

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

Пояснювальна записка

ДО дипломної роботи
(тип кваліфікаційної роботи)
магістра
(освітній ступінь)

на тему «Дослідження технологічних параметрів лазерного
різання листових авіаційних матеріалів»

ХАІ.104.163н.24В.134.1801043ПЗ

Виконав: здобувач(ка) 2 курсу групи № 163н
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
(код та найменування)

Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-
космічна техніка»
(код та найменування)

Освітня програма «Технології виробництва та
ремонту літальних апаратів»
(найменування)

Бардусова В. В.
(прізвище та ініціали здобувача (ки))

Керівник: Юрій Д'ЯЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

Рецензент: Юрій ЧОРНИЙ
(ім'я та прізвище)

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет _____ літакобудування _____
Кафедра _____ технології виробництва літальних апаратів _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Галузь знань _____ 13 «Механічна інженерія» _____
(код та найменування)
Спеціальність _____ 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» _____
(код та найменування)
Освітня програма _____ «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів» _____
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



_____ Катерина МАЙОРОВА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« _____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бардусова Валерія Володимирівна
(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Дослідження технологічних параметрів лазерного різання листових авіаційних матеріалів

керівник кваліфікаційної роботи Д'яченко Юрій Веніамінович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету № 555-уч від « 22 » 04 2024 року.





2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 16.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики; літературний огляд та патентний пошук на тему кваліфікаційної роботи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати): аналіз технологічних особливостей лазерного різання листових металів; чисельне моделювання процесів лазерного різання листових металів; застосування методу рототабельного планування для мінімізації ширини та шерохватості лазерного різа листових авіаційних матеріалів.

5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал завданням не передбачено.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		
		завдання видав	завдання прийняв	
1	Д'яченко Ю. В., професор каф. 104	22.04.24		4.05.24
2		26.04.24		16.05.24
3		28.04.24		28.05.24
4		29.04.24		9.06.24

Нормоконтроль


 (підпис)
Юрій Д'ЯЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

« 14 » 06 2024 р.7. Дата видачі завдання « 22 » 04 2024 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз технологічних особливостей лазерного різання листових матеріалів	4.05.24	
2	Чисельне моделювання процесів лазерного різання листових авіаційних матеріалів	16.05.24	
3	Мінімізація ширини поверхні лазерного різання методом рототабельного планування	28.05.24	
4	Мінімізація шерохватості поверхні лазерного різання методом рототабельного планування	9.06.24	
5	ДОДАТОК А Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні	10.06.24	
6	ДОДАТОК Б Поширення температурного поля в залежності від швидкості лазерного різання	12.06.24	

Здобувач


 (підпис)
Бардусова В. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи


 (підпис)
Юрій Д'ЯЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ	8
1.1 Порівняльний аналіз сучасних методів розрізання листових металів	9
1.2 Принципові схеми технологічних лазерів.....	10
1.3 Газолазерне різання листових металів	12
1.4 Параметри та показники процесу газолазерного різання.....	15
1.5 Сучасні типи лазерного технологічного обладнання	18
1.6 Якісні параметри лазерного різання листових матеріалів.....	21
1.7 Оптимізація схеми розкладки деталей на листі.....	29
2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛИСТОВИХ АВІАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	30
2.1 Механізм лазерного різання	31
2.2 Теоретична модель процесу лазерного різання	31
2.3 Моделювання процесу лазерного різання в системі ANSYS.....	36
2.4 Аналіз результатів чисельного моделювання.....	37
3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОТОТАБЕЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ШИРИНИ ТА ШЕРОХОВАТОСТІ ЛАЗЕРНОГО РІЗА	44
3.1 Мінімізація ширини поверхні лазерного різку методом рототабельного планування.....	45
3.2 Мінімізація шерохватості поверхні лазерного різку методом ротатабельного планування	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	52
ДОДАТКИ.....	54
ДОДАТОК А Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні деяких листових металів.....	55
ДОДАТОК Б Поширення температурного поля в залежності від швидкості лазерного різання	59

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячено аналізу технологічних особливостей лазерного різання листових матеріалів, моделюванню процесів лазерного різання та застосуванню методу рототабельного планування для мінімізації ширини та шероховатості різу. У першому розділі розглянуто аналіз сучасних методів розрізання листових металів, принципові схеми технологічних лазерів, види лазерного різання, сучасні типи лазерного технологічного обладнання. Порівняльний аналіз різних методів розрізання дозволив виявити переваги та недоліки кожного з них, що стало основою для подальшого дослідження. Основну увагу приділено моделюванню процесів лазерного різання листових авіаційних матеріалів в системі ANSYS та здійснено аналіз отриманих результатів. Моделювання дозволило детально вивчити вплив різних параметрів на процес різання та покращити розуміння фізичних явищ, що відбуваються під час лазерного різання. У роботі також розглянуто підходи до мінімізації ширини поверхні різу та шероховатості поверхні різу за допомогою методу рототабельного планування, що дозволило досягти високої якості оброблених поверхонь. Додатки містять матеріали, які ілюструють динаміку поширення температурного поля при лазерному різанні та залежність температурного поля від швидкості різання.

INTRODUCTION

The qualification work is devoted to the analysis of technological features of laser cutting of sheet materials, modeling of laser cutting processes and application of the rotatable planning method to minimize the width and roughness of the cut.

The first chapter deals with the analysis of modern methods of cutting sheet metals, schematic diagrams of technological lasers, types of laser cutting, modern types of laser technological equipment. A comparative analysis of different cutting methods made it possible to identify the advantages and disadvantages of each of them, which became the basis for further research. The main attention was paid to the modeling of the processes of laser cutting of sheet aviation materials in the ANSYS system and the analysis of the obtained results was carried out. Modeling made it possible to study in detail the influence of various parameters on the cutting process and to improve the understanding of the physical phenomena occurring during laser cutting. The work also considers approaches to minimizing the width of the cut surface and the roughness of the cut surface using the method of rotatable planning, which made it possible to achieve high quality of the processed surfaces.

The appendices contain additional materials that illustrate the dynamics of the spread of the temperature field during laser cutting and the dependence of the temperature field on the cutting speed.

ВСТУП

Лазерна техніка переживає період інтенсивного розвитку. Широке застосування отримали лазери для обробки матеріалів, у тому числі заготовок виробів аерокосмічної техніки, що дозволило підвищити продуктивність праці в операціях обробки та контролю, покращити якість виготовлення, збільшити ресурс, забезпечити можливість повної автоматизації технологічних процесів.

Лазерне випромінювання має унікальні фізичні особливості, високим ступенем монохроматичності, когерентності, що дає можливість фокусувати промінь лазера в пляму діаметром у кілька довжин хвиль.

Застосування лазерної технології на виробництві дозволяє суттєво зменшити кількість технологічних етапів виготовлення виробу, зменшити відсоток браку, підняти продуктивність процесу.

Області використання лазерів у різних сферах людської діяльності щороку розширюються, швидко збільшується кількість розроблених і вироблених типів лазерів різного призначення з довжинами хвиль генерації від ультрафіолетового та рентген-діапазону (менше 300 нм) до інфрачервоного діапазону (10600 нм), з різним рівнем потужності та різним часовим режимом.

Сучасні методи математичного моделювання, зокрема прогресивний метод кінцевих елементів (МКЕ), дозволяють проводити аналіз процесів розмірної обробки матеріалів, отримувати результати, близькі до даних натурних експериментів, аналізувати розподіл теплових полів від точкових та розподілених джерел, визначати основні енергосилові параметри досліджуваних процесів і таким чином скоротити загальні фінансові видатки проведення досліджень.

Актуальність теми даного дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення технологічних процесів в авіаційній галузі для досягнення більш високих стандартів якості продукції, підвищення продуктивності та зниження виробничих витрат. Лазерне різання, як високотехнологічний метод обробки, дозволяє досягти цих цілей завдяки своїм численним перевагам перед традиційними методами різання. Лазерне різання металів стало надійною технологією промислового виробництва.

Метою дослідження в даній роботі є вдосконалення процесу лазерного різання листових матеріалів шляхом аналізу технологічних особливостей, чисельного моделювання процесів та оптимізації параметрів різання для досягнення високої якості оброблених поверхонь. Дослідження спрямоване на покращення розуміння механізмів лазерного різання та розробку рекомендацій для підвищення ефективності та якості обробки листових матеріалів.

Завдання дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставлених цілей:

1. Аналіз сучасних методів розрізання листових металів - порівняння різних технологій різання для виявлення їх переваг та недоліків.
2. Чисельне моделювання процесів лазерного різання листових авіаційних металів та аналіз результатів чисельного моделювання.
3. Оптимізація параметрів різання - застосування методу рототабельного планування для мінімізації ширини та шероховатості різі.

Предметом дослідження є процес лазерного різання листових матеріалів, включаючи технологічні особливості, чисельне моделювання процесів, а також оптимізацію параметрів різання для мінімізації ширини та шероховатості поверхні різі.

В якості інструментарію дослідження використано сучасні обчислювальні пакети на основі методу скінченних елементів та програми для розрахунків.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ

1.1 Порівняльний аналіз сучасних методів розрізання листових металів

Частка листових деталей у сучасному машинобудуванні становить близько 70% [1, 2]. Їх одержують із застосуванням розділових операцій. В умовах масового та серійного виробництва такі операції найбільш ефективно виконувати штампуванням. Однак поряд із широкими технологічними можливостями листове штампування має ряд недоліків (складність та висока вартість виготовлення, експлуатації та ремонту штампів; технологічні обмеження щодо складності оброблюваного контуру; залежність якості різку від товщини матеріалу, затуплення ріжучих кромek, порушення зазорів та ін.). У умовах одиничного виробництва для розділових операцій листового металу застосовують механічну обробку, але вона низькопродуктивна, інструмент має високу вартість, утруднена обробка матеріалу з підвищеними механічними властивостями [3].

В умовах сучасного виробництва все ширше застосування отримують процеси фізико-технічної обробки, насамперед методи плазмового, гідроабразивного та лазерного різання, які інтенсивно розвиваються та успішно конкурують зі штампуванням та обробкою різанням.

Лазерне різання ефективно при вирізанні складних контурів з тонколистового прокату (рисунок 1.1).

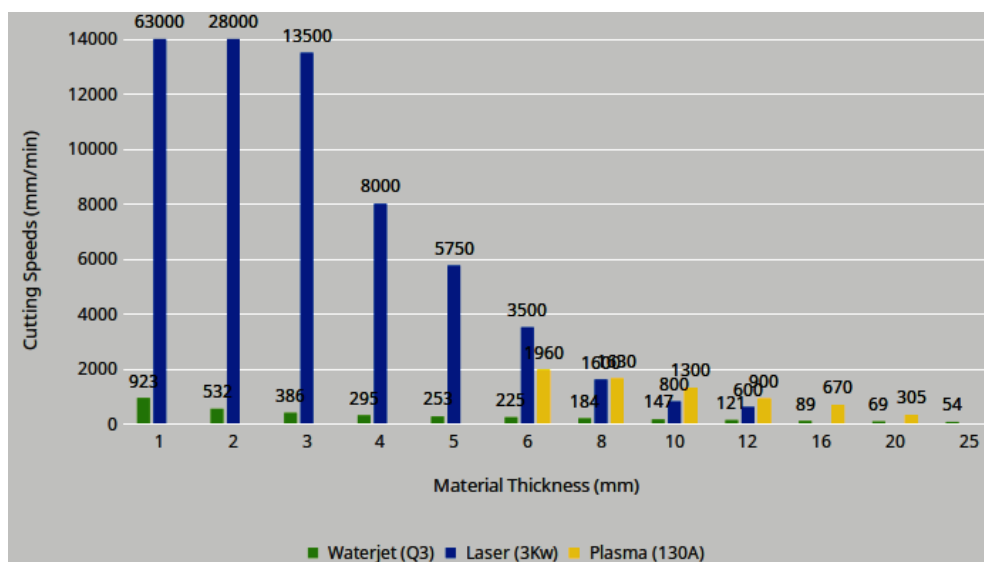


Рисунок 1.1 – Схема ефективного застосування плазмового, гідроабразивного та лазерного різання листових металів

Враховуючи високу вартість лазерного обладнання, його вигідно застосовувати у тих випадках, коли складно чи неможливо застосовувати звичайні розділові технології. Велика швидкість різання дає можливість значно підвищити продуктивність розкрійних операцій.

1.2 Принципові схеми технологічних лазерів

Технологічні лазери поділяють за типами передусім залежно від складу їхнього активного середовища.

Технологічні лазери класифікують за такими ознаками:

- агрегатний стан активного середовища (газові, твердотільні, рідинні, напівпровідникові);
- метод накачування (газорозрядні, газодинамічні);
- тимчасовий режим генерації (безперервні, імпульсні, імпульсно-періодичні);
- рівень вихідної потужності та експлуатаційним характеристикам.

Технологічний лазер, як правило, складається з трьох основних вузлів:

- джерела енергії (механізму або системи накачування);
- активного (робочого) тіла, що піддається накачуванню та призводить до його вимушеного випромінювання;
- оптичного резонатора (системи дзеркал), що забезпечує посилення вимушеного випромінювання активного тіла [4].

Для різання зазвичай застосовують такі типи технологічних лазерів: твердотільні (рисунок 1.2) і газові - з поздовжнім або поперечним прокачуванням газу, щілинні, а також газодинамічні.

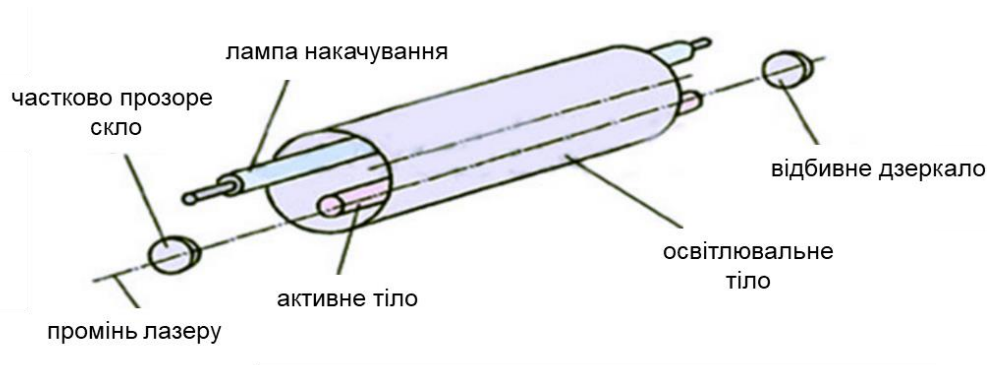


Рисунок 1.2 – Схема твердотільного технологічного лазера

У освітлювальній камері твердотільного лазера розміщуються лампа накачування і активне тіло, що є стрижнем з рубіну, неодимового скла (Nd-Glass), легованого ітербієм (Yb-YAG) або неодимом (Nd-YAG). Лампа накачування створює потужні світлові спалахи для збудження атомів активного тіла. По торцях стрижня розташовані дзеркала резонатора - частково прозоре і відбиває. Лазерний промінь посилюється в резонаторі за рахунок багаторазових відбитків усередині активного тіла та виходить через частково прозоре дзеркало [5].

Серійні твердотільні лазери мають порівняно невелику потужність, що зазвичай не перевищує 5 кВт. Довжина хвилі випромінювання – 1060 нм (рубінового лазера – 694 нм). Режим випромінювання може бути імпульсним або імпульсно-періодичним [2].

У газових технологічних лазерах як активне тіло застосовують суміш газів, зазвичай вуглекислого газу, азоту і гелію. У лазерах з поздовжнім прокачуванням газу суміш газів, що надходять з балонів, прокачується за допомогою насоса через газорозрядну трубку. Електричний розряд між електродами, що підключені до джерела живлення, використовується для енергетичного збудження газу. По торцях трубки розміщені дзеркало резонатора, що відображає і напівпрозоре.

Більш потужними є газові лазери з поперечним прокачуванням газу (рисунок 1.3). Їхня вихідна потужність може перевищувати 20 кВт.

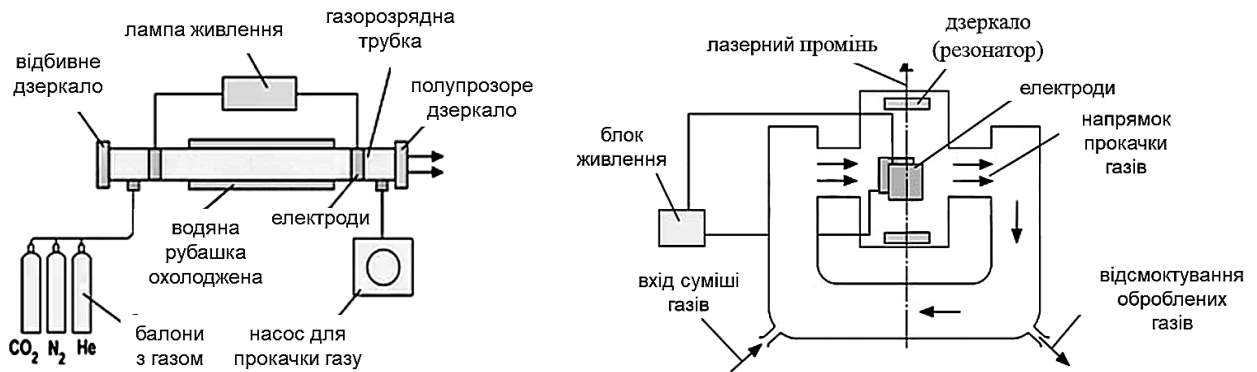


Рисунок 1.3 – Схеми лазерів з поздовжнім та поперечним прокачуванням газу

Дуже ефективні щільові технологічні лазери (рисунок 1.4). Вони мають ще менші габарити, а потужність їхнього випромінювання зазвичай становить 600 – 8000 Вт. Режим випромінювання – безперервний та частотно-імпульсний. Довжина хвилі випромінювання вуглекислотних лазерів становить 10600 нм.

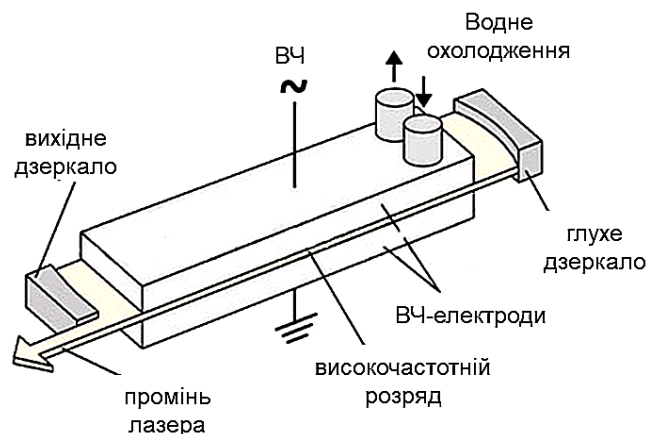


Рисунок 1.4 – Схема щільового лазера

У щільовому лазері застосовується поперекове високочастотне накачування активного середовища (з частотою від десятків МГц до кількох ГГц). Завдяки такому накачуванню збільшується стійкість і однорідність горіння розряду. Щілина між електродами становить від 1 до 5 мм, що сприяє ефективному відводу тепла від активного середовища [7].

Твердотілі лазери погано обробляють неметали, оскільки ряд таких матеріалів повністю або частково прозорий для випромінювання з довжиною хвилі 1060 нм, наприклад, оргскло. Лазерний промінь чутливіший до нерівної поверхні оброблюваного матеріалу. Однак при розкрої алюмінієвих сплавів, міді та латуні твердотільні лазери мають перевагу в порівнянні з вуглекислотними, оскільки поглинання випромінювання поверхнею цих металів значно вище на довжині хвилі твердотільного лазера.

Вуглекислотні лазери більш універсальні та застосовуються для обробки майже будь-яких металів та неметалів. Крім того, дуже низька розбіжність променя дозволяє розмістити джерело лазерного випромінювання поза зоною обробки без втрати якості променя. Залежно від конструктивних особливостей випромінювачів можлива реалізація безперервного або імпульсно-періодичного режиму лазерного різання. В даний час для розкрою листових матеріалів більше поширення отримало використання лазерів безперервної дії [8].

Збільшення швидкості лазерного розкрою призводить до поліпшення якості різання. Це пов'язано з тим, що при збільшенні швидкості розкрою метал перегрівається в меншому обсязі, що призводить до зменшення глибини зміненого шару і не дає збільшуватися грату на висоті різку.

Однак варіювання швидкістю обробки має обмеження. Нижня межа допустимої швидкості різання для вуглецевих сталей служить перехід процесу в режим автогенного різання, для нержавіючих сталей, титанових і алюмінієвих сплавів різке погіршення якості поверхні різку. В умовах різання металів лазером потужністю 1000 Вт такі явища особливо характерні при швидкостях обробки нижче 0,3 0,5 м / хв. Занадто високим швидкостям різання відповідає різке зниження товщини деталей, що розрізаються. Тому зазвичай швидкості лазерного різання не перевищують діапазон 6 8 м/хв.

1.3 Газолазерне різання листових металів

Принцип газолазерного різання листових матеріалів полягає в видуванні матеріалу в розплавленому стані за допомогою одночасного впливу лазерного променя та допоміжного газу, що знаходиться під тиском для створення прорізів у матеріалі (рисунок 1.5) Вплив лазерного променя доводить матеріал до температури плавлення та вище.

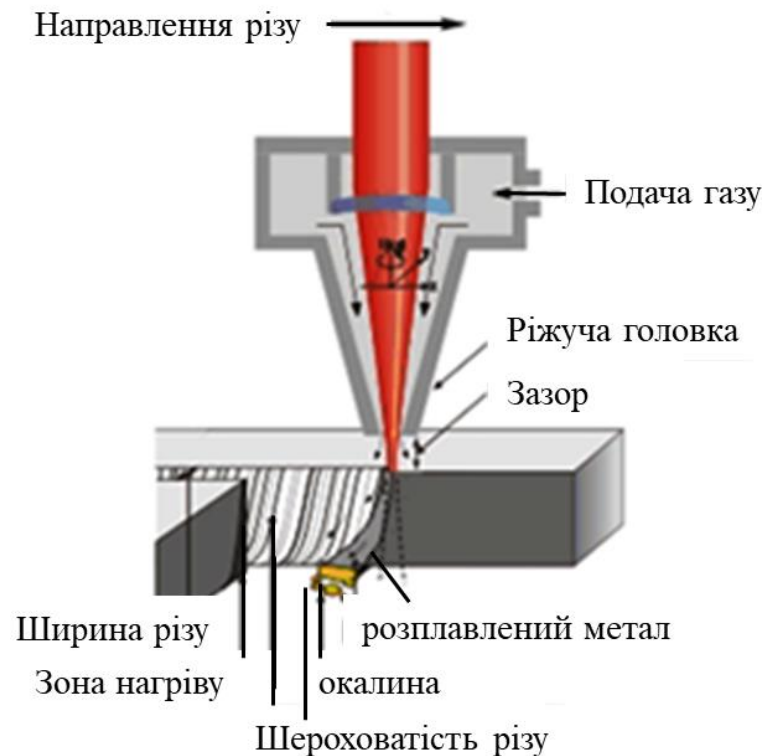


Рисунок 1.5 - Схема газолазерного різання листових матеріалів

Лазерне випромінювання нагріває, плавить та випаровує матеріал по лінії передбачуваного різання, а потік допоміжного газу видаляє продукти руйнування. При використанні кисню або повітря при різанні металів на поверхні руйнування утворюється оксидна плівка, що підвищує поглинальну здатність матеріалу, а в результаті екзотермічної реакції виділяється досить багато теплоти [4].

Вплив лазерного випромінювання на метал при розрізанні характеризується загальними положеннями, пов'язаними з поглинанням та відображенням випромінювання, поширенням поглиненої енергії за обсягом матеріалу за рахунок теплопровідності, а також низка специфічних особливостей.

В галузі впливу лазерного променя метал нагрівається до першої температури руйнування – плавлення. При подальшому поглинанні випромінювання відбувається розплавлення металу та фазова межа плавлення переміщується углиб матеріалу. Енергетична дія лазерного променя призводить до подальшого збільшення температури, що досягає другої температури руйнування – кипіння, коли він метал починає активно випаровуватися [2].

Таким чином, можливі два механізми лазерного різання – плавленням та випаровуванням. Однак останній механізм вимагає високих енергетичних витрат і здійснено лише для досить тонкого листового металу. Тому на практиці різання виконують плавленням. Метою суттєвого скорочення витрат енергії, підвищення товщини оброблюваного металу та швидкості розрізання застосо-

ується допоміжний газ, що вдувається в зону різку для видалення продуктів руйнування металу. Зазвичай як допоміжний газ використовується кисень, повітря, інертний газ чи азот.

Лазерне різання з нейтральним газом, зазвичай застосовується в тих випадках, коли небажано окислення кромки металу, наприклад, при різанні нержавіючої сталі, титану та ін. Ефективність різання в нейтральному газі нижче, ніж при лазерно-кисневому різанні, де присутні додаткові джерела нагрівання за рахунок хімічних реакцій окиснення.

Лазерне різання з киснем характеризується тим, що при взаємодії кисню з розігрітим металом відбувається екзотермічна реакція окиснення.

Кисень при газолазерному різанні виконує потрійну функцію: сприяє попереднього окислення металу та знижує його здатність відображати лазерне випромінювання; потім метал займається і горить у струмені кисню, результаті виділяється додаткова теплота, що підсилює дію лазерного випромінювання; кисневий струмінь здуває і забирає з області різання розплавлений метал та продукти його згоряння, забезпечуючи одночасний приплив газу безпосередньо до фронту реакції горіння [9,10].

Важливим фактором є відстань між соплом та оброблюваною деталлю (рисунк 1.6), від якого залежить отримання розрізів високої якості.

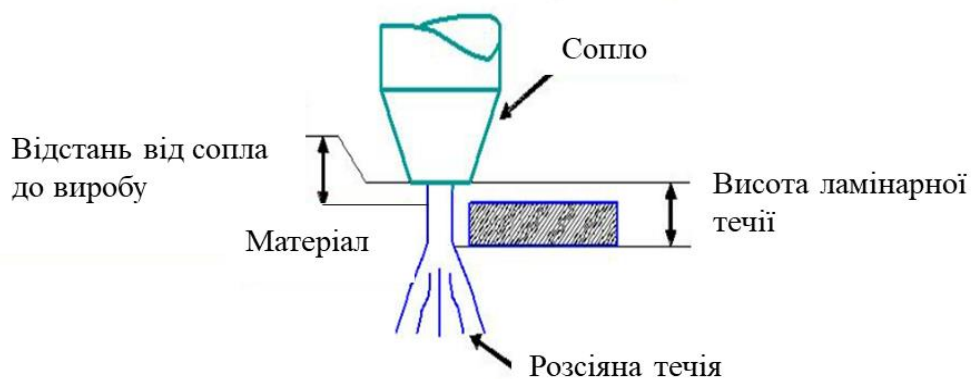


Рисунок 1.6 - Схема змещення сопла від поверхні листа, що розрізається

Ця відстань дозволяє газу, втягнутому в ламінарний потік, потрапляти безпосередньо у ванну розплавленого металу. Якщо ця відстань дуже велика, то газ тече по ванні в розсіяному стані, що може бути причиною появи задирок або бризок на верхній поверхні деталі (рисунк 1.7).

У процесі різання з'являється зона термічного впливу (ЗТВ) – смуга матеріалу, що примикає до зони розплавлення від кромки різку, де вплив Нагрівання в процесі різання призводить до зміни мікроструктури. ЗТВ характеризується своєю протяжністю та характерними особливостями мікроструктури.

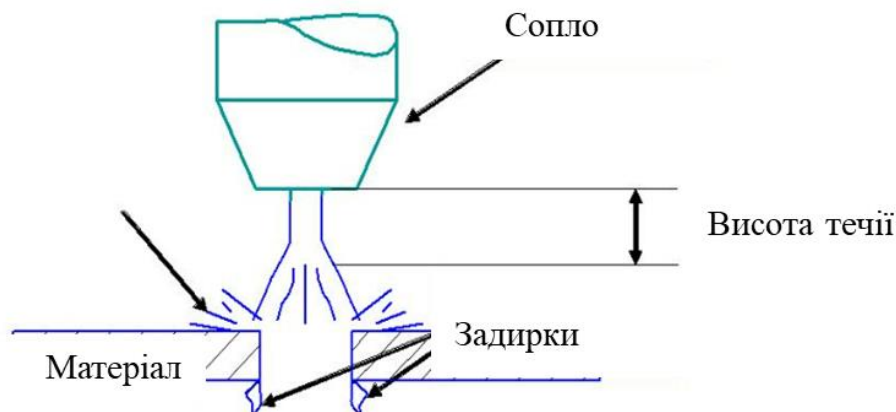


Рисунок 1.7 - Схема впливу зміщення сопла на якість лазерного різання

Для деталей, які мають переважно статичні навантаження, дозволяється застосування лазерного розкрою без видалення ЗТВ. після лазерного різання. Для деталей зі сталі необхідно видалення металу ЗТВ незалежно від характеру експлуатаційних навантажень.

1.4 Параметри та показники процесу газолазерного різання

З точки зору техніко-економічної ефективності використання газолазерного різання доцільно в тих випадках, коли потрібно отримати деталі з високим ступенем точності форми та розмірів.

У першу чергу розглядають шляхи досягнення високих якісних показників кромки різання. Поряд з цим виділяють і режими, що забезпечують високу енергетичну ефективність процесу для забезпечення максимальної глибини прорізання та швидкості різання.

При оцінці точності відтворення заданого контуру у вирізаній деталі розрізняють лінійну та розмірну точність. Лінійна точність (рисунок 1.8) характеризується сталістю макрогеометричного профілю поверхні різання по всій товщині і визначається переважно енергетичними і оптичними параметрами лазерного випромінювання, динамічними характеристиками спрямовується в зону струменя газу і швидкістю різання[11].

Розмірна точність різання (рисунок 1.9), тобто, збіг розмірів вирізаної деталі в площині із заданими розмірами, залежить як від конструкції, так і від якості виготовлення пристрою переміщення лазерного променя або деталі, типу мікропроцесора, що керує цим відносним переміщенням.

Поняття якості при газолазерному різанні металів досить багато загальних характеристик з іншими термічними способами різання.

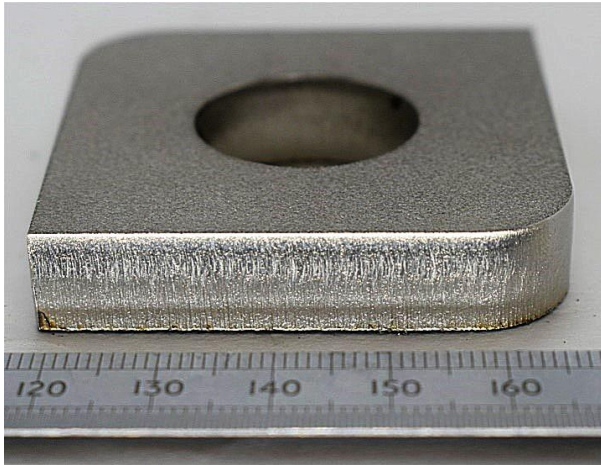


Рисунок 1.8 - Приклад реалізації лінійної точності лазерного різь



Рисунок 1.9 - Приклад реалізації розмірної точності лазерного різь

Якість визначають такі показники: точність, шорсткість Rz , неперпендикулярність (клиновидність), протяжність зони термічного впливу $b_{ЗТВ}$, ширина різь b , відставання лінії різь, кількість грата, а також радіусом оплавлення верхньої кромки $R_{кр}$ (рисунок 1.10).

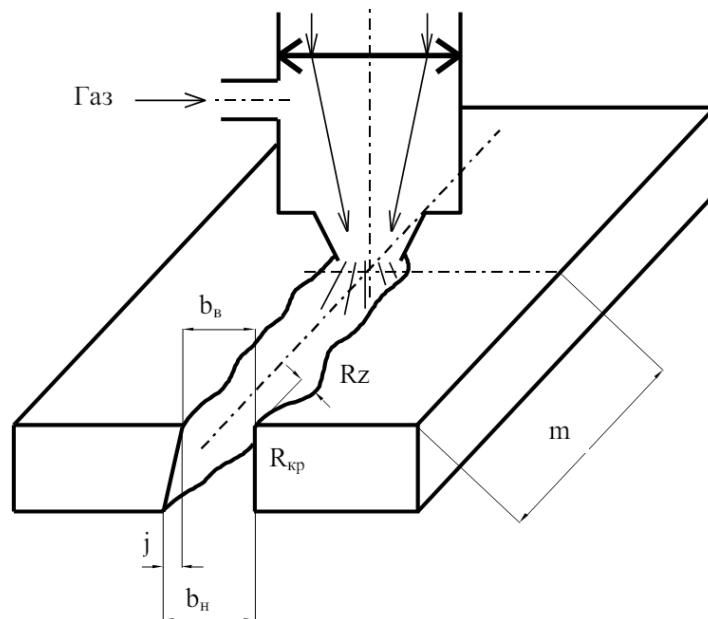


Рисунок 1.10 - Параметри якості лазерного різь: Rz – шорсткість; j – неперпендикулярність; b_B та b_H – відповідно ширина різь вверху та внизу; $R_{кр}$ – радіус оплавлення верхньої кромки; m – довжина різь

При ГЛР металів на поверхні різь утворюються поглиблення (борозни). Борозни, залишені лазерним різанням, можуть відрізнятися залежно від матеріалу та конкретних параметрів лазерного різання. Вони можуть виглядати як чисті, точні лінії або злегка шорсткі краї, залежно від характеристик матеріалу та

потужності лазера. Борозни характеризуються трьома показниками: глибиною, частотою та формою (викривленням або так званим відставанням лінії різну), які в своїй сукупності визначають мікрогеометрію (шорсткість) поверхні різну. Їх глибина та ширина залежить від потужності лазера, швидкості різання та матеріалу, що різеться. Машини для лазерного різання можна контролювати глибину та ширину борозен для досягнення бажаних результатів [12].

Ці борозни (рисунок 1.11) відіграють роль концентраторів напружень, що впливають на певні характеристики, а саме на втомну міцність металів. Для конкретного металу шорсткість залежить від теплових характеристик джерела теплоти, тобто лазерного випромінювання, параметрів струменя ріжучого газу та похибки координатного пристрою.

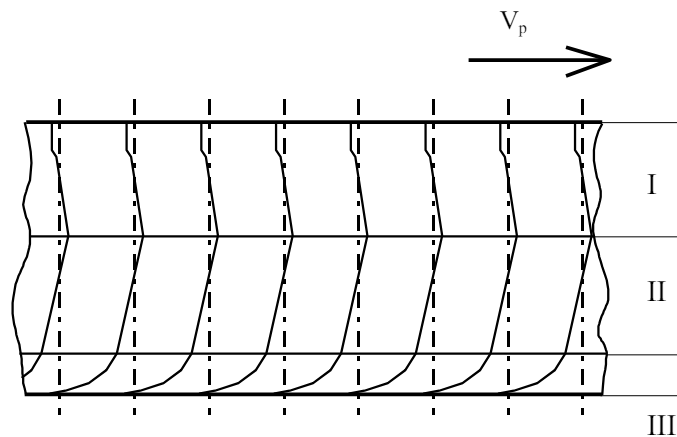


Рисунок 1.11 - Схема розташування борозен на поверхні різну вуглецевій сталі

На поверхні різну можна виділити три основні зони, що відрізняються одна від одної різним нахилом борозен та по відношенню до напрямку обробки та шорсткості [12].

Наявність зони **I** на поверхні різну характеризує руйнування, що періодично протікає від верхньої кромки всередину металу. Зона **II** формується безперервно та також має менш виражену борозневу структуру внаслідок періодичного видалення продуктів руйнування із зони **I**. Характер нахилу борозен у зоні **II** в протилежному напрямку різання задається нахилом руйнування поверхні.

При зниженні швидкості різання нахил борозен зменшується як для зони **I**, так і для зони **II**. Наявність зони **III** на поверхні різну вказує на продовження процесу різання, але без участі лазерної енергії, а тільки лише за рахунок струменя газу та видування з неї перегрітого розплавленого металу. При цьому швидкість прорізання металу різко знижується, про що свідчить значний нахил борозенок до краю металу і, відповідно, знижується якість кромки різну.

Основні закономірності лазерного різання якісно описуються теорією Свіфта-ХукаДжіка.

Так при високій ефективності лазерного різання, коли втрати на теплопровідність значно нижче витрат на нагрівання та плавлення, ця теорія дає просте співвідношення для балансу енергії:

$$hV_p b(c\rho T_{пл} + L_{пл}) = \eta P_{\Sigma} \dots \dots \dots (1.1)$$

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

1.5 Сучасні типи лазерного технологічного обладнання

За складом лазерне технологічне обладнання може бути технологічним лазером, лазерною технологічною установкою та лазерним технологічним комплексом.

Технологічний лазер (ТЛ) - джерело потужного теплового лазерного випромінювання, що відповідає заданим технічним вимогам з необхідним комплектом запасних частин. ТЛ є основним компонентом лазерного технологічного обладнання, хоча самостійно в промисловості не застосовується. Практично всі вітчизняні та зарубіжні фірми на продаж виставляють не ТЛ, а лазерні технологічні установки або лазерні технологічні комплекси.

Лазерна технологічна установка (ЛТУ) - це ТЛ із зовнішнім оптичним трактом, комплектом зовнішньої оптики і відповідним числом запасних частин. Найчастіше у ЛТУ є маніпулятор виробів, робота якого пов'язані з роботою ТЛ. ЛТУ призначені переважно виконання спеціалізованих технологічних операцій.

Лазерний технологічний комплекс (ЛТК) – це ЛТУ, з маніпулятором виробів або оптики, зовнішньою технологічною оснасткою та загальною системою управління для проведення технологічних операцій. Усі частини ЛТК функціонально пов'язані між собою для реалізації лазерного різання.

За призначенням і здатністю виконувати те чи інше число технологічних операцій всю гамму лазерного технологічного обладнання ділять на універсальні, спеціалізовані та спеціальні. Відповідно до цього воно використовується в дрібному, серійному та масовому виробництві. У загальному випадку комплекс для газолазерного різання (рисунок 1.12) складається з наступних частин: випромінювач **I**, координатний пристрій **II**, система формування та транспорту-

вання випромінювання і газу **III**, автоматизована система управління параметрами установки та технологічного процесу **IV**.

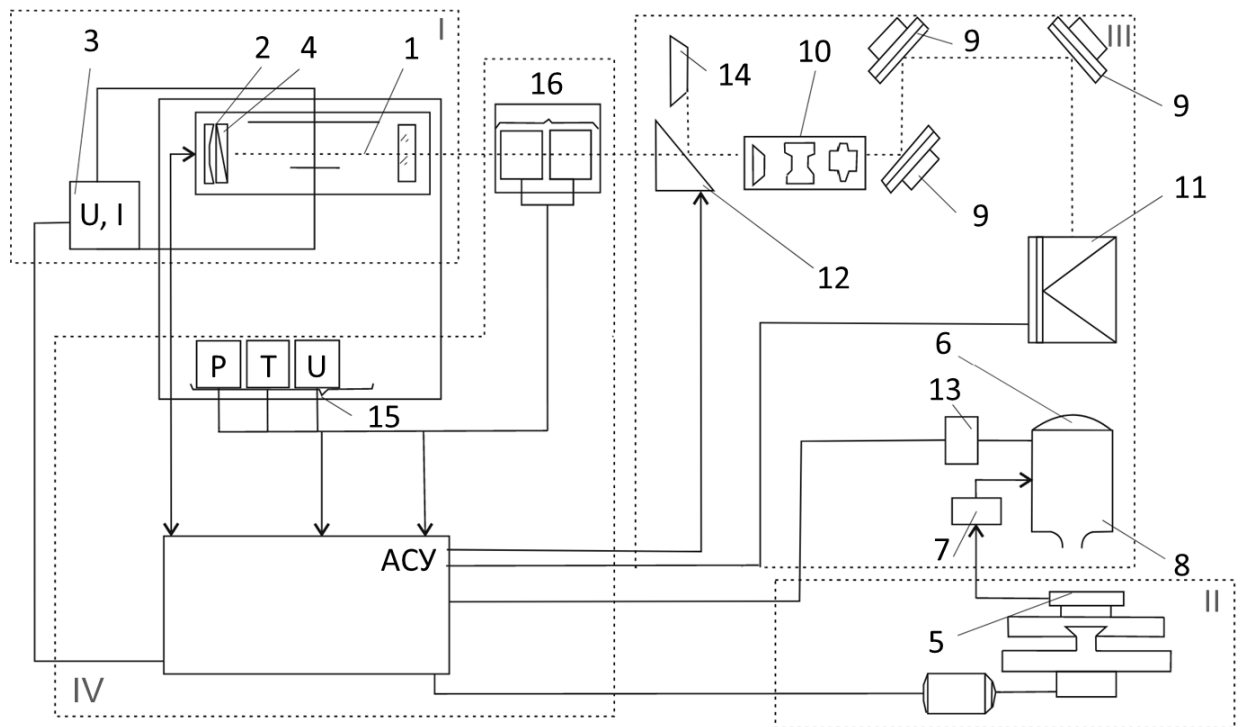


Рисунок 1.12 – Структура лазерного технологічного комплексу

Випромінювач призначений для генерації лазерного випромінювання з необхідними оптичними, енергетичними і просторово-тимчасовими параметрами, що забезпечують необхідні показники якості та продуктивності процесу різання.

У складі блоку випромінювача входять активне середовище 1, дзеркала резонатора 2 елементи системи накачування 3, а при необхідності - пристрій модуляції випромінювання 4.

Блок координатного пристрою служить для здійснення відносного переміщення променя і листової заготовки 5 в просторі. До складу координатного пристрою входять виконавчі механізми, двигуни, привід.

Блок системи формування та транспортування випромінювання і газу здійснює передачу пучка від випромінювача до оброблюваної заготовки 5, на поверхні якої система 6 фокусує лазерне випромінювання.

Блок системи стабілізації 7 осевого зміщення фокальної площини і відстані між вихідними отворами сопла і деталлю створює необхідну щільність потужності лазерного променя. Також ця система служить для формування необхідних параметрів газового потоку, спрямованого в зону обробки через сопло 8.

До складу блоку формування і транспортування випромінювання і газу входять: поворотні дзеркала 9, оптичні об'єктиви 10, пристрій обертання площини поляризації 11, оптичний затвор 12, система фокусування б, система подачі газу 13, юстирувальний лазер 14.

Автоматизована система управління служить для контролю та керування параметрами лазера, для передачі команд на виконавчі механізми системи формування та транспортування випромінювання та газу та координатного пристрою. До складу автоматизованої системи управління входять: підсистеми датчиків 15 внутрішніх параметрів лазера і датчиків 16 параметрів випромінювання, зазору; підсистема управління адаптивною оптикою, затвором, координатним пристроєм 4 [2, 9].

Комплект обладнання для газолазерного різання включає, крім технологічного лазера, ряд оптичних та електронних систем (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 Структура комплексу для газолазерного різання

Підсистема	Призначення
Випромінювач	Містить активний елемент та оптичний резонатор
Блок живлення лазера	Забезпечує електроживлення та керування лазером
Блок охолодження	Забезпечує знімання тепла від випромінювача
Контур охолодження	Другий зовнішній контур водяного охолодження
Оптичний колиматор	Зменшує розбіжність випромінювання та дозволяє його передавати на великі відстані до ріжучої голівки
Блоки кутового повороту випромінювання	Використовуються при побудові оптичної системи передачі випромінювання на портал до ріжучої голівки
Блок вимірювання	Контролює потужність лазерного випромінювання
Ріжуча голівка	Містить фокусуючу оптику та сопло для подачі в зону різання кисню або інертного газу під тиском. Розміщується на каретці вертикального переміщення для точного наведення на площину листа
Датчик положення	Використовується для точного вимірювання фокусної відстані від ріжучої голівки до площини листа

Важливим параметром є відстань між соплом та площиною листа, від якого залежить одержання розрізів високої якості.

Ця відстань дозволяє газу, втягнутому в ламінарний потік, потрапляти безпосередньо у ванну розплавленого металу. Якщо ця відстань дуже велика, то газ тече по ванні в розсіяному стані, що може бути причиною появи задирок або бризок на верхній поверхні деталі.

У процесі різання з'являється зона термічного впливу (ЗТВ) - смуга матеріалу, що примикає до зони розплавлення від кромки різку, де вплив нагріву в

процесі різання призводить до зміни мікроструктури. ЗТВ характеризується своєю протяжністю та характерними особливостями мікроструктури. Для деталей, які мають переважно статичні навантаження, дозволяється застосування лазерного розкрою без видалення ЗТВ. після лазерного різання. Для деталей зі сталі необхідно видалення металу ЗТВ незалежно від характеру експлуатаційних навантажень [8].

Система безконтактного автофокусування (рисунок 1.13) лазерного променя забезпечує автоматичну зміну розміру фокальної плями та положення сопла для безперервного різання різних матеріалів у широкому діапазоні товщин.

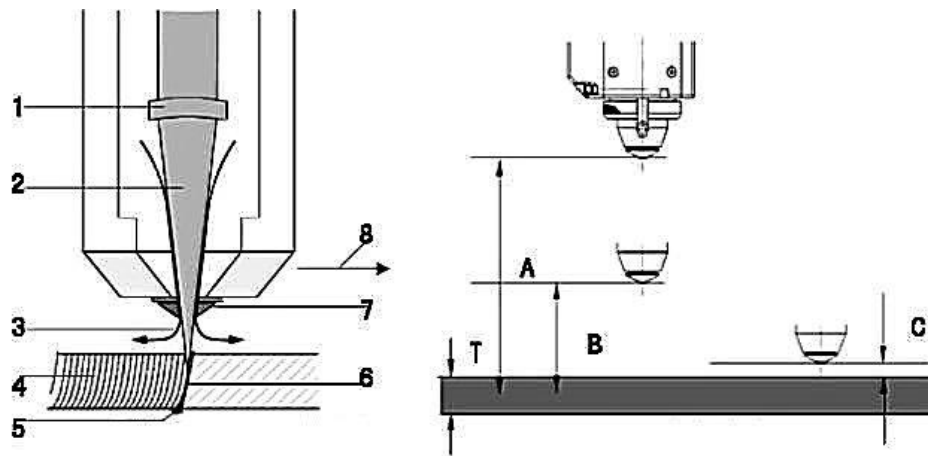


Рисунок 1.13 – Система безконтактної автофокусування:

- 1- лінза; 2 - лазерний промінь; 3 - потік повітря ;4 - лінія розрізу; 5 - розплавлений матеріал; 6 - січна площина;7 - мундштук; 8 - напрямок різання;
 А - порожня висота; В - висота проколу; С - висота зрізу; Т - товщина листа

У процесі різання через нерівності поверхні матеріалу змінюється фокусна відстань лазера, що впливає на якість різі. Щоб подолати це явище, на головці лазера розміщено ємнісний датчик. Він вимірює відстань між лазерною головкою та деталлю надзвичайно точно та в реальному часі. Ця інформація передається на лазерний контролер. Він використовується для регулювання висоти ріжучої головки в режимі реального часу за допомогою дуже точного приводу. Це створює замкнутий цикл керування, який безперервно та в режимі реального часу регулює висоту ріжучої головки відповідно до матеріалу, щоб вона завжди була ідеально встановлена на правильній висоті фокусування.

1.6 Якісні параметри лазерного різання листових матеріалів

З позицій техніко-економічної ефективності застосування газолазерного різання особливо доцільно в тих випадках, коли потрібно отримати деталі з високим ступенем точності розмірів і форми.

Якість газолазерного різку листових матеріалів оцінюють наступними показниками: ширина різку, шорсткість поверхні, наявність грата, неперпендикулярність кромки різку, ширина зони термічного впливу (ЗТВ).

Шорсткість поверхні. Для поверхні різку характерна наявність двох зон із різною шорсткістю. Перша зона розташована при вході в метал і має мінімальну шорсткість, друга зона розташована за нею і має велику шорсткість. Відмінність шорсткостей тим істотніша, чим більша товщина металу, що розрізається.

Поверхня характеризується як шорстка, якщо ці зміни значні, і гладка, якщо вони мінімальні. Таким чином, це показник якості поверхні, і він показує, чи потрібна поверхня додаткова обробка чи ні [13].

Вони виявили, що потужність лазерного променя та швидкість різання мають найбільший вплив на шорсткість поверхні різку, оскільки висока потужність на низькій швидкості призводить до більшого розплавлення матеріалу, що призводить до поганої обробки поверхні. Крім того, використання аргону як допоміжного газу допомагає отримати найкращу якість поверхні порівняно з іншими типами допоміжного газу.

На рисунку 1.14 показано гладку та шорстку поверхню за допомогою сканування методом SEM (Scanning Electron Microscope) [14].

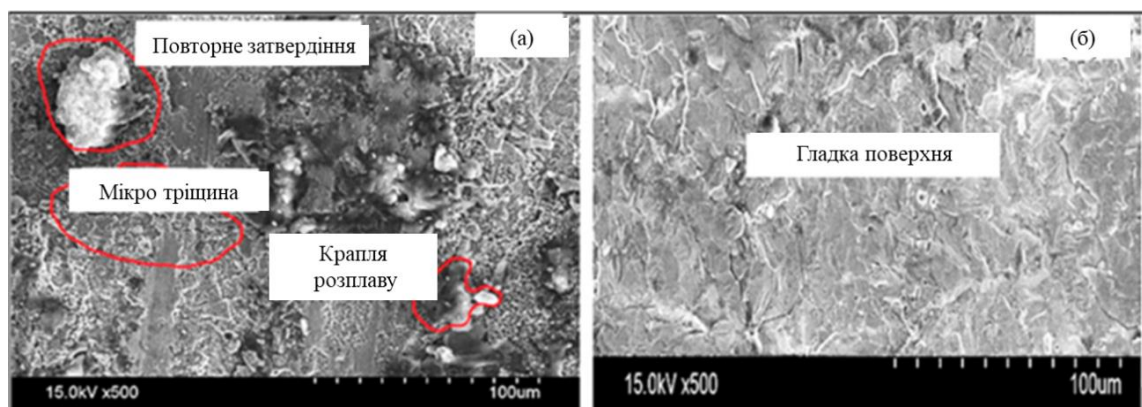


Рисунок 1.14 – Різниця між шорсткою та гладкою поверхнею титанового сплаву за допомогою SEM

Ширина пропилу. Ширина траєкторії після газолазерного різання називається шириною пропилу (рисунок 1.15, а). Ширина пропилу має два параметри, які є шириною верхнього та нижнього пропилу поперечного перерізу поверхні різку (рисунок 1.15, б, в). Товщина верхнього пропилу більша, ніж товщина нижнього пропилу, оскільки потужність на верхній поверхні більша, ніж на нижній. Показано, що товщина пропилу пропорційна потужності лазерного променя та обернено пропорційна швидкості різання [14].

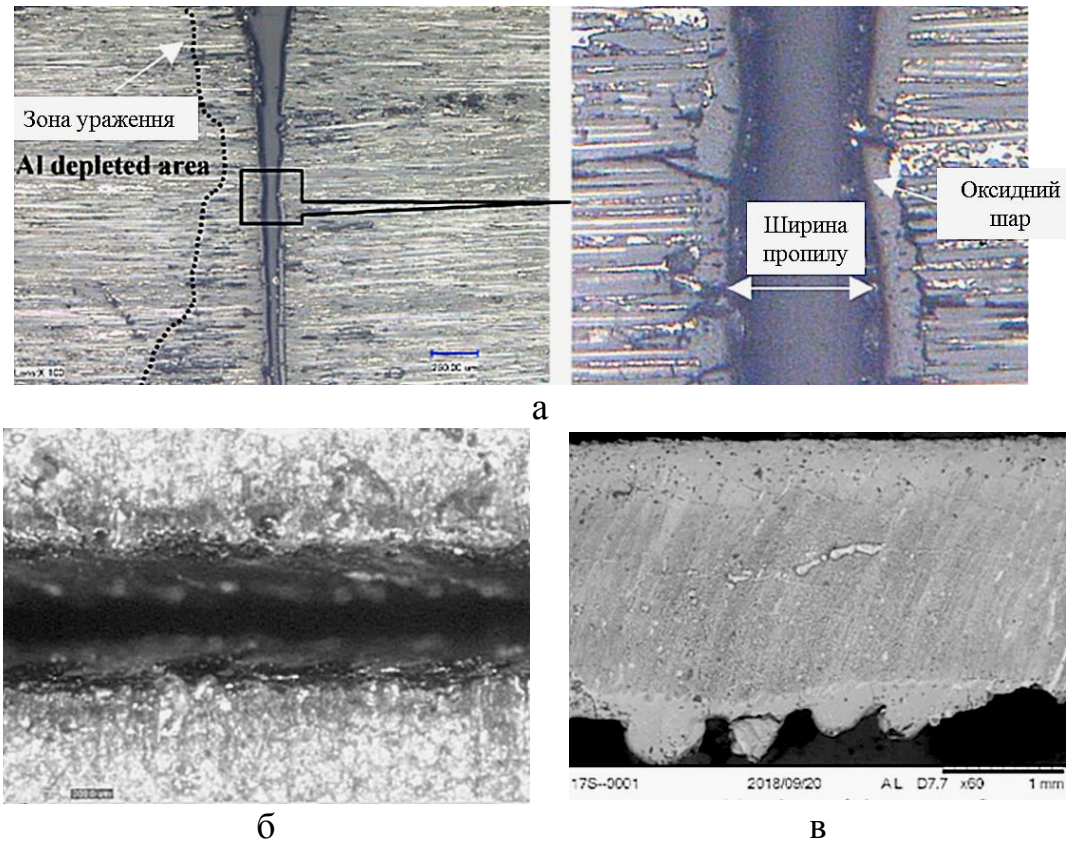


Рисунок 1.15 – Представлення ширини пропилу листового матеріала, розрізаного лазерним променем

Конусність пропилу. Конусність пропилу в радіанах – це ділення різниці між верхньою та нижньою ширинами пропилу на подвійну товщину, як показано на рисунку 1.16 [3].

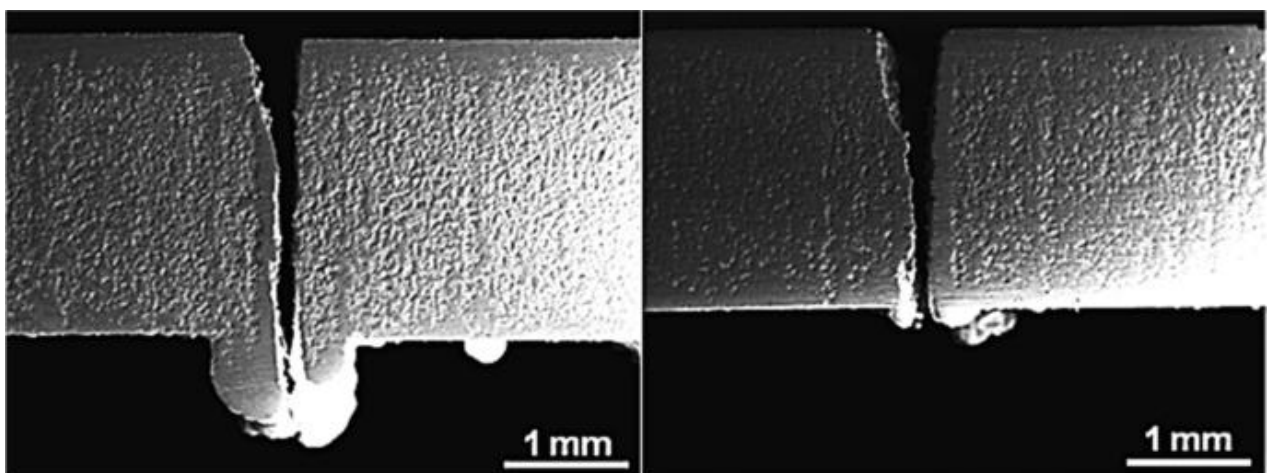


Рисунок 1.16 – SEM зображення для представлення конусності пропилу та шлаку під час лазерного різання

Результати показують, що конусність пропилу пропорційна потужності та обернено пропорційна швидкості різання:

$$KT = \frac{(UKW - LKW)180}{2\pi T} \dots\dots\dots (1.2)$$

де UKW - верхня ширина пропилу; LKW – нижня ширина пропилу;
 T – товщина.

На металографічних шліфах перевіряють кут різку, утворений перпендикуляром до листа і прямий, що проходить через дві точки по торцях різку. Максимально допустимий кут різку має бути не більше 7° .

На нижній кромці поверхні різку утворюється грат, який легко видаляється при оптимальних режимах газолазерного різання. При відхиленні від оптимальних режимів газолазерного різання потрібно механічне вплив видалення гра-та до фрезерування кромки. Розміри гра-та перевіряють на металографічних шліфах.

Зона теплового впливу. Це область, мікроструктура якої змінилася, але не розплавилася, а її товщина показує, наскільки змінилися властивості матеріалу під час процесу лазерного різання (рисунок 1.17).

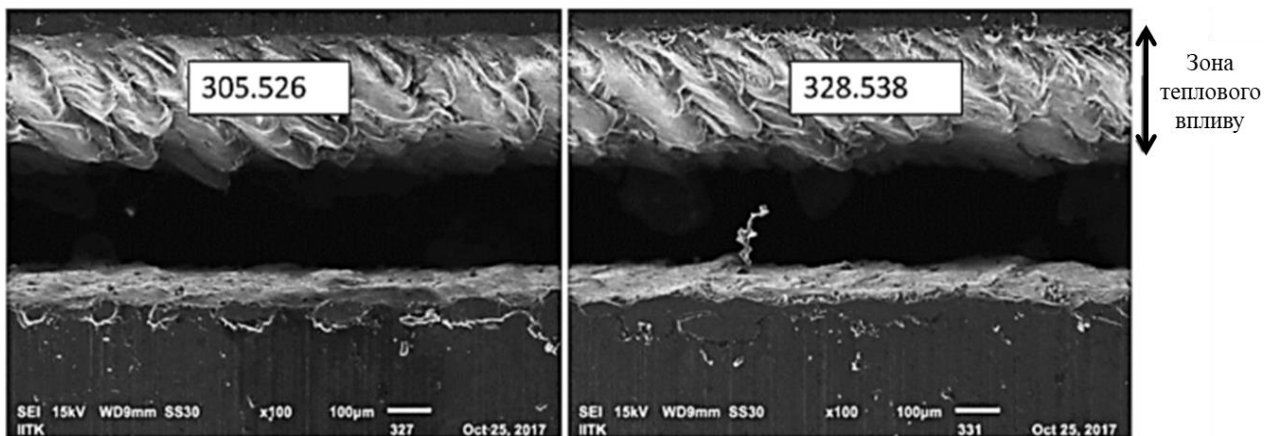


Рисунок 1.17 – Межа ЗТВ після розрізання зразка лазерним променем

Результати показують, що ширина зони теплового впливу (ЗТВ) пропорційна потужності лазера та обернено пропорційна швидкості різання.

Протяжність ЗТВ оцінюють металографічним контролем шліфу поперечного зразка після травлення. Враховується будь-яка видима різниця у розмірі зерна та типі структури [14].

До контрольованого розміру крім власне ЗТВ включають і ділянку з оплавленим металом. Береться найбільший розмір з урахуванням кута різку. Тріщини в оплавленому металі і ЗТВ не допускаються.

Відхилення ширини пропилу. Різниця між максимальною та мінімальною шириною пропилу на відстані різання є представленням відхилення ширини пропилу (рисунок 1.18).

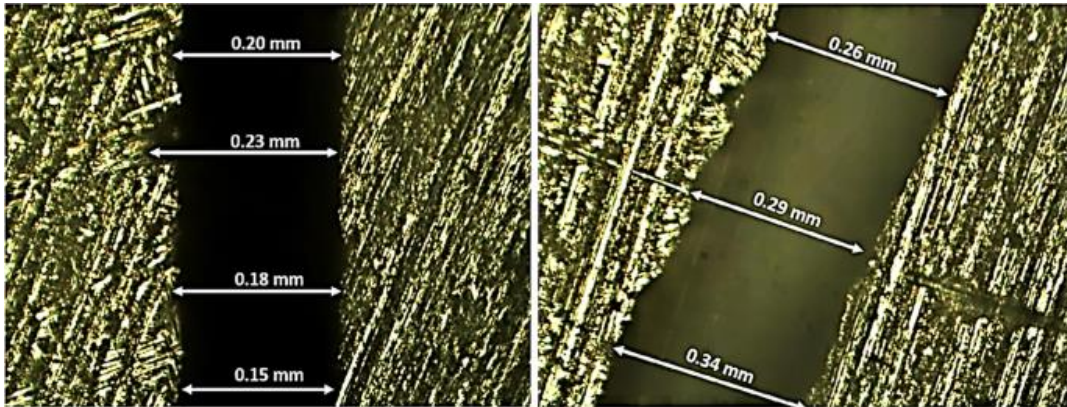


Рисунок 1.18 – Відхилення ширини пропилу вздовж траєкторії різку лазерним променем

Ширина верхнього пропилу більша, ніж ширина нижнього пропилу, оскільки він знаходиться близько до джерела тепла. Це також залежить від тиску допоміжного газу, як вивчено в статтях [6, 9].



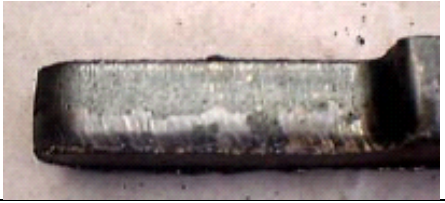


Оптимізація процесів газолазерного різання листових металевих матеріалів потребує усунення характерних дефектів різання.

У таблицях 1.2 і 1.3 представлені характерні технологічні дефекти газолазерного різання конструкційних і нержавіючих сталей, можливі причини появи та рекомендації щодо усунення даних дефектів.



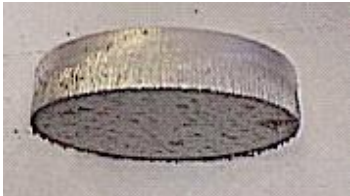
Таблиця 1.2 - Дефекти газолазерного різання конструкційних сталей

Технологічний дефект	Можливі причини	Рекомендації щодо усунення
<p>Погана якість різання на протилежних сторонах листа.</p> 	<p>Фокусуюча лінза не відцентрована. Отвір наконечника закритий або некруглий. Неточне вирівнювання поворотних дзеркал.</p>	<p>Перевірте центрування фокусуючої лінзи. Перевірте стан отвору наконечника. Перевірте траєкторію переміщення теплового променя юстировочним лазером.</p>
<p>Широкий різ на початку контуру, що вирізується.</p> 	<p>Занадто довгий тип врізання. Неправильний вибір типу лінії лазерного різання. Тривалий час технологічного проколювання.</p>	<p>Змініть тип та довжину лінії врізування. Перевірте тип лінії лазерного різку. Перевірте факт перевищення часу проколювання для заданого значення.</p>

Продовження таблиці 1.2

<p>Широкий різ по всьому контуру, що вирізується.</p> 	<p>Надто високий тиск кисню. Фокус розташований надто високо. Потужність випромінювання занадто велика.</p>	<p>Зменшуйте тиск кисню з кроком 0,1 МПа. Перевірте положення нульової точки фокусу. Зменшіть потужність випромінювання.</p>
<p>Матеріал, що видаляється, зварюється на нижній частині листа.</p> 	<p>Низька потужність лазерного випромінювання. Занадто висока швидкість різання. Надто низький тиск кисню</p>	<p>Збільшіть потужність лазерного випромінювання. Зменшіть швидкість різання. Збільште тиск кисню з кроком 0,1 бар.</p>
<p>Задирки з похилими штрихами на нижній частині листа.</p> 	<p>Занадто висока швидкість різання. Надто низька потужність випромінювання. Надто низький тиск кисню.</p>	<p>Зменшіть швидкість різання. Збільшуйте потужність випромінювання з кроком 100 Вт. Збільшуйте тиск кисню з кроком 0,1 МПа.</p>
<p>Глибокі штрихи на зовнішній стороні різання.</p> 	<p>Занадто велике нагрівання листа в локальній зоні.</p>	<p>Змініть фокусування лазерного променя і послідовність різання.</p>
<p>Ефект "горілого паперу" на нижній частині листа.</p> 	<p>Надто високий тиск кисню. Занадто висока швидкість різання.</p>	<p>Зменшуйте тиск кисню з кроком 0,1 МПа. Зменшіть швидкість різання.</p>

Таблиця 1.3 Дефекти газолазерного різання нержавіючих сталей

Технологічний дефект	Можливі причини	Рекомендації щодо усунення
Задирки на протилежних сторонах різу 	Фокусуюча лінза не відцентрована. Неточне вирівнювання оптичного ланцюга лазерного випромінювання.	Перевірте центрування лінзи. Перевірте вирівнювання оптичного ланцюга лазерного випромінювання.
Довгий білий задирок 	Надто низький тиск азоту.	Збільшуйте тиск азоту з кроком 1 МПа.
Чорний задир на зовнішній та внутрішній сторонах листа 	Фокус розташований надто високо.	Переміщуйте фокус вниз з кроком 0,1 мм.
Нерівномірний різ 	Швидкість різання занадто висока.	Зменшуйте швидкість різання з кроком 150 мм/хв.
Торцева сторона розрізу має забарвлення жовтого кольору 	Азот не очищений. Наявність кисню або повітря у газопроводі.	Перевірте чистоту азоту. Перевірте стан газового тракту.

На нижній кромці поверхні різу утворюється грат, який легко видаляється при оптимальних режимах газолазерного різання. При відхиленні від оптимальних режимів газолазерного різання потрібно механічне вплив видалення

грата до фрезерування кромки. Розміри грата перевіряють на металографічних шліфах.

Для поверхні різку характерна наявність двох зон з різною шорсткістю. Перша зона розташована при вході в метал і має мінімальну шорсткість, друга зона розташована за нею і має велику шорсткість. Відмінність шорсткостей тим істотніша, чим більша товщина металу, що розрізається. Макрорельєф поверхні різку характеризується висотою виступів та кроків між ними.

На металографічних шліфах перевіряють кут різку, утворений перпендикуляром до листа і прямий, що проходить через дві точки по торцях різку. Максимально допустимий кут різку має бути не більше 7° .

Протяжність ЗТВ оцінюють металографічним контролем шліфу поперечного зразка після травлення. Враховується будь-яка видима різниця у розмірі зерна та типі структури. До контрольованого розміру крім власне ЗТВ включають і ділянку з оплавленим металом. Береться найбільший розмір з урахуванням кута різку. Тріщини в оплавленому металі і ЗТВ не допускаються.

При газолазерному різанні металів на торцевій поверхні різку утворюються рівномірно розташовані борозенки. Борозни характеризуються трьома показниками: глибиною, частотою і формою відставанням лінії різку, які у своїй сукупності визначають мікрогеометрію поверхні різку.

На вході лазерного променя ширина окисленого шару мінімальна і практично мало залежить від зміни швидкості різку. Істотна зміна якості різку спостерігається у разі, коли не відбувається прорізання листа та розплавлений метал виплескується назовні.

Зі збільшенням швидкості різку зменшується ширина окисленого шару, чим більше товщина листа металу, що розкраюється, тим менше інтервал оптимальних швидкостей різку. Крім того, відмінність в ширині окисленого шару спостерігається в кінцевій точці закінчення різку, воно значно більше, ніж на початку різку[7].

Найбільший вплив на шорсткість поверхні різку надає швидкість різання, потім діаметр фокусування променя і, нарешті, потужність лазерного випромінювання.

Найбільший вплив на ширину різку має діаметр фокусування променя, потім швидкість різання і, нарешті, потужність лазерного випромінювання.

При швидкості газолазерного різання менше, ніж $0,5$ м/хв, якість різання значно падає. На поверхні різку з'являються вибоїни, безформні нарости, процес перетворюється на так званий автогенний режим.

1.7 Оптимізація схеми розкладки деталей на листі

При газолазерному різанні листових деталей, що містять внутрішні замкнуті контури отворів, досить складно задавати послідовність обходу контурів, розташування траєкторії щодо вихідного контуру. Важливим етапом процесу газолазерного різання листових деталей є формування траєкторії підходу і відходів до контуру, що вирізається. Сучасні комп'ютерні інтегровані системи CAD/CAM забезпечують різні варіанти підходу і відходу на всіх ділянках, де відбувається включення або вимикання лазера.

При формуванні ділянки підходу або відходу виконується автоматичний контроль, що виключає пошкодження оброблюваного об'єкта (рисунок 1.19, а).

При газолазерному різанні листових деталей необхідні технологічні рішення, що запобігають випаданню деталей з листа після завершення різання. Для вирішення цієї технологічної проблеми сучасні комп'ютерні інтегровані системи CAD/CAM містять блок призначення точок переривання, в яких відбувається перекриття лазерного променя, створюючи тим самим ділянки розриву траєкторії (рисунок 1.19, б) [10].

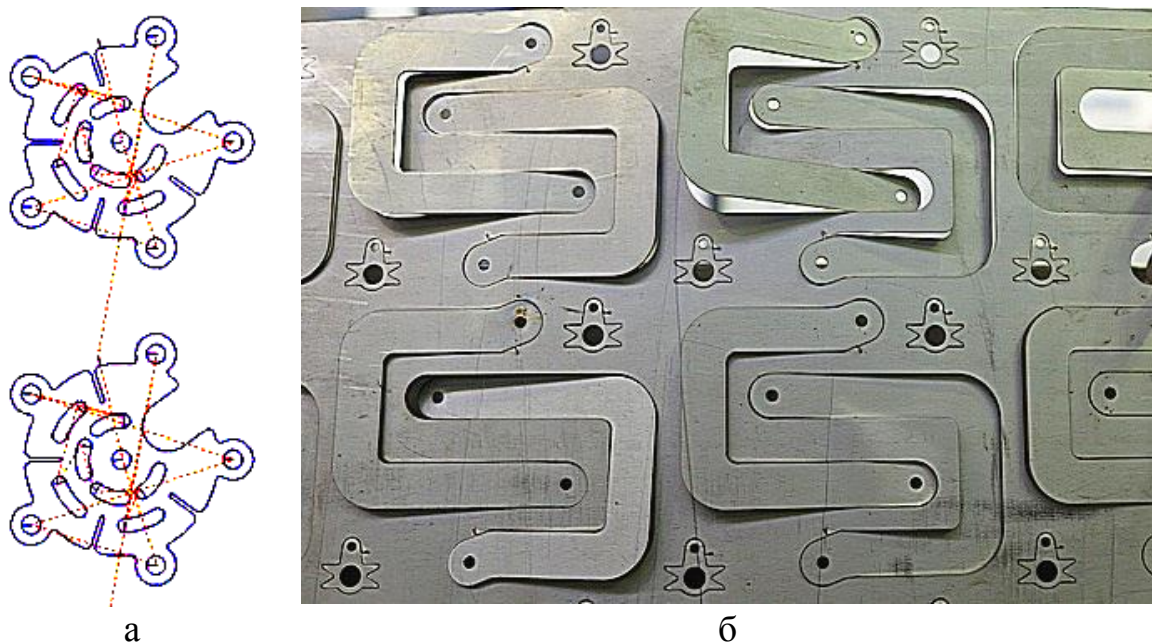


Рисунок 1.19 – Приклади формування ділянок підходу, відходу та перекриття лазерного променя

Сучасні комп'ютерні інтегровані системи CAD/CAM забезпечують автоматичне розпізнавання зовнішніх і внутрішніх контурів листових деталей. Програмне забезпечення лазерних технологічних комплексів з ЧПК забезпечує високоточне газолазерне різання з потрібної сторони: обхід зовнішніх контурів виконується зовні, а внутрішніх - з середини.

Висновки до розділу 1

Вивчення технологічного обладнання для лазерного різання авіаційних листових металів дозволило глибше зрозуміти сучасні підходи та методи, які використовуються для обробки високоякісних авіаційних матеріалів. Лазерне різання має значні переваги перед традиційними методами завдяки своїй високій точності, швидкості, мінімальному тепловому впливу та можливості обробки складних контурів.

Проаналізувавши основні типи лазерів, які використовуються в авіаційній промисловості, можна зробити висновок, що волоконні та CO₂ лазери є найбільш поширеними завдяки їх здатності ефективно різати різні типи авіаційних металів, включаючи алюмінієві сплави, титан та нержавіючу сталь. Ці лазери забезпечують високу якість різку, що є критично важливим для авіаційної промисловості, де кожна деталь повинна відповідати високим стандартам безпеки та надійності.

Значну увагу приділено також вибору допоміжного обладнання та систем управління, яке дозволяє автоматизувати процеси різання, підвищуючи їх ефективність та точність. Сучасні системи ЧПК дозволяють інтегрувати лазерні установки в автоматизовані виробничі лінії, що забезпечує високу продуктивність і повторюваність процесів.

Важливим аспектом є також врахування параметрів лазерного випромінювання та умов обробки, таких як потужність лазера, швидкість різання, тип і тиск допоміжного газу. Правильне налаштування цих параметрів дозволяє досягти оптимальних результатів різання для конкретних матеріалів і товщин.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що технологічне обладнання для лазерного різання авіаційних листових металів є складною і високотехнологічною системою, яка вимагає глибокого розуміння фізичних процесів, технічних характеристик обладнання та специфіки оброблюваних матеріалів.

Ефективне використання таких систем дозволяє забезпечити високу якість і точність виготовлення авіаційних компонентів, що сприяє підвищенню безпеки та надійності авіаційної техніки.

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ЛИСТОВИХ АВІАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Механізм лазерного різання

Основні кількісні співвідношення для лазерного різання можна отримати із аналізу наступної теплової моделі процесу. Теплове джерело потужністю q , що дорівнює поглиненій матеріалом частці лазерного випромінювання P , рухається прямолінійно по поверхні нескінченної пластини завтовшки S зі швидкістю лазерного різання V [15].

Стаціонарне теплове поле в рухомій системі координат може бути представлено сімейством ізотерм, згущених попереду та розріджених позаду джерела, що рухається. Розрахункові ізотерми для теплового джерела (рисунок 2.1) потужністю 500 Вт, що рухається зі швидкістю 20 мм/с по пластині з сталі 3 товщиною 1 мм [13].

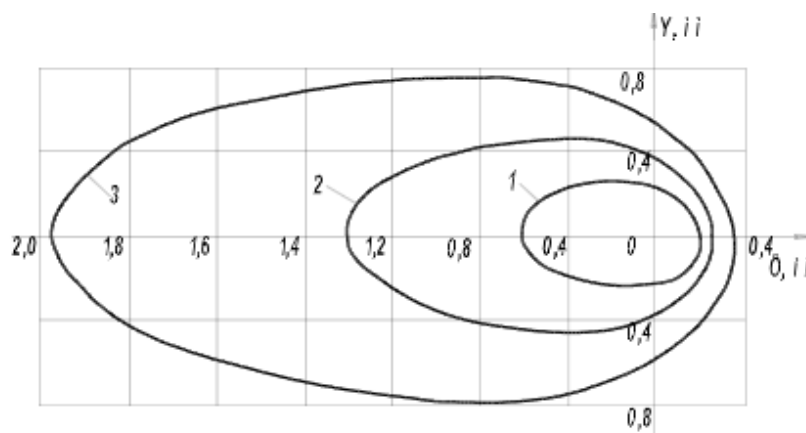


Рисунок 2.1 - Температурне поле точкового теплового джерела, що рухається: 1 - $T = 1300$ °C; 2 - $T = 900$ °C; 3 - $T = 700$ °C

Основні закономірності процесу можуть бути отримані при використанні моделі зосередженого теплового джерела. При цьому передбачається, що вся енергія джерела зосереджена в точці на поверхні матеріалу, але температура відповідних точок обох поверхонь зразка однакова (розглядається двовимірне завдання теплопровідності). Механізм лазерного різання матеріалів досить складний. Відповідно до існуючої теорії [10] після займання металу через деякий проміжок часу встановлюється квазістаціонарний режим руйнування, при якому його швидкість V_p визначається лише температурою межі руйнування T_p у зоні обробки.

2.2 Теоретична модель процесу лазерного різання

На механізм формування різку суттєво впливають явища, котрі відбуваються на верхній кромці металу до моменту встановлення квазістаціонарного руйнування. У цей перехідний період відбувається нагрівання верхньої кромки

метал від вихідної температури до T_p та прискорення межі руйнування до швидкості V_p . При цьому перехідний процес супроводжується перерозподілом поглиненої енергії, що перейшла в тепло енергії лазерного випромінювання.

У початковий момент кордон руйнування нерухомий, все тепло відводиться всередину металу механізмом теплопровідності, а також витрачається (при досягненні на верхній кромці деталі температури плавлення металу $T_{пл}$) на утворення прошарку рідкого металу, його оксидів та нагрівання цього прошарку до температури T_p . Товщина нагрітого шару поблизу нерухомого фронту руйнування збільшується з часом t пропорційно \sqrt{t} [16]. При досягненні температури T_p швидкість межі руйнування різко зростає до значення V_p [8]. Отже, вважатимемо, що зміна швидкості межі руйнування носить ступінчастий характер: після деякого запізнення вона досягає стаціонарної швидкості руху V_p , що визначається тільки температурою поверхні металу T_p .

Час t_0 встановлення квазістаціонарного руйнування для малих швидкостей обробки можна визначити, враховуючи, що нагрівання металу відбувається рухомим з постійною швидкістю v лазерним променем, сфокусованим у кругову пляму радіуса r_d :

$$t_0 = \frac{2a}{v^2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кип} - T_H)}{W_p a}} \right] \quad (2.1)$$

де T_H – початкова температура металу, $T_{кип}$ – температура кипіння металу; W_p – щільність лазерної потужності; P – потужність лазерного випромінювання.

Протягом часу t_0 лазерне джерело переміститься по верхній кромці металу на відстань:

$$x_0 = \frac{2a}{v} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{кип} - T_H)}{W_p a}} \right]. \quad (2.2)$$

Крім того, за цей же час t_0 на верхній кромці внаслідок механізму теплопровідності утворюється зона рідкого металу та його оксидів завширшки (рисунк 2.2, а)

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_{пл})}, \quad (2.3)$$

де $t_{пл}$ – час, необхідний для досягнення температури плавлення металу $T_{пл}$.

При цьому:

$$t_{пл} = \frac{2a}{v^2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{kv(T_{пл} - T_H)}{W_p a}} \right]. \quad (2.4)$$

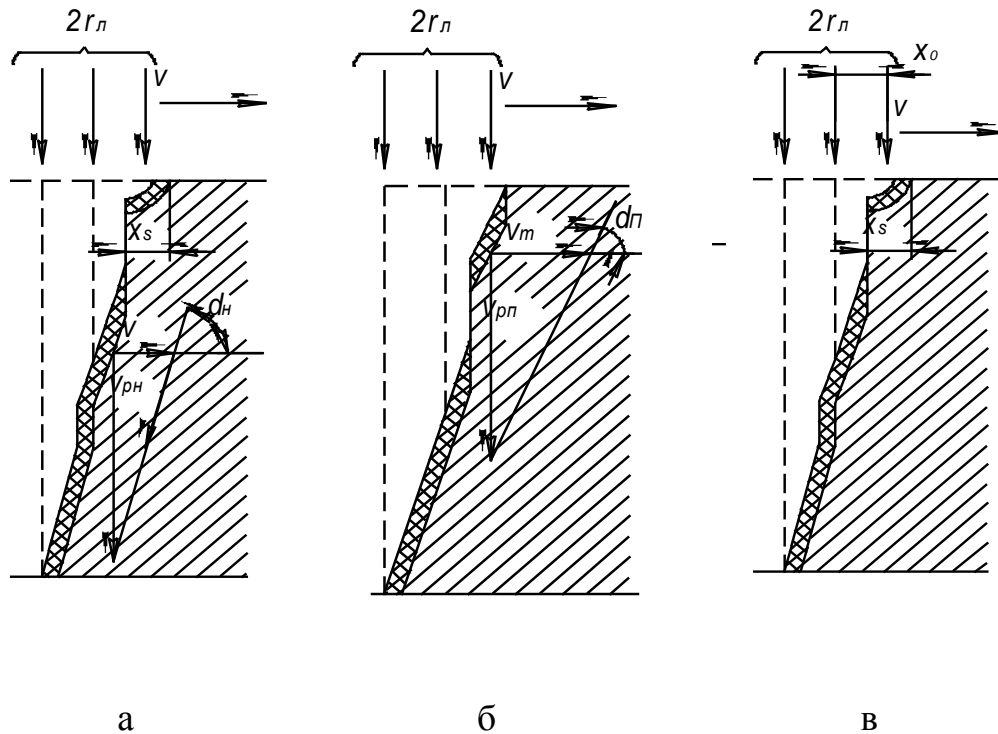


Рисунок 2.2 – Механізм руйнування при різанні металів безперервним лазерним випромінюванням на низьких швидкостях

Отже, якщо за час t_0 зона рідкого металу пошириться в напрямку різання на більшу відстань, ніж переміститься лазерний промінь (що характерно для низьких швидкостей різання), тобто $x_s > x_0$, то протягом цього часу перед лазерним променем, що рухається, на верхній кромці утворюється розплавлену ділянку. При подальшому русі лазерного пучка обробка на цій ділянці відбувається тільки вглиб металу до тих пір, поки лазерний промінь знову не досягне верхньої кромки металу. Потім знову протягом часу t_0 верхня кромка металу нагрівається до температури T_0 передньою частиною лазерного, що рухається променя при нерухомій межі руйнування, тоді як завдяки решті частини лазерного променя продовжується різання углиб металу. Процес періодично повторюється.

На рисунку 2.3 наведена схема послідовності формування різку на верхній кромці металу при низьких швидкостях обробки, по якій можна простежити взаємне розташування з плином часу переднього краю лазерного променя, що рухається, і межі зони рідкого металу [5, 6]. В результаті зазначеної періодичності руйнування поблизу верхньої кромки металу при низьких швидкостях різання на поверхні різку повинні утворюватися окремі борозни шириною, що і спостерігається насправді.

Таким чином, при малих швидкостях різання руйнування вглиб металу відбувається подвійно.

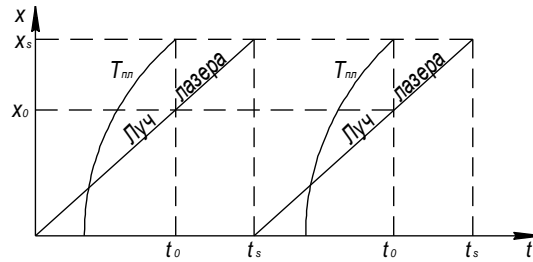


Рисунок 2.3 – Взаємне переміщення лазерного променя та межі руйнування на верхній кромці металу

Поблизу переднього краю лазерного променя протяжністю воно протікає періодично зі швидкістю V_p^{Π} протягом часу проходження променем відстані і полягає в нагріванні і руйнуванні деталі джерелом тепла, що періодично переміщується від поверхні вглиб металу. В результаті впливу на метал решти сфокусованого променя, що дорівнює $(d_{\text{л}} - x_0)$, руйнування відбувається безперервно зі швидкістю V_p^{H} [10].

При цьому поверхня фронту періодично протікає руйнування нахилена по відношенню до напрямку різання під кутом α_{Π} , утвореному швидкістю V_p^{Π} і швидкістю поширення в металі теплової хвилі V_T , а поверхня фронту безперервного руйнування - під кутом α_{H} , утвореному швидкостями V_p^{Π} і v (рисунок 2.2). При високих швидкостях обробки, для яких $x_s < x_0$, температурне поле навколо рухомого лазерного джерела через деякий час стабілізується, і руйнування всередину металу відбувається тільки безперервно (рисунок 2.4) [10, 12].

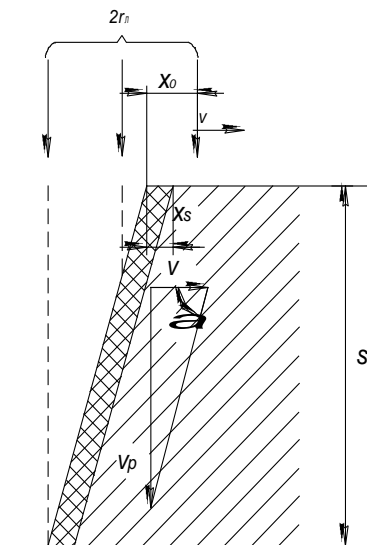


Рисунок 2.4 – Схема руйнування при високих швидкостях різання

В даному випадку час досягнення квазістаціонарної руйнації:

$$t_0 = \frac{\pi \cdot k^2}{4 \cdot a} \left[\frac{(T_{\text{кип}} - T_{\text{н}})}{W_{\rho} a} \right]^2. \quad (2.5)$$

Діапазон швидкостей обробки, для яких характерна освіта борозенчастого рельєфу поверхні різь, можна визначити з умови $x_s > x_0$.

Тоді:

$$v_{\partial} < \frac{a}{k} W_p \left[\frac{(T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}})}{(T_{\text{кип}} - T_{\text{н}})^2} \right]. \quad (2.6)$$

При низьких швидкостях різання мікронерівності на поверхні різь утворюються в результаті накладання борозен шириною один на одного, і теоретичне значення шорсткості поверхні може бути визначено за формулою:

$$R_z = 0,134 x_s. \quad (2.7)$$

Максимальну товщину S металу, що розрізається для низьких і високих швидкостей різання можна визначити відповідно до залежностей:

$$S = \frac{x_s v_p^{\text{н}} + (2r_{\text{л}} - x_0) v_p^{\text{в}}}{V}; \quad (2.8)$$

$$S = \frac{(2r_{\text{л}} - x_0) v_p^{\text{в}}}{V}. \quad (2.9)$$

Враховуючи, що різ у поперековому перерізі на верхній кромці деталі формується при нерухомій межі руйнування, його ширину можна оцінити з виразу:

$$b_p^e = 2 \left[r_{\text{л}} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r_{\text{л}}} \right)^2} + x_s \right]. \quad (2.10)$$

При високих швидкостях обробки, коли тепловідведенням у поперековому напрямі можна знехтувати, ширина різь на верхній кромці:

$$b_p^e = 2 \left[r_{\text{л}} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r_{\text{л}}} \right)^2} \right], \quad (2.11)$$

де:

$$x_0 = \frac{\pi \cdot k}{4a} \cdot V \cdot \left[\frac{(T_{\text{кип}} - T_{\text{н}})}{W_{\rho} a} \right]^2. \quad (2.12)$$

У глибинних шарах металу різ формується при рухомій зі швидкістю v_{∂}^i межі руйнування. Отже, його ширина в нижніх шарах різь повинна бути меншою, ніж на верхній кромці. Цю величину можна уточнити із залежності:

$$b_p^{\text{н}} = 2 \left[r_{\text{л}} + \frac{a}{v_p^{\text{н}}} \ln \frac{T_{\text{кип}}}{T_{\text{пл}}} \right]. \quad (2.13)$$

Наведені залежності справедливі для широкого діапазону застосовуваних матеріалів, потужностей лазерного випромінювання, швидкостей обробки [6].

Ця теоретична модель може бути рекомендована для попередніх та оціночних розрахунків режимів різання металевих листових матеріалів безперервним лазерним випромінюванням.

2.3 Моделювання процесу лазерного різання в системі ANSYS

Система інженерного аналізу ANSYS – це універсальний кінцево-елементний пакет, призначений для вирішення в єдиному середовищі та на одній і тій же кінцево-елементній моделі різних завдань та їх оптимізації. Незалежно від типу розв'язуваної задачі в процесі виконання кінцево-елементного аналізу в системі можна умовно виділити п'ять етапів: створення комп'ютерної моделі або імпорт існуючої моделі із CAD систем; створення кінцево-елементної моделі; додаток навантажень та завдання граничних умов; одержання рішення; аналіз отриманих результатів [14, 17].

Використані при розробці моделей характеристики матеріалів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Характеристики матеріалів, що розрізаються

Марка матеріалу	Теплопровідність k , Вт/мм·град	Питома теплоємність c , Дж/г·град	Щільність ρ , г/см ³
Титановій сплав ВТ-5	0,023	0,52	4,5
Сталь ВНС-5	0,02	0,5	7,56
Сталь 45	0,0519	0,477	7,845
Сталь X18H10T	0,0155	0,48	7,9

В якості параметрів, що найбільше впливають на процес різання, обрані швидкість та товщина матеріалів; потужність лазерного променя прийнята у всіх розрахункових випадках постійної та рівної 1000 Вт. Швидкості обрані в діапазоні: 5 мм/с, від 10 до 50 мм/с з кроком 10 мм/с, товщини листа – від 1 до 4 мм з кроком 1 мм. Для чисельного розв'язання задачі різання листового металу лазерним променем був застосований тип аналізу *Transient Thermal Analysis*, що дозволяє врахувати характер зміни досліджуваних температурних характеристик з плином часу.

Для постановки чисельного розв'язання задачі про моделювання різання листового металу лазерним променем було застосовано тип аналізу *Transient Thermal Analysis*, що дозволяє врахувати характер зміни досліджуваних характеристик з часом.

Моделювання процесу представлено наступним чином: пластина з заданими габаритними розмірами $H \times B \times L$ розбивається на кінцеві елементи

SOLID70 представлені в бібліотеці елементів ANSYS з різною щільністю розбиття (рисунок 2.5). Встановлюються вихідні дані матеріалу пластини – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність та щільність. Конвективний теплообмін пластини з навколишнім середовищем не враховується [18, 19].

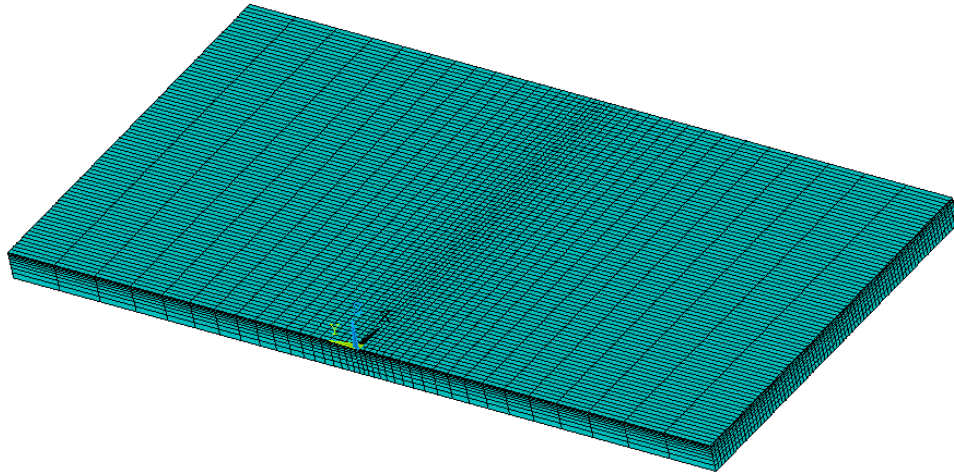


Рисунок 2.5 – Схема розбиття пластини на кінцеві елементи

Промінь лазера представлений у вигляді точкового джерела тепла заданої потужності (1000 Вт), прикладеного по черзі до вузлів елементів пластини, лежачи на траєкторії лінії різання.

Спрощено різання пластини вважалось задовільним при досягненні в елементах пластини на зворотній від падіння променя стороні температури кипіння матеріалу. При розв'язанні задачі відбувався покроковий розрахунок руху променя по поверхні пластини. Усього було прораховано дев'ять кроків у кожному варіанті. Для кожного розрахункового випадку процес вважався завершеним за повного розрізання матеріалу з максимально можливою для даної товщини швидкістю.

2.4 Аналіз результатів чисельного моделювання

Як типовий приклад наведено аналіз результатів для титанового сплаву *BT-5*. На рисунку 2.6 показано розподіл температурного поля в початковий момент часу для пластини товщиною 4 мм, що розрізається зі швидкістю руху лазерного променя 5 мм/с. У початковий момент часу, коли промінь знаходиться ще біля кромки пластини, починається процес інтенсивного нагрівання [18].

Шкала температур дає уявлення про розсіювання тепла по товщині металу, сірим кольором позначена температура вище за температуру плавлення титанового сплаву *BT-5* і ця область вважається областю початку різку. При швидкостях вище цього значення наскрізного різку не відбувається.

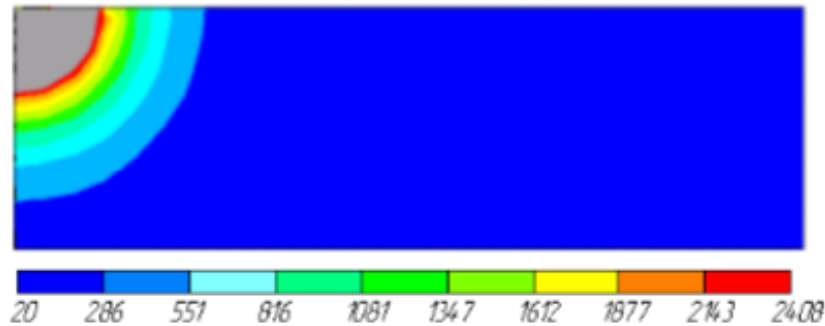


Рисунок 2.6 – Температурне поле у початковий момент часу

Початок наскрізного різання настає через 0,4 с (або на четвертому кроці від початку руху променя поверхнею пластини – рисунок 2.7 а). На останньому, дев'ятому, кроці через 0,9 с картина розподілу температур має інший вигляд (рисунок 2.7, б).



Рисунок 2.7 – Етапи повного розрізання пластини товщиною 4 мм при швидкості різання 5 мм/с: а – через 0,4; б – через 0,9 с

Просторовий розподіл температурного поля (товщина пластини 4 мм, швидкість руху променя 5 мм/с) показано на рисунку 2.8.

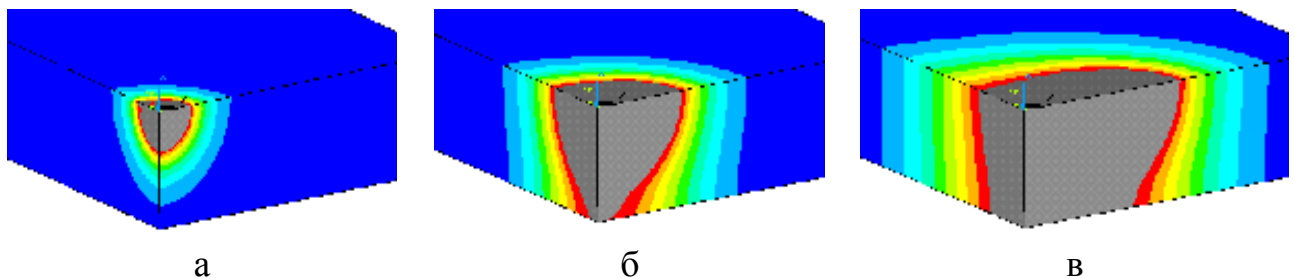


Рисунок 2.8 – Температурне поле пластини, що розрізається:
а – у початковий час; б – через 0,4; в – через 0,9 с

Як видно із рисунку 2.8 ширина різку на верхній площині не змінюється від початку наскрізного розрізання пластини до останнього розрахункового кроку (на рисунку 2.8, б, в – це зона сірого кольору). Очевидно, що такий розподіл температурного поля зберігатиметься до кінця різання пластини.

Наскрізне лазерне різання для титанового сплаву ВТ-5 товщиною 4 мм починається при швидкості руху променя 5 мм/с. При швидкості 10 мм/с різ спостерігається приблизно до середини товщини листа (рисунок 2.9, а), а при

швидкості 50 мм/с – різ незначний, такий може застосовуватися для неповного прорізування, наприклад гравіювання (рисунок 2.9, б).

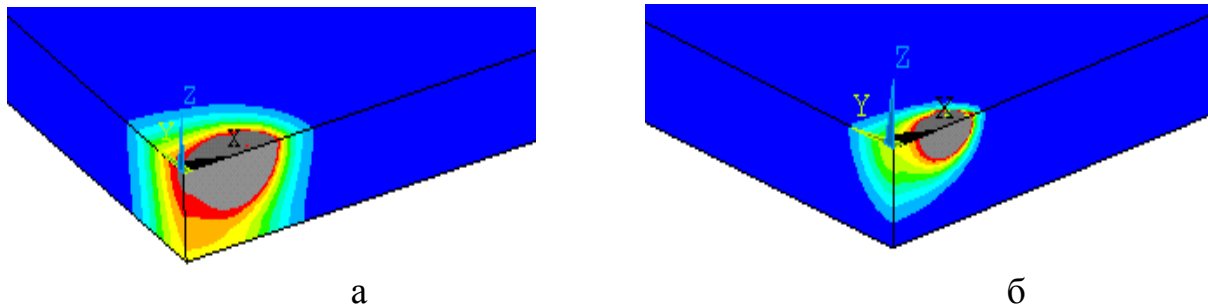


Рисунок 2.9 – Різання листа товщиною 4 мм із титанового сплаву ВТ-5 зі швидкістю: а – 10 мм/с; б – 50 мм/с

Для сталі 45, на відміну від титанових сталей з підвищенням температури значення коефіцієнта теплопровідності k зменшується [10]. Це призводить до того, що здатність матеріалу пропускати тепло знижується, тому при різанні такого матеріалу спостерігався наскрізний різ лише у пластин товщиною 1 і 2 мм при максимальних для них швидкостях 50 і 10 мм/с відповідно. Наскрізного різку для товщин 3 і 4 мм не відбувається в діапазоні вибраних для розрахунку швидкостей. Так само, як і при різанні титанового сплаву, у початковий момент часу, коли лазерний промінь знаходиться біля кромки матеріалу, відбувається процес інтенсивного нагрівання. Картина розподілу температур за товщиною матеріалу в початковий момент часу для листа завтовшки 2 мм при швидкості різання 10 мм/с показано на рисунку 2.10.

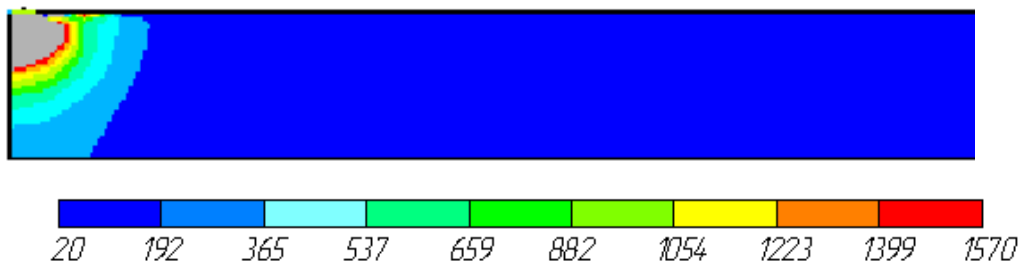


Рисунок 2.10 – Температурне поле у початковий момент часу для листа завтовшки 2 мм при швидкості різання 10 мм/с

На рисунку 2.11 показано розподіл температури по товщині пластини для початку повного прорізування, на четвертому кроці (0,2 с) від початку руху променя і на дев'ятому кроці (0,45 с) відповідно.

З аналізованого діапазону швидкостей різання листа зі сталі 45 товщиною 2 мм можлива лише за швидкості трохи більше 10 мм/с.

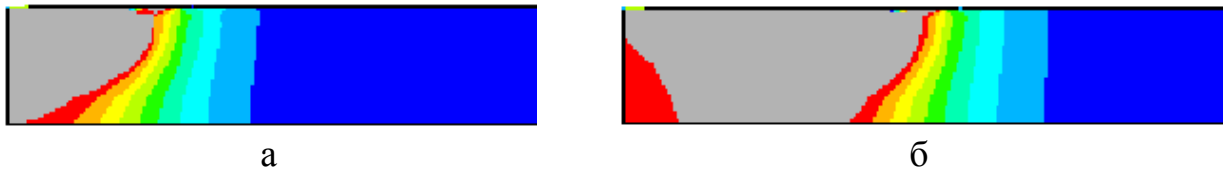


Рисунок 2.11 – Температурне поле у початковий момент повного прорізання листа товщиною 2 мм при швидкості різання 10 мм/с:
а – через 0,2; б - через 0,45 с

При швидкостях вище цього значення наскрізного різку не відбувається. При швидкості 20 мм/с різ спостерігається приблизно до середини товщини металу, а при швидкості 50 мм/с товщина різку незначна.

На рисунку 2.12 показано отримане температурне поле на останньому, дев'ятому, кроці розрахунку (0,45 с).



Рисунок 2.12 – Результати моделювання лазерного різання листа зі сталі 45 товщиною 2 мм при різанні з різними швидкостями:
а – 20 мм/с; б – 50 мм/с

У нержавіючих сталях, в даному випадку для сталі X18H10T, різання здійснено для трьох розглянутих товщин - 1, 2 та 3 мм. Це пояснюється тим, що у сталі X18H10T коефіцієнт теплопровідності k значно нижчий, ніж у сталі 45. В результаті процесу моделювання знайшло своє підтвердження припущення про те, що ширина різку на поверхні входу променя більше ширини різку на виході.

Наскрізне розрізання листа завтовшки 1 мм відбувається на всіх режимах вибраних для розрахунків швидкостей, листа завтовшки 2 мм – на швидкостях до 30 мм/с, листа завтовшки 3 мм – на швидкостях 5 та 10 мм/с. Для лазерного різання листа сталі X18H10T це показано на рисунку 2.10 (область, виділена сірим кольором).



Рисунок 2.10 – Ширина різку на верхній (а) та нижній (б) площинах пластини при різанні сталі X18H10T (товщина 2 мм, швидкість 10 мм/с)

На рисунку 2.11 показано розподіл температури для матеріалів ВТ-5, ВНС-5, сталі 45 і Х18Н10Т при лазерному різанні пластин товщиною 1 мм зі швидкістю 20 мм/с.

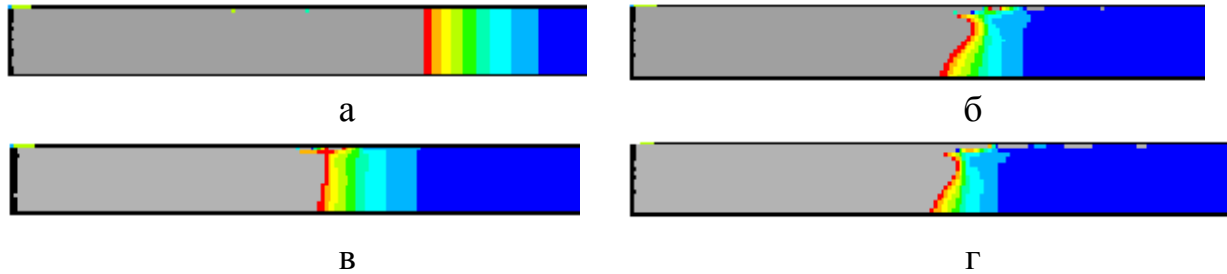


Рисунок 2.11 – Розподіл температурного поля при різанні пластин завтовшки 1 мм зі швидкістю 20 мм/с для матеріалів:
а – ВТ-5, б – ВНС-5, в – сталь 45, г – Х18Н10Т

У титановому сплаві, як видно із рисунку 2.11 температурне поле поширюється швидше при одній і тій же швидкості різання, ніж у сталях. При різанні вуглеродистих сталей необхідно прагнути до фокусування випромінювання в плями меншого діаметра (використовувати установки з малою розбіжністю лазерного пучка, що працюють в одномодовому режимі, застосовувати більш короткофокусні лінзи) з метою підвищення щільності потужності в зоні різання, проте не більше тієї величини W_p , коли на обраних швидкостях настає некероване горіння стали [8].

Для нержавіючих сталей глибина різку s зростає зі зменшенням діаметра плями фокусування з одночасним зниженням та його якості. Для титанових сплавів характерні самі закономірності, проте за зниженні щільності потужності спостерігається значно різкіше зниження глибини розрізання металу. В результаті однакової глибини якісного різку для титанових сплавів можна отримати як при високій щільності потужності та вищій швидкості різання, так і при низьких значеннях щільності потужності та швидкості різання. Отже, при різанні нержавіючих сталей не завжди слід прагнути підвищення щільності потужності в зоні різання. При різанні ж титанових сплавів кращі результати виходять у разі підвищення щільності потужності у зоні обробки [12].

Ширина різку знижується зі зменшенням діаметра плями фокусування на всіх матеріалах, незважаючи на деяке підвищення при цьому густини потужності. Також вона залежить від теплопровідності матеріалу.

Результати досліджень показали, що поряд із щільністю потужності важливим технологічним фактором, що багато в чому визначає розмірні параметри обробки, є швидкість різання.

Однак варіювання швидкості обробки має обмеження. Нижньою межею допустимої швидкості різання для вуглецевих сталей служить перехід процесу в режим автогенного різання, для нержавіючих сталей, титанових і алюмінієвих сплавів - різке погіршення якості поверхні різіу.

В умовах різання металів лазером потужністю 1000 Вт такі явища особливо характерні при швидкостях обробки менше 0,3...0,5 м/хв. Занадто ж високим швидкостям різання відповідає різке зниження товщини деталей, що розрізаються.

Тому зазвичай швидкості різання не підвищують понад 6...8 м/хв [3, 15].

Аналіз проведеного моделювання в системі ANSYS процесу лазерного різання для розглянутих груп авіаційним листових металів дозволяє зробити такі висновки:

1) Титанові сплави мають кращу здатність до різання лазерним випромінюванням, незважаючи на підвищені в порівнянні з конструкційними сталями міцнісні характеристики.

2) Високоміцні сталі при інших рівних параметрах (потужність випромінювання, швидкість різання) порівняно з титановими сплавами при лазерному різанні мають обмеження за товщинами листа. Ці обмеження пов'язані з різними механізмами зміни теплопровідності даних матеріалів при нагріванні до температури кипіння.

3) Моделювання розподілу температурних полів при лазерному різанні різних груп матеріалів при варіюванні швидкостей різіу і товщин листів показало відмінність у ширині різіу на вході і виході променя, яке залежить від швидкості різіу.

4) Моделювання розподілу температурних полів при лазерному різанні різних груп матеріалів різних товщин показало, що найбільш ефективним технологічним параметром для отримання якісного різання є швидкість руху лазерного променя.

Висновки по розділу 2

1. Проведено аналіз можливості дослідження та розроблено чисельні (кінцево-елементні) моделі процесу лазерного різання металевих листових заготовок для деталей аерокосмічної техніки.

2. Аналіз результатів моделювання показав, що титанові сплави мають кращу здатність до різання лазерним випромінюванням, незважаючи на підвищені в порівнянні з конструкційними сталями характеристики міцності. Високоміцні сталі при інших рівних параметрах (потужність випромінювання, швидкість різання) в порівнянні з титановими сплавами при лазерному різанні ма-

ють обмеження по товщинах листа. Ці обмеження пов'язані з різними механізмами зміни теплопровідності таких матеріалів при нагріванні до температури кипіння.

3. Моделювання температурних полів при лазерному різанні різних груп матеріалів з різними швидкостями різання для різних товщин листів показало, що ширина різку на вході і виході лазерного променя різна і залежить від швидкості різання.

4. Аналіз результатів моделювання температурних полів при лазерному різанні різних груп матеріалів і різних товщин листів показав, що найбільш ефективним технологічним параметром для управління якістю різку є швидкість руху лазерного променя.

**3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОТОТАБЕЛЬНОГО
ПЛАНУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ШИРИНИ
ТА ШЕРОХОВАТОСТІ ЛАЗЕРНОГО РІЗА**

Таблиця 3.3 - План експерименту типу 2^3 для сталі ВНС-5

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$, мкм
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,274
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,223
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,252
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,217
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,548
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,432
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,505
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,433

Таблиця 3.4 - План експерименту типу 2^3 для сталі 45

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$, мкм
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,232
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,21
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,223
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,207
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,465
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,42
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,446
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,415

Таблиця 3.5 План експерименту типу 2^3 для сталі Х18Н10Т

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(b_p)$, мкм
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,218
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,206
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,213
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,204
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,436
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,411
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,425
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,408

План типу 2^3 дозволяє отримати окремі оцінки для коефіцієнтів рівняння регресії виду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.1)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (3.1) визначають за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{ij=1}^N x_{ij}y_j}{N}; \quad b_{il} = \frac{\sum_{ij=1}^N x_{ij}x_{lj}y_j}{N}, \quad (3.2)$$

де i, l – номери факторів;

x_{ij}, x_{lj} – координатні значення факторів i та l у j -му досліді.

У результаті розрахунків отримано такі значення коефіцієнтів:

– для титанового сплаву ВТ-5:

$$b_0 = 0,3846; b_1 = -0,045; b_2 = -0,01413; b_3 = 0,1278; b_{12} = 0,00815; \\ b_{13} = -0,0154; b_{23} = -0,00437; b_{123} = -0,0527.$$

– для сталі ВНС-5:

$$b_0 = 0,3605; b_1 = -0,0034; b_2 = -0,00875; b_3 = 0,119; b_{12} = 0,0075; \\ b_{13} = -0,01275; b_{23} = -0,00175; b_{123} = -0,0035.$$

– для сталі 45:

$$b_0 = 0,32725; b_1 = -0,01425; b_2 = -0,0045; b_3 = 0,10925; b_{12} = 0,0025; \\ b_{13} = -0,00475; b_{23} = -0,0015; b_{123} = -0,001.$$

– для сталі Х18Н10Т:

$$b_0 = 0,3151; b_1 = -0,00788; b_2 = -0,00263; b_3 = 0,10488; b_{12} = 0,0014; \\ b_{13} = -0,0026; b_{23} = -0,00087; b_{123} = -0,0006.$$

Після підстановки коефіцієнтів рівняння (3.1) воно набуває вигляду:

– для титанового сплаву ВТ-5:

$$y = 0,3846 - 0,045x_1 - 0,01413x_2 + 0,1278x_3 + 0,00815x_1x_2 - 0,0154x_1x_3 \\ - 0,00437x_2x_3 - 0,0527x_1x_2x_3,$$

– для сталі ВНС-5:

$$y = 0,3605 - 0,0034x_1 - 0,00875x_2 + 0,119x_3 + 0,0075x_1x_2 - 0,01275x_1x_3 \\ - 0,00175x_2x_3 - 0,0035x_1x_2x_3,$$

– для сталі 45:

$$y = 0,32725 - 0,01425x_1 - 0,0045x_2 + 0,10925x_3 + 0,0025x_1x_2 \\ - 0,00475x_1x_3 - 0,0015x_2x_3 + 0,001x_1x_2x_3,$$

– для сталі Х18Н10Т:

$$y = 0,3151 - 0,00788x_1 - 0,00263x_2 + 0,10488x_3 + 0,0014x_1x_2 - 0,0026x_1x_3 \\ - 0,00087x_2x_3 + 0,0006x_1x_2x_3,$$

Кодування незалежних змінних здійснюється за формулою:

$$x_i = \tilde{x}_i - \frac{\tilde{x}_{i0}}{\Delta\tilde{x}_i}, \quad (3.3)$$

де \tilde{x}_i – поточне значення тех. параметра у натуральній величині;

\tilde{x}_{i0} – значення параметра на нульовому рівні;

$\Delta\tilde{x}_i$ – інтервал його варіювання.

З отриманих рівнянь видно, що найбільший вплив на ширину різку b_p для представлених матеріалів має діаметр фокусування променя, потім швидкість різання і, нарешті, потужність лазерного випромінювання.

3.2 Мінімізація шерохватості поверхні лазерного різку методом ротатбельного планування

Швидкість різання, потужність вилучення і діаметр фокуса є основними паспортними величинами лазерних технологічних установок і входять в технології моделювання газолазерної різки [9, 10, 19]. Рівні та інтервали варіювання факторів беремо з таблиці 3.1.

Для мінімізації шерохватості R_z лазерного різку як одного з показників якості обробленої поверхні матеріалу використовують залежність 2.1 – 2.5.

Постійні, що входять в ці залежності, мають наступні значення [4, 12]:

Титановий сплав VT-5:

$$T_{\text{кип}} = 3300^{\circ} \text{C}, T_{\text{н}} = 20^{\circ} \text{C}, T_{\text{пл}} = 2408^{\circ} \text{C}, k = 0,023 \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot \text{град}}, a = 9,83 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}};$$

Сталь 45:

$$T_{\text{кип}} = 1600^{\circ} \text{C}, T_{\text{н}} = 20^{\circ} \text{C}, T_{\text{пл}} = 1570^{\circ} \text{C}, k = 0,0519 \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot \text{град}}, a = 13,3 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}};$$

Сталь ВНС- 5:

$$T_{\text{кип}} = 3250^{\circ} \text{C}, T_{\text{н}} = 20^{\circ} \text{C}, T_{\text{пл}} = 2300^{\circ} \text{C}, k = 0,02 \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot \text{град}}, a = 5,3 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}},$$

$$c = 0,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{град}}, \rho = 7,56 \frac{\text{г}}{\text{см}^3};$$

Сталь X18H10T:

$$T_{\text{кип}} = 1680^{\circ} \text{C}, T_{\text{н}} = 20^{\circ} \text{C}, T_{\text{пл}} = 1580^{\circ} \text{C}, k = 0,0155 \frac{\text{Вт}}{\text{мм} \cdot \text{град}}, a = 4,088 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}};$$

Матриця ротатбельного планування та результати теоретичного розрахунку отриманих значень шерохватості лазерного різку представлені в таблицях 3.2 – 3.5.

План типу 2^3 дозволяє отримати роздільні оцінки для коефіцієнтів рівняння регресії за формулами 3.1 – 3.2.

У результаті розрахунків отримані наступні значення коефіцієнтів:

– для титанового сплаву VT-5:

$$b_0 = 5,7668; b_1 = -3,0006; b_2 = -1,0464; b_3 = 1,973; b_{12} = 0,5606;$$

$$b_{13} = -1,0346; b_{23} = -0,3938; b_{123} = 0,2241.$$

– для сталі ВНС-5:

$$b_0 = 4,0425; b_1 = -2,0725; b_2 = -0,702; b_3 = 1,36; b_{12} = 0,351;$$

$$b_{13} = -0,684; b_{23} = -0,239; b_{123} = 0,114.$$

– для сталі 45:

$$b_0 = 1,8316; b_1 = -0,9394; b_2 = -0,3192; b_3 = 0,6092; b_{12} = 0,1573$$

$$b_{13} = 0,3158; b_{23} = -0,1035; b_{123} = 0,056.$$

– для сталі X18H10T:

$$b_0 = 1,0113; b_1 = -0,5214; b_2 = -0,1746; b_3 = 0,33885; b_{12} = 0,0887; \\ b_{13} = -0,173; b_{23} = -0,059; b_{123} = 0,0292.$$

Після підстановки коефіцієнтів рівняння (3.1) воно набуває вигляду:

– для титанового сплаву BT-5:

$$y = 5,7668 - 3,0006x_1 - 1,0464x_2 + 1,1973x_3 + 0,5606x_1x_2 + 1,0346x_1x_3 \\ - 0,3938x_2x_3 - 0,2241x_1x_2x_3,$$

– для сталі ВНС-5:

$$y = 4,0425 - 2,0725x_1 - 0,702x_2 + 1,36x_3 + 0,351x_1x_2 - 0,684x_1x_3 \\ - 0,239x_2x_3 - 0,114x_1x_2x_3,$$

– для сталі 45:

$$y = 1,8316 - 0,9394x_1 - 0,3192x_2 + 0,6092x_3 + 0,1573x_1x_2 - 0,3158x_1x_3 \\ - 0,1035x_2x_3 + 0,056x_1x_2x_3,$$

– для сталі X18H10T:

$$y = 1,0113 - 0,5214x_1 - 0,1746x_2 + 0,33885x_3 + 0,0887x_1x_2 - 0,173x_1x_3 \\ - 0,059x_2x_3 + 0,0292x_1x_2x_3,$$

Кодування незалежних змінних здійснюється за формулою 3.3.

З отриманих рівнянь видно, що найбільший вплив на зменшення шорсткості поверхні лазерного різку R_z для листових авіаційних матеріалів має швидкість лазерного різання, потім діаметр фокусування променя, найменше - потужність безперервного лазерного випромінювання

Висновки по розділу 3

Метод рототабельного планування може бути рекомендований для попередніх та оціночних розрахунків режимів різання листових авіаційних матеріалів безперервним лазерним випромінюванням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В умовах сучасного машинобудівного виробництва все ширше застосування отримують процеси фізико-технічної обробки, насамперед методи гідроабразивного, плазмового та лазерного різання, які інтенсивно розвиваються та успішно конкурують зі штампуванням та обробкою різанням.

Враховуючи високу вартість лазерного обладнання, його вигідно застосовувати у тих випадках, коли складно чи неможливо застосовувати звичайні розділові технології.

Велика швидкість лазерного різання високоміцних авіаційних матеріалів дозволяє значно підвищити продуктивність розкрійних операцій.

Титанові сплави мають кращу здатність до різання лазерним випромінюванням, незважаючи на підвищені в порівнянні з конструкційними сталями характеристики міцності.

Високоміцні сталі за інших рівних параметрів (потужність випромінювання, швидкість різання) порівняно з титановими сплавами при ГЛР мають обмеження по товщинах листа. Ці обмеження пов'язані з різними механізмами зміни теплопровідності матеріалів при нагріванні до температури кипіння.

Моделювання розподілу температурних полів при ГЛР різних товщин показало, що найбільш ефективним технологічним параметром для отримання якісного різку є швидкість руху лазерного променя.

Однак варіювання швидкості обробки має обмеження. Нижня межа допустимої швидкості різання для вуглецевих сталей служить перехід процесу в режим автогенного різання, для нержавіючих сталей, титанових сплавів - різке погіршення якості поверхні різку.

В умовах різання металів лазером потужністю 1000 Вт такі явища особливо характерні при швидкостях обробки менше 0,3...0,5 м/хв. Занадто ж високим швидкостям різання відповідає різке зниження товщини деталей, що розрізаються.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технології виготовлення деталей складної форми: навч. посіб. / Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. М. Кореньков.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с. Кайдалов А.А. Сучасні технології термічного та дистанційного різання конструкційних матеріалів.- К. : "Екотехнологія", 2007. -456 с.
2. Ding, H.; Wang, Z.; Guo, Y.; Yin, X. Research on laser processing technology of instrument panel implicit weakening line based on neural network and genetic algorithm. *Optik* 2020, 203, 163970.
3. Sharma V, Singh M, Singh JIP (2021) Analysis of various laser cutting parameters on material removal rate for machining of aluminium 5052 using one-factor approach. *Mater Today Proc* 50:2500–2504.
4. Чисельне моделювання процесів лазерного різання листових авіаційних матеріалів / Ю. В. Дяченко, О. В. Маковецький, Є. Є. Хитрих : Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології: зб. наук. тр. - Х.: Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ", 2014. - Вип. 63. - С. 104-114.
5. Діанов Є. М. «Волоконні лазери. Успіхи фізичних наук», ФІАН, 2004. - Т. 174, вип. 10. - С. 1139-1142.
6. Гайдачук, В. Е. Аналіз ефективності технології лазерного різання листових деталей із кольорових металів у серійному авіаційному виробництві / В. Е. Гайдачук, А. І. Костенко // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів: зб. наук. тр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ». - Вип. 61(1). – Х., 2010. – С. 20 – 37.
7. Perveen A, Molardi C, Fornaini C (2018) Applications of laser welding in dentistry: a state-of-the-art review. *Micromachines* 9(5):209.
8. Biswas R, Kuar AS, Mitra S (2014) Multi-objective optimization of hole characteristics during pulsed Nd:YAG laser microdrilling of gamma-titanium aluminide alloy sheet. *Opt Lasers Eng* 60:1–11.
9. Muhammad Alsaadawy, Montasser Dewidar, Ahmed Said: «A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2024) 130:1039–1074.
10. Patel, A.; Bhavsar, S.N. Experimental investigation to optimize laser cutting process parameters for difficult to cut die alloy steel using response surface methodology. *Mater Today Proc.* 2021, 43, 28–35.
11. Peirovi, S.; Poursaghar, M.; Nejad, A.F.; Hassan, M.A. A study on the different finite element approaches for laser cutting of aluminum alloy sheet. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 93, 1399–1413.

12. Singh, Y.; Singh, J.; Sharma, S.; Aggarwal, V.; Pruncu, C.I. Multi-objective optimization of kerf-taper and surface-roughness quality characteristics for cutting-operation on coir and carbon fibre reinforced epoxy hybrid polymeric composites during CO₂-pulsed laser-cutting using RSM. *Lasers Manuf. Mater. Process.* 2021, 8, 157–182.
13. Levichev, N.; Rodrigues, G.C.; Dewil, R.; Duflou, J.R. Anticipating heat accumulation in laser oxygen cutting of thick metal plates. *J. Laser Appl.* 2020, 32, 022018.
14. Tamilarasan A, Rajamani D, Esakki B (2018) Parametric optimisation in Nd-YAG laser cutting of thin Ti-6Al-4V super alloy sheet using evolutionary algorithms. *Int J Mater Prod Technol* 57(1–3):71–91.
15. Аналіз напружено-деформованого стану авіаційних конструкцій за допомогою системи ANSYS / А. Г. Гребенніков, С. П. Світличний, В. Н. Король, В. Н. Анпілов. - Навч. посібн. Ч. 1 – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», CADFEM GmbH. АНТО "КНК", 2002. - 310 с.
16. Чисельне моделювання процесів лазерного різання листових авіаційних матеріалів / Ю. В. Дяченко, О. В. Маковецький, Є. Є. Хитрих : Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології: зб. наук. тр. - Х.: Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ", 2014. - Вип. 63. - С. 104-114.
17. Pramanik D, Kuar AS, Sarkar S, Mitra S (2020) Enhancement of sawing strategy of multiple surface quality characteristics in low power fiber laser micro cutting process on titanium alloy sheet. *Opt Laser Technol* 122 (August 2019):105847.
18. Технології виготовлення деталей літальних апаратів з видаленням припуску: підручник / В. С. Кривцов, В. Т. Сікульський, В. М. Павленко та ін. – Х.: Нац. Аерокосм. Ун-т «Харк. авіа. ін.-т», 2010. – 224 с.
19. Hajad, M.; Tangwarodomnukun, V.; Jaturanonda, C.; Dumkum, C. Laser cutting path optimization using simulated annealing with an adaptive large neighborhood search. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 103, 781–792.

ДОДАТКИ

**ДИНАМІКА ПОШИРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ
ЛАЗЕРНОМУ РІЗАННІ ДЕЯКИХ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ**

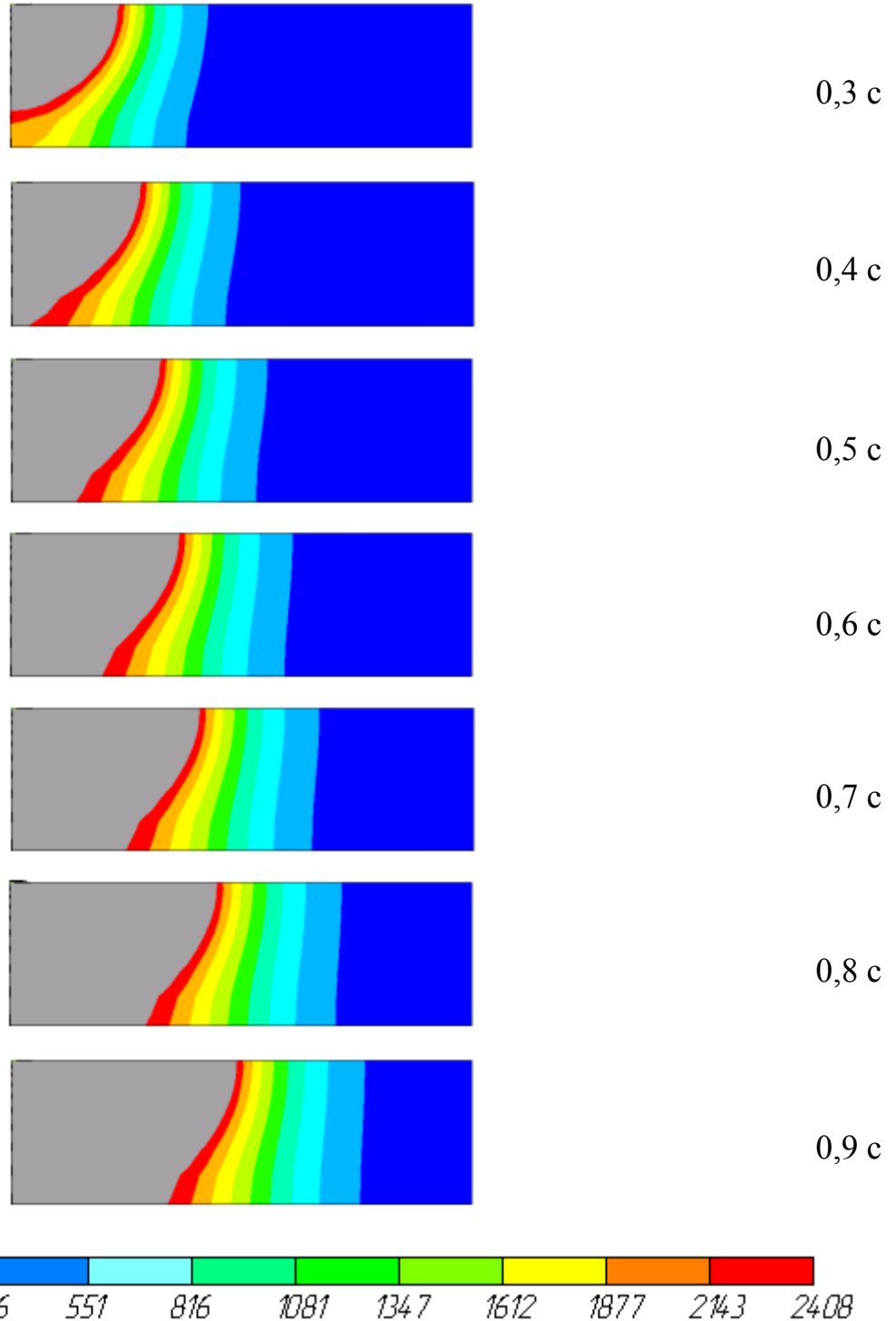


Рисунок А.1 – Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні титанового сплаву ВТ-5 ($s=4$ мм, $v= 5$ мм/с)

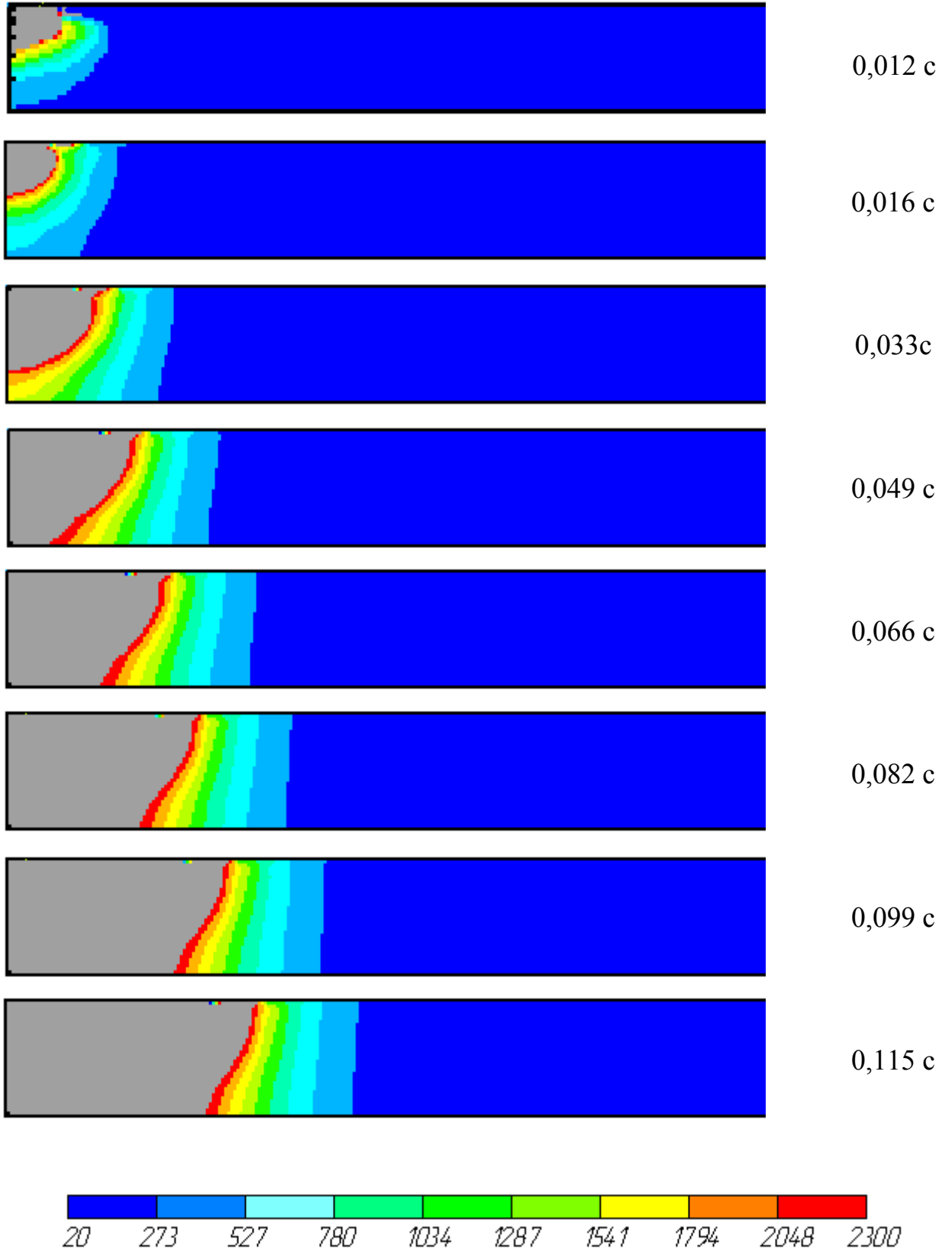


Рисунок А.2 – Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні сталі ВНС-5 ($s=2$ мм, $v= 5$ мм/с))

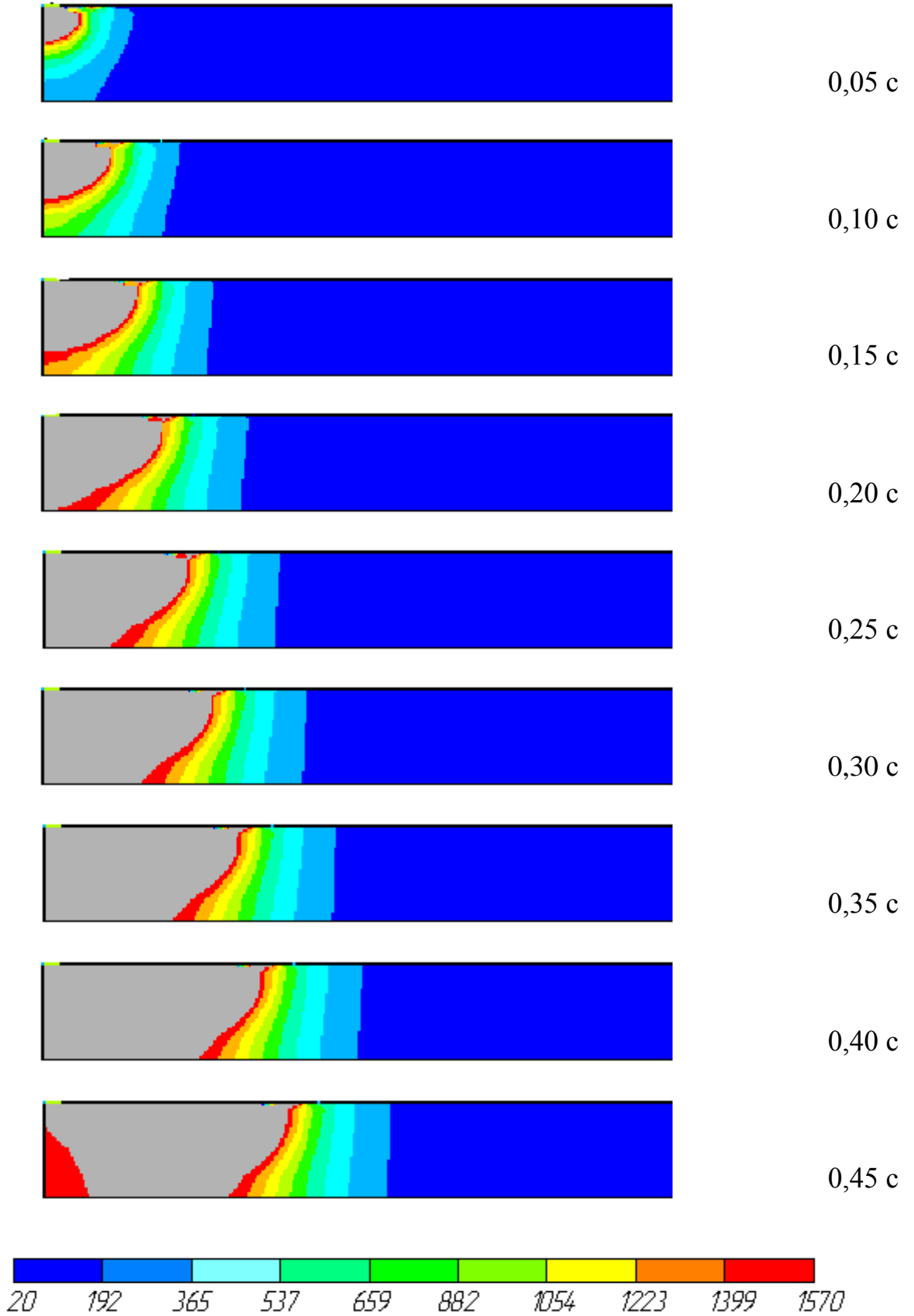


Рисунок А.3 – Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні сталі 45 ($s=2$ мм, $v= 10$ мм/с)

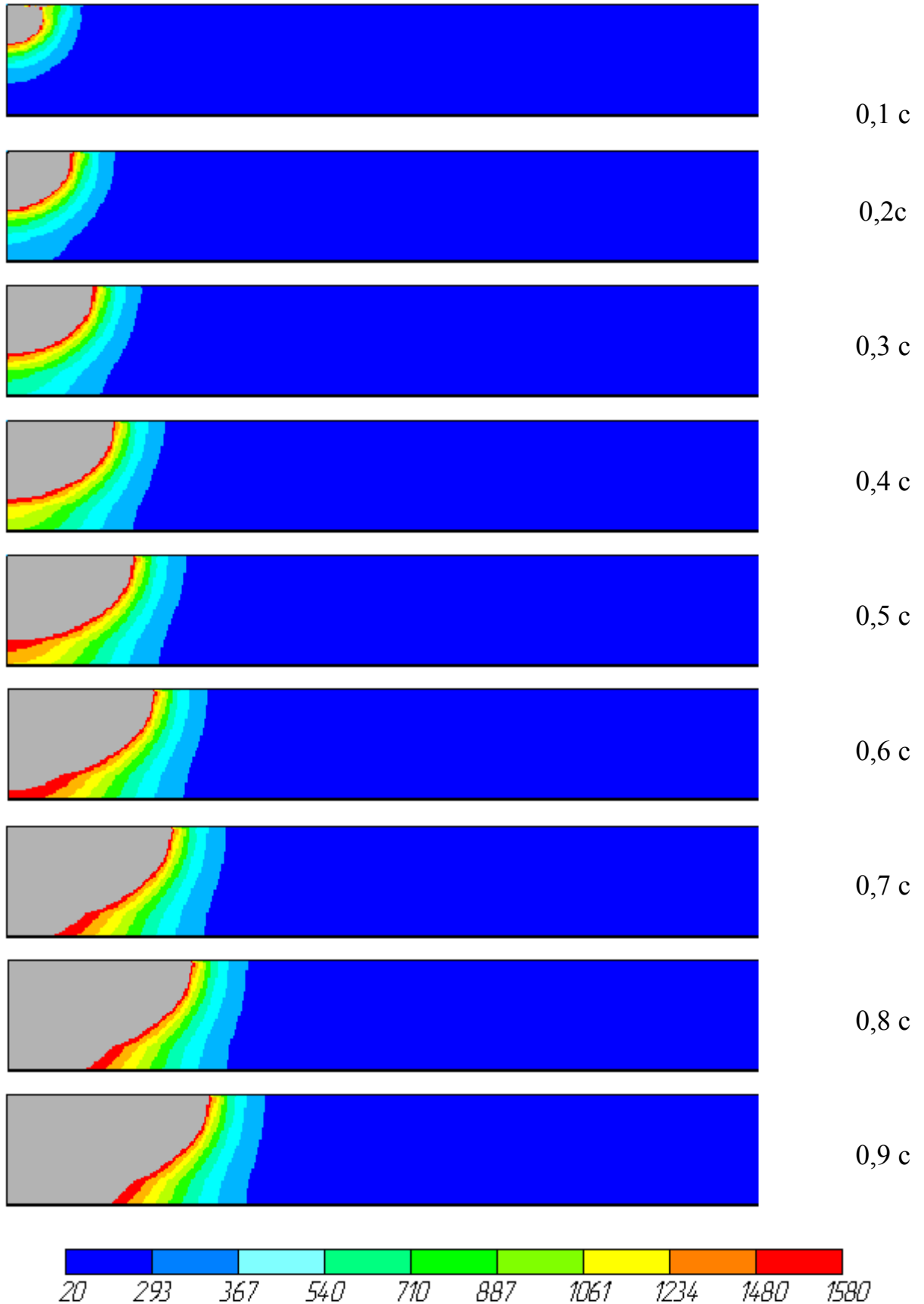


Рисунок А.4 – Динаміка поширення температурного поля при лазерному різанні сталі X18H10T ($s=3$ мм, $v=5$ мм/с)

**ПОШИРЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ
ВІД ШВИДКОСТІ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ**

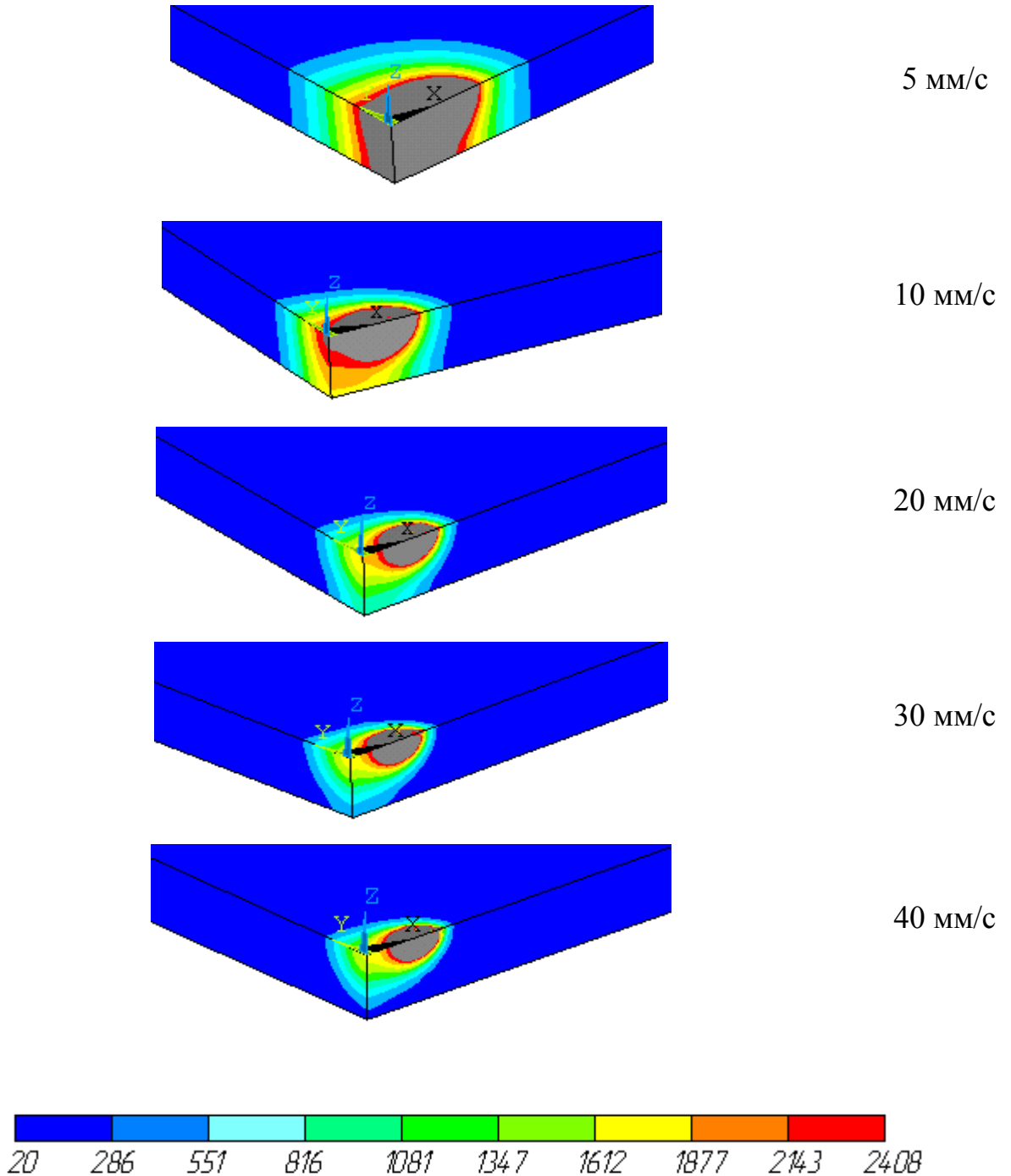
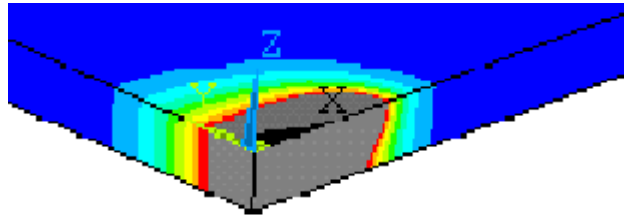
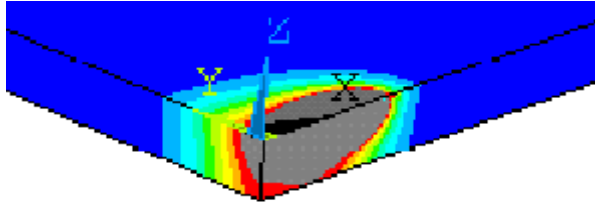


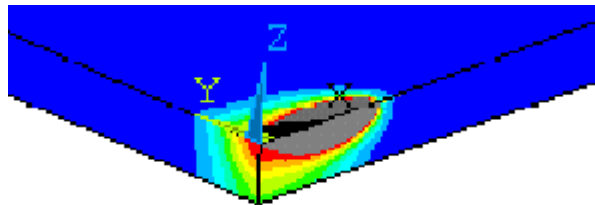
Рисунок Б.1 – Поширення температурного поля при лазерному різанні титанового сплаву ВТ-5 ($s=4$ мм)



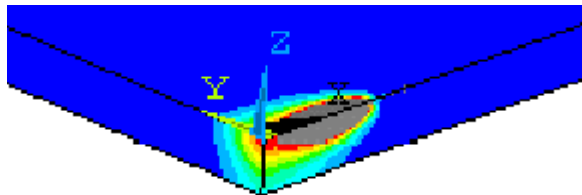
5 мм/с



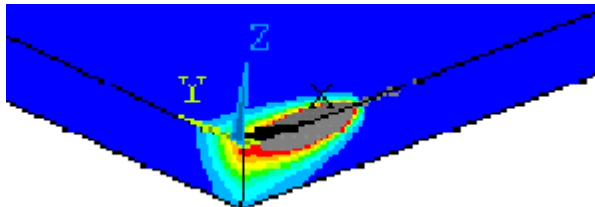
10 мм/с



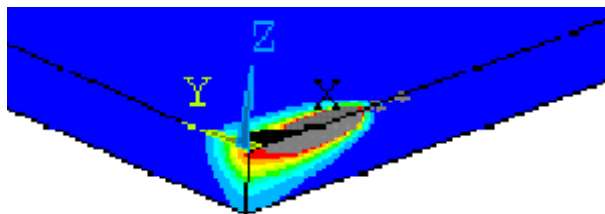
20 мм/с



30 мм/с



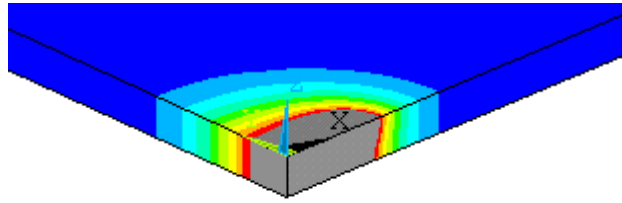
40 мм/с



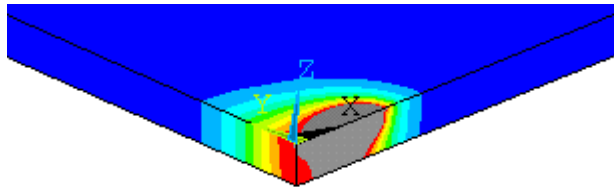
50 мм/с



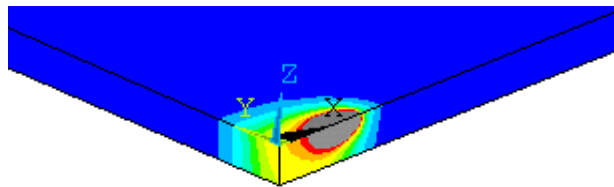
Рисунок Б.2 – Поширення температурного поля при лазерному різанні сталі ВНС-5 (s=2 мм)



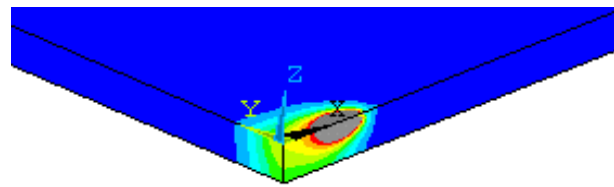
5 мм/с



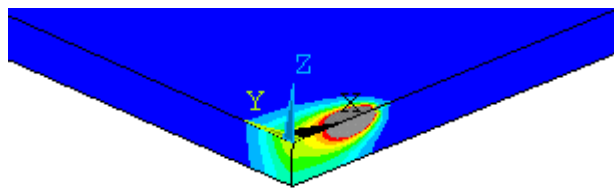
10 мм/с



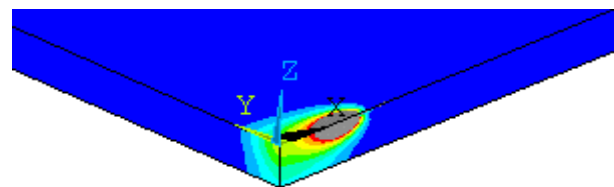
20 мм/с



30 мм/с



40 мм/с



50 мм/с

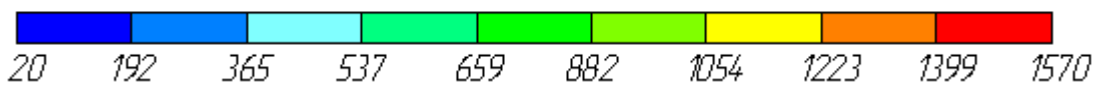


Рисунок Б.3 – Поширення температурного поля при лазерному різанні сталі 45 (s=2 мм)

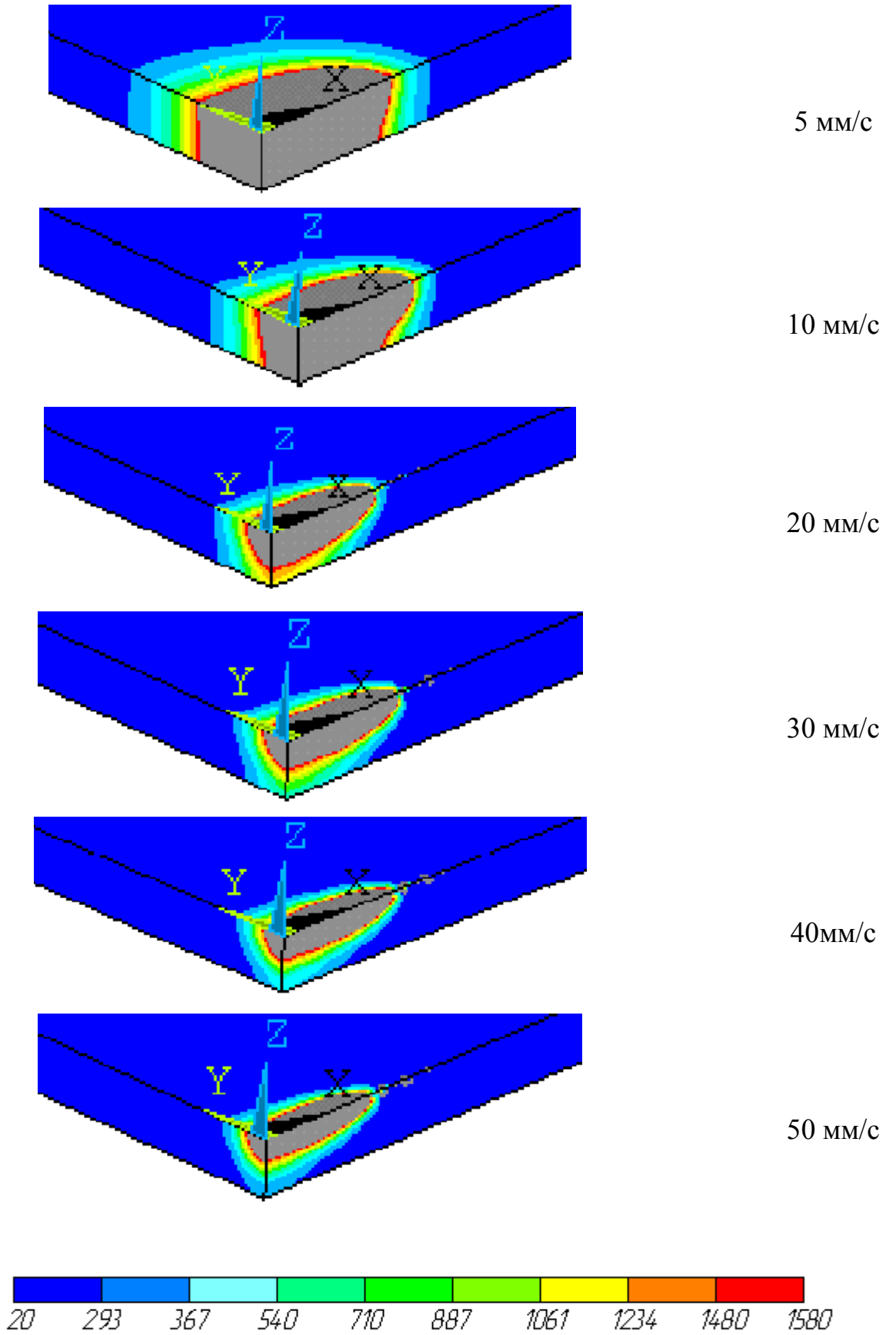


Рисунок Б.4 – Поширення температурного поля при лазерному різанні сталі X18H10T (s=2 мм)