілих запасних частин. Застосування включає створення прототипів і швидкий ремонт промислового обладнання, такого як прес-форми та спеціальні інструменти. Значний прогрес у компонентах технології металообробки за останні два десятиліття, включаючи недорогі, надійні промислові лазери, недороге, високопродуктивне обчислювальне обладнання і програмне забезпечення, а також технологію металевих порошків, зробив технологію металообробки передовою технологією.

Можна виділити основні переваги:

- дозволяє в широкому діапазоні керувати фізико-механічними властивостями наплавленого шару, за рахунок зміни параметрів технології наплавлення;

- точне дозування енергії лазерного випромінювання, локальність впливу, мінімальний час дії імпульсу лазерного випромінювання (теплого впливу) на оброблюваний матеріал, забезпечує мінімальні теплові внесення і дозволяє зберегти геометричні розміри;
- забезпечує високу якість адгезії наплавленого шару до підкладки, так як процес з'єднання наплавленого шару з підкладкою є металургійним;
- дозволяє одержати більш високу якість наплавленого шару, як з точки зору дефект утворень, так і з точки зору отримання таких властивостей як твердість, ударна в'язкість, теплостійкість, корозійна стійкість;
- дозволяє зменшити припуски на подальшу механічну обробку;
- висока ступінь контрольованості процесу лазерного наплавлення і можливість точного і оперативного регулювання параметрів дозволяє отримати наплавлені шари необхідної товщини із заданими фізико-механічними властивостями;
- технологія лазерного наплавлення дозволяє в кілька разів знизити собівартість і тривалість ремонту, в порівнянні з традиційними методами усунення дефектів, за рахунок відмови від попереднього підігріву, подальшої термообробки, мінімальної подальшої механічної обробки.

2.4 Недоліки лазерного наплавлення

Утворення тріщин в осадженому шарі заготовки (рисунок 2.5, а і б) [8]. Тріщини в покритті призводять до руйнування виробу через зниження втомної міцності, яка може бути зменшена в 10-15 разів; використовуючи оптимальні

параметри процесу DLD, можна отримати зразки, вільні від таких макродефектів,

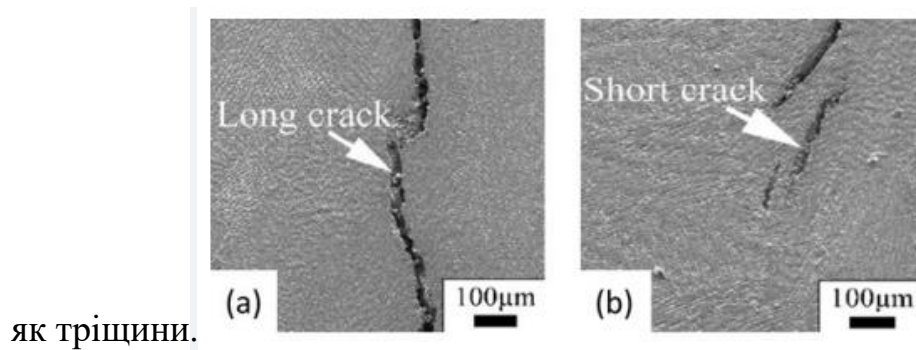


Рис2.5 - (а) Довга тріщина (б) коротка тріщина. [8]

Недостатня пористість і розчинні порожнечі є поширеними дефектами, які негативно впливають на механічні властивості. Існує три основні механізми виникнення цих дефектів. По-перше, коли деякі процеси лазерної обробки поверхні працюють при дуже високій густині потужності, осадження або плавлення може відбуватися в замкненому режимі. Якщо плавлення в режимі замкової щілини не контролювати ретельно, замкові щілини можуть стати нестабільними, неодноразово утворюватися і руйнуватися, залишаючи порожнечі, утворені паром, що потрапила в осад. В результаті ці порожнечі стають майже сферичними (а на рис. 2.6) [8]. По-друге, гази можуть бути захоплені всередині частинок порошку в процесі розпилення порошку. По-третє, наявність дефектів розплаву пов'язана з недостатнім проникненням розплавленої маси верхнього шару в нижній шар або шар попереднього покриття, як показано на (рис. 2.6, б)

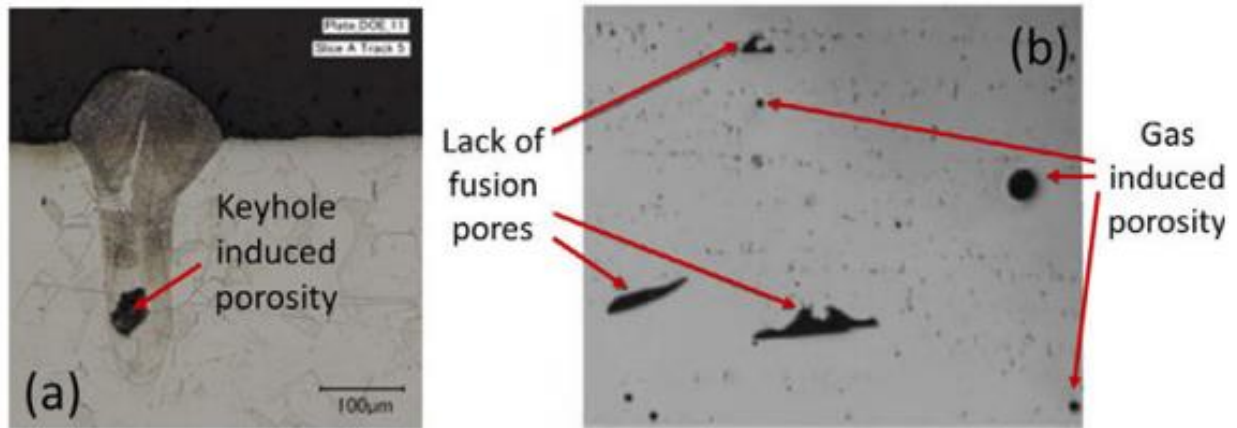


Рис.2.6 (а) Пористість замкової щілини (б) відсутність плавких пор та газоподібної пористості, що утворюється при лазерному наплавленні з сплаву Stellite 1

Втрати легуючих елементів. Під час АМ багатьох важливих технічних сплавів відбувається значне випаровування легуючих елементів, коли температура розплавленої ванни стає занадто високою. Оскільки деякі елементи є більш летючими, ніж інші, може відбуватися вибіркве випаровування, і загальний склад сплаву може змінитися. Зміни в складі можуть вплинути на структуру затвердіння, корозійну стійкість і механічні властивості і можуть бути серйозною проблемою у виробництві високоякісних компонентів.

Висновки

Тому лазерна обробка поверхні сталевго порошку Stellite 1 як присадочного матеріалу є перспективним методом для ремонту деталей. Цей метод споживає значно менше матеріалу і часу на виробництво, дозволяє створювати складні геометрії і має гнучкість для швидкої адаптації до нових завдань без необхідності змінювати весь виробничий цикл. Регулюючи параметри, можна отримати литі конструкції з дрібнодендритною структурою або великими дендритними осями. Цей метод зберігає міцність і твердість звичайних сталей Stellite 1, але є високопродуктивним і тому значно знижує виробничі витрати. Цей метод можна комбінувати з іншими технологіями для подальшого зниження виробничих витрат, скорочення термінів виконання замовлень і створення виробів, які неможливо виготовити тільки цим методом.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок пристрою затискання

З умов обробки необхідна сила для затиску тисками пневматичними (рис.3.1) повинна бути менше або дорівнювати тій силі, яку розвиває затискний пристрій. Принцип роботи: заготовка затискається за допомогою накладних губок, встановлених на рухомому і регульованому повзунку. Регульований повзунок підлаштовується під розмір за допомогою гвинта з різноспрямованими різьбами. Рухомий повзунок рухається до заготовки за допомогою важільної системи, приводиться в рух по черзі дисковими пружинами. Для розпакування заготовки в положенні навантаження в нижній частині пристрою фіксується пневматична камера, яка при подачі стисненого повітря в нижню порожнину рухає стрижень вгору, тим самим відпускаючи заготовку.

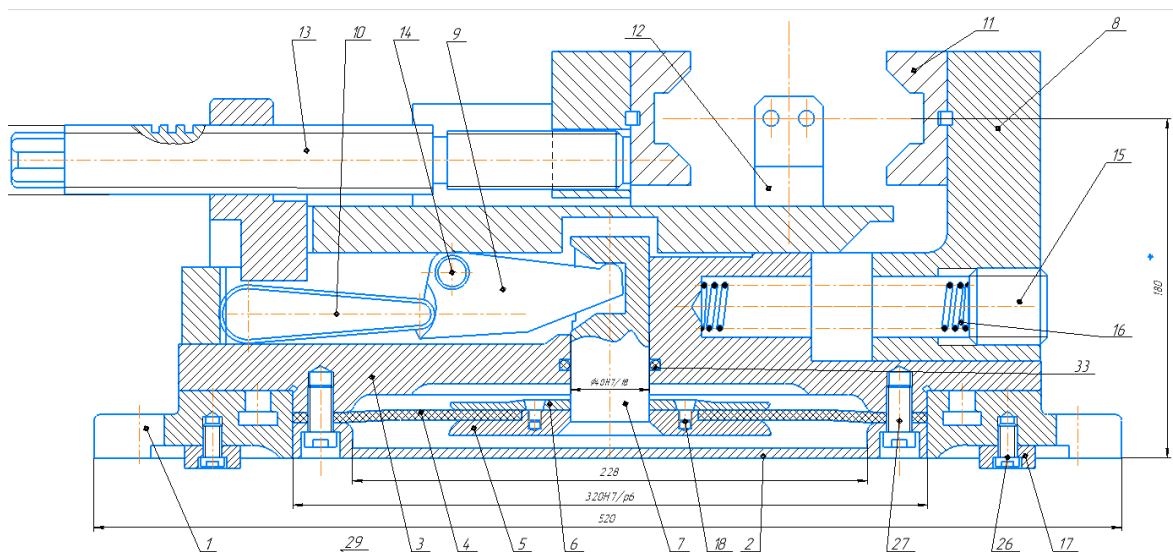


Рис. 3.1 Тиски пневматичні: 1 – плита; 2 – кришка; 3 – корпус; 4 – мембрана; 5,6 – шайба; 7 – шток; 8 – ползун; 9 – ричаг; 10 – штовхач; 11 – призма; 12 – упор; 13,18 – винт; 14 – вісь; 15 – пробка; 16 – пружина; 17 – шпонка;

Всі зовнішні сили умовно діляться на ті, які підбурюють і врівноважують деталь (рис.3.2). Сили збурення призводять до зміщення заготовки з положення, встановленого при її базування. До них відносяться:

- складові сили нанесення матеріалу на деталь,
- об'ємні сили (вага заготовки, відцентрові сили і сили інерції).

До сил які урівноважують заготовку відносяться:

- сили тертя, які виникають при закріпленні деталі;
- реакції опор.

Оскільки лазерне наплавлення безконтактне воно не впливає на деталь і ми його не враховуємо. Також відцентрові і сили інерції не враховуються.

- Вага деталі:

$$G = m \cdot g = 25.5 \cdot 9.81 = 250,156 \text{ (H)}, \quad (3.1)$$

де m - маса деталі (кг);

g - прискорення вільного падіння (m/s^2).

Для рівноваги твердого тіла, що знаходиться під дією просторової системи сил, порізно повинні дорівнювати нулю алгебраїчні суми проекції всіх сил на кожную з трьох координатних осей і алгебраїчної суми моментів всіх сил щодо кожної з цих осей. Зазначені шість рівнянь статички можуть бути записані в такому вигляді:

$$\begin{array}{l} \sum (P_i)_{OX} = 0 \Rightarrow Q_1 \\ \sum (P_i)_{OY} = 0 \Rightarrow Q_2 \\ \sum (P_i)_{OZ} = 0 \Rightarrow Q_3 \\ \sum (M_i)_{OX} = 0 \Rightarrow Q_4 \\ \sum (M_i)_{OY} = 0 \Rightarrow Q_5 \\ \sum (M_i)_{OZ} = 0 \Rightarrow Q_6 \end{array} \Rightarrow Q_P = \sqrt{\sum Q_i} \Rightarrow Q = k Q_P \quad (3.2)$$

Потім з кожного рівняння статичної рівноваги визначається частина загальної сили закріплення Q_i . Векторна сума Q_i дасть розрахункову силу закріплення Q_P . Для забезпечення надійності затиску в розрахункову формулу вводиться коефіцієнт запасу $k=1,5$.

$$\sum(P_i)_{OX} = Q_3 - G = 0 \quad (3.3)$$

$$Q = 1.5 \cdot 250,156 = 375.23 \text{ (H)}$$

3.2 Розрахунок оптичної системи

Для реалізації лазерної газо порошкової наплавки (ЛГПН) необхідно виготовити систему фокусування лазерного випромінювання з системою подачі газо порошкової суміші (ГПС) в зону його концентрації. Вихідними даними системи є:

діаметр волокна $d_{\text{fiber}} = 400\mu\text{m}$;

числова апертура $NA = 0.2$;

потужність випромінювання $P_m = 700\text{W}$;

довжина хвилі лазерного випромінювання 900-1000 μm .

Для проведення розрахунку та конструювання оптичної системи оптико-механічного вузла у якості вихідних даних скористуємось наступними параметрами які наведені в таблиці 3.1,

n_1 – показник заломлення матеріалу лінзи 1;

f_1 – фокусна відстань лінзи 1;

D_1 – світловий діаметр лінзи ;

r_{11} – радіус кривизни передньої поверхні заломлення лінзи 1;

n_2 – показник заломлення матеріалу лінзи 2;

f_2 – фокусна відстань лінзи 2;

r_{21} – радіус кривизни передньої поверхні заломлення лінзи 2;

L – відстань між лінзами.

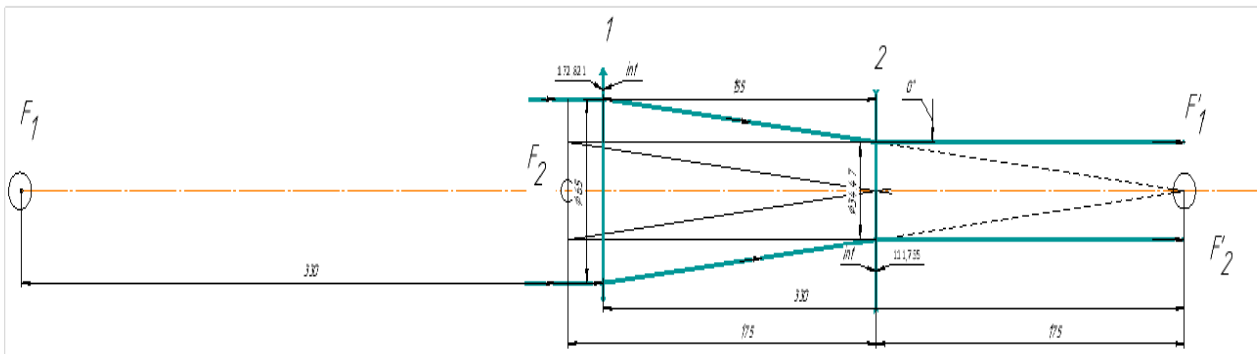


Рис. 3.2 Хід променів від «крапкового» джерела світла у системі, де:
1, 2 – лінзи з фокусними відстанями f_1 та f_2 відповідно.

Таблиця 3.1 Вихідні дані для розрахунку оптичної системи.

n_1 (плавлений кварц)	f_1 , мм	D_{L1} , мм	r_{11} , мм	n_2 (плавлений кварц)	f_2 , мм	L , мм	r_{21} , мм
1.5237	330	65	∞	1.6386	175	155	∞

1. За заданим показником заломлення n_1 лінзи 1, фокусною відстанню f_1 та радіусом кривизни передньої поверхні заломлення r_{11} , визначаємо радіус кривизни задньої поверхні заломлення r_{12}

Якщо $r_{11} = \infty$, тоді необхідно скористатись формулою

$$r_{12} = f_1(n_1 - 1) = 330(1,5237 - 1) = 172,821 \text{ мм}$$

2. Аналогічно розраховуємо радіус кривизни другої поверхні заломлення r_{21}

$$r_{22} = \frac{f_2 r_{21} (n_2 - 1)}{r_{21} - f_2 (n_2 - 1)} = 175(1.6386 - 1) = 111,11755 \text{ мм}$$

1. Діаметр світлового пучка на лінзі 2 визначається з подібності трикутників

$$D_2 = D_1(f_1 - L)/f_1 = 65(330 - 155)/330 = 34,469 \text{ мм}$$

2. Кут нахилу променів на виході з оптичної системи визначаємо за формулою

$$\alpha = \arctg(D_1(L + f_2 - f_1)/2f_1f_2) = 65(155 + 175 - 330)/2 * 330 * 175 = 0^\circ$$

Розрахунок параметрів лінзи що колімує

Розрахунок параметрів позитивної лінзи

$$D_1 = 65 \text{ мм}$$

$$D_{L1} = 65 + 2,5 = 67,5 \text{ мм}$$

Приймаємо $D_{L1} = 70 \text{ мм}$

Для телескопічних систем точність центрування – середня, від 0,02 мм до 0,05мм. Допуск на діаметр оптичної деталі e9, на внутрішній діаметр оправы – Н8.

Товщина по крайці $t_1 = 2,5 \text{ мм}$.

Товщина лінзи по оптичній вісі $d_1 \geq \frac{70 - 10 * 2,5}{4} = 11,25 \text{ мм}$

Приймаємо $d_1 = 12 \text{ мм}$

Допуск на товщину лінзи приймаємо рівним $\pm 0,5 \text{ мм}$

Виконуємо розрахунок параметрів лінзи:

Відрізок від вершини першої поверхні заломлення до передньої головної площини

$$S_H = -f'_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{12}} d_1 = f_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{12}} d_1 = 330 \frac{1,5237 - 1}{1,5237 * 172,821} * 12 = 7,87557 \text{ мм}$$

Радіус першої поверхні заломлення лінзи

$$R_{11} = r_{11} = \infty \text{ мм}$$

Відрізок від вершини другої поверхні до задньої головної площини

$$S'_{H'} = -f'_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{11}} d_1 = f_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{11}} d_1 = 330 \frac{1,5237 - 1}{1,5237 * \infty} * 12 = 0 \text{ мм}$$

тобто задня головна площина проходить через вершину задньої поверхні заломлення.

Відстань від вершини лінзи до зображення

$$s' = f' - S'_{H'} = 330 - 0 = 330 \text{ мм}$$

Радіус другої сферичної поверхні заломлення лінзи

$$R_{12} = r_{12} \left(1 + \frac{S'_{H'}}{f'_1} \right) = 172,821 \left(1 + \frac{0}{330} \right) = 172,821 \text{ мм}$$

Відповідно до ГОСТ 1807-75 приймаємо $R_{12} = 172,98 \text{ мм}$

Фокусна відстань лінзи

$$f'_1 = [(1,5237 - 1) \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{172,98} \right) + \frac{(1,5237 - 1)^2}{1,5237 * \infty * 172,98} * 12]^{-1} = 330,3 \text{ мм}$$

$$\Delta = \frac{f'_1 - f_1}{f_1} * 100\% = \frac{330,3 - 330}{330} * 100\% = 0,0009\%$$

Вирахуване значення фокусної відстані майже не відрізняється від заданого, тому, проведений розрахунок та вибір параметрів лінзи можна прийняти як вірні.

Проведемо ескізну побудову розрахованої лінзи

З ескізу видно, що товщина лінзи по крайці більше мінімально рекомендованої

Товщина лінзи по крайці $t_1 = 8,42 \text{ мм}$

Розмір технологічних фасок та допуски на них рівні на обох

поверхнях заломлення $m_{11} = m_{12} = 0,4^{+0,5}$

Кут нахилу фасок, виходячи з відношень

$$D_{L1}/R_{11} = 70/\infty = 0 \text{ поверхня рівна}$$

$$D_{L1}/R_{12} = 70/172,821 = 0,4$$

вибираємо рівними $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 45^\circ$

Позитивна лінза									
D_{L1} мм	d_1 мм	R_{11} мм	R_{12} мм	f'_1 мм	t_1 мм	m_{11} мм	m_{12} мм	α_{11} мм	α_{12} мм
70e9	12 $\pm 0,5$	∞	172,98	330,3	8,42	$0,4^{+0,5}$	$0,4^{+0,5}$	45°	45°

Таблиця 3.2 Параметри позитивної лінзи

Розрахунок параметрів негативної лінзи

$$D_2 = 34,469\text{мм}$$

$$D_{L2} = 34,469 + 1,5 = 35,969\text{мм}$$

Приймаємо $D_{L2} = 40\text{мм}$

Для телескопічних систем точність центрування – середня, від 0,02 мм до 0,05мм. Допуск на діаметр оптичної деталі e9, на внутрішній діаметр оправки – Н8

Товщина по оптичній вісі d_2

$$d_2 = (0,15 \dots 0,08)D_{L2} = 40(0,15 \dots 0,08) = 6,0 \dots 3,2\text{мм.}$$

Приймаємо $d_2 = 4,0\text{мм}$

Допуск на товщину лінзи приймаємо рівним $\pm 0,3\text{мм}$

Проведемо розрахунок параметрів негативної лінзи:

Відрізок від вершини першої поверхні заломлення до передньої головної площини

$$S_{2H} = -f'_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{22}} d_2 = f_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{22}} d_2 = 175 \frac{1,6386 - 1}{1,6386 * 111,775} * 4 = 2,441\text{мм}$$

Радіус першої поверхні заломлення лінзи

$$R_{21} = r_{21} = \infty\text{мм}$$

тобто передня поверхня лінзи плоска.

Відрізок від вершини другої поверхні до задньої головної площини

$$S'_{2H'} = -f'_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{21}} d_2 = f_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{21}} d_2 = 175 \frac{1,6386 - 1}{1,6386 * \infty} * 4 = 0\text{мм}$$

тобто задня головна площина проходить через вершину задньої поверхні

заломлення.

Відстань від вершини лінзи до зображення

$$s'_2 = f'_2 - S'_{2H'} = 175 - 0 = 175\text{мм}$$

Радіус другої поверхні лінзи

$$R_{22} = r_{22} \left(1 + \frac{S'_{2H'}}{f'_2} \right) = 111.775 \left(1 + \frac{0}{175} \right) = 111.775\text{мм}$$

Відповідно до ГОСТ 1807-75 приймаємо $R_{22} = 111,69\text{мм}$

Фокусна відстань лінзи

$$f'_2 = \left[(1,6386 - 1) \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{111,69} \right) + \frac{(1,6386 - 1)^2}{1,6386 * \infty * 172,98} * 4 \right]^{-1} = 174,89821\text{мм}$$

$$\Delta = \frac{f'_2 - f_2}{f_2} * 100\% = \frac{174,89821 - 175}{175} * 100\% = 0,00058\%$$

Розмір технологічної фаски та допуску на першій поверхні

Проведемо ескізну побудову розрахованої лінзи

Товщина лінзи по крайці $t_2 = 5,54\text{мм}$

Заломлення $m_{21} = 0,3^{+0,4}\text{мм}$ $m_{22} = 0,7^{+0,5}\text{мм}$

Кут нахилу фаски $D_{L2}/R_{22} = 40/111,69 = 0,358$

вибираємо рівними $\alpha_{21} = \alpha_{22} = 45^\circ$

Таблиця 3.3 Параметри негативної лінзи

Негативна лінза									
$D_{L1}\text{мм}$	$d_2\text{мм}$	$R_{21}\text{мм}$	$R_{22}\text{мм}$	$f'_2\text{мм}$	$t_2\text{мм}$	$m_{21}\text{мм}$	$m_{22}\text{мм}$	$\alpha_{21}\text{мм}$	$\alpha_{22}\text{мм}$
40e9	4 $\pm 0,3$	∞	111.69	174,89821	5,54	$0,3^{+0,4}$	$0,7^{+0,5}$	45°	45°

При обговоренні варіантів конструкцій модуля фокусування було встановлено, що найбільші втрати лазерного випромінювання відбуваються на наступних елементах:

- виводу лазерного випромінювання з оптичного волокна;

- лінзах, яка колімує випромінювання та його фокусує (на кожній, максимальні втрати складатимуть біля 10%);

- захисному склі (біля 10%).

Крім того, від зони обробки віддзеркалиться біля 40%-50% випромінювання, яке лишилось, яке поглинеться:

- на системі подачі ГПС;

- та знову: на захисному склі, лінзах

В даній роботі доцільно використати захисне скло з параметрами наведеними в

Таблиця 3.4 Параметри захисного скла

Світловий діаметр (%):	90.00	Діаметр (мм):	15.00
Допуск діаметра(мм):	+0.00/-0.20	Товщина (мм):	2.00
Покриття:	VIS-NIR (400-1000нм)	Допуск товщини (mm):	±0.38
Діапазон довжин хвиль (нм):	400 - 1000	RoHS:	Сумічний

Розрахунок кріплення негативної лінзи завальцюванням

1. Виходячи з того, що діаметр лінзи дорівнює

$$DL2 = 40 \text{ мм, приймаємо } S = 0,4 \text{ мм; } l = 1,2 \text{ мм; } l1 = 2,5 \text{ мм; } l2 = 0,8 \text{ мм.}$$

2. Мінімальне значення діаметру центрального отвору оправы

$$d2 = D2 + 0,2 = 34,469 + 0,2 = 34,669 \text{ мм.}$$

Остаточно приймаємо діаметр центрального отвору оправы $d2 = 35 \text{ мм.}$

3. Відповідно до обраних та розрахованих розмірів виконуємо ескізу побудову елементів оправы для кріплення завальцюванням. Остаточну конфігурацію оправы для закріплення негативної лінзи буде визначено після розробки юстирувального вузла проектованої оптичної системи

Розрахунок кріплення різьбовим кільцем

1. Приймаємо діаметр оправы під встановлення оптичної деталі

$$dO1 = DL1 = 88 \text{ мм.}$$

2. Мінімальне значення діаметру центрального отвору оправи,

$$d_{O2} = D + 0,2 = 85 + 0,2 = 85,2 \text{ мм. Приймаємо } d_{O2} = 86 \text{ мм.}$$

3. Діаметр внутрішньої різьби $D_p = D_{L1} + 2,0 = 90 \text{ мм.}$

4. Крок різьби дорівнює $P_0 = 0,75 \text{ мм}$

5. Перевіряємо умову, що діаметр внутрішньої різьби оправи має відповідати

$$D_p \geq d_{O1} + 0,2 + 2H_1 = 88 + 0,2 + 2 \cdot 0,54 \cdot 0,75 = 89,1 \text{ мм.}$$

6. Довжина ділянки нарізання внутрішньої різьби

$$S_p = (6..10)P_0 = 9 \cdot 0,75 = 6,75 \text{ мм.}$$

Приймаємо $S_p = 7$

7. Визначаємо розміри проточки для виходу різьбоутворюючого інструменту при виготовленні внутрішньої метричної різьби (ГОСТ 10549-63).. Розміри проточки

$$b_1 = 3,0 \text{ мм; } r = 1,0 \text{ мм; } r_1 = 0,5 \text{ мм; } d_4 = 90 + 0,4 = 90,4 \text{ мм}$$

8. Визначаємо розміри різьбового кільця (рис. 5.7, а, табл. 5.3)[9]:

- мінімально допустимий діаметр отвору

$$d_{K \min 1} = D_p - 5,5 = 90 - 5,5 = 84,5 \text{ мм;}$$

- мінімально допустима висота

$$h_{K \min} = 6,0 \text{ мм;}$$

- ширина та висота шліцевого пазу

$$t_{ш} = 2,0; h_{ш} = 2,5 \text{ мм.}$$

Округляємо до найближчого більшого цілого значення та приймаємо діаметр отвору кільця $d_{K1} = 86 \text{ мм}$, що дорівнює діаметру отвору у оправі d_{O2} . Висоту кільця приймаємо $h_K = 7,0 \text{ мм}$. Визначаємо кількість шліців під ключ

$$d_{K1} = 86 < 200 \text{ мм, тому кількість шліців – два.}$$

9. Крок зовнішньої різьби для закріплення корпусу вузла у приладі приймаємо

$$P = 2P_0 = 2 \cdot 0,75 = 1,5 \text{ мм.}$$

10. Приймаємо мінімальну товщину корпусу вузла рівною 2 мм та отримуємо діаметр зовнішньої різьби

$$D_p \geq d_4 + 2t + 2H_1 = 90,4 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 0,54 \cdot 1,5 = 96,02 \text{ мм.}$$

Приймаємо $D'_p = 98 \text{ мм.}$

11. Мінімальний розмір зовнішнього діаметру оправы

$$D_{02} = D'_p + (2 \dots 10) = 98 + 4 = 102 \text{ мм.}$$

12. Довжина ділянки із зовнішньою різьбою $l_p = (6 \dots 10)P' = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ мм.}$

13. Визначаємо розміри проточки для виходу різьбоутворюючого інструменту при виготовленні зовнішньої метричної різьби (ГОСТ 10549-63) (рис. 5.10, табл. 5.8)[9]. Розміри проточки

$$b = 4,0 \text{ мм; } r = 1,0 \text{ мм; } r_1 = 0,5 \text{ мм; } d_3 = 98 - 2,2 = 95,8 \text{ мм.}$$

14. Після завершення вибору та розрахунку основних конструкційних елементів оправы для закріплення різьбовим кільцем позитивної лінзи, креслимо ескізи оправы (з виносками проточок для виходу різьбоутворюючого інструменту) та різьбового кільця.

15. Після завершення вибору та розрахунку основних конструкційних елементів оправы для закріплення різьбовим кільцем лінзи, креслимо ескізи оправы (з виносками проточок для виходу різьбоутворюючого інструменту) та різьбового кільця.

Висновки

В даному розділі спроектовано і розраховано метод закріплення деталі в пневматичних лещатах. Визначені параметри лазерної технологічної установки і розрахована оптична система для лазерної газопорошкової наплавки.

3.3 Розрахунок розмірів зони термічного впливу

Мета: керування розмірами зони термічного впливу та її «тепловою історією» при лазерній поверхневій обробці з використанням сфокусованого лазерного випромінювання з:

- Гауссовим розподілом густини потужності в зоні опромінення
- «рівномірного» розподілу густини потужності в зоні опромінення

В якості прикладу розглянемо процес зміцнення заготовки зі сталі 45

Початкові умови:

Матеріал заготовки – сталь 45

потужність випромінювання $P_m 1000 \text{ Вт}$

радіус зрни опромінення $r_p 3.25\text{-}2\text{мм}$

швидкість переміщення заготовки $V_z = 12 \text{ мм/с}$

Максимальна температура поверхні T_{max} повинна бути менша температури плавлення матеріалу заготовки $T_m = 1535^\circ\text{C}$

Мінімальна температура T_{min} більша температури структурних перетворень $T_{ac3} = 750^\circ\text{C}$

В процесі розрахунків визначаємо розміри та форму зони термічного впливу, їх зміну в процесі обробки, в залежності від режимів опромінення. На Рис.1 наведена система координат, яка використовувалась при розрахунках.

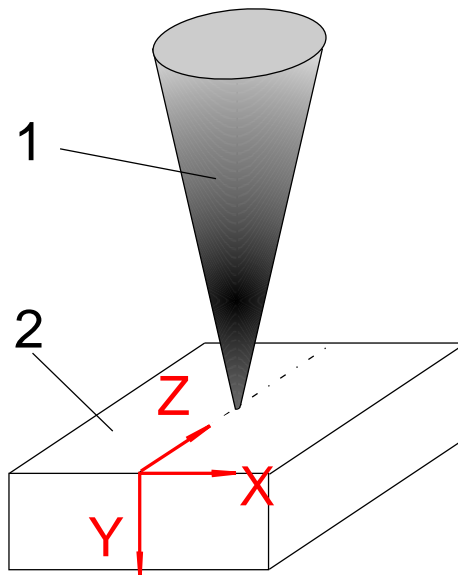


Рис.1 Прийнята система координат, де: 1-лазерний промінь; 2- заготовка.

В якості моделі процесу використано нестационарне нелінійне рівняння теплопровідності (1) з кінцевими умовами другого типу (2), початковими умовами

(3) і з урахуванням фазових перетворень (неявна схема виділення їх границь (3), плавлення і випаровування оброблюваного матеріалу (4):

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{\substack{x=0 \\ x=HX}} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=HY} = 0 \\ -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0} = A(T) * W_p(x, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$T_{Start} = 25^{\circ}C \quad (3)$$

$$C_v(T) = C_v(T) + \delta Q_f(T_f - T) \quad (4)$$

де:

x, y, z, t - координати простору і часу;

$\rho(T), C(T), \lambda(T), R(T)$ - відношення щільності, питомої теплоємності, теплопровідності та оптичних властивостей оброблюваного матеріалу до температури T ;

Q_f - ентальпія фазового перетворення;

T_f - температура фазового перетворення;

δ - дельта-функція Дірака;

HX, HY - довжина і ширина зразка;

$W_p(x, z, t)$ - зв'язок густини падаючої потужності на опромінюваній поверхні від просторово-часових координат

Лазерний промінь з розподілом потужності $W_p(x, y)$ (5) розгорнутого на поверхні заготовки керується рівнянням (6).

$$W_p(x, z) = \frac{2P_m}{\pi r_p^2} \exp\left(-\frac{2((x-x_c)^2 + (z-z_c)^2)}{r_p^2}\right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} z_c(t) &= z_o + V_z t + Bs \cdot \cos(\omega t); \\ x_c(t) &= x_o + As \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

де:

P_m - середня потужність випромінювання;

r_p - радіус сфокусованої плями

x_c, z_c - поточні координати осі сфокусованого лазерного променя

x_o, z_o - початкове положення осі балки;

As, Bs, ω - амплітуда і частота сканування.

На Рис.2 наведено залежності теплофізичних властивостей сталі 45 від температури [1]

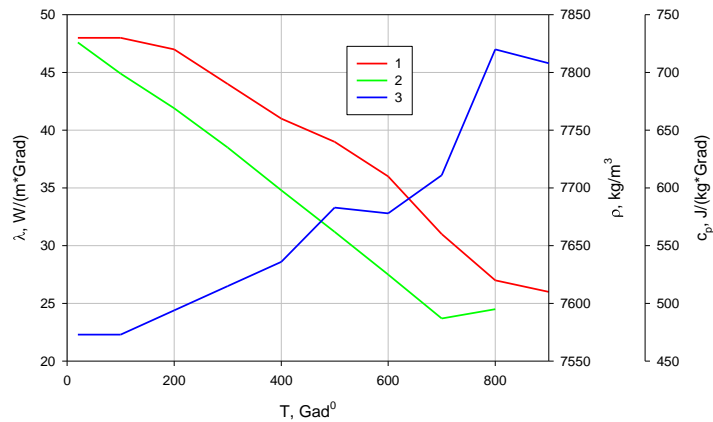


Рис. 2. Співвідношення термічних властивостей $C(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ для сталі 45 до температури T , де: 1- теплопровідність; 2 – щільність; 3 - питома теплоємність,

1. Порівняння результатів обробки лазерним променем ($Pm = 1000W$, $Vz = 10-12$ mm/s), який сфокусований в зона опромінення $r_p = 3,25$ мм, але має різний розподіл густини потужності в плямі фокусування $Wp(x, z)$ – Гауссовий закон розподілу інтенсивності та рівномірний закон розподілу інтенсивності Гауссовий закон розподілу густини потужності Gaussian law of power density distribution (GLPDD) і uniform law of power density distribution (ULPDD).

Умова порівняння – об’єм під залежностями, які описують розподіл густини потужності в зона опромінення рівний, та дорівнює 1.

На Рис.3 наведені «теплові історії» зони термічного впливу, які виникають в сталі 45 при лазерній обробці з різними розподілами $Wp(x, z)$ в зона опромінення та різною швидкістю переміщення зразка Vz ($Pm = 1000W$, $r_p = 3,25$ mm)

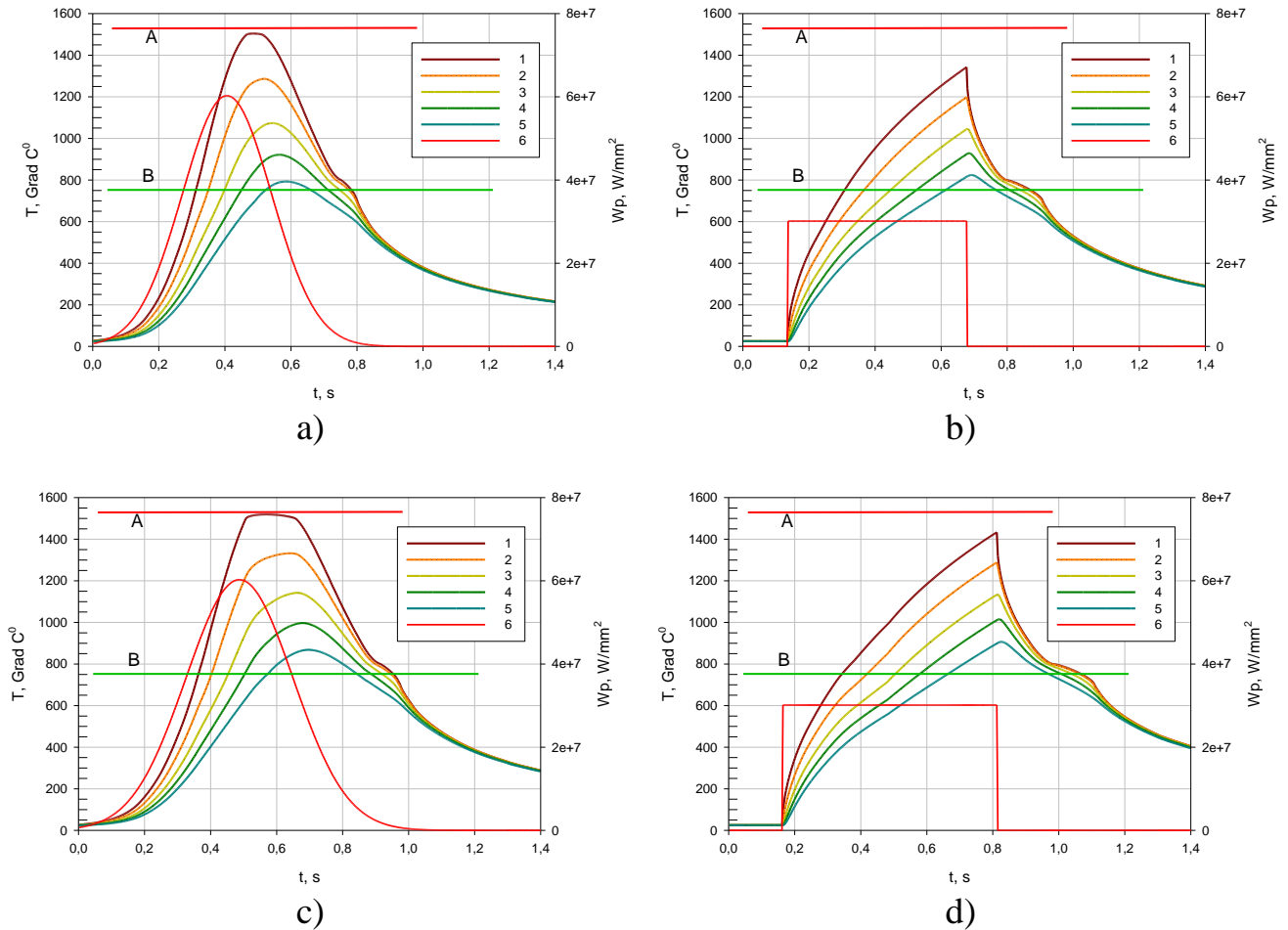


Рис.3 Зв'язок температури $T(y)$ на різній глибині від опромінюваної поверхні і густини потужності сфокусованого лазерного променя Wp від часу t при обробці сталі 45 лазерним променем з $Pm = 1000\text{Вт}$, сфокусованим в плямі з $r_p = 3,25$ мм з гаусовим законом розподілу інтенсивності (а, с) і з рівномірним законом розподілу інтенсивності (b, г) і рухаються зі швидкістю $V_x = 12\text{мм/с}$ (а, b) і $V_x = 10\text{мм}$ (с, d), де: 1 - залежність щільності потужності сфокусованого лазерного променя Wp від часу t ; 2 - залежність температури $T(y)$ від поверхні ($z = 0$) від часу t ; 3 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0192\text{мм}$ від часу t ; 4 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0416\text{мм}$ від часу t ; 5 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0608\text{мм}$ від часу t ; 6 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,08\text{мм}$ від часу t ; А - температура плавлення; В - температура структурних перетворень

Аналізуючи залежності, які наведені на Рис.3, відмітимо, що (як звичайно) зменшення швидкості обробки веде до зростання температури в зоні дії лазерного випромінювання, обробка з «рівномірним» розподілом $Wp(x, y)$ (в порівнянні з обробкою Гауссовим променем) веде:

- до зниження температури в зоні обробки;
- більшому часу нагріву і (відповідно) прогрівання зони обробки на більшу глибину
- більшому часу існування зони температур, які нагріті вище температури структурних перетворень T_{ac3} . Останнє, можливо, свідчить, про більш повні структурні перетворення, які будуть протікати в зоні термічного впливу (HAZ)/

Всі ці явища пов'язані з тим, що на відміну від обробки Гауссовим променем:

- густина потужності в зона опромінення з рівномірним розподілом $Wp(x, z)$ в 2 менша
- час нагрівання HAZ з рівнем $Wp(x, z)$, є достатнім для компенсації природнього тепловідведення з зони нагріву.

Крім того, слід відмітити, що при зменшенні швидкості обробки лазерним променем з Гауссовим розподілом $Wp(x,z)$ температура поверхні наближається до температури плавлення (Рис 3). Її зростання зупиняється з-за витрачання енергії на подолання теплоти фазового перетворення, яке необхідне при плавленні

Все це приводить до того, що HAZ, яка утворилась при обробці сфокусованим променем з ЄЗРГП також перевищує приблизно 1.5 рази HAZ, яка утворилась при обробці сфокусованим променем ULPDD (Рис.4).

На Рис.4 наведено поле температур $T(x, y)$, яке утворилось в заготовці в зоні дії сфокусованого випромінювання (тут і в подальшому, розглядаємо поле температур $T(x, y)$ в момент часу t_m , коли температура поверхні максимальна).

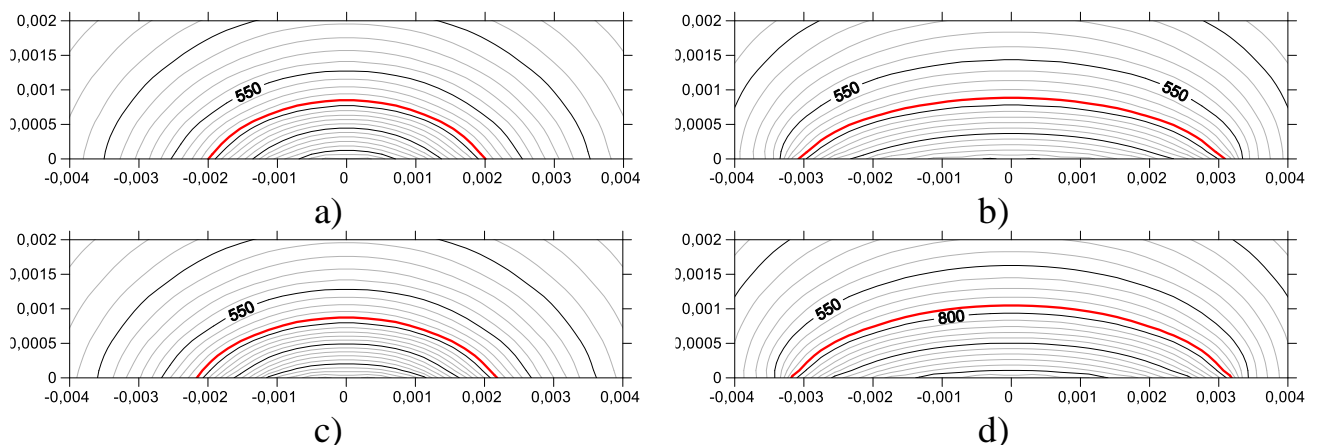


Рис.4. Розподіл температури в зразках зі сталі 45 ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$) де: а) –GLID; б) - ULID

На Рис.5 наведено зміни положення в просторі і часі ізотерми структурних перетворень $T_{ac3}(x,y,t)$, які протікають в зоні термічного впливу сталі 45 ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$) GLPDD, а на Рис.6 розраховані перерізи ЗТВ, які виникають в заготовці з сталі 45 при її лазерному опроміненні на різних режимах обробки. Зазначимо, що залежність $T_{ac3}(x,y,t)$, яка наведена на Рис.6 є типовою. В наступному, дані залежності будуть наведені для режимів обробки, при яких вони будуть мати не типовий вигляд.

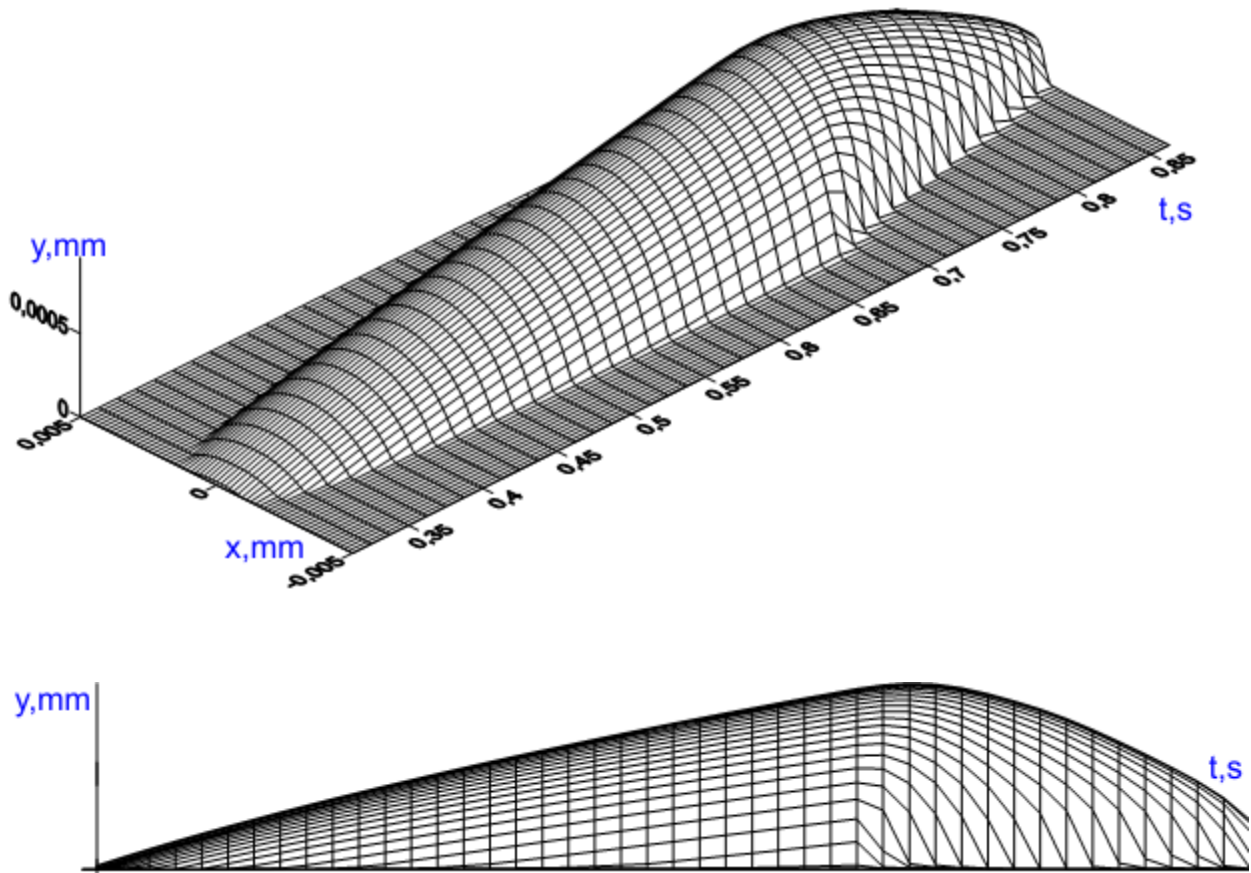


Рис.5 Зміни в просторі і часі ізотерми структурних перетворень $T_{ac3}(x,y,t)$, які протікають в зоні термічного впливу сталі 45 ($P_m=1000W$, $r_p = 3.25mm$, $V_z = 12mm/s$) з GLPDD

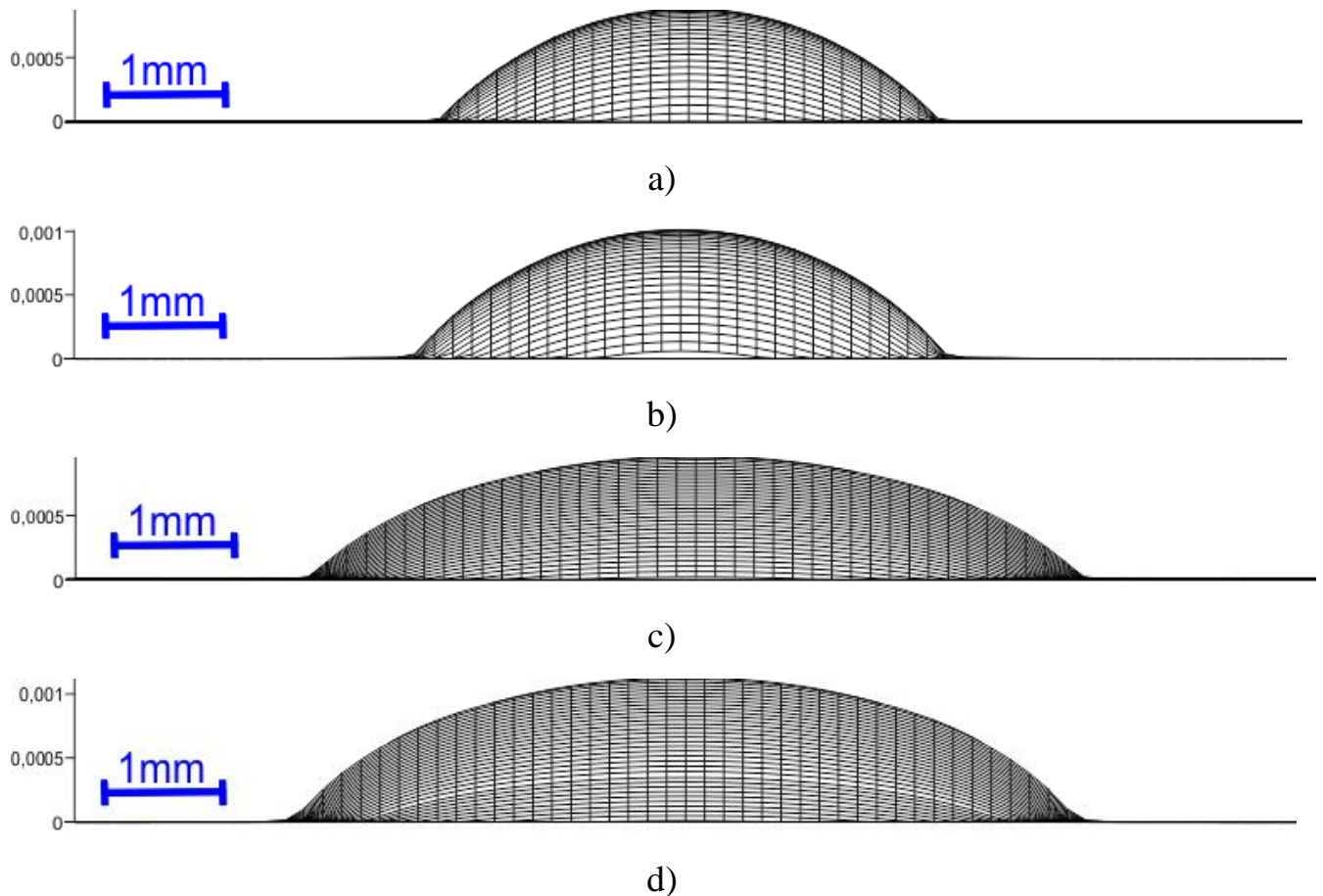


Рис.6 розраховані перерізи HAZ, які виникають в заготовці зі сталі 45 при її лазерному опроміненні на різних режимах обробки ($P_m=1000W$, $r_p = 3.25mm$), де: а) лазерний промінь з ГЗРГП, $V_z = 12mm/s$; б) лазерний промінь з GLPDD, $V_z = 10mm/s$ с) лазерний промінь з ULPDD, $V_z = 12mm/s$; д) - лазерний промінь ULPDD, $V_z = 10mm/s$.

Слід відмітити, що при обробці заготовки сфокусованим лазерним випромінюванням з ULPDD, поле температур, яке виникає в зоні лазерного впливу (в поперечному перерізі) містить ізотерми, які відхиляються від бажаного (майже «прямокутного») вигляду (Рис.4b, d), що позначається і на поперечному перерізі HAZ (Рис.6 с, d). Це відбувається не тільки завдяки природній теплопровідності матеріалу заготовки та інтенсивному відведенню тепла з зони дії

лазерного випромінювання, але й завдяки тому, що зона опромінення лазерного випромінювання є коло. Відповідно, розподіл густини енергії лазерного випромінювання $W_E(x, z)$ (7), вздовж лінії обробки не буде мати «прямокутний» переріз (Рис. 7), такий як переріз залежності ULPDD. Так, на Рис. 7 зображено $W_p(x, z, t)$ та розподіл $W_E(x, z)$ на поверхні зразка за умов $P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$ та фокусування випромінювання з ULPDD. Також, для порівняння на, на Рис. 8 наведено $W_E(x, z)$ за умов фокусування випромінювання ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$) в зону з GLPDD (Рис.8а).

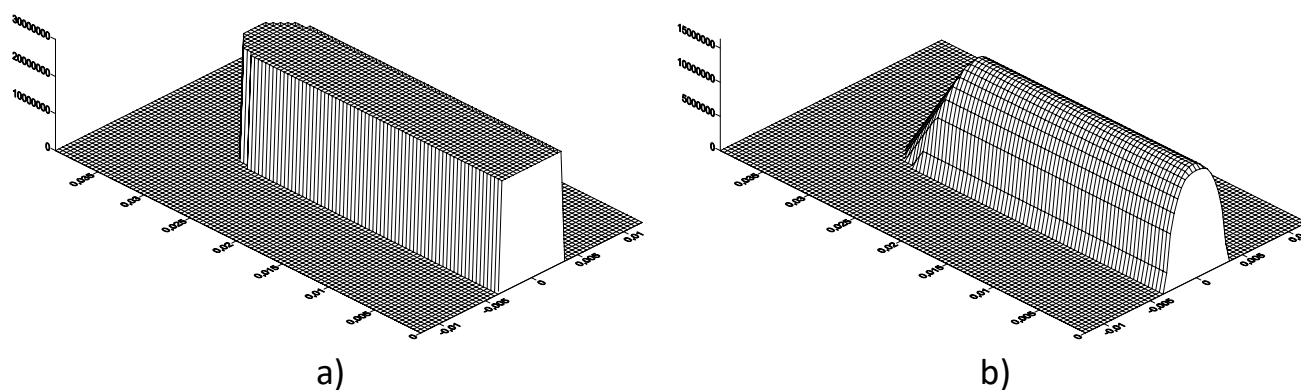


Рис. 7 $W_p(x, z, t)$ (a) та $W_E(x, z)$ (b) на поверхні зразка за умов $P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$ та фокусування випромінювання з ULPDD

$$W_E(x, z) = \int_0^{time_p} W_p(x, z, t) dt \quad (7)$$

Де: час_t – час інтегрування

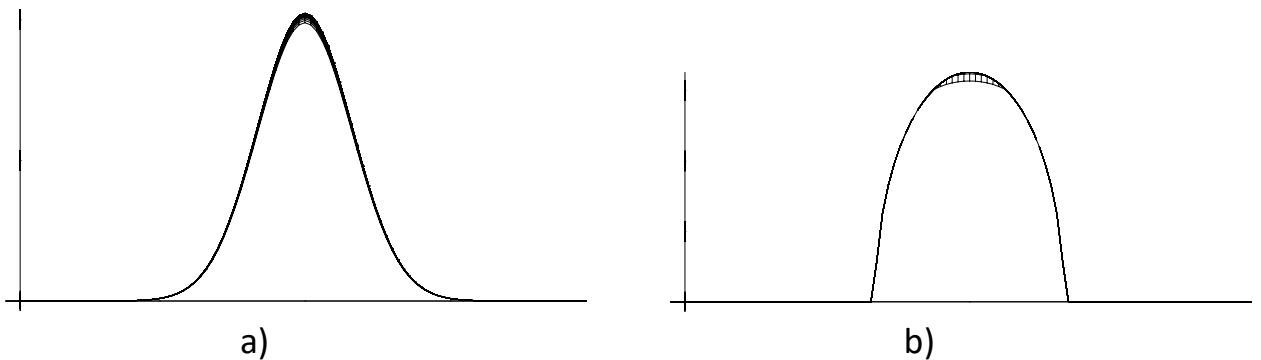


Рис.8 $W_E(x)$ на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з $P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, $V_z=12\text{mm/s}$, сфокусоване в пляму з GLPDD (а) ULPDD (б). У випадку, коли обробка з GLPDD, максимальні значення $W_E(x,z)$ складають $W_E \text{ MAX} = 20458578.5 \text{ J/mm}^2$, коли обробка з ULPDD, $W_E \text{ MAX} = 16333629.2 \text{ J/mm}^2$.

При моделюванні процесу лазерного нагріву заготовки ми будемо намагатись збільшити розміри ЗТВ завдяки застосування сканування сфокусованого лазерного випромінювання. При цьому ми будемо порівнювати розраховані (завдяки чисельному рішенню системи (1) – (6)) розміри ЗТВ, які утворюються при обробці сталі 45 сфокусованим лазерним випромінюванням з ULPDD та GLPDD та час, який вони існують.

Додаткове сканування сфокусованого лазерного випромінювання веде до перерозподілу та зниженню $W_E(x,z)$ (в більшості випадків) (Рис.9), що безумовно позначиться на:

- зниження температурів зоні лазерної дії (в більшості випадків);
- тепловій історії HAZ (з-за багатьох проходів сфокусованого лазерного випромінювання в зоні його дії);
- розмірах та формі поперечного перерізу HAZ.

Так, на Рис.9 наведено зображення $W_E(x)$ на поверхні зразка (поступова її трансформація) при обробці лазерним випромінюванням з $P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, сфокусоване в пляму з GLPDD (а,с,ф,н) та ULPDD (б,д,г,і) та сканує в площині YOХ, яка перпендикулярна вектору руху заготовки з частотою $\square=50\text{Hz}$ та різною амплітудою А (6)

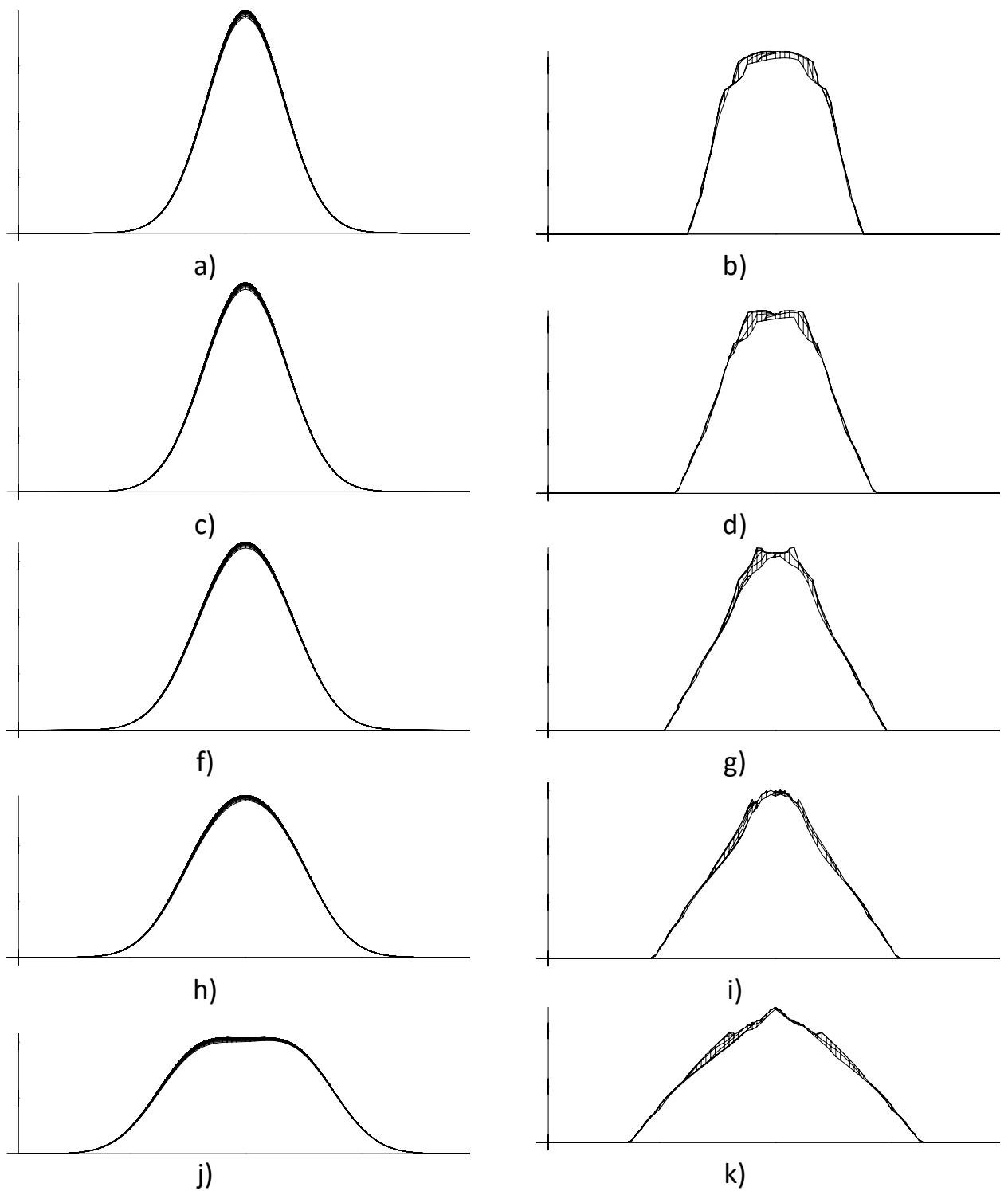


Рис.9 Зміни $W_E(x)$ на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з $P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, $V_z=12\text{mm/s}$, сфокусоване в пляму з GLPDD (a,c,f,h,j) ULPDD (b,d,g,i,k) що сканує в площині YOX-перпендикулярній вектору руху заготовки з частотою $\square=50\text{Hz}$ та різною амплітудою A , де: a), b) - $A=0.5\text{mm}$; c), d) - $A=1\text{mm}$; f), g) - $A=1.5\text{mm}$; h), i) - $A=2\text{mm}$; j), k) - $A=3\text{mm}$;

А на Рис.10 наведено залежність максимальної густини енергії вздовж лінії обробки для різних законів сканування.

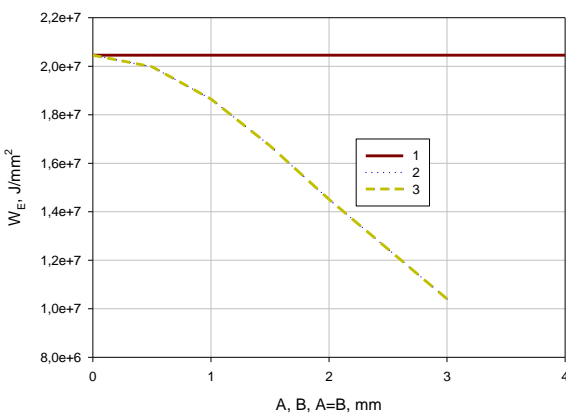
Аналізуючи залежності $W_E(x)$, які наведені на Рис.9, Рис10 відмітимо, що сканування лазерного випромінювання в площині YOX, яка перпендикулярна вектору руху заготовки: веде до збільшення зони його дії та можливого зростання ширини HAZ. Ми можемо припустити, що очікувальний поперечний переріз HAZ буде нагадувати раніш розрахований HAZ, та зображений на Рис. 6, причому, для даних режимі обробки та закону сканування:

- $W_E(x)$, з використанням лазерного випромінювання з GLPDD при зростанні A монотонно зменшується (Рис.9, Рис.10);
- $W_E(x)$, з використанням лазерного випромінювання з ULPDD не чутлива зростанню A до 1.5мм (тобто приблизно половини r_p), причому збільшення A перетворює $W_E(x)$ на «трикутний».

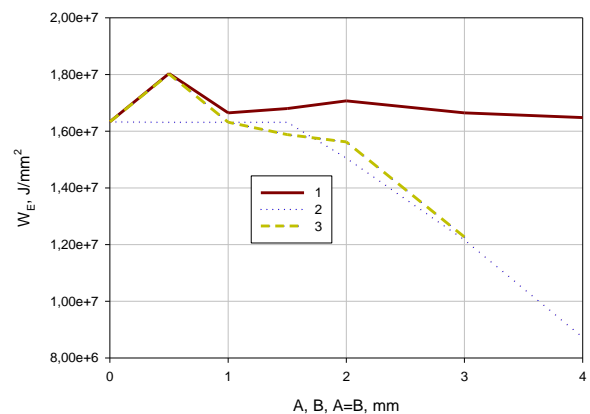
Таким чином, ми можемо сказати, що для даних режимів обробки та закону сканування, збільшення A приведе до поступового:

- зростанню ширини HAZ (WHAZ) та зменшенню її глибини (DHAZ);
- заміни ULPDD на розподіл $Wp(x,z,t)$, який нагадує «горби» верблюда, або перевернутий конус (Рис.11)

Очевидно, що при використанні ULPDD, та скануванні випромінювання в межах зона опромінення, уникнення перетворення розподілу $W_E(x)$ на «трикутний» (Рис.9к) (і, відповідно, погіршення форми поперечного перерізу ЗТВ) можливо при використанні зона опромінення квадратного або прямокутного перерізу (не круглого);



a)



b)

Рис. 10. Залежність максимальної густини енергії W_E на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з $P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$, що сканує з частотою $\square=50Hz$ від амплітуди сканувань, де: а) – сканування променю з GLPDD; б) - сканування променю з ULPDD; 1- залежність максимальної густини енергії $W_E(B)$ -сканування в площині YOХ-перпендикулярній вектору руху заготовки; 2 – $W_E(A)$ -сканування в площині YOZ – співпадає з вектром швидкості руху заготовки; 3- залежність $W_E(A=B)$ - сканування по колу.

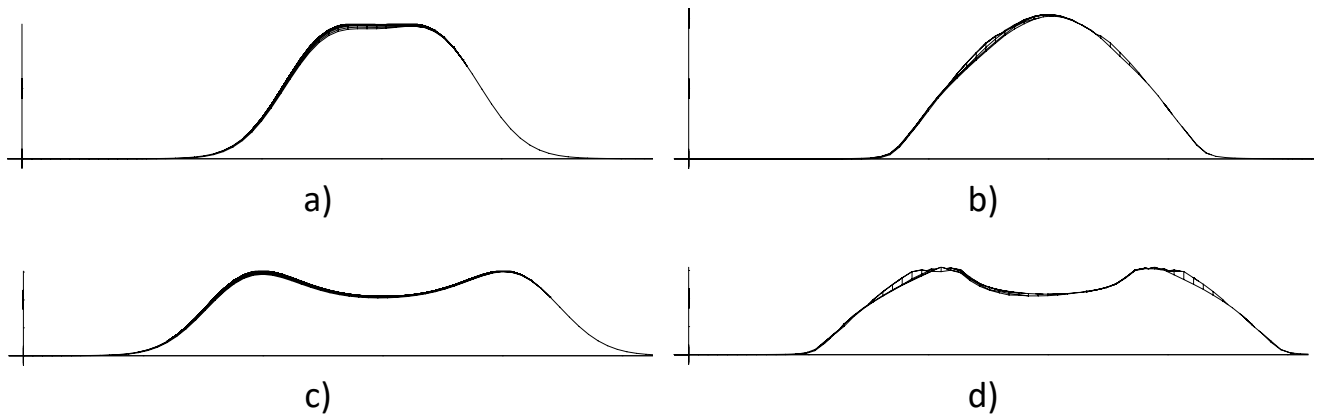


Рис.11 Зміни $W_E(x)$ на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з $P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$, сфокусоване в зону з GLPDD (а,с) ULPDD (б,д) що сканує в площині YOХ-перпендикулярній вектору руху заготовки з частотою $\square=50Hz$ та різною амплітудою A , де: а), б) - $A=r_p=3.25mm$;; с), д) - $A=2r_p=6.5mm$.

Сплески W_E , спостерігаються у вершинах амплітуди сканування, коли різко знижується відносна швидкість $V_{\square}(t)$ деталі та променю. Відповідно, поперечний переріз HAZ буде нагадувати переріз $W_E(x,z)$. Особливо вказане справедливо за умови, коли A значно більша, ніж $2r_p$. Координати «сплесків» $W_E(x,z)$ легко визначаються у 2-х випадках:

1-й, коли відносна швидкість переміщення знижується в у вершинах амплітуди сканування в площині YOХ, тобто:

$$\cos(\square t) = 0 \tag{8}$$

2-й, коли дорівнює «нулю» $V_z \sin(\omega t)$, що можливо (сканування в площині ZOY) при виконанні умов (9):

$$\sin(\omega t) = V_z / (B_s \omega) \leq 1 \quad (9)$$

Поява «сплеску» на залежності W_E від амплітуди сканувань $B = 0.5\text{mm}$ (Рис.10b) пояснюється приблизним виконанням умови (8), тобто зменшенням відносної $V_z \sin(\omega t)$ деталі та променю.

Аналізуючи (8) та (9) відмітимо, що поява «сплесків» W_E в площині XOY (Fig.1) залежить лише від частоти коливань, а поява «сплесків» W_E в площині YOZ (Fig.1) залежить від швидкості V_z , амплітуди B та частоти ω

Використовуючи (8) та (9), зазначимо, що створення «суцільного» розподіл $W_E(x,z)$ (і, відповідно, суцільної, не розривної HAZ) на поверхні деталі можливо:

- зменшенням швидкості руху заготовки V_z ;
- різкого збільшення частоти сканування ω ;
- зменшенням потужності випромінювання в мертвих точках коливань;
- використанням всіх перерахованих методів.

Зменшення частоти сканування або зростання швидкості переміщення заготовки приведе до «хвиле» подібної сумарної траєкторії руху сфокусованого променю і, відповідно, аналогічної форми ЗТВ, яка утвориться на поверхні деталі. Що стосується перерізу ЗТВ вздовж вершин, то він також буде мати вигляд «горбів» верблюда. Так, на Рис.11 наведено залежності $W_E(x,z)$ на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з ULPDD $P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, $V_z=12\text{mm/s}$, що сканує в площині YOX-перпендикулярній вектору руху заготовки з частотою $\omega=5\text{Hz}$ для різних амплітуд сканування

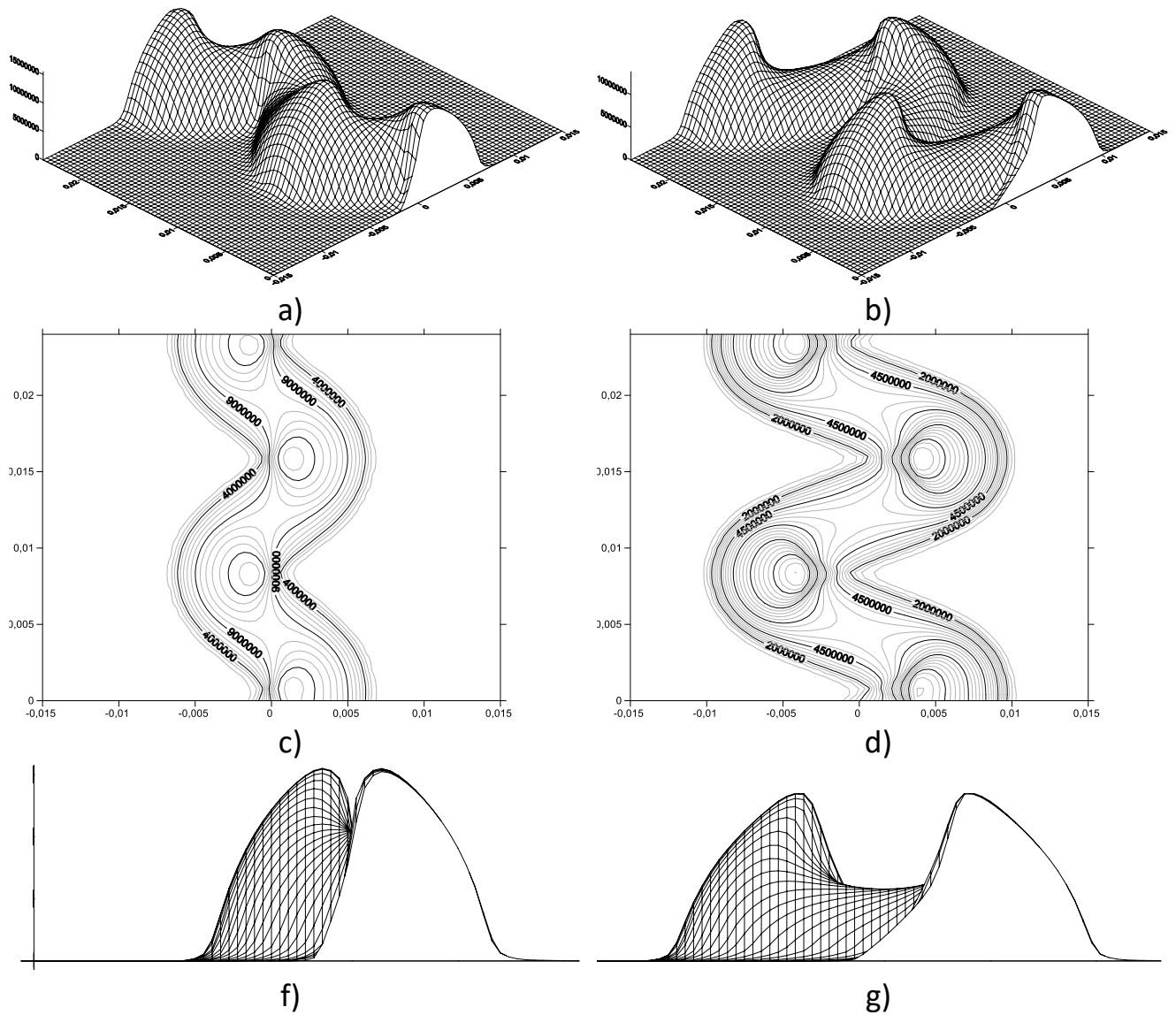


Рис. 11 Залежності $W_E(x, z)$ на поверхні зразка при обробці лазерним випромінюванням з ULPDD $P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, $V_z=12\text{mm/s}$, що сканує в площині YOX-перпендикулярній вектору руху заготовки з частотою $\square=5\text{ Hz}$ для різних амплітуд сканування A , де: а), с) ф) - з $A = r_p=3.25\text{mm}$; б), д) г) з $A = 2r_p=3.25\text{mm}=6.5\text{mm}$; ф), г) –поперечний переріз $W_E(x, z)$

Порівнюючи дані, які наведені на Рис.10, відмітимо, що для даних умов обробки ($P_m=1000\text{W}$, $r_p=3.25\text{mm}$, $V_z=12\text{mm/s}$, $\square=50\text{ Hz}$) сканування сфокусованого лазерного випромінювання з ULPDD доцільно проводити з амплітудою, яка не

перевищує 0.5 mm. Збільшення амплітуди сканування приведе до падіння температури в зоні дії сфокусованого лазерного випромінювання (Рис.12), і відповідно, розмірів HAZ.

З-за «розтягнутої» в просторі плями фокусування з GLPDD, сканування випромінювання з даним розподілом не так чутливе до зростання амплітуди сканування. Проте, зростання амплітуди сканування (на даних режимах обробки) також веде до зменшенню розмірів HAZ.

Так, на Рис.12 наведено «теплові історії», які виникають в HAZ, при обробці зразка сталі 45 ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$, $\square=50 Hz$) з різною амплітудою коливань лазерним променем та різним розподілом густини потужності в зона опромінення. Залежності розмірів HAZ та часу існування ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$, $\square=50 Hz$) наведені на Рис.13. Також, на Рис.14, Рис.15 наведено «рух» у часі ізотерми структурних перетворень та їх кінцевий вигляд, які виникають в заготовці при її обробці лазерним випромінюванням, яке сканує з різною амплітудою.

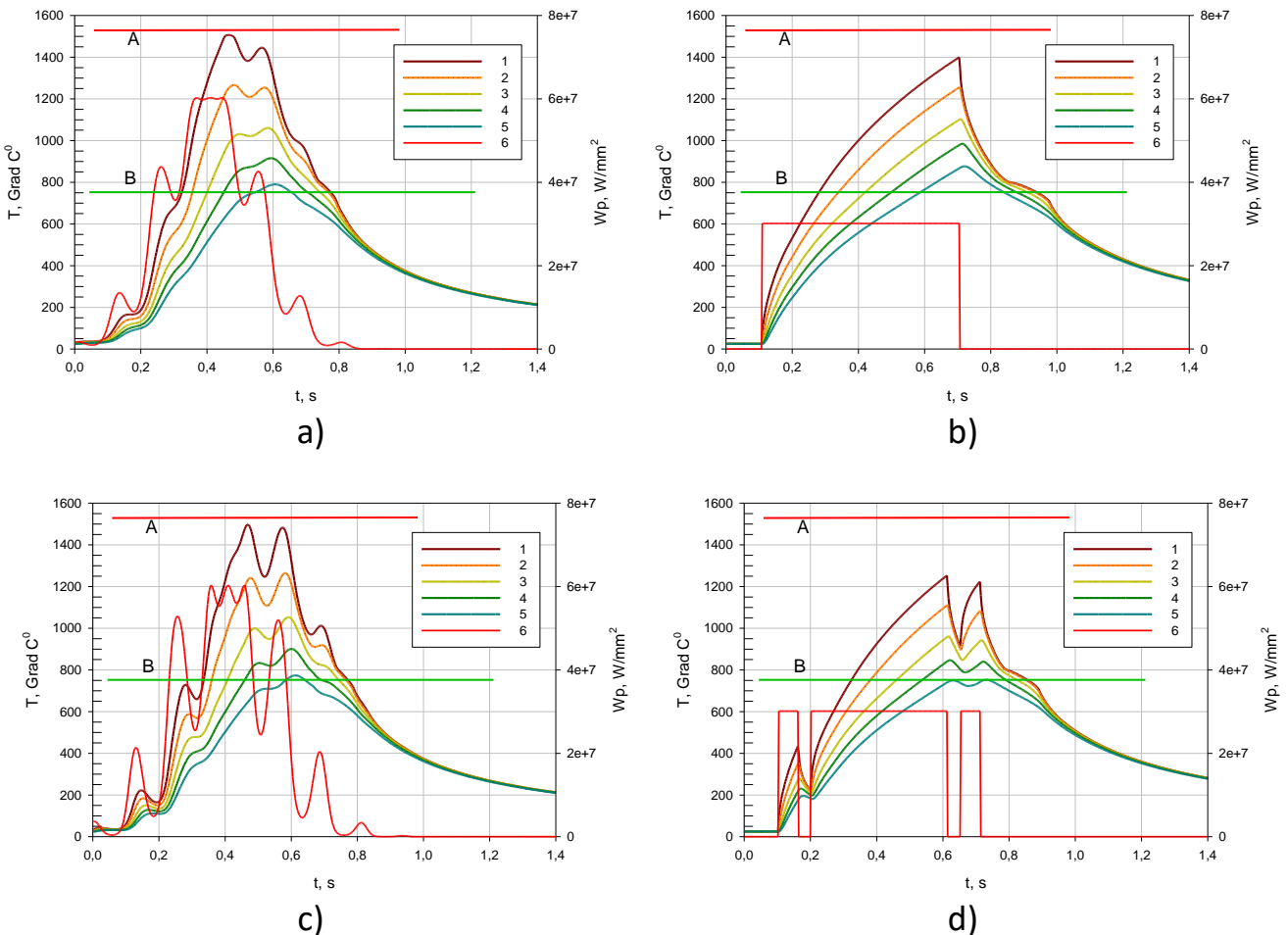
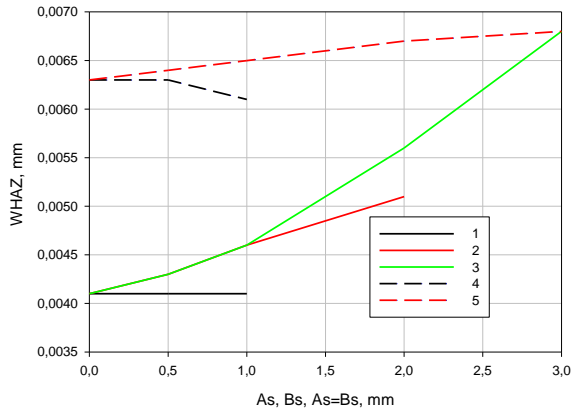


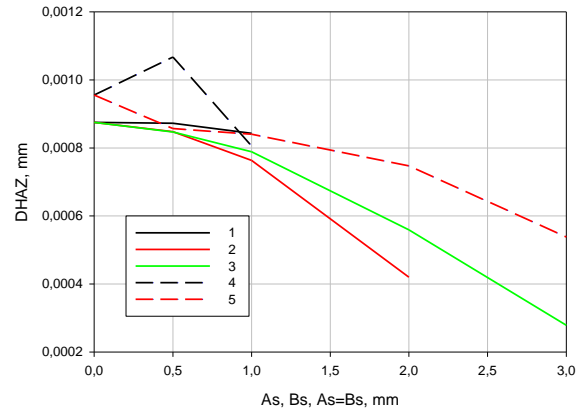
Рис.12 Зв'язок температури $T(y)$ на різній глибині від опромінюваної поверхні і густина потужності сфокусованого лазерного променя W_p від часу t при обробці сталі 45 лазерним променем з $P_m = 1000W$ сфокусованим в плямі з $r_p = 3,25mm$ і рухомим зі швидкістю $V_x = 12mm/c$ і скануванням з частотою $\square = 50Гц$ з Гауссовим законом розподілу інтенсивностей (а, с) і з рівномірним законом розподілу інтенсивностей (b, d) і розгорткою з амплітудою $B_s = 0,5 mm/c$ (а, b) і $B_s = 1,0 mm$ (с,d), де: 1 - залежність щільності потужності сфокусованого лазерного променя W_p від часу t ; 2 - залежність температури $T(y)$ від поверхні ($z = 0$) від часу t ; 3 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0192mm$ від часу t ; 4 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0416mm$ від часу t ; 5 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,0608mm$ від часу t ; 6 - залежність $T(z)$ на глибині $y = 0,08mm$ від часу t ; А - температура плавлення; В - температура структурних перетворень

Як видно з залежностей, які наведені на Рис.12, для даних умов обробки, (як і очікувалось) сканування лазерного випромінювання веде до періодичного нагріву зони лазерної дії, причому температура поверхні повторює періодичність появи «піку» сфокусованого лазерного променя. У зв'язку з тим, що сканування лазерного випромінювання вздовж руху заготовки (в площині YOZ) з GLPDD майже не змінює W_E (Рис.10а), то й температура поверхні (не дивлячись на періодичний нагрів) майже не змінюється (Рис.12 а, с).

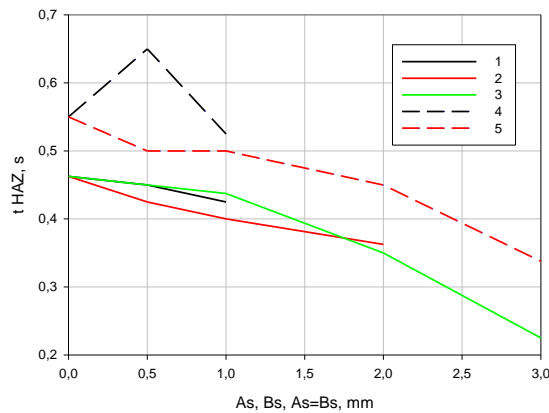
Згідно (9), зростання амплітуди сканування B_s веде до зменшенню інтервалу часу проходження осі променя зони нагріву та зростання їх кількості. Але зростання амплітуди сканування B_s також веде до зростання швидкості V_{\square} . У випадку, коли $B_s = 0.5 mm$ ми маємо певний баланс між V_{\square} та кількістю разів проходження променя. Це позначається на сплеску на залежності W_E (Рис. 10b) від амплітуди сканування при $B_s = 0.5 mm$ (промінь з ULPDD) та зростанню температури в зоні лазерного нагріву (Рис.3b, Рис.12b) майже на $100^{\circ}C$.



a)

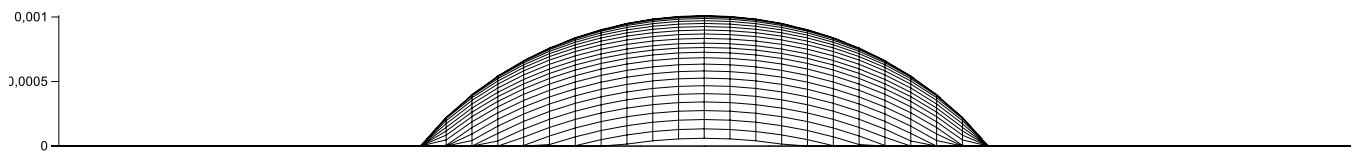


b)



c)

Рис.13 Залежності ширини (а), глибини (b) та часу протікання структурних перетворень (c) в HAZ від амплітуди сканування сфокусованим лазерним випромінюванням ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=12mm/s$, $\square=50 Hz$) з різним розподілом густини потужності в зона опромінення де: а) 1- амплітуда сканування B_s , промінь з GLPDD; 2- амплітуда сканування A_s , промінь з GLPDD; 3- сканування по колу, $B_s = A_s$, промінь з GLPDD; 4- амплітуда сканування B_s , промінь з ULPDD; 5- амплітуда сканування A_s , промінь з ULPDD;



a)

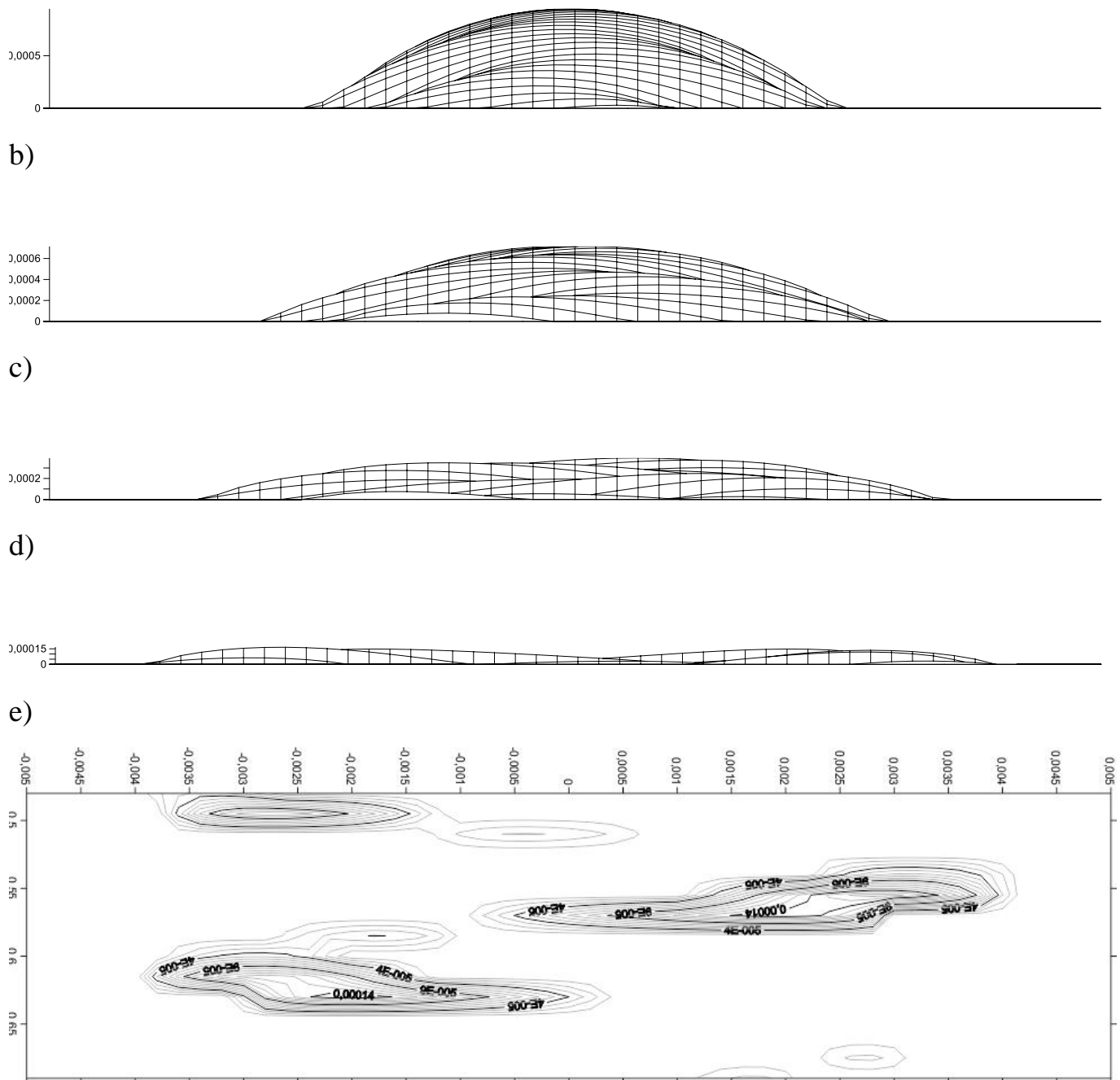
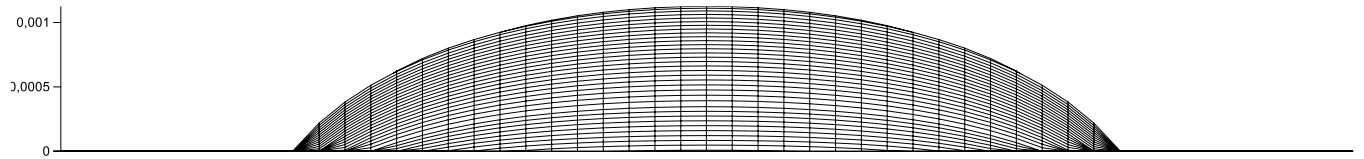
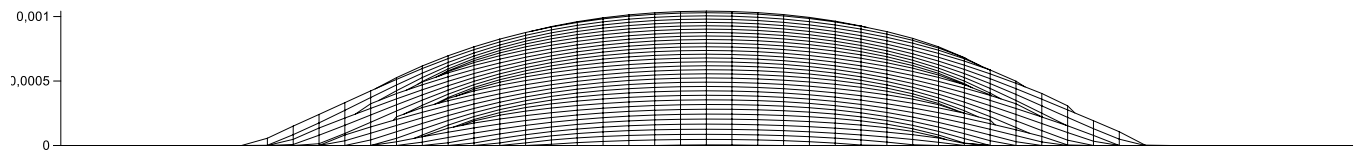


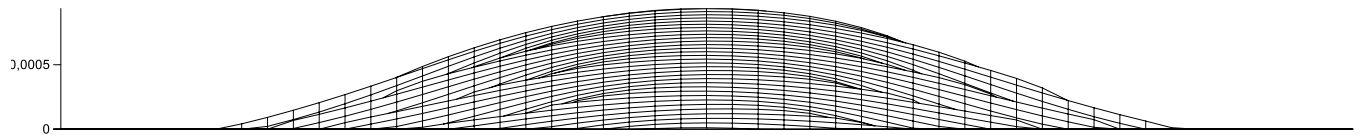
Рис. 15. Розраховані поперечні перерізи ЗТВ та зміна положення у часі ізотерми T_{Ac3} , які виникають в заготовці зі сталі 45 під дією сфокусованого лазерного випромінювання ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=10mm/s$, $\square=50\text{ Hz}$, $B_s=0$) з GLPDD, де: а) – амплітуда сканування $A_s=0$; б) – $A_s=1mm$; в) – $A_s=2mm$; г) – $A_s=3mm$; е) – $A_s=4mm$; ф) – рух у часі ізотерми T_{Ac3} , в перерізі ЗТВ (вертикальна координата час, горизонтальна вісь ОХ, ізолінії – глибина).



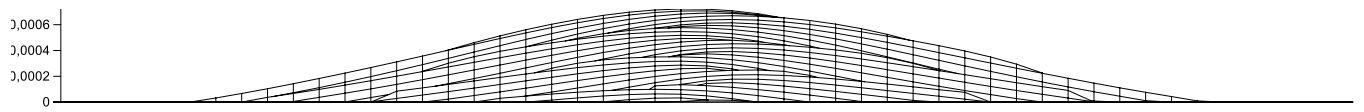
a)



b)



c)



d)



e)

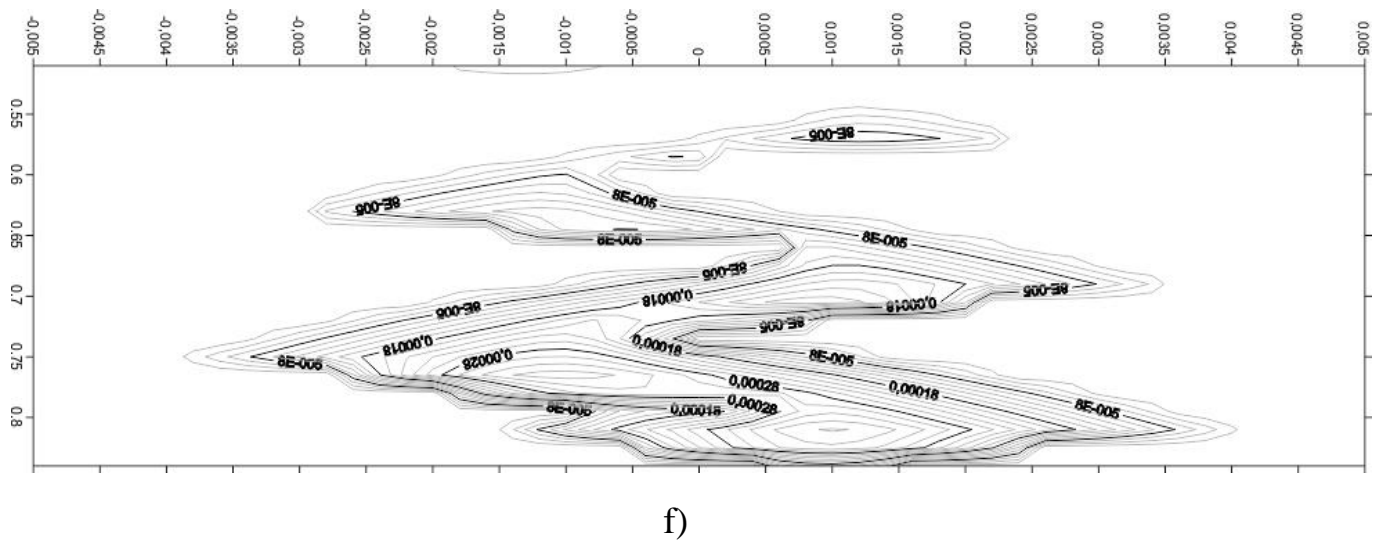


Рис. 16. Розраховані поперечні перерізи ЗТВ та зміна положення у часі ізотерми T_{Ac3} , які виникають в заготовці зі сталі 45 під дією сфокусованого лазерного випромінювання ($P_m=1000W$, $r_p=3.25mm$, $V_z=10mm/s$, $\square=50\text{ Hz}$, $B_s=0$) з ULPDD, де: а) – амплітуда сканування $A_s=0$; б) – $A_s=1mm$; в) – $A_s=2mm$; г) – $A_s=3mm$; д) – $A_s=4mm$; ф) – рух у часі ізотерми T_{Ac3} , (вертикальна координата час, горизонтальна вісь Ox , ізолінії – глибина).

Аналізуючи залежності, які наведені на Рис.15, Рис.16 відмітимо (як і очікувалось) сканування сфокусованого лазерного випромінювання з ULPDD є більш ефективним, ніж з використанням звичайного лазерного випромінювання, що має GLPDD. В усіх випадках, поперечний переріз ЗТВ не схожий на «ідеальний», і (як відмічалось раніше) це пов'язано не тільки виконання закону природньої теплопровідності, але й завдяки тому, що $W_E(x,z)$, втрачає схожість з «прямокутною». Крім того, висока швидкість руху сфокусованого випромінювання V_s веде зниження температури в зоні його дії. Як відмічалось вище, зменшення швидкості руху можливо досягти зменшенням амплітуди сканувань та їх частоти.

Як відмічалось раніше, в першому випадку ми зменшуємо поперечний переріз ЗТВ. В другому, при високій швидкості руху заготовки ми можемо отримати «синусоїдо» подібну ЗТВ на її поверхні (Рис. 11), що не є допустимим.

Найкращим рішенням підвищення глибини ЗТВ (у випадку, коли ми використовуємо сфокусоване лазерне випромінювання яке сканує) є зменшення розміру плями фокусування r_p лазерного випромінювання, тобто зростання W_p .

При цьому, за умов $\alpha = 0$ (тобто без застосування додаткового сканування) обробка на даному режимі приведе до плавлення поверхні.

Ілюстрацією сказаного вище є наведені на Рис. 17 для порівняння розраховані перерізи ЗТВ, які утворюються при обробці сталі 45 сфокусованим лазерним випромінюванням ($P_m=1000\text{W}$, $V_z=10\text{mm/s}$, $\alpha=50\text{ Hz}$, $V_s=0$) з ULPDD, та різними зонами опромінення

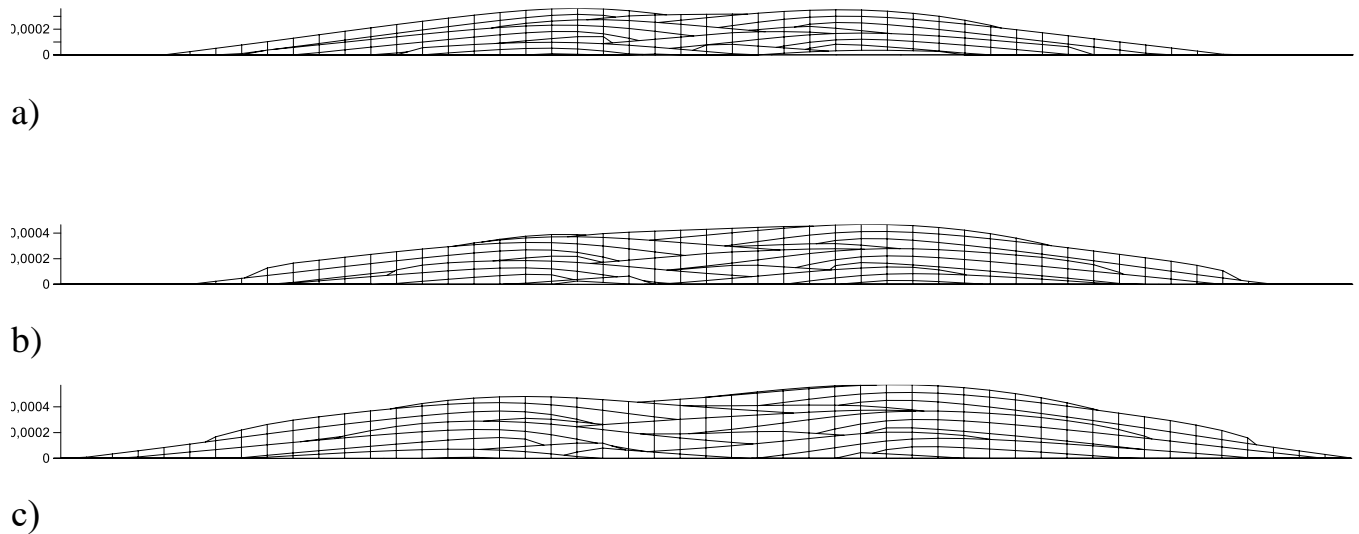
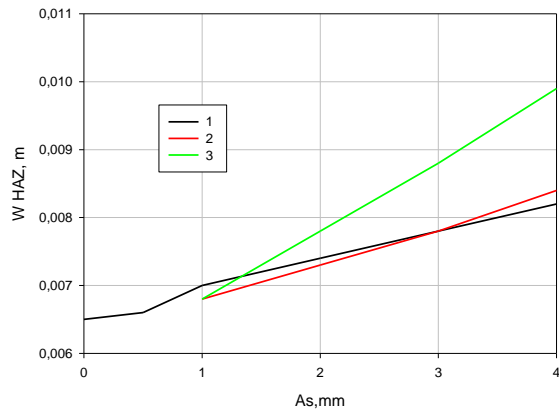
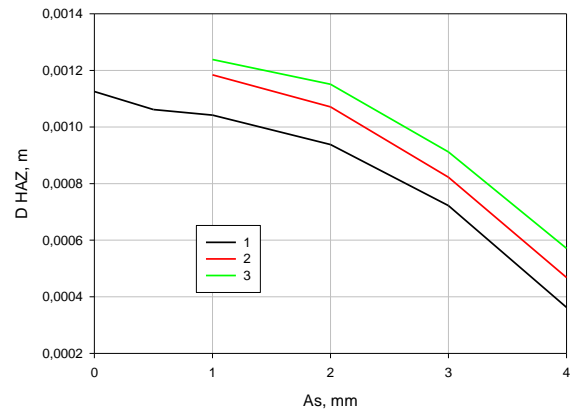


Рис. 17 Розраховані перерізи ЗТВ, які утворюються при обробці сталі 45 сфокусованим лазерним випромінюванням ($P_m=1000\text{W}$, $V_z=10\text{mm/s}$, $\alpha=50\text{ Hz}$, $V_s=0$, $A_s=4\text{ mm}$) з ULPDD, та різними зонами опромінення, де; а) - $r_p=3.25\text{mm}$; б) - $r_p=3\text{ mm}$; в) - $r_p=2.75\text{mm}$

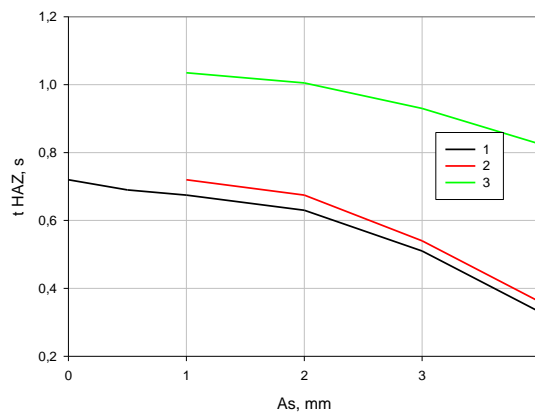
На Рис. 18 наведено залежності розмірів ЗТВ, які утворені при обробці сталі 45 сфокусованим лазерним випромінюванням ($P_m=1000\text{W}$, $V_z=10\text{mm/s}$, $\alpha=50\text{ Hz}$, $V_s=0$) з ULPDD, та різними зонами опромінення від амплітуди сканувань A_s ,



a)



b)



c)

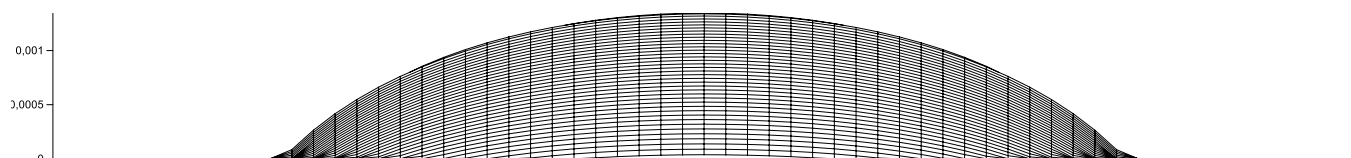
Рис. 18 Залежності розмірів ЗТВ, які утворені при обробці сталі 45 сфокусованим лазерним випромінюванням ($P_m=1000W$, $V_z=10mm/s$, $\square=50 Hz$, $B_s=0$) з ULPDD, та різними плямами фокусування від амплітуди сканувань A_s , де: а) залежність ширини ЗТВ від амплітуди сканувань A_s ; б) – залежність глибини ЗТВ від амплітуди сканувань A_s ; в) залежність часу існування ЗТВ від амплітуди сканувань A_s ; 1- пляма фокусування $r_p=3.25mm$; 2) - $r_p=3.0mm$; 3 - $r_p=2.75mm$

Як видно з наведених залежностей (Рис. 18), у випадку сканування лазерного випромінювання в площині, яка лежить перпендикулярно руху заготовки, найкращий результат (розміри та час існування ЗТВ) досягається при використанні лазерного випромінювання, яке фокусується в плями менших розмірів.

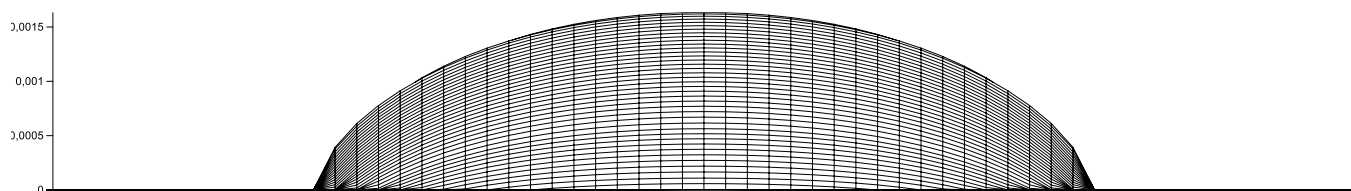
Зазначимо, що зменшення швидкості обробки V_z і відповідно, збільшенню розмірів плями фокусування, дозволить створювати в заготовці ЗТВ більших

розмірів. Але і в даному випадку, коли ми застосовуємо додаткове сканування лазерного випромінювання, ми повинні дотримуватись правила: сканування відбувається сфокусованим лазерним випромінюванням, яке має меншу зону опромінення (забезпечує більшу W_p), чим при звичайній обробці.

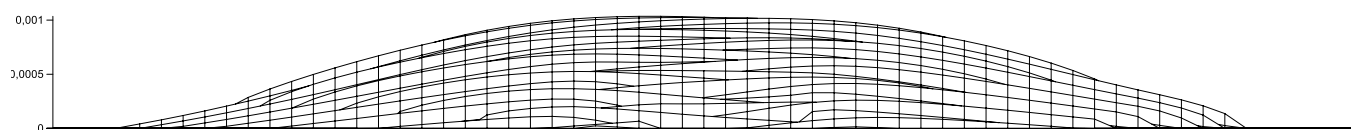
Так, наприклад, на Рис. 19 наведені розраховані перерізи ЗТВ, які утворюються в заготовці зі сталі 45 при її лазерній обробці на швидкості $V_z = 6\text{mm/s}$ з різними зонами опромінення



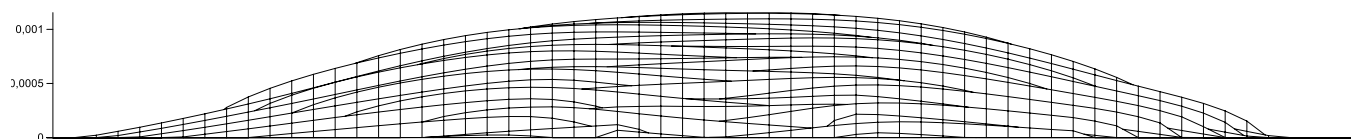
a)



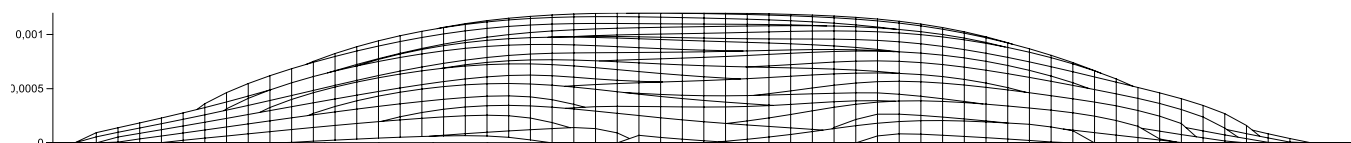
b)



c)



d)



e)

Рис. 19 Розраховані перерізи ЗТВ, які виникають в сталі 45 при її обробці сфокусованим лазерним випромінюванням з ULPDD ($P_m=1000\text{W}$, $V_z = 6\text{mm/s}$) та різними зонами опромінення, де: а) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 4\text{mm}$; б) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 3,5\text{mm}$; в) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 3\text{mm}$; г) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 2,5\text{mm}$; д) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 2\text{mm}$; е) - $\square = 0\text{ Hz}$, $r_p = 1,5\text{mm}$

- $\square = 50$ Hz, $A_s = 4$ mm, $r_p = 3$ mm; c) - $\square = 50$ Hz, $A_s = 4$ mm, $r_p = 3$ mm; d) - $\square = 50$ Hz, $A_s = 4$ mm, $r_p = 2.75$ mm; e) - $\square = 50$ Hz, $A_s = 4$ mm, $r_p = 2.5$ mm;

Зазначу, що у випадку $\square = 0$ Hz ($P_m = 1000$ W, $V_z = 6$ mm/s) при збільшенні зони опромінення r_p понад 4 mm в зоні нагріву, температура нижче температури T_{Ac3} , а при зменшенні зони опромінення нижче ніж 3,5 mm, в зоні дії лазерного випромінювання починається плавлення поверхні. На даних режимах обробки ($P_m = 1000$ W, $V_z = 6$ mm/s), у випадку застосування додаткового сканування лазерного випромінювання ($\square = 50$ Hz, $A_s = 4$ mm) при зміні розміру зони опромінення в діапазоні 2.5 mm - 3 mm, температура в зоні дії лазерного випромінювання не перевищує 1200°C.

Якщо розглядати певний переріз деталі, у якому утворюється ЗТВ, то при її лазерній обробці без сканування, майбутня ЗТВ, плавно змінює свої розміри у часі (Рис.1). У випадку використання додаткового сканування сфокусованого лазерного випромінювання, майбутня ЗТВ «хвиле» подібно змінюється у часі, а величина відхилення від «плавних» змін у часі майбутньої ЗТВ (для даного матеріалу деталі, швидкості обробки, розміру зони опромінення) залежить від параметрів сканування (Рис.20)

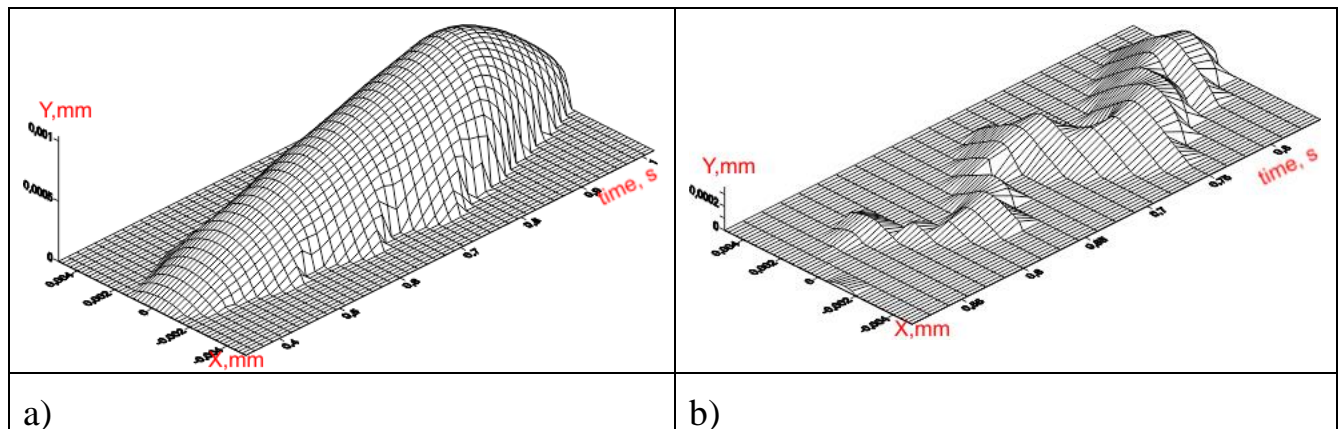


Рис.20 Поводження у часі ЗТВ, яка виникає при лазерній обробці сталі 45 сфокусованим лазерним променем, який сканує, де: а)

Аналізуючи залежності, які наведені на Рис.20 відмітимо, що при застосуванні додаткового сканування лазерного випромінювання, при розробці реальних технологічних процесів, треба обов'язково враховувати «хвилеподібні» зміни у часі розмірів майбутньої ЗТВ.

Висновки

- Сканування сфокусованого лазерного випромінювання є дієвим механізмом впливу на теплову історію та розміри зони термічного впливу
- Більшу продуктивність операції лазерного зміцнення (в порівнянні зі звичайним лазерним випромінюванням, що має Гауссовий закон розподілу густини потужності) забезпечить застосування лазерного випромінювання, яке сканує та має «рівномірний» закон розподілу густини потужності в зона опромінення.
- Для виконання операцій лазерного зміцнення (з використанням випромінювання, яке сканує) доцільно проводити при фокусуванні його в зону меншого (за звичай) розміру. В цьому випадку, мінімальний розмір зони опромінення можливо визначити по розміру зони опромінення, при якому починається плавлення поверхні (для даної швидкості обробки).
- Для виконання операцій лазерного зміцнення з використанням сфокусованого лазерного випромінювання, яке сканує, зона його опромінення повинна мати квадратний (або прямокутний) переріз, причому його ребра повинні бути паралельні площині сканування.
- Рівномірний розподіл густини потужності в плямі фокусування не є оптимальним. Визначення оптимального розподілу густини потужності в зоні опромінення та оптимальних режимів зміцнення можливий з проведенням попередніх експериментів (для перевірки адекватності розрахунків) і використання методів нелінійного програмування.
- Також в даному розділі спроектовано і розраховано метод закріплення деталі в пневматичних лещатах. Визначені параметри лазерної технологічної установки і розрахована оптична система для лазерної газопорошкової наплавки.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ.

При використанні лазерних технологічних комплексів можуть виникати шкідливі виробничі фактори, які впливають на операторів, якщо вони виконують роботи з технічного обслуговування лазерного технологічного комплексу або перебувають в одному приміщенні з працюючим лазерним технологічним комплексом.

В даній роботі розроблено лазерний технологічний комплекс для лазерної газопорошкової обробки поверхні матеріалів з коаксіальним підведенням лазерного випромінювання, що складається з лазерної технологічної установки потужністю 0,7 кВт, блоку живлення, системи вентиляції, блоку подачі технологічного газу та пульта керування.

Загальні відомості

Лазер потужністю 0,7 кВт належить до першого класу небезпеки випромінювання. Під час використання лазерної системи можуть виникати небезпечні та потенційно шкідливі елементи, залежно від небезпеки та умов використання:

1. висока напруга на зарядному пристрої, що живить конденсаторні батареї великої ємності, які можуть зберігати великий заряд при відключенні від джерела живлення
2. забруднення повітря хімічними речовинами (наприклад, чадним газом, свинцем, ртуттю, продуктами термічного окислення та розкладання матеріалів об'єктів дослідження), що утворюються внаслідок розряду високовольтних електродів, випаровування матеріалів у приміщенні під час зварювання, підготовки поверхні, різання тощо
3. здатність виробляти рентгенівське випромінювання; і
4. ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання від газорозрядних камер.
5. електромагнітні поля від роботи газових ДГК, що приводяться в дію радіочастотними або надвисокочастотними генераторами.

6. шум від роботи роторних насосів, що використовуються в ГОІ-16-1, а також шум і вібрація електромагнітних котушок.
7. можливість гальмування лазерних реакцій, якщо інтенсивне випромінювання ОКГ взаємодіє з матеріалом і утворює високоенергетичні частинки, що проникають глибоко в організм.
8. іонізуюче випромінювання, що використовується для накачування.
9. ризик несправності або вибуху системи лазерного збудження.

Розглянемо вищезазначені небезпечні та шкідливі фактори більш детально як потенційні ризики травматизму та виробничих збитків.

Електробезпеність.

- 1) Обладнання повинно бути встановлене в безпечному приміщенні (ПУЕ), тобто в сухому, без пилу приміщенні.
- 2) Обладнання повинно бути підключено до трифазної мережі змінного струму напругою 380 В і частотою 50 Гц і заземлено.

Для нормальної і безпечної експлуатації даного комплексу лазерної техніки передбачено ряд заходів електробезпеки.

Обслуговування лазерної системи здійснюється персоналом, який пройшов інструктаж з техніки безпеки при роботі з високовольтним ($U > 1000$ В) обладнанням відповідно до інструкцій, викладених в ПУЕ ГОСТ 12.2.007.0-75. Електробезпека в аварійному режимі забезпечується комбінацією відключення і нульового захисту. Приміщення, де встановлюється лазерна система, забезпечується діелектричними рукавичками і гумовими килимками, медичними аптечками і попереджувальними плакатами відповідно до ГОСТ 4997-75.

Недоступність до ділянки, що знаходиться під напругою, забезпечується відповідно до ГОСТ 12.2.009-80. Висота електромережі (не менше 2,2 м), обмеження огорожами, що приховують дроти і вимикачі, наявність подвійної ізоляції (що складається з робочої і допоміжної ізоляції). Наявність запобіжників для захисту людей від ураження електричним струмом; використання низької напруги (до 36 В) там, де це можливо.

4.1 Освітлення приміщення

Освітленість приміщення при роботі з лазерним обладнанням повинна бути не менше 150 люкс. Використовується виробниче освітлення з поєднанням природного і штучного світла. Приміщення, де встановлена лазерна система, освітлюється низьковольтними люмінесцентними лампами (тип ПБ) згідно зі СНиП II-4-79, оскільки висота стелі становить 6 метрів.

Обладнання та стіни пофарбовані у світлі тони, що сприяє рівномірному розподілу світла в полі зору.

Оскільки лазерна обробка використовує значну кількість вимірювальних приладів і вимагає тривалого робочого часу за третім розрядом, необхідна освітленість становить 310 лм (СНиП II-4-79).

Робоча зона, тобто пульт управління, освітлюється низьковольтними люмінесцентними лампами. На робочій поверхні відсутні різкі тіні, які спотворюють форму і розміри предметів і втомлюють очі. Робочі частини машини виготовлені зі світлопоглинаючого чавуну або сталі матового кольору. Інші частини обладнання мають матовий зелений або сірий колір. У робочій зоні немає відблисків від прямого або відбитого світла. Освітлення в приміщенні максимально наближене до природного.

4.2 Шум.

Шум, що генерується лазерною системою, знаходиться в межах норми - менше 75 дБА. Цей шум класифікується як постійний і зберігається протягом усього часу роботи лазерної системи. Шум, що генерується відпрацьованим повітрям, знаходиться в межах норми. Це досягається завдяки використанню звукопоглинальних матеріалів, таких як піна і мастила для рухомих частин. Нижня частина лазера, де розташований обертовий вентилятор, закрита металевим екраном з внутрішньою поверхнею, покритою пінополістиролом.

Гігієнічні норми, норми шуму та заходи з контролю шуму описані в наступному документі: ДСН 3.3.6.037-99.

Пожежна безпека

На території підприємства відсутні місця зберігання вибухонебезпечних або легкозаймистих матеріалів, за винятком спеціально обладнаних складів паливно-мастильних матеріалів. Для запобігання концентрації вибухонебезпечних газів і парів у виробничих приміщеннях і на складах паливно-мастильних матеріалів передбачені загальнообмінні та місцеві витяжки.

Відповідно до ОНТП 24-86, приміщення, в яких встановлено обладнання для лазерної обробки, відносяться до категорії В: Клас П-Па. Зона розміщення обладнання: тверді горючі матеріали. Конструкція приміщення, в якому встановлено обладнання для лазерної обробки, відповідає четвертому ступеню пожежонебезпеки згідно з чинними нормативними документами (згідно зі СНиП 2.01.02.-85 та ГОСТ 12.1.004-91). Ділянка спланована відповідно до протипожежних норм і складається з одноповерхового цеху з двома виходами (один загальний і один запасний), обкладеного цеглою та цеглою. У середині цеху є цегляна перегородка (товщиною 300 мм), що відокремлює технічний майданчик від мийної, санітарно-побутового приміщення, складу та адміністративного офісу. Ці приміщення розташовані симетрично відносно центрального коридору і забезпечують одночасну евакуацію з усіх приміщень.

У всіх приміщеннях ЦОП встановлена пожежна сигналізація. Приміщення ЦОД обладнане протипожежним обладнанням відповідно до стандартів, включаючи пожежні крани, протипожежний водопровід, вогнегасники ОХП-8, ОХП-5 та ОХП-100, а також автоматичну систему пожежогасіння.

Можливі причини пожежі включають

- Несправність електрообладнання (високий струм перевантаження, коротке замикання).

- Експлуатація пошкодженого технологічного обладнання;

Організаційні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки включають

- Належне функціонування обладнання відповідно до вимог технічної документації;

- належний стан приміщень (справність евакуаційних виходів);

- розміщення пожежних попереджень у відповідних місцях; та
- Інформування працівників про пожежну безпеку.
- Встановлення детекторів диму.

Первинні засоби пожежогасіння: вода, пісок, азбестове полотно, вогнегасник ОУ-8 (2 вогнегасники). Повинні бути передбачені аварійні виходи. Двері повинні мати ширину не менше 800 мм, а коридори - не менше 2 м. Вікна та двері повинні відчинятися назовні або в бік евакуаційного виходу; на видному місці в приміщенні повинен знаходитися план евакуації відповідно до СНиП 2.09.02-85..

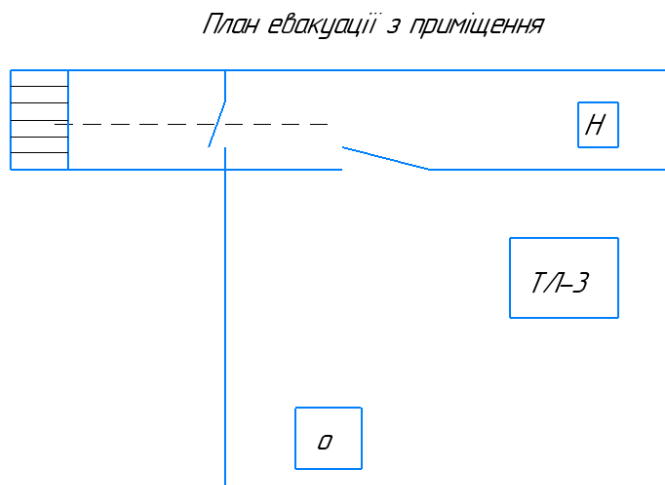


Рис. 5.1. План евакуації при пожежі

4.2 Лазерна безпека

Лазерні технологічні комплекси, що входять до складу ЛПК, є лазерами з 4 класом небезпеки за випромінюванням, яке вони генерують, згідно з ГОСТ 12.1.040-83, де вихідне випромінювання є небезпечним при впливі на шкіру дифузно розсіяного випромінювання на відстані 10 см від дифузно відбиваючої поверхні. Імовірність пошкодження ока адаптованого в темряві вища, ніж при яскравому світлі.

Ефективність лазерного випромінювання залежить від довжини хвилі випромінювання λ [мкм]. В даному випадку $\lambda = 1,06$ мкм. Для безперервного лазерного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм гранично допустимий рівень (ГДР) лазерного випромінювання визначається за формулою $\psi = 2 \cdot 10^2$ Вт/см².

Розрахунок опромінення рогівки пучком з поверхні:

На рисунку 5.1 показано опромінення рогівки ока 2 лазерним променем 1, відбитим від поверхні 6. Поверхня q розташована на відстані r1 від вікна лазерного випромінювання. Кут $\theta_1 = 0$ між нормаллю до поверхні і напрямком поширення випромінювання. Енергія випромінювання поверхні в цьому випадку::

$$E_n = \frac{P \cdot k_1}{S_q}, \quad (4.1)$$

де:

P - потужність випромінювання, P = 700 Вт;

k_1 – коефіцієнт послаблення випромінювання на шляху від лазера до роговиці ока, $k_1 = 1$;

S_q – площа плями на поверхні q, см²;

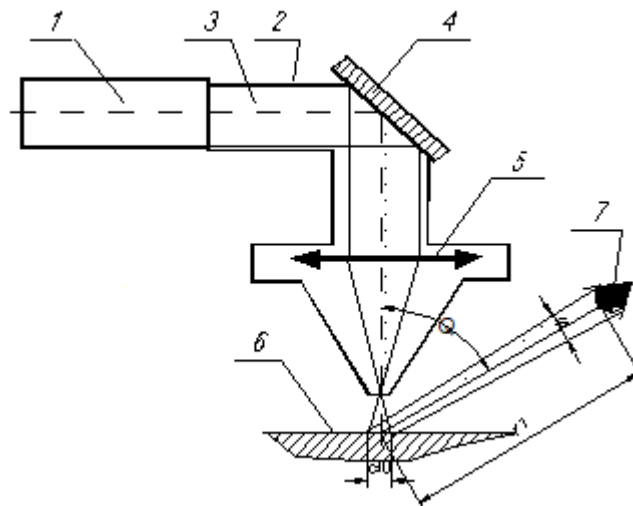


Рис.5.1. Схема розрахунку опромінення роговиці ока для відбитого випромінювання.

У нашому випадку, лазерне випромінювання буде спрямовано перпендикулярно на оброблювану поверхню q , отже розрахункові форми можна спростити.

Отже:

$$E_n = \frac{200 \cdot 1}{0,05} = 4 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}; \quad (4.2)$$

Для ока 2 поверхня q є джерелом випромінювання, випромінювальна здатність його складає:

$$R_{\text{э}} = \frac{P \cdot k_1 \cdot \rho}{S_q} = E_n \cdot \rho_1; \quad (4.3)$$

де:

$$\rho = 0,45;$$

$$R_{\text{э}} = 4 \cdot 0,45 = 1,8 \text{ кВт/см}^2; \quad (4.4)$$

При дифузійному відбитті енергетична яскравість не залежить від кута спостереження θ_2 і пов'язана з енергетичним потоком лазерного випромінювання співвідношенням:

$$L = \frac{R_{\text{э}}}{\pi} = \frac{1,8}{3,14} = 0,573 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}; \quad (4.5)$$

Роговиця ока, що опромінює, спостереження, знаходиться на відстані r_2 від поверхні q , дорівнює добутку енергетичної яскравості джерела в напрямку спостереження на значення (Ω) тілесного кута, під яким його видно із точки спостереження:

$$\psi_p = \frac{L \cdot k \cdot S_q \cdot \cos \theta_2}{R_2^2} = \frac{0,573 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 1}{200^2} = 7,2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2} \quad (4.6)$$

$$\psi_p = 0,07 \text{ Вт/мм}^2.$$

Порівняємо вимірний рівень енергетичного впливу СПДУ (розрахований ψ_p): $\psi_p < \psi$. Отже, незалежно від форми джерела світла, опромінення вважається

безпечним. Розглянемо заходи, яких необхідно вжити для забезпечення лазерної безпеки.

Приміщення, в якому встановлено ЛВЛ, відноситься до III класу небезпеки і відповідає вимогам нормативно-технічних документів. Внутрішні поверхні приміщення та предмети в приміщенні не мають поверхонь з коефіцієнтом відбиття більше 0,4. У робочій зоні розміщена схема із зазначенням лазерної зони, розмежованої, по можливості, прозорими та непрозорими (металевими) екранами. Засоби індивідуального захисту працівників в основному включають захисні окуляри з двома типами світлофільтрів (червоно-жовтий і синьо-зелений) та окуляри з маркуванням ОЗП ГОСТ 12.4.013-85.

4.3 Промислова гігієна

Повітря в робочій зоні.

З цієї причини наші приміщення зараз класифікуються як приміщення без обігріву. Існують потенційні порушення вимог щодо метеорологічних умов та хімічного складу повітря в приміщеннях:

- Потрапляння в приміщення технологічних газів з балонів АЗС "Львів";
- забруднення повітря робочої зони продуктами згоряння компонентів присадок через несправність витяжної системи.
- Негерметичність запірної арматури або трубопроводів при подачі газу з балонів;

Небезпечні речовини, такі як бензин, що використовуються під час лазерної обробки, метиловий спирт і ацетон. Вони відносяться до помірно небезпечних,

тобто помірно шкідливих, з точки зору впливу на здоров'я людини; ГДК згідно з ГОСТ 12.1. 005-88/98, 1,0. .10,0 мг/м³ (гранично допустима концентрація).

Заходи виробничої санітарії:

- Хімічний склад повітря в робочій зоні може бути несприятливим, що може вплинути на здоров'я працівників. Цю проблему можна вирішити, встановивши загальну витяжну шафу під стелею технологічної зони. Крім того, слід регулярно перевіряти запірну арматуру і газові труби, проводити профілактичні та ремонтні роботи.

- Панелі управління в газових установках обладнані світловою та звуковою сигналізацією для виявлення газових сумішей. Крім того, відповідні частини обладнання опломбовані. Вентиляція і кондиціонування повітря здійснюються відповідно до СНиП 2.04.05-84.

4.3 Заходи безпеки при експлуатації лазерного технологічного комплексу

При експлуатації лазерного технологічного комплексу необхідно дотримуватися наступних заходів безпеки відповідно до ГОСТ 12.1.005-88:

1. 1. ремонт лазерів здійснюється відповідно до ГОСТ 12.1.009-76 "Правила технічної експлуатації обладнання з елементами, що знаходяться під напругою понад 1000 В
2. 2. монтаж, ремонт і налагодження лазера здійснюється відповідно до правил техніки безпеки, прийнятих на підприємстві
3. лазерні багатофункціональні верстати експлуатуються відповідно до СНиП 2392-81, ГОСТ 12.1.040-83 і ГОСТ 12.1.031-81

4. приміщення, де встановлений лазер, обладнане засобами пожежогасіння, вуглекислотними вогнегасниками класу ОХВ-5, ОХВ-8 і ОХВ-100, ящиками з піском, попереджувальними плакатами, діелектричними рукавичками та аптечкою першої медичної допомоги
5. у зоні лазерної обробки передбачені витяжні вентиляційні отвори, за необхідності встановлені захисні екрани та огорожі
6. лазерне випромінювання здійснюється через герметичний світловод
7. балони зі стисненим газом розміщені на відстані не менше 5 м від лазерного випромінювання і не менше 1 м від радіаторів опалення та надійно закріплені на рамі.
8. ремонт, перевірка, чистка та регулювання системи повинні проводитися після повного вимкнення системи та відключення її від мережі електроживлення.
9. зона обслуговування повинна бути покрита діелектричним килимом згідно з ГОСТ 4997-75.
10. під час перерв і після закінчення роботи електричні кола установки повинні бути знеструмлені, а вентиля редукторів робочого газу закриті.
11. працівники, які працюють на лазерному комплексі, повинні проходити регулярні медичні огляди не рідше одного разу на рік.

Заборонені речовини.

1. експлуатація лазерних випромінювачів при відкритих дверцятах живлення (для цього дверцята обладнані пристроєм блокування кінцевого вимикача типу МП 110744)
2. допуск сторонніх осіб у приміщення, де встановлено лазерний багатофункціональний верстат

3. оператор не повинен залишати робочу зону під час роботи лазера
4. візуальний контроль під час обробки заготовки без використання спеціальних захисних засобів (масок, окулярів)
5. не підносити в зону дії лазера предмети, не передбачені виробничим завданням або технологічним процесом.

Висновок.

В даній главі наведені чіткі вимоги щодо забезпечення всіх заходів безпеки під час експлуатації лазерного технологічного комплексу з урахуванням впливу небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникнути на підприємстві при роботі з лазерним технологічним обладнанням.

Незважаючи на наявність небезпечних факторів, які можуть виникнути під час експлуатації лазерного технологічного комплексу, даний вид виробництва, тобто лазерну обробку, можна вважати безпечним за умови дотримання правил експлуатації обладнання.

Загальний висновок

Вивчаючи характер експлуатаційних пошкоджень прес-форм, автори обрали та описали методи ремонту деталей, а також визначили переваги та недоліки цих технологічних процесів. Описано лазерну газопорошкову обробку поверхні та визначено її основні переваги над іншими методами ремонту. Основною перевагою є точність обробки, що значно зменшує витрати матеріалу під час ремонту деталей і, таким чином, зменшує обсяг робіт при подальшій механічній обробці. Оскільки джерело лазерного випромінювання локалізоване, можна зменшити зону термічного впливу оброблюваної деталі.

Розроблено технологічну схему лазерної газо-порошкової обробки поверхні. Спроектовано установку для обробки деталей та розраховано оптику випромінювальної системи.

Список використаних джерел:

- [1]. Изготовление пресс форм от чертежа до серийного производства. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://klona.ua/blog/liteynoe-proizvodstvo/izgotovlenie-press-form-ot-cherteja-do-seriynogo-proizvodstva>
- [2]. Ремонт прес-форм. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://obrobka.pp.ua/597-remont-pres-form.html>
- [3]. Лазерне наплавлення металів, ремонт прес-форм, твердіть до 60 HRC. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sumaris-ukr.com.ua/ua/p1149754124-lazernoe-naplavlenie-metallov.html>
- [4]. Імпульсне лазерне наплавлення. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.laser-bulat.ru/technology/welding/deposit-welding/>
- [5]. Dong-GyuAhn^a, Ho-JinLee^a, Jong-RaeCho^b, Dae-SeonGuk^a (2016) Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers] – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850616300130>
- [6]. G A Turichin, V V Somonov, K D Babkin, E V Zemlyakov and O G Klimova (2016) High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/125/1/012009/pdf>
- [7] Theory and Technology of Direct Laser Deposition - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/additive-manufacturing-of-high-performance-metals-and-alloys-modeling-and-optimization/theory-and-technology-of-direct-laser-deposition>
- [8] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang (2018) Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Progress in Materials Science vol. 92 pp. 112–224.

[9]. Основи проектування оптико-механічних вузлів: Методичні вказівки до практичних занять студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньо-професійної програми Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів/ Уклад. Дубнюк В. Л., -К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 83 стор.

[10]. Восстановление деталей сваркой и наплавкой - [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://extxe.com/1837/vosstanovlenie-detalej-svarkoj-i-naplavkoj/#2>

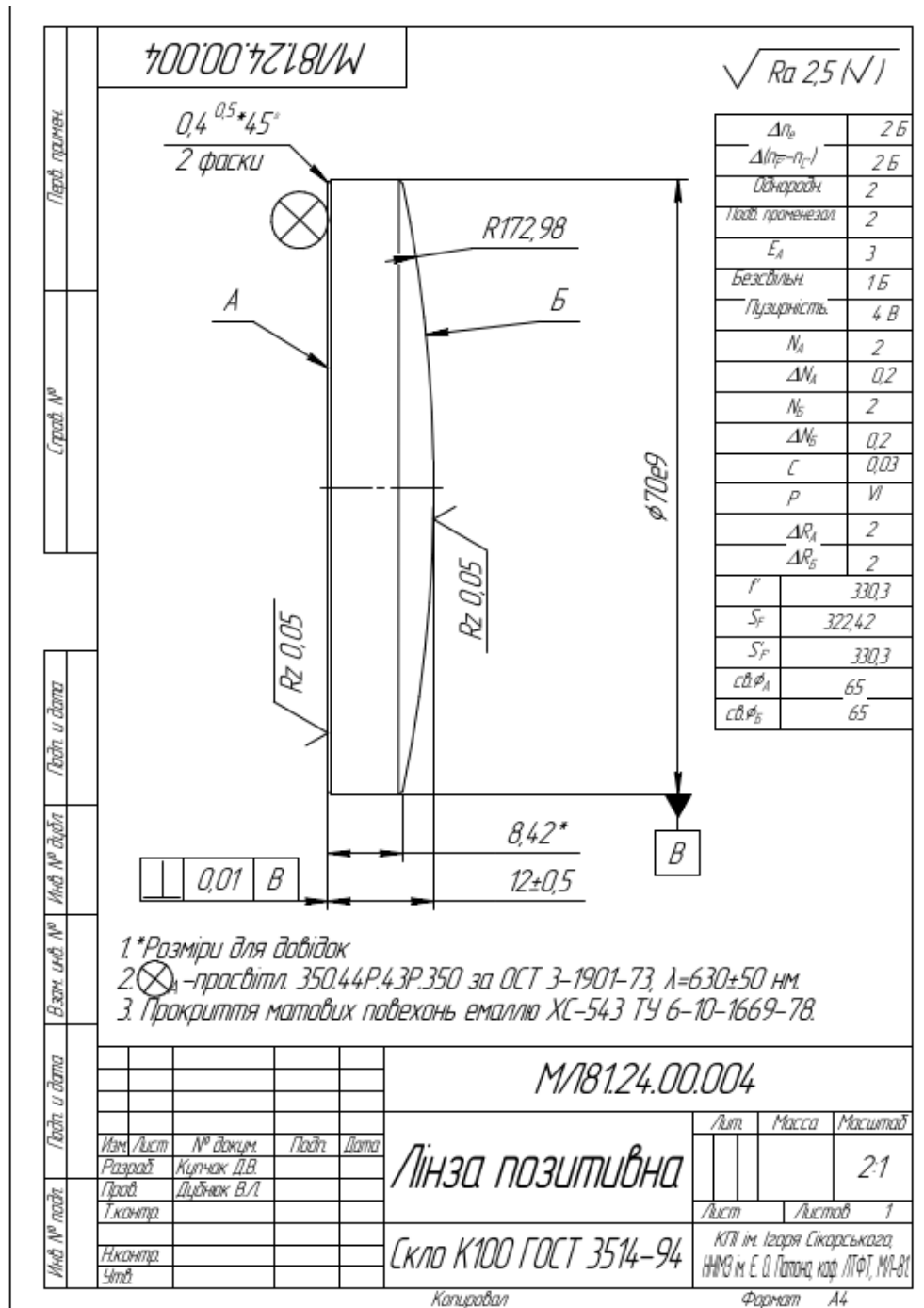
[11]. Відновлення та зміцнення поверхневих шарів прес-форм з використанням технологій лазерної наплавки-[Електронний ресурс]-

Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55312>

[12] Відновлення та зміцнення поверхневих шарів прес-форм з використанням технологій лазерної наплавки-[Електронний ресурс]- Режим доступу:

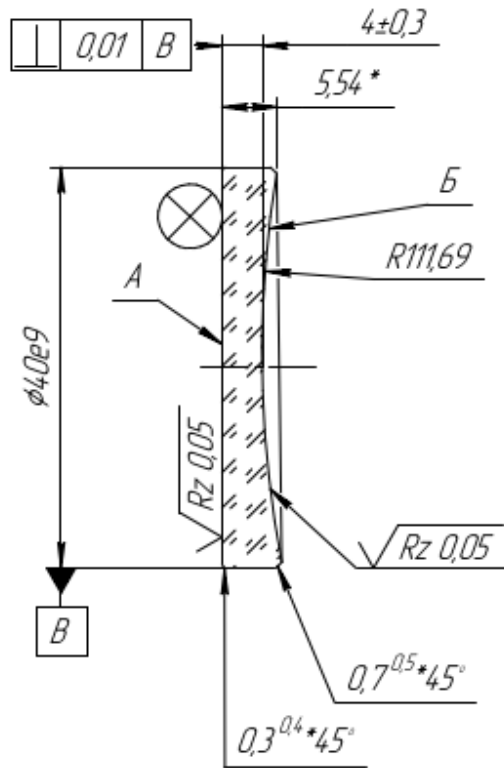
https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37053/simple-search?query=&sort_by=score&order=desc&rpp=10&etal=0&filtername=author&filterquery=%D0%9A%D1%83%D0%BF%D1%87%D0%B0%D0%BA%2C+%D0%94%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%81+%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87&filtertype>equals

Додатки



M/181.24.00.004

$\sqrt{Ra 2,5 \sqrt{V}}$



Δn_e	2 Б
$\Delta(n_e - n_o)$	2 Б
Діагностика	2
Клас. променезал.	2
ϵ_s	3
Беззвільн.	1 Б
Позивність	4 В
N_A	2
ΔN_A	0,2
N_B	2
ΔN_B	0,2
ϵ	0,03
ρ	VI
ΔN_B	2
ΔR_B	2
r'	174,89
S_F	172,46
S_F	174,89
св. ϕ_A	34,469
св. ϕ_B	34,469

- 1 * Розміри для довідок
- 2 \otimes_A - просвітл. 350.44P.43P.350 за ОСТ 3-1901-73, $\lambda = 630 \pm 50$ нм.
3. Прокриття матових поверхонь емаллю ХС-543 ТУ 6-10-1669-78.

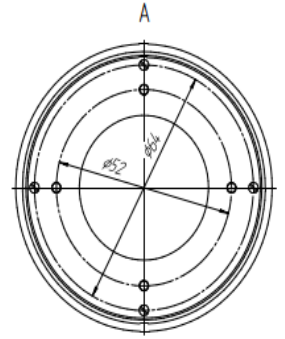
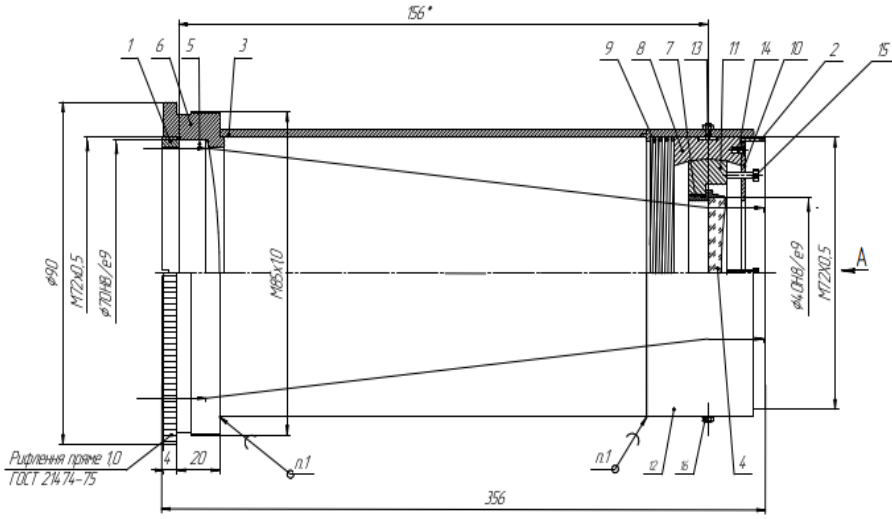
Лист. примеч.
Строби. №
Лист. и дата
Лист. № докум.
Взам. инв. №
Лист. и дата
Лист. и дата
Лист. № лист.

M/181.24.00.004

Изм.	Лист	№ докум.	Лист	Дата
Разработ		Кутмак Д.В.		
Проект		Дубняк В.Л.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Лінза негативна			Лист	Масса	Масштаб
					2:1
Скло БФ24 ГОСТ 3514-94			Лист	Листов 1	
			КТІ ім. Ігоря Сікарського ННМЗ ім. Е.О.Попова, каф. ЛТФ, МП-81		
Копировав			Формат А4		

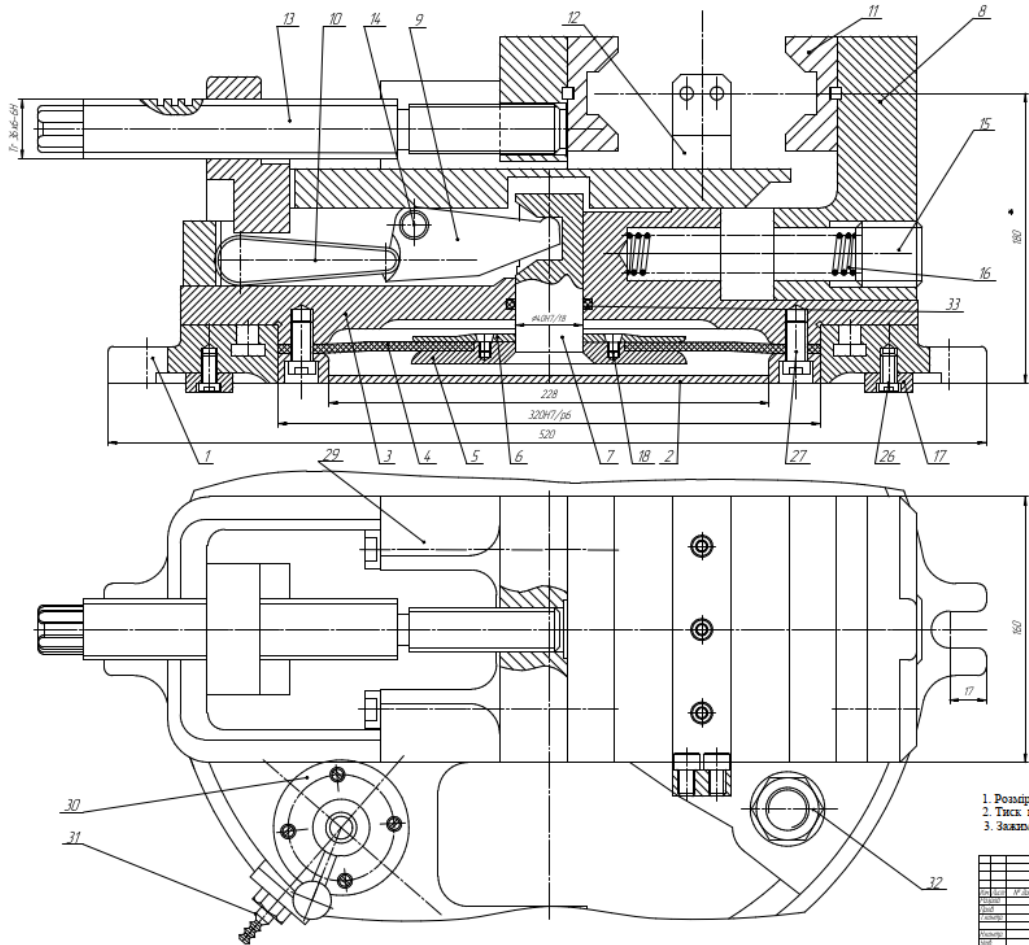
М/В124.00.0000.01



*Размеры для добавок
1. Полями приложен ГОСТ 18 ГОСТ 21931-76

Лист 1 из 1
Лист 2 из 1
Лист 3 из 1
Лист 4 из 1
Лист 5 из 1
Лист 6 из 1
Лист 7 из 1
Лист 8 из 1
Лист 9 из 1
Лист 10 из 1
Лист 11 из 1
Лист 12 из 1
Лист 13 из 1
Лист 14 из 1
Лист 15 из 1
Лист 16 из 1
Лист 17 из 1
Лист 18 из 1
Лист 19 из 1
Лист 20 из 1
Лист 21 из 1
Лист 22 из 1
Лист 23 из 1
Лист 24 из 1
Лист 25 из 1
Лист 26 из 1
Лист 27 из 1
Лист 28 из 1
Лист 29 из 1
Лист 30 из 1
Лист 31 из 1
Лист 32 из 1
Лист 33 из 1
Лист 34 из 1
Лист 35 из 1
Лист 36 из 1
Лист 37 из 1
Лист 38 из 1
Лист 39 из 1
Лист 40 из 1
Лист 41 из 1
Лист 42 из 1
Лист 43 из 1
Лист 44 из 1
Лист 45 из 1
Лист 46 из 1
Лист 47 из 1
Лист 48 из 1
Лист 49 из 1
Лист 50 из 1
Лист 51 из 1
Лист 52 из 1
Лист 53 из 1
Лист 54 из 1
Лист 55 из 1
Лист 56 из 1
Лист 57 из 1
Лист 58 из 1
Лист 59 из 1
Лист 60 из 1
Лист 61 из 1
Лист 62 из 1
Лист 63 из 1
Лист 64 из 1
Лист 65 из 1
Лист 66 из 1
Лист 67 из 1
Лист 68 из 1
Лист 69 из 1
Лист 70 из 1
Лист 71 из 1
Лист 72 из 1
Лист 73 из 1
Лист 74 из 1
Лист 75 из 1
Лист 76 из 1
Лист 77 из 1
Лист 78 из 1
Лист 79 из 1
Лист 80 из 1
Лист 81 из 1
Лист 82 из 1
Лист 83 из 1
Лист 84 из 1
Лист 85 из 1
Лист 86 из 1
Лист 87 из 1
Лист 88 из 1
Лист 89 из 1
Лист 90 из 1
Лист 91 из 1
Лист 92 из 1
Лист 93 из 1
Лист 94 из 1
Лист 95 из 1
Лист 96 из 1
Лист 97 из 1
Лист 98 из 1
Лист 99 из 1
Лист 100 из 1

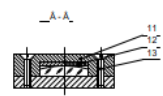
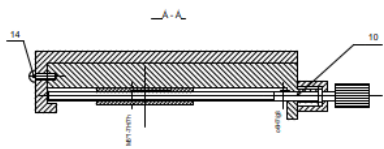
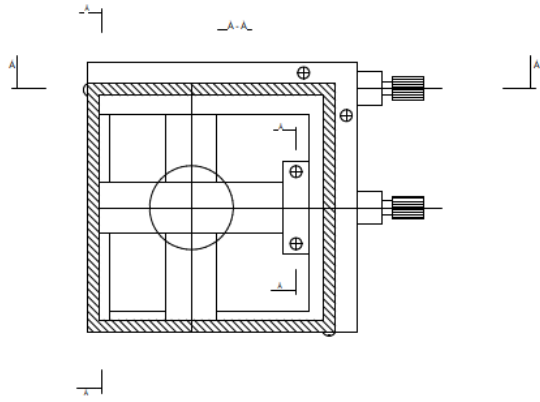
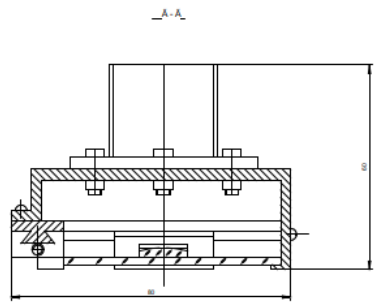
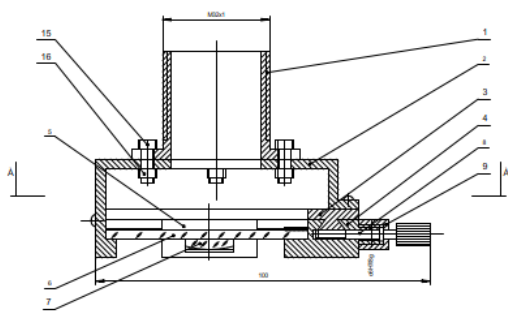
М/В124.00.0000.01		Лист 1 из 1	
Система оптическая		21	
Свертальная		Кодификатор ИФТРС	
		К/В (Кодификатор)	
		Кодификатор	
		Лист 1 из 1	



- 1. Розміри для стравок
- 2. Тиск в сеті у-0,5МПа
- 3. Зав'язаний від рукової губки 6 мм

№	Вид	Колір	Матеріал	К-сть	Місце	Примітка
1	Тиск					11
Тиски пневматические лабораторные						

9200 000 000 000 1-1-148 0200



		ІМЗ ФПТ - 21.1.000.002.003.0005	
		Сканер на шпіндрочних лізках	
		Р	0.5
		2:1	
		Складено в Україні	
		ІНТУ / 2017	
		ІМЗ ФПТ - 21.1.000.002.003.0005	