

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузь знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Підвищення втомної міцності титанових сплавів
методом лазерного ударного зміцнення»**

Шифр **МРТАМ 23. 18001.000 ПЗ**

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАм-22-1


Підпис

Я. М. Івашко
Івашко, прозвіще

Керівник к.т.н., доц. каф. ТАМ.


Підпис

С. Ф. Похонський
Похонський, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.


Підпис

О. В. Діхо
Діхо, прізвище

12 12 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *досліджень, турботності та інновацій*
Кафедра *виробництва автомобілів та матеріалознавства*

Освітній рівень *магістр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство»*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
16 жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Івашко Ярославу Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Підвищення втомної міцності титанових сплавів методом лазерного ударного зміцнення.*

керівник роботи: *Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.*

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від *15.08.2023 р. № 28 (Д 30)*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедрі *16.12.2023 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) АНАЛІЗ ФЕНОМЕНУ ВТОМИ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАПОБІГАННЯ

2) МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3) РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4) ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Прізвище
1	<i>Аналіз феномену втоми та методи її запобігання</i>	30.10.23	
2	<i>Методика та обладнання експериментальних досліджень</i>	15.11.23	
3	<i>Результати експериментальних досліджень</i>	23.11.23	
4	<i>Висновки</i>	4.12.23	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	6.12.23	
6	<i>Допуск до захисту</i>	12.12.23	
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	23.12.23	

Студент



Підпис

Іванко В. М.
Іванко В. М.

Керівник роботи



Підпис

Посонський С. Ф.
Посонський С. Ф.

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-22-1 Івашко Ярослав Михайлович

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему *«Підвищення втомної міцності титанових сплавів методом лазерного ударного зміцнення»* складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 29 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та __ додатків розміщених на __ сторінках. Роботу викладено на 85 сторінках, з них 77 сторінок основного тексту, на яких розміщено 37 рисунків і 6 таблиць.

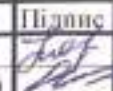


Втомне руйнування – це добре відома технічна проблема. В історії відомо безліч випадків руйнування конструкцій, пов'язаних зі втомою, причому значна їхня частка відбулася не так давно. Всі ці обставини свідчать про необхідність вивчення процесу втомного руйнування: його етапи, тривалість, причини і наслідки. Особливо важливим є вивчення цієї теми у сфері авіабудування, де опір втомним руйнуванням відіграє важливу роль для конструкцій, так як руйнація спричиняє катастрофи з серйозними наслідками. З цієї причини останніми роками активно розробляються стандарти та норми для створення надійних літальних апаратів, а також запобігання їх руйнуванню. З появою нових стандартів, стали з'являтися і методи поліпшення властивостей матеріалів, які б їм чинити опір втомному руйнуванню. Активно розвивається такий метод поверхневого зміцнення матеріалів, як лазерне ударне зміцнення. Однак на даний момент цей спосіб створення залишкових напружень знаходиться на стадії вивчення, що заважає його впровадженню у виробництво.

Мета роботи: дослідження метода лазерного ударного зміцнення титанових сплавів для підвищення його втомної міцності.

Ключові слова: феномен втоми, втомна міцність, лазерне ударне зміцнення.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФЕНОМЕНУ ВТОМИ ТА МЕТОДИ ЇЇ	9
ЗАПОБІГАННЯ	
1.1 Втомне руйнування	9
1.1.1. Різні фази «втомного життя»	11
1.1.2 Зародження тріщини	12
1.1.3. Зростання тріщини	14
1.2. Методи створення залишкових напружень	16
1.2.1 Теорія залишкових напружень	16
1.2.2. Методи створення залишкових напружень	16
1.3. Титанові сплави	22
1.3.1. Застосування в авіабудуванні	23
1.3.2. Титановий сплав OT4-0	27
1.4 Концентратори напружень	28
1.5 Сучасні дослідження в галузі лазерного ударного зміцнення	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ	38
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Теоретичні відомості	38
2.1.1. Параметри циклу	38
2.1.2. Ймовірнісний характер явища втоми	40
2.2. Обладнання та зразки для досліджень	45
2.2.3. Вимірювання залишкових напружень методом свердління	
отворів	50
2.2.4. Втомні випробування	53
2.2.5 Мікроструктурні дослідження	55

ДРМТВАТАМ 23.22375.000 ПЗ					
№	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Івашко			Підвищення втомної міцності титанових сплавів методом лазерного ударного зміцнення
Перевір.		Посоцький			
Контр.		Бабак			Літера
Звер.		Диха			Аркуш
					Аркушів
					4
					85
					ХНУ МТВАм-22-1

2.3. Програма випробувань	57
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	58
3.1 Вимірювання залишкових напружень	58
3.2 Результати втомних випробувань	66
3.3. Результати мікрофрактографії	76
ВИСНОВКИ	81

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арх.
Зам.	Арх.	№ доум.	Підпис	Дата		87

ВСТУП

Втомне руйнування – це добре відома технічна проблема. Вже в 19-му столітті було зареєстровано кілька серйозних втомних відмов і проведено перші лабораторні дослідження. Тоді ж Август Веллер у своїх роботах довів, що одноразове застосування навантаження, яке в рази менше статичної міцності, не завдає їй жодної шкоди, а от якщо це навантаження додаватиметься до об'єкта багаторазово, то це легко може призвести до руйнування. З того часу було проведено безліч випробувань, написано величезну кількість робіт з вивчення феномену втоми, однак і до цього часу питання руйнування втоми залишається актуальним.

В історії відомо безліч випадків руйнування конструкцій, пов'язаних зі втомою, причому значна їхня частка відбулася не так давно. Ось найвідоміші [1]:

- 1988 - пригода з Boeing 737 над Кахулуї;
- 1989 - катастрофа DC-10 у Су-Сіті;
- 1992 - авіакатастрофа в Амстердамі;
- 1998 - аварія ICE у Ешеді;
- 2000 – аварія на залізниці у Хетфілді;
- 2002 – катастрофа рейсу 611 China Airlines;
- 2005 – рейс авіакомпанії Chalk's Ocean Airways, втрата крила під час польоту;
- 2009 - сход з рейок поїзда до Віареджо;
- 2009 – аварія на Саяно-Шушинській ГЕС;
- 2018 – аварія на авіалайнері Рейс 1380 Southwest Airlines.

Всі ці обставини свідчать про необхідність вивчення процесу втомного руйнування: його етапи, тривалість, причини і наслідки. Особливо важливим є вивчення цієї теми у сфері авіабудування, де опір втомним руйнуванням

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

відіграє важливу роль для конструкцій, так як руйнація спричиняє катастрофи з серйозними наслідками. З цієї причини останніми роками активно розробляються стандарти та норми для створення надійних літальних апаратів, а також запобігання їх руйнуванню. Одними з останніх було розроблено та впроваджено два методи запобігання руйнуванню конструкції літака через втомні тріщини: безпечний ресурс (safe-life) та безпечне руйнування (fail-safe). Перший метод виходить з основного положення, що безпека літака визначається відсутністю тріщин втоми в конструкції протягом безпечного ресурсу. Метод безпечного руйнування передбачає створення такої конструкції, яка здатна витримувати значне навантаження, що нормується після часткового або повного руйнування одного з її силових елементів. У цих методах є два дуже важливі поняття. Безпека руйнування - властивість конструкції, що дозволяє їй зберігати необхідну залишкову міцність протягом періоду експлуатації без ремонту після руйнування або часткового руйнування основного силового елемента.

Другим терміном є допустимість ушкодження (damage tolerance) - властивість конструкції, що дозволяє їй зберігати необхідну залишкову міцність за інтервал часу її застосування, протягом якого конструкція піддається певному ступеню втомного, корозійного, випадкового пошкодження або пошкодження від дискретного джерела [1].

З появою нових стандартів, стали з'являтися і методи поліпшення властивостей матеріалів, які б їм чинити опір втомному руйнуванню. Особливе місце тут зайняли методи, в основі яких лежить створення залишкових напружень в поверхневих шарах деталей. До них відносяться дробоструменева обробка, загартування СВЧ, високочастотна ударна обробка та інші. Останнім часом активно розвивається такий метод поверхневого зміцнення матеріалів, як лазерне ударне зміцнення. Одна з головних його переваг - це глибина створюваних залишкових напружень, яка помітно більша, ніж при використанні інших методів. Однак на даний

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

момент цей спосіб створення залишкових напружень знаходиться на стадії вивчення, що заважає його впровадженню у виробництво.

Саме тому метою роботи є: дослідження метода лазерного ударного зміцнення титанових сплавів для підвищення його втомної міцності.

Завдання роботи:

- 1) аналіз феномену втоми;
- 2) аналіз технології лазерного ударного зміцнення та існуючих досліджень з даної тематики;
- 3) проведення експериментів із застосуванням лазерного ударного зміцнення з метою визначення впливу лазерного наклепу на втомну довговічність титанових сплавів.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФЕНОМЕНУ ВТОМИ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАПОБІГАННЯ

1.1 Втомне руйнування

Вперше люди стали помічати втомне руйнування конструкцій наприкінці 18 століття. Тоді англійські інженери відзначали, що у диліжансів поштових карет, що тривало експлуатуються, несподівано крихко ламалися осі, які були виготовлені з кованого заліза, що володіє високою міцністю. У той час фахівці пояснювали це явище переродженням матеріалу за рахунок втоми в процесі тривалої експлуатації під дією змінних напружень, що виникає через нерівності на дорозі. З того часу і з'явився термін "втома матеріалів".

І в наші дні втома є однією з головних причин відмови деталей і конструкцій, які піддаються впливу напружень, що циклічно змінюються в часі. Відомо, що багаторазові циклічні навантаження призводять до руйнування деталей машин та елементів конструкцій при напруженнях, рівень яких значно менше напружень, які руйнують метал у разі одноразового навантаження. Руйнування може наступати при напруженнях нижче межі плинності. Це називається втомним руйнуванням [1].

Втома металів виявляє себе у виникненні мікротріщин у місцях концентрації напружень, а саме на поверхні або у під поверхневому шарі, у місцях різкої зміни перерізу або біля інших концентраторів. Втомні тріщини з'являються поступово і поширюються з невеликою швидкістю вглиб деталі, поки її перетин не зменшиться до критичної величини, після чого настає тендітний долом виробу.

Опір металів втомному руйнуванню характеризується межею витривалості. Їм називають напруження циклу, що витримує метал без

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

руйнування за будь-якої кількості циклів. Межу витривалості визначають при випробуваннях з певною асиметрією циклу та позначають σ_R . Її знаходять за діаграмою, яку будують у координатах $\sigma - N$, де N – це кількість циклів (рисунок 1.1). При визначенні межі витривалості обмежуються 10⁷ циклами (ця кількість циклів називають базою випробувань).

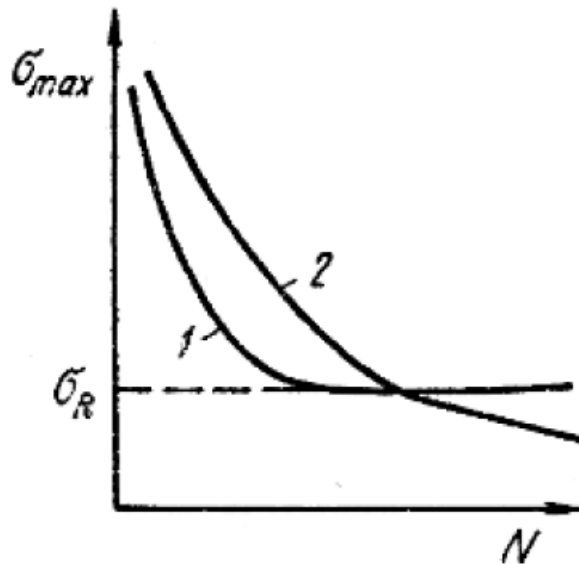


Рисунок 1.1 – Криві витривалості:

1 – для сталей (фізична межа витривалості), 2 – для кольорових металів

По кривим втоми знаходять ще один важливий критерій - довговічність при втомі. Під довговічністю розуміють число циклів навантаження, яке витримує матеріал без руйнування за певної напружень.

Процес втомного руйнування починається з пластичної деформації поверхневих шарів деталі. Переміщення дислокацій в умовах повторно-змінних навантажень спостерігається навіть при напруженнях нижче за межу витривалості. Швидкість локальних пластичних деформацій при циклічному деформуванні на кілька порядків вища за швидкість пластичної деформації при статичному навантаженні. З підвищенням числа циклів у поверхневих шарах зростає щільність дислокацій та кількість вакансій. При досягненні базової кількості циклів формується зміцнений поверхневий шар металу з великою кількістю зародкових тріщин розмір яких не досяг критичного.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Подальше зростання кількості циклів не може викликати подальшого розвитку руйнування у такому шарі. І лише коли напружень перевищують межу витривалості, тріщини досягають критичної довжини, після чого починається процес їх злиття в магістральну тріщину та її поширення [1, 2].

Процес зростання втомної тріщини займає лише 5-10 % загального часу експлуатації деталі до остаточного руйнування. Решту часу припадає на зародження і поступове підростання тріщин, багато з яких з часом припиняють свій розвиток внаслідок зміцнення металу в місцях сконцентрованих напружень біля вершини тріщини. Подальший розвиток отримують лише ті, які мають досить велику довжину та гостру вершину. Одна з них призводить до остаточного руйнування.

Зона долому, як правило, має кристалічну поверхню, характерну для тендітного руйнування при статичних випробуваннях.

1.1.1. Різні фази «втомного життя»

Дослідження 20-го століття показали, що втомна тріщина починає зростати як невидима мікротріщина в смузі ковзання. Пізніше було виявлено, що зародження таких мікротріщин починається вже на ранніх етапах втомного життя. Так ранніх, що розпочатися цей процес може майже відразу після докладання циклічних навантажень, які перевищують межу витривалості. Незважаючи на таку ранню появу, мікротріщина залишається невидимою значну частину втомного життя зразка.

Після зародження тріщини зростання тріщини може залишатися слабким і нестійким через ефекти мікроструктури, наприклад, меж зерен та ін. Однак після деякого зростання мікротріщин вдалині від місця зародження можна спостерігати більш регулярне зростання. Це початок періоду реального зростання тріщини. Різні етапи втомного життя зображені рисунку

1.2. Варто відзначити, що життя втоми складається з двох періодів: період

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

зародження тріщини і період зростання тріщини. Вкрай важливо розрізнити ці два періоди, оскільки деякі поверхневі фактори мають сильний вплив на процес зародження, але в той же час не мають значного впливу на зростання тріщини [3].



Рисунок 1.2 – Різні фази втомного життя

Одним із таких факторів є шорсткість поверхні. А ось агресивні середовища можуть впливати як на період зародження тріщини, так і на період зростання тріщини, але у різний спосіб.

1.1.2 Зародження тріщини

Процес зародження тріщини та її зростання є наслідком циклічного ковзання у смугах ковзання. Отже, циклічна пластична деформація є наслідком руху дислокацій. Як згадувалося раніше, втома виникає при амплітуді напружень, що менше межі плинності матеріалу. На такому низькому рівні напружень пластична деформація обмежена невеликою кількістю зерен. Ця мікропластичність набагато легше виникає у зернах на поверхні матеріалу, тому що в такому випадку матеріал оточує її лише з одного боку. З іншого боку ми маємо газ (повітря, наприклад) чи рідина (води). Звідси випливає, що пластична деформація в поверхневих зернах обмежена набагато менше, ніж у при поверхневих шарах, а отже, така деформація може статися при нижчому рівні напружень.

Циклічне ковзання вимагає циклічного напруження зсуву. У мікромасштабі воно немає однорідного розподілу.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

В кристалографічних областях воно відрізняється від зерна до зерна залежно від їх розмірів та форм, орієнтації та пружної анізотропії матеріалу. У деяких зернах на поверхні матеріалу ці фактори сприятливіші для циклічного ковзання, в інших немає. Якщо це ковзання відбудеться на поверхневому зерні, крок ковзання буде створено на поверхні матеріалу. Це означає, що край матеріалу піддається впливу навколишнього середовища. Він буде покритий оксидним шаром у більшості довілля, що справедливо для більшості матеріалів. Такі шари легко прилипають до матеріалу і їх нелегко позбутися. Ще один істотний аспект полягає в тому, що ковзання під час збільшення навантаження також має на увазі деяке деформаційне зміцнення в смугі ковзання. Отже, після розвантаження більша напруженість зсуву буде присутня на тій самій смугі, тільки в протилежному напрямку. Що зробить зворотне ковзання кращим. У результаті повне оборотне ковзання неможливе через складність видалення оксидного шару та деформаційного зміцнення. Зворотне ковзання, що відбувається в тій же смугі ковзання, відбувається в паралельній площині ковзання. Така сама послідовність спостерігається й у наступних циклах. Після кількох циклів можна спостерігати формування постійних смуг ковзання. Ці смуги є місцями, де може утворитися тріщина. На рисунку 1.3 показано, як циклічне ковзання призводить до зародження тріщини.

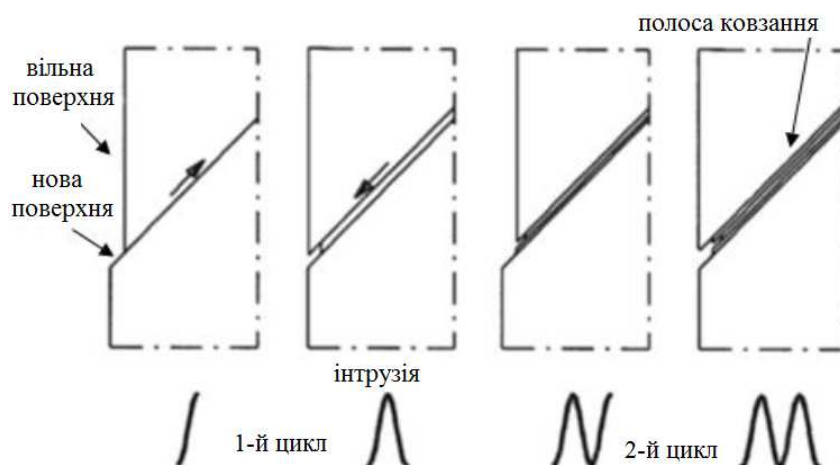


Рисунок 1.3 – Циклічне ковзання та зародження тріщини [3]

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Низькі обмеження на циклічне ковзання на поверхні матеріалу є фактором, що сприяє зародженню тріщини на вільній поверхні. На практиці причиною цього є неоднорідний розподіл напружень через концентратори напружень в отворах або інших геометричних неоднорідностях. Шорсткість також сприяє зародженню тріщини на поверхні матеріалу. У результаті можна сказати, що в періоді зародження тріщини втома є поверхневим явищем.

1.1.3. Зростання тріщини

Поки розмір тріщини залишається близько одного зерна, мікротріщина присутня в пружному анізотропному матеріалі з кристалічною структурою та безліччю різних систем ковзання. Оскільки мікротріщина сприяє неоднорідному розподілу напружень на мікрорівні з концентрацією на її кінці, може бути активовано більше однієї системи ковзання. Крім цього, якщо тріщина зростає в кількох прилеглих зернах, обмеження на зміщення ковзання збільшуватиметься через присутність сусідніх зерен. Таким чином, ковзання відбуватиметься не лише на одній площині ковзання. Напрямок зростання тріщини відхилитиметься від початкової орієнтації смуги ковзання. Взагалі, існує тенденція до зростання перпендикулярно до напрямку навантаження (рисунок 1.4).

Оскільки зростання мікротріщин залежить від циклічної пластичності, перешкоди ковзанню можуть означати поріг цього зростання. Швидкість зростання тріщини, яка вимірюється, як збільшення довжини тріщини за один цикл, зменшується, коли вершина тріщини наближається до межі зерна. Після проникнення через кордон зерна швидкість зростання тріщини збільшується під час зростання наступне зерно.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

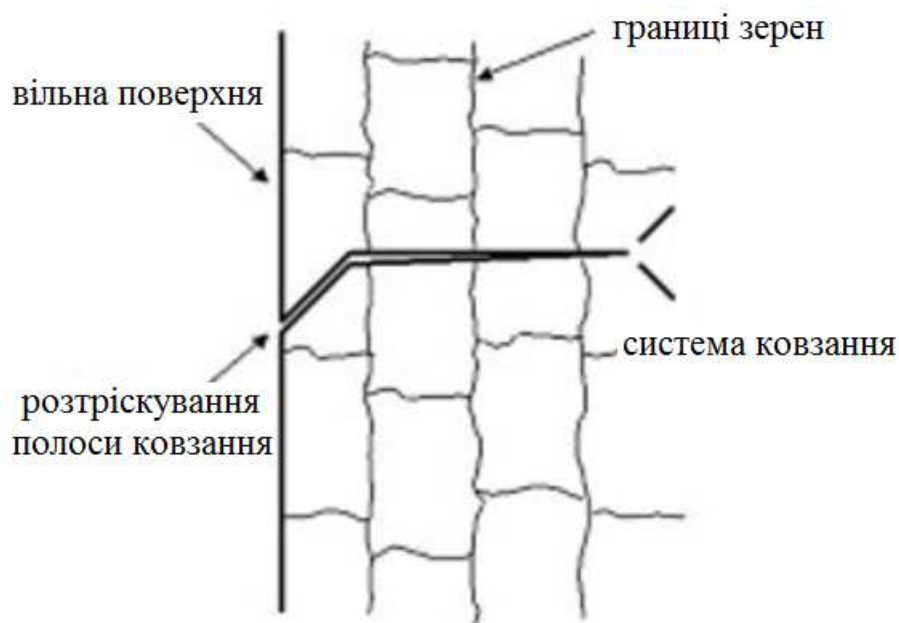


Рисунок 1.4 – Поперечний переріз мікротріщини

Спочатку мікротріщина може рости неоднорідно з досить високою швидкістю, потім вона може сповільнитися або навіть зупинитися через структурні бар'єри матеріалу. Однак картина зміниться, якщо фронт тріщини після деякого зростання тріщини проходить через значну кількість зерен. Тріщина не може рости в кожному зерні у довільному напрямку та з будь-якою швидкістю, незалежною від зростання тріщини у сусідніх зернах. Ця безперервність запобігає великим градієнтам швидкості зростання тріщини вздовж фронту тріщини. Як тільки число зерен уздовж фронту тріщини стає більшим, зростання тріщини стає відносно безперервним процесом. Швидкість зростання тріщини залежить від стійкості матеріалу до зростання тріщин, а поверхневі чинники не актуальні. Опір зростання тріщини, коли тріщина проникає у матеріал, залежить від об'ємних властивостей матеріалу. Отже, зростання тріщини не є поверховим явищем [2, 3].

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.2. Методи створення залишкових напружень

Залишкові напруження, що виникають у поверхневому шарі, істотно впливають на опір втоми. Саме тому вони багато в чому здатні визначати якість та експлуатаційні характеристики конструкцій.

1.2.1 Теорія залишкових напружень

Залишковими напруженнями прийнято називати ті напруження, які існують у конструкції або окремих її елементах за відсутності зовнішніх силових, теплових чи інших впливів. Наявність цих напружень обумовлено також нерівномірністю температури за обсягом тіла, утвореними під час нагрівання або охолодження нових структур з іншою щільністю, наявністю включень та ін. У техніці вони відіграють важливу роль, зокрема коли справа стосується характеристик міцності матеріалу.

У ряді досліджень встановлено [1, 2], що сприятливий розподіл залишкових напружень у виробках може підвищити їхню вібраційну та втомну міцність. Поверхня виробів, як правило, є найслабшою зоною, тому будь-яка обробка, яка призводить до виникнення та зростання поверхневих стискаючих напружень, сприятливо впливатиме на експлуатаційні властивості виробів.

1.2.2. Методи створення залишкових напружень

Методи створення залишкових напружень можна розбити на дві основні групи:

1. зміцнення виробів без зміни хімічного складу (поверхнєве загартування, поверхнєве пластичного деформування тощо);

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

2. зміцнення виробу зі зміною хімічного складу поверхневого шару та його структури (хіміко-термічна обробка та нанесення захисних шарів).

Докладніше зупинимося першої групі методів, саме на тих, основу яких лежить створення залишкових напружень лежить на поверхні деталі, і розглянемо кілька методів.

Дробеструменева обробка - це холодний робочий процес, який використовується для чистової обробки металевих деталей, щоб запобігти втомним і корозійним руйнуванням і продовжити термін служби виробу шляхом створення стискаючих залишкових напружень в поверхневих шарах матеріалу [4]. Вона полягає в ударі дробом (круглі металеві, скляні або керамічні частинки) по поверхні деталі (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Дробеструменева обробка.

Таким чином утворюється пластично деформований шар. Також утворюється пружно деформований шар навколо пластично деформованого шару. Пластично деформований шар має тенденцію розширюватися, і сусідній матеріал, що пружно реагує, запобігає цьому. У результаті в поверхневому шарі до певної глибини створюються залишкові напруження (рисунок 1.6) [4].

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.6 – Механізм дробоструменевої обробки.

Цей метод поверхневої обробки безсумнівно має переваги, такі як низька вартість, можливість обробки великих виробів, надійність обладнання. Проте за сучасних умов є й серйозні мінуси. Основний мінус – це те, що дробоструменева обробка може призвести до спотворення форми деталі, що є неприпустимим для деяких елементів конструкцій. Більше того, глибина зміцненого шару не велика – приблизно 0,25 мм. А враховуючи, що цей спосіб призводить до появи шорсткості поверхні, яку видаляють у промислових масштабах, то зміцнений шар може бути видалений разом з нею.

Поверхнєве загартування струмами високої частоти (СВЧ). Загартування металів струмами високої частоти – це один із поширених методів поверхневої термічної обробки, який дозволяє підвищити твердість поверхні заготівлі. Індукційне загартування СВЧ дає можливість загартувати всю поверхню деталі або її окремі елементи або зони, які зазнають основного навантаження. При цьому під загартованою твердою зовнішньою поверхнею заготівлі залишаються незагартовані в'язки шару металу. Така структура зменшує крихкість, підвищує стійкість та надійність всього виробу, а також знижує енерговитрати на нагрівання всієї деталі.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Суть методу полягає в тому, щоб швидко нагріти поверхневий шар матеріалу до температури, значно вище критичної, і після цього швидко охолодити робити (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Поверхнєве загартування СВЧ

Основними перевагами цього методу є можливість точно розрахувати глибину загартованого шару, малий час обробки, можна використовувати обладнання малої потужності.

Однак з економічної точки зору, індукційні установки доцільно використовувати тільки при серійному виробництві, для одиничного виробництва придбання та виготовлення індуктора не вигідно. Для деяких деталей складної форми виробництво індукційної установки дуже складно, через що важко отримати рівномірність загартованого шару.

Лазерне ударне зміцнення. ЛУЗ (від англ. Laser Shock Peening - лазерне ударне зміцнення) - це обробка поверхні, яка використовується для створення стискаючих залишкових напружень в поверхневому шарі матеріалу. Короткочасні високоенергетичні імпульси використовуються для

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

створення на поверхні матеріалу плазми, яка швидко розширюється. Тим самим вона викликає поверхневий тиск на поверхні матеріалу, що створює ударну хвилю вглиб матеріалу, яка пластично деформує його. Ця хвиля створює залишкові напружень, які залишаються в зразку після досягнення системою рівноваги. ЛУЗ призводить до характерного розподілу цих залишкових напружень по глибині, де високі стискаючі залишкові напружень поряд з поверхнею зменшуються і можуть перетворитися на розтягуючі залишкові напруження поряд з центральними шарами матеріалу.

Цей процес здійснюється наступним чином: поверхню, що обробляється, покривають непрозорим для лазерного випромінювання шаром з низькою температурою випаровування (чорною фарбою, металеву фольгою або стрічкою). Поверх його знаходиться прозорий шар, роль якого часто виконує вода. Енергія лазерного імпульсу поглинається непрозорим шаром, що призводить до його нагрівання, випаровування та формування високотемпературної плазми, обмеженої з одного боку поверхнею матеріалу, а з іншого – прозорим шаром, що стримує поширення плазми. Внаслідок обмеженого обсягу тиск газу різко зростає до високих значень і проходить в матеріал, створюючи в ньому ударну хвилю, яка призводить до появи в матеріалі напружень, що стискають. Якщо ці напруження перевищують пружну межу Гюгоніо [5], то матеріал пластично деформується. Непрозорий шар служить захистом від прямого контакту поверхні зразка з лазерно-індукованою плазмою, а також допомагає узгодити властивості поверхні взаємодії з лазерним випромінюванням, незалежно від фактичних властивостей зразка. Схематично цей процес зображено на рисунку 1.8.

Основними перевагами лазерного зміцнення є:

- підвищення межі витривалості та збільшення зносостійкості оброблених деталей;
- збільшення терміну служби виробу;
- збереження властивостей після нагрівання у процесі експлуатації;

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- підвищення мікротвердості поверхні;
- екологічна чистота, відсутність робочих газів.

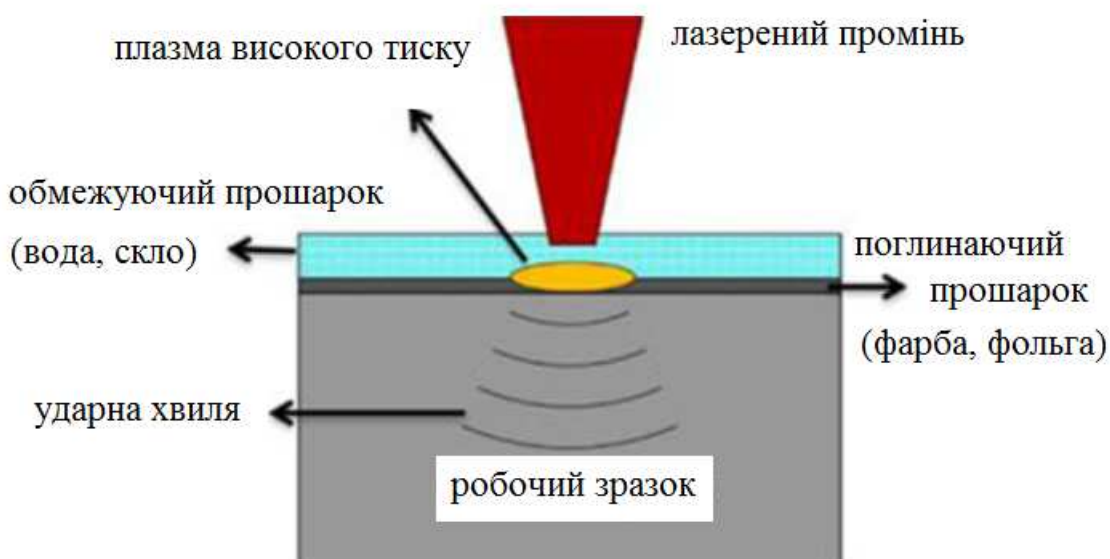


Рисунок 1.8 – Лазерне ударне зміцнення.

Починаючи з перших досліджень, процес лазерного зміцнення показав великий потенціал та застосування на промисловому рівні, особливо для критично важливих компонентів. Завдяки створенню стискаючих залишкових напружень більшої глибини та можливості тонкого налаштування параметрів процесу, ця технологія значно покращила механічні властивості та робочі характеристики багатьох матеріалів, що використовуються в промисловості.

Тільки за період з 1996 по 2001 р. було випущено більше 25 патентів на використання лазерного зміцнення, і з кожним роком їх кількість зростає. Розвиток лазерної промисловості дозволило розширити сферу застосування даної технології. Наприклад, такі пристрої, як скануючий промінь і волоконні лазери дозволяють обробляти деталі, розмір яких може варіюватися від декількох сантиметрів (форсунки) до декількох метрів (панелі крила).

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Особливий інтерес до технології лазерного наклепу виявляють аерокосмічні компанії. ЛУЗ застосовують при виробництві двигунів для зменшення втомних відмов різних компонентів.

Загальноприйнятою практикою стало застосування лазерного зміцнення до лопаток газових турбін.

Починаючи з 90-х років, компанія Toshiba використовує адаптовану віддалену систему лазерного зміцнення на атомних реакторах для запобігання корозійному розтріскуванню компонентів реактора.

Також проводяться розробки застосування зміцнення для біомедичних імплантатів зі сплавів Mg-Ca [3, 5]. Однак, не до кінця досліджено вплив залишкових напружень на сумісність імплантату та тканин тіла.

Останнім часом у літакобудуванні широко застосовується зварне з'єднання замість заклепувального, особливо для з'єднання стрінгерів, з метою зменшення ваги літака та збільшення міцності з'єднання. Однак використання лазерного з'єднання призвело до появи нової проблеми. Так як у разі заклепувального з'єднання стрінгер і фюзеляж - окремі деталі, то тріщина, що утворилася у фюзеляжі, не загрожує стрінгеру, на відміну від зварного з'єднання, де стрінгер і фюзеляж після зварювання є суцільною деталлю. Для запобігання розповсюдженню тріщини на стрінгер, ведуться дослідження щодо застосування лазерного зміцнення вздовж зварного шва, для збільшення резистивності до розповсюдження тріщини у цій галузі [5].

1.3. Титанові сплави

Легкість, висока питома міцність, вібростійкість та опір руйнуванню, стійкість проти повзучості та висока корозійна стійкість зробили титан та його сплави незамінними матеріалами у будівництві літаків, ракет, космічних апаратів та морських суден, у хімічному та енергетичному машинобудуванні, а також у багатьох.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Застосування титану як конструкційного матеріалу обумовлено сприятливим поєднанням його високої механічної міцності, антикорозійних властивостей, жароміцності та малої щільності. Окрім іншого, його механічні та корозійні властивості активно покращуються легуванням марганцем, хромом, алюмінієм, молібденом, кремнієм та бором.

Питома міцність (відношення міцності та щільності) кращих титанових сплавів досягає 30-35 кН·м²/кг і більше [6], що майже вдвічі перевищує питому міцність більшості легованих сталей. Саме ці властивості конструкційного матеріалу становлять особливий інтерес для літако - і ракетобудування. При підвищених температурах титанові сплави за міцністю перевищують високоміцні сплави алюмінію і магнію.

1.3.1. Застосування в авіабудуванні

Україна належить до тих країн світу, котрі мають майже повний цикл (макротехнологію), за винятком авіоніки, створення авіаційної техніки, та, безумовно, займає провідне місце на світовому ринку в секторі транспортної та регіональної пасажирської авіації. За рівнем розвитку авіабудування Україна належить до найбільш розвинених держав [7]. Таку промисловість мають декілька країн, котрі застосовують високі технології. Виробництво найбільших пасажирських літаків взагалі освоїли всього кілька держав світу. Найбільші літаки — аеробуси, що вміщують близько 850 (Airbus A380) пасажирів. Їх продукують компанії «Boeing» (США) і «Airbus» (Євросоюз). Менші літаки, виробляються в країнах ЄС (компанії «Saab AB» і «ATR»), в Бразилії («Embraer»), в Канаді («Bombardier»), в Ірані (HESA), а в Україні — на Харківському авіазаводі і на київському «Антонові». Слід відмітити, що деякі моделі літаків моделей «Ан», випереджають подібні світові зразки, на три роки.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

У 2007 році, було створено державний авіабудівний концерн «Авіація України», що об'єднав 10 підприємств авіапрому, зокрема київський авіазавод «Авіант», АНТК ім. Антонова, Запорізьке машинобудівне КБ «Прогрес», Харківське державне авіаційне виробниче підприємство (Харківський авіазавод). Цей концерн створювався задля «об'єднання розробників і виробників авіаційної техніки в єдиний комплекс з централізованим керуванням. Водночас, корпорацію «Національне об'єднання „Антонов“» було закрито.

Авіаційна промисловість є основним споживачем титанової продукції. Саме активне зростання в галузі авіаційної техніки дало поштовх титановому виробництву. За своїми фізико-механічними властивостями титанові сплави є універсальним конструкційним матеріалом.

Аж до кінця 60-х років 20 століття титан застосовувався переважно виготовлення газових турбін двигунів літаків. У 70 - 80-х роках його сплави почали широко застосовуватися для виготовлення різних деталей планерної частини літаків [7].

В даний час з титану роблять обшивку літака, деталі, що піддаються впливу високих температур, силові елементи, деталі шасі. У авіаційних двигунах жароміцні титанові сплави використовуються виготовлення лопаток, дисків та інших елементів вентиляторів і компресорів двигунів.

У конструкції сучасного літака може бути більше 20 тонн титану. Наприклад, у літаку Боїнг-787 встановлюють близько 2,5 мільйона титанових заклепок, що полегшує вагу літака на кілька тонн (порівняно із заклепками, зробленими із сталі).

Нижче наведено основні напрямки використання титану в авіаційній техніці:

1. Для виготовлення виробів складної просторової форми:
 - окантування люків і дверей, де можливе скупчення вологи (використовується висока корозійна стійкість титану);

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- обшивка, на яку діє струмінь продуктів згорання двигуна, протипожежні перегородки (використовується висока температура плавлення);

- тонкостінні трубопроводи повітряної системи (титан менший від усіх інших металів розширюється під впливом температури);

- настил підлоги вантажної кабіни (використовується висока міцність та твердість).

2. Для виготовлення вузлів та агрегатів, що зазнають сильних навантажень:

- стійки шасі;

- силові елементи (кронштейни) крила;

- гідроциліндри.

3. Виготовлення частин двигуна:

- диски та лопатки (рисунок 1.9);

- корпуси двигунів.



Рисунок 1.9 – Титанові лопатки двигуна

В Україні та більшості інших країн, що активно розвивають авіаційну промисловість, немає жодного авіаційного двигуна літака чи гелікоптера, де

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

б не застосовувалися титан та його сплави: Ан-70, (рисунок 1.10), Ан-178, АН-148, тощо.



Рисунок 1.10 – Літаки моделей «Ан»

Однак авіація це далеко не єдина сфера застосування титану. Крім неї титанові сплави застосовується в суднобудуванні, ракетобудуванні, хімічній та нафтохімічній промисловостях.

У суднобудуванні титан використовується завдяки здатності металу протистояти корозії у морській воді та витримувати значні механічні навантаження. З нього виготовляють гребні гвинти, вали, обшивку корпусів, теплообмінники, глушники для двигунів підводних човнів, дисків вимірювальних приладів. Мала питома вага титанового сплаву дозволяє зробити кораблі максимально маневреними, а стійкість матеріалу до солоної води дає змогу скоротити періодичність обслуговування підводних частин судна.

Крім суднобудування, титанові сплави застосовуються у хімічній та нафтохімічній промисловостях [6, 7]. Цінності цього конструкційного матеріалу в цих галузях полягає не лише у зниженні експлуатаційних витрат та безаварійності роботи, а й у протистоянні агресивним та отруйним середовищам. Вироби з цього металу стійкі до високих тисків та температур. З титану роблять насоси, компресори, фільтри та трубопроводи для фармацевтичних засобів.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1.3.2. Титановий сплав ОТ4-0

Титановий сплав ОТ4-0 відрізняється високою технологічністю та корозійною стійкістю. Основними легуючими елементами є алюміній, марганець, залізо та цирконій. З інших домішок слід відзначити кремній, кисень, вуглець, азот та водень. Хімічний склад регламентується ГОСТ 19807-91. Кристалічні грати сплаву ОТ4-0 має клас структурою псевдо α . Матеріал термічно не зміцнюється, добре деформується у гарячому та холодному станах, зварюваність без обмежень. Титан ОТ4-0 використовується виготовлення деталей складної форми, які працюють при середніх і високих температурах. Він широко затребуваний у різних галузях сучасного машинобудування.

Хімічний склад марки ОТ4-0 % згідно з ГОСТ 19807-91 відображено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад титанового металу ОТ4-0

Хімічний елемент	Вміст сплаву, %
Титан	96.13 – 98.8
Залізо	до 0.3
Вуглець	до 0.1
Кремній	до 0.12
Марганець	до 0.5-1.3
Азот	до 0.05
Алюміній	до 0.4–1.4
Цирконій	до 0.3
Кисень	до 0.15
Водень	до 0.012

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Основні механічні властивості титанового сплаву ОТ4-0 вказані у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Механічні властивості титанового металу ОТ4-0

Густина	4457 кг/м ³
Межа міцності	650 МПа
Межа плинності	550 МПа
Модуль Юнга	0,32

1.4 Концентратори напружень

Концентрація напружень – це місцеве підвищення напружень в елементах конструкцій, обумовлене різкими переходами в поперечних перерізах, пов'язаними з наявністю отворів, виточок, викруток, канавок тощо, які називаються концентраторами. Концентратори напружень можна розділити на дві групи зовнішні та внутрішні.

Зовнішні концентратори напружень є найчастіше конструктивні елементи:

- отвори;
- канавки;
- зовнішні елементи зварних швів;
- переходи елементів з різною товщиною та інше.

Внутрішніми концентраторами напружень є найчастіше різні дефекти внутрішньої будови металів та зварних швів:

- структурна неоднорідність;
- неметалічні включення;
- тріщини внутрішні та зовнішні

На рисунку 1.11 показані графіки розподілу напружень у перерізі смуги, що розтягується, ослабленої круглим отвором (рисунок 1.11, а) і напівкруглими викружками або галтелями (рисунок 1.11, б).

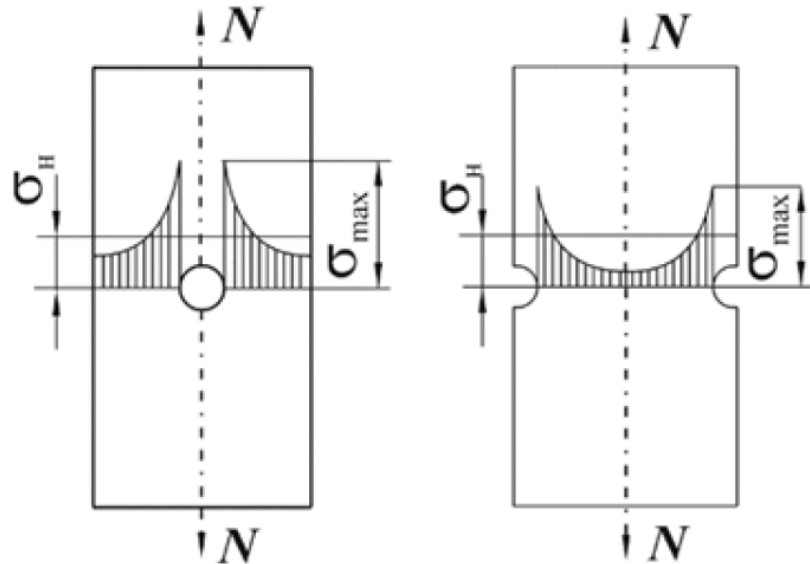


Рисунок 1.11 – Характерні концентратори напружень

Максимального значення напружень досягають у безпосередній близькості від концентратора (наприклад, у краю отвору) і обмежуються дуже невеликою частиною площі поперечного перерізу, тобто. мають місцевий характер. Тому напруження у місць концентрації називають місцевими напруженнями [5].

З концентрацією напружень доводиться рахуватися при конструюванні та розрахунку міцність деталей машин. Слід уникати глибоких витоків, викруток, різких переходів перерізів, біля яких виникає концентрація напружень, що сприяє передчасному руйнуванню матеріалу. Потрібно також прагнути ретельної обробки поверхонь деталей. Навіть дрібні сліди від шліфувального кола можуть зменшити межу міцності матеріалу при розтягуванні на 15-20 %.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

1.5 Сучасні дослідження в галузі лазерного ударного зміцнення

Поверхнєве зміцнення стало невід'ємною частиною промислових операцій. Цей процес має покращити механічні та металургійні властивості виробів, такі як втомна довговічність, корозійна стійкість, зносостійкість та ерозійна стійкість [3]. Саме тому останніми роками дедалі більше досліджень проводиться у сфері поверхневого зміцнення зразків шляхом створення залишкових напружень [6].

Одним із найперспективніших методів є лазерне ударне зміцнення (ЛУЗ). Застосування ЛУЗ дозволяє підвищити втомну довговічність і зносостійкість. ЛУЗ також показало придатність обробки складних геометрій за рахунок технологічних особливостей, у той час як при використанні аналогічних методів це може бути важкодоступним [8, 9].

У багатьох роботах проводиться порівняння ЛУЗ з дробоструминною обробкою (ДО), так як вона є найбільш широко використовуваним методом поверхневого зміцнення у виробництві. Наприклад, у роботі [9] було показано, що лазерне зміцнення має значні переваги, пов'язані з глибиною та величиною залишкових стискаючих напружень. Для ілюстрації цього явища були виміряні залишкові напруження у зразках, виконаних з матеріалу Інконель 718, після лазерної та дробоструминної обробок. Результати представлені рисунку 1.12. Даний графік наочно демонструє переваги ЛУЗ перед ДО.

Ще одна перевага ЛУЗ у порівнянні з дробоструминною обробкою була представлена у статті [10]. Metal Improvement Company (MIC) вивчала вплив різних методів створення залишкових напружень на втомні властивості зразків з отворами в центрі, виконаних з алюмінієвого сплаву Al 6061-T6. Втомна довговічність зразків, оброблених лазером, перевищує довговічність зразків, оброблених дробом, приблизно в 10 разів, як

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

проілюстровано рисунку 1.13. Ця відмінність обумовлена величиною і глибиною залишкових напружень.

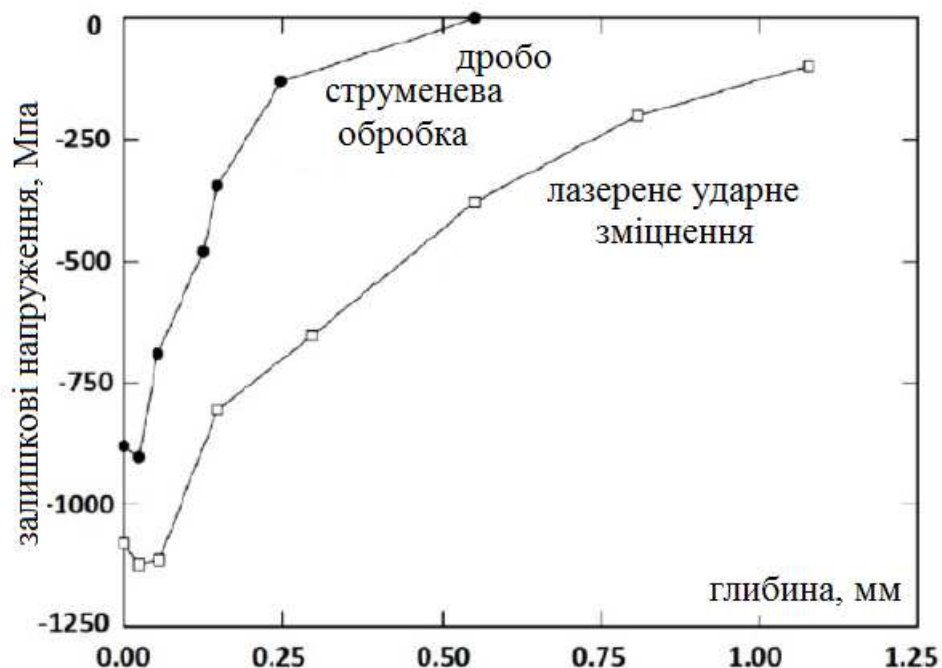


Рисунок 1.12 – Профіль залишкових напружень в Інконель 718 до та після ЛУЗ

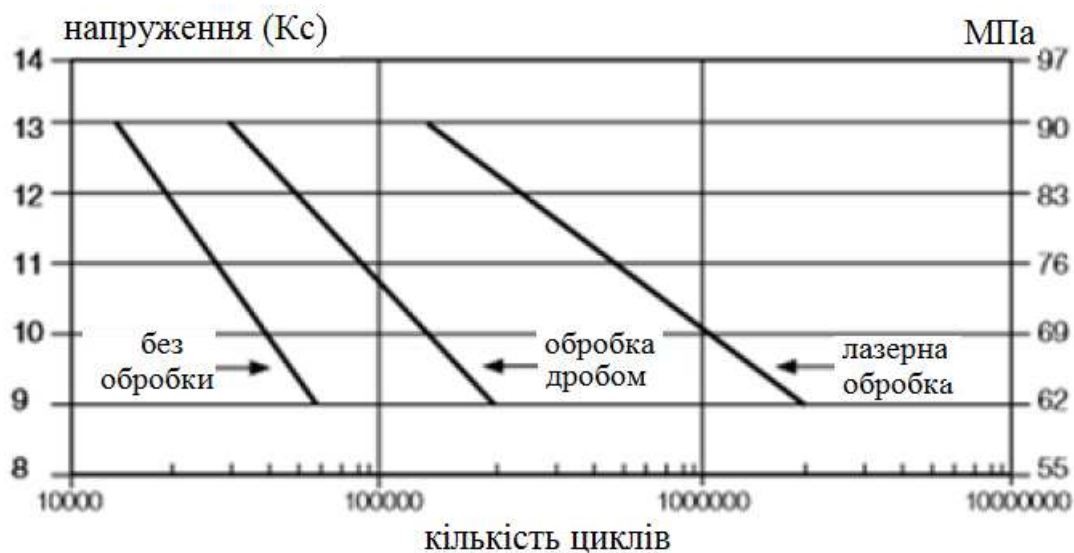


Рисунок 1.13 – Випробування на втому алюмінієвих зразків [11]

Як і в будь-якого іншого технологічного процесу, у лазерного зміцнення є набір параметрів, що впливають на якість обробки та підсумкові властивості матеріалу.

У роботі [12] досліджувався вплив щільності потужності лазера на розподіл залишкових напружень за товщиною зразка та втомну довговічність зразків. Геометрія зразків, що випробовуються, показана на рисунку 1.14.

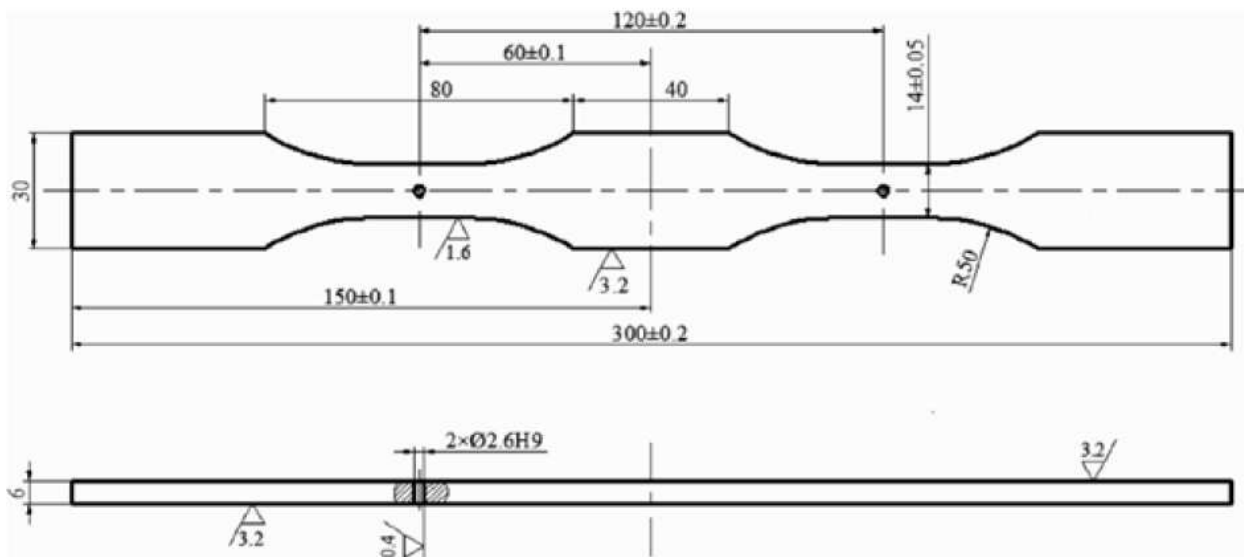


Рисунок 1.14 – Геометрія зразків з Al 7050-T7451 [12]

Досліджуваний матеріал – сплав Al 7050-T7451. Для поверхневого зміцнення був використаний Q-switched лазер з довжиною імпульсу 20 нс, довжиною хвилі 1064 нм, діаметром плями 2,6 мм, перекриття було вибрано 50 %. Енергія лазерного імпульсу була 3 Дж, 4 Дж, 5 Дж, 6 Дж, 11,3 Дж. Відповідні щільності потужності дорівнювали 2,83 ГВт/см², 3,77 ГВт/см², 4,71 ГВт/см², 5,65 ГВт/см² та 10,62 ГВт/см². Втомні випробування проводилися за допомогою додатку асиметричного циклу з максимальним напруженням 195 Мпа і коефіцієнтом асиметрії циклу 0,1. В результаті випробувань було виявлено, що збільшення густини потужності лазера спочатку призводить до збільшення втомної довговічності, потім до

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ				

зниження, а після цього знову до збільшення. Кількість циклів та поліпшення від ЛУЗ для різних густин потужності можна побачити на рисунку 1.15. При різних густинах потужності ми маємо різні розподіли залишкових напружень, місця зародження тріщин теж відрізнятимуться. Швидкість зростання тріщини також залежить від густини потужності імпульсу. Таким чином, це дослідження говорить про те, що ключем до поліпшення втомної довговічності отворів кріплення є підбір правильних параметрів лазера.

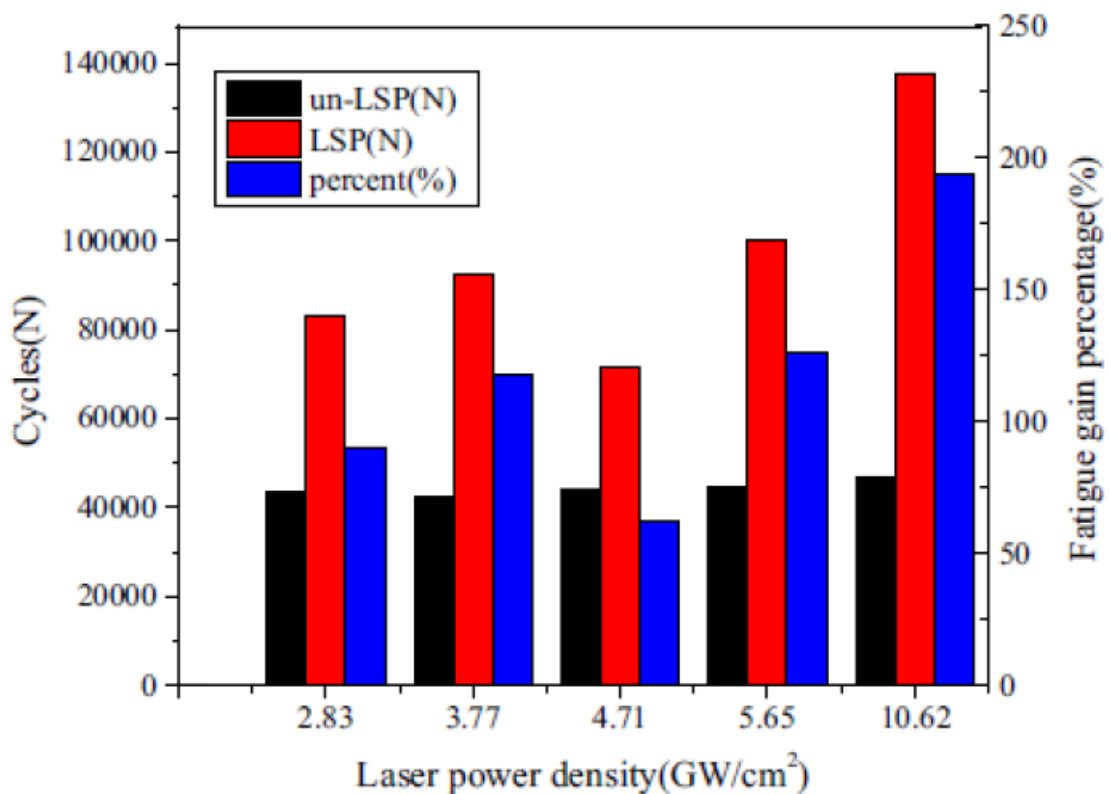


Рисунок 1.15 – Експериментальна залежність кількості циклів від густини потужності лазера [12]

У дослідженні [13] вивчається вплив на втомну довговічність таких факторів, як кількість перекриттів лазерної плями та енергія лазерного імпульсу. Зразки для випробувань виготовлялися з алюмінієвого сплаву АА2024-Т3, їх геометрія представлена рисунку 1.16, ширина дорівнює 50 мм.

Лазерне зміцнення проводилося за допомогою Nd:YAG лазера з довжиною імпульсу 10 нс, довжиною хвилі 1064 нм та частотою 10 Гц. Бралось два значення енергії лазера 3 Дж і 1,3, а також два розміри лазерної плями: 1×1 мм та 3×3 мм. Кількості перекриттів – 1, 2, 3 та 5.

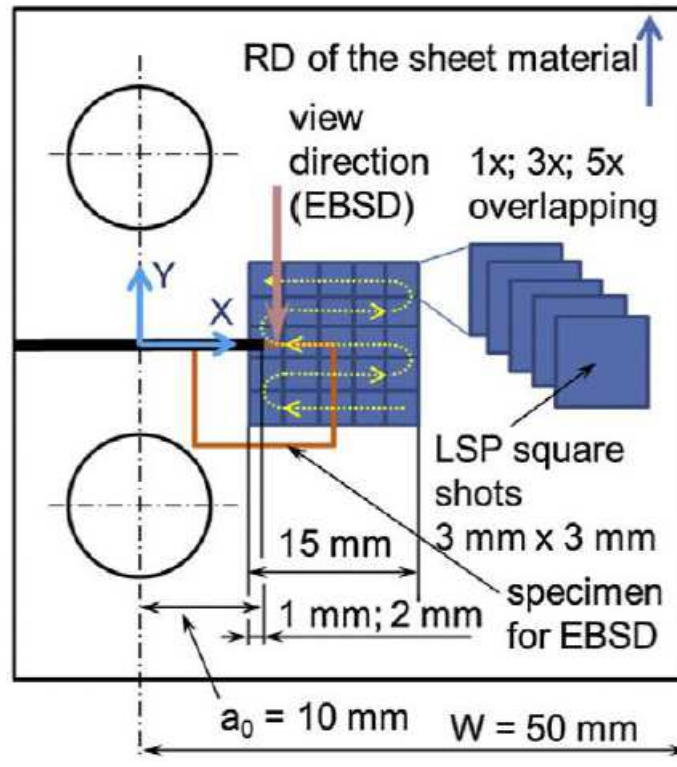


Рисунок 1.16 – Геометрія зразків з AA2024 для втомних випробувань [13]

Випробування поширення втомної тріщини (ПВТ) проводилися на сервогідралічній машині. Кожен набір зразків досліджувався в тих самих умовах випробувань – максимальне навантаження 25 кН, амплітуда циклу 11,25 кН, середнє напруження циклу 13,75 кН, $R=0.1$, частота 10 Гц і кімнатна температура.

На рисунку 1.17 представлені результати дослідження впливу лазерної обробки на втомну міцність зразків. Критерієм закінчення експерименту була величина, що дорівнює відношенню довжини тріщини до ширини отворів під штифт. Її граничним значенням було значення 0,6. Рисунок 1.17 (а) демонструє результати випробувань оброблених зразків, для зміцнення яких використовувалася оптика 1x1 мм. З графіка видно, що ЛУЗ з енергією 1,3

						ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			34

Дж збільшило ресурс майже вдвічі. Збільшення одного з параметрів ЛУЗ (кількість перекриттів чи величини енергії), збільшує втомну довговічність вдесятеро.

На рисунку 1.17 (б) відібрано аналогічні результати для зразків з ЛУЗ, значення оптики якої було 3x3 мм. Наочно можна побачити, що збільшення кількості перекриттів дає значний приріст втомної довговічності порівняно з БМ.

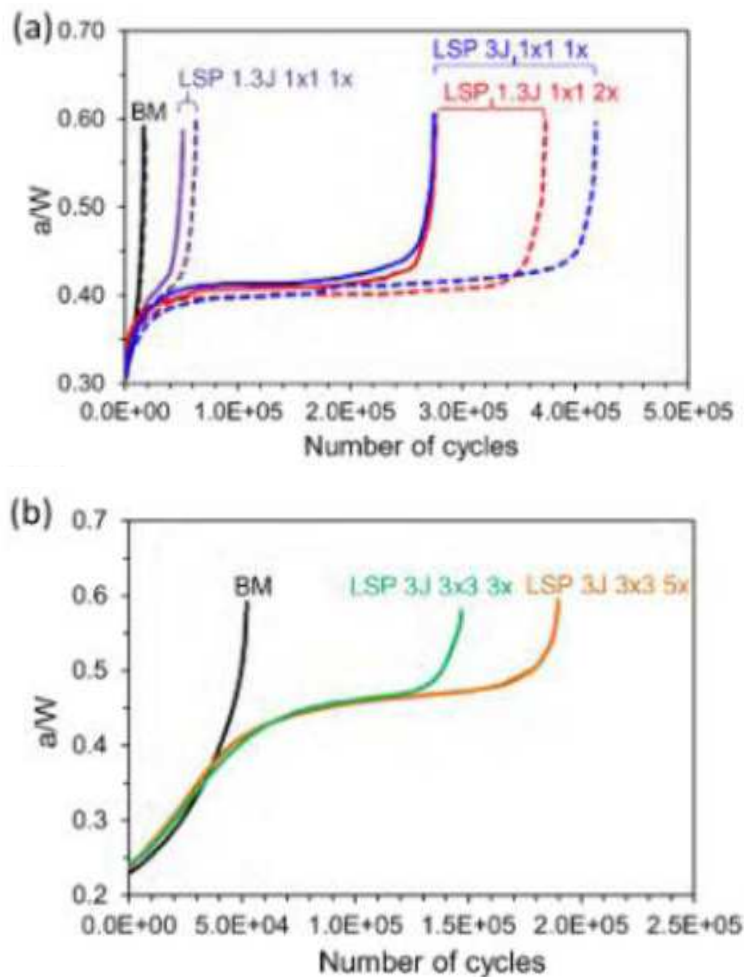


Рисунок 1.17 – Результати випробувань поширення тріщини при різних параметрах лазерного зміцнення [13]

У статті [14] розглядався вплив на втомний ресурс такого фактора як напрям лазерного зміцнення щодо спрямування прокату. В експерименті

використовувалися зразки з нержавіючої сталі Duplex 2205, геометрія яких представлена на рисунку 1.18.

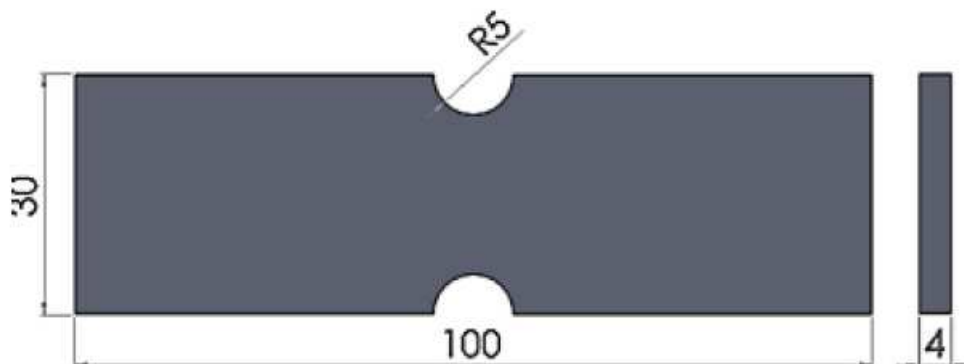


Рисунок 1.18 – Геометрія зразків із нержавіючої сталі Duplex 2205 [15]

У випробуваннях на втому відповідно досліджувалися три типи зразків: без обробки, обробка паралельно прокату та перпендикулярно прокату. Максимальна амплітуда напружень – 300 МПа, а коефіцієнт асиметрії циклу – 0.1. Результати втомних випробувань відображені на рисунку 1.19.

Експериментально показано, що обробка ЛУЗ в обох напрямках (паралельному та перпендикулярному напрямку прокату) усуває залишкові напруження через виробничий процес і створює високу стискаючу залишкову напруження з різним розподілом для кожного напрямку відповідно до анізотропії, що спостерігається у нержавіючій сталі. Було продемонстровано, що ЛУЗ є ефективним методом підвищення втомної довговічності у зразках. За допомогою завдання напрямку зміцнення, перпендикулярного напрямку прокату, збільшення втомного ресурсу досягає значення 79% при 275 МПа амплітуди напружень, тоді як при напрямку обробки паралельному напрямку прокату збільшує втомний ресурси всього на 35 % при тому ж рівні напружень.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

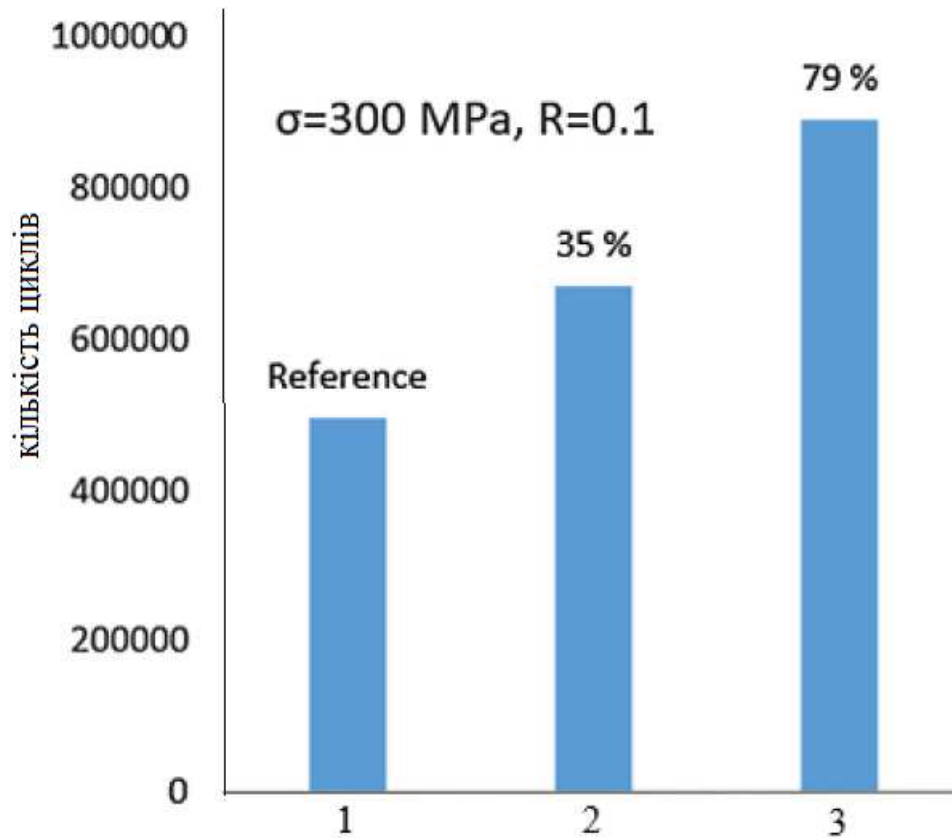


Рисунок 1.19 – Порівняння втомних властивостей зразків з різними напрямками лазерної обробки:

1 – без ЛУЗ, 2 – з ЛУЗ паралельно до прокату, 3 – з ЛУЗ перпендикулярно до прокату [15]

2. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Теоретичні відомості

2.1.1. Параметри циклу

Так як у втомних випробуваннях напруження, що діють на зразок, постійно змінюється за величиною та знаком, має сенс говорити про цикл. У даному випадку цикл - це одноразова зміна напружень, тобто сукупність послідовних значень напружень за період. Також варто зазначити, що тут буде розглянуто лише одновісне навантаження.

Залежно від характеру повторно-змінних навантажень, цикли напружень ділять на знаковмінний симетричний, знаковмінний асиметричний, пульсуючий та знакопостійний (рисунок 2.1).

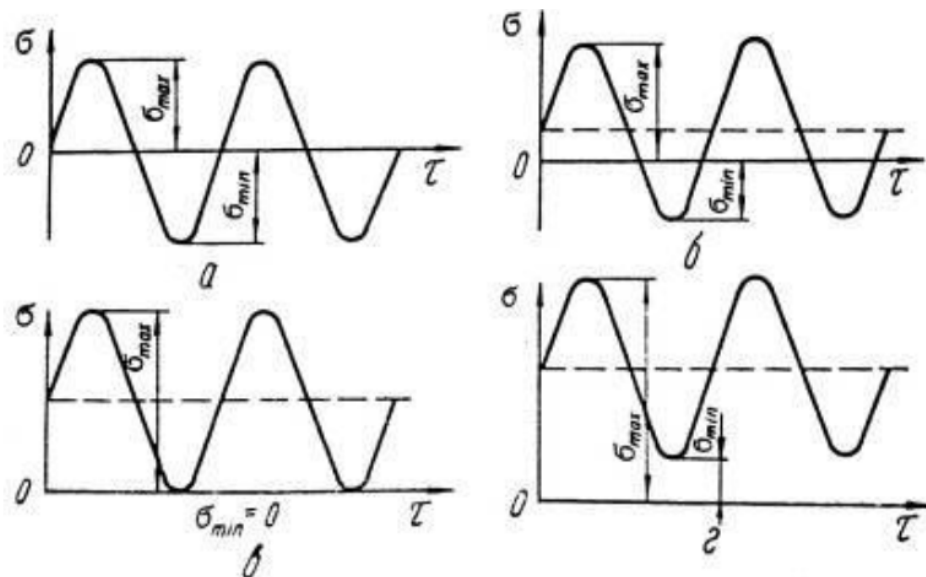


Рисунок 2.1 – Характер повторно-змінних навантажень під час випробування на втому:

а – знаковмінний симетричний, б – знаковмінний асиметричний, -
пульсуючий, г - знакопостійний

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Цикл характеризується кількома основними величинами:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{– амплітудою,}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{– середнє напруження,}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad \text{– коефіцієнт асиметрії,}$$

де σ_{min} – мінімальне напруження циклу, σ_{max} – максимальне напруження циклу.

Якщо максимальне значення напружень та мінімальне значення напружень чисельно рівні між собою, але протилежні за знаком, то цикл називається симетричним. Якщо ж максимальне та мінімальне напруження не рівні між собою, цикл називається асиметричним [3].

Будь-який асиметричний цикл можна уявити як результат накладання симетричного циклу на постійне середнє напруження. Досвід показує, що руйнування матеріалу при змінних напруженнях настає не відразу, а після багаторазової зміни навантаження, причому число циклів, при якому відбувається руйнування, виявляється тим менше, що вище максимальне напруження циклу.

Експериментально встановлено, що число циклів, за якого відбувається руйнація, залежить не тільки від величини максимального (за абсолютним значенням) напружень, але і від амплітуди коливання напружень. Чим більше σ_a при тому самому σ_{max} , тим менше змін навантаження витримає матеріал. Тому з усіх циклів найнебезпечнішим є симетричний.

Експериментальним шляхом також встановлено, що для багатьох матеріалів існує таке значення максимального напруження, що залежить від

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ступеня асиметрії циклу, при якому матеріал витримує необмежену кількість змін навантаження (циклів).

2.1.2. Ймовірнісний характер явища втоми

Втомне руйнування і особливо його перша стадія носить яскраво виражений статистичний характер, оскільки залежить від індивідуальних особливостей полікристалічної будови кожного зразка. Так, навіть за найсуворішому дотриманні однорідності умов випробувань зразки з одного і того ж матеріалу при однакових максимальних напруженнях руйнуються при суттєво різних кількостях циклів. Розкид руйнівних величин циклів може досягати у своїй двох і більше порядків. Величина розкиду збільшується зі зменшенням рівня максимальних напружень та відповідним збільшенням кількості циклів, необхідних для руйнування зразка.

В останні роки інтенсивно розвиваються ймовірнісні методи розрахунку на міцність при напруженнях змінних у часі. Ці методи ґрунтуються на ймовірнісній оцінці розсіювання втомних характеристик матеріалу, що визначаються шляхом випробувань досить великої партії зразків, що мають однаковий склад та геометрію, на різних рівнях максимальних напружень циклу [3].

Статистичний аналіз проблем втоми потребує статистичної функції розподілу відповідних змінних. На жаль, статистичні розподіли для втомних проблем не можуть бути виведені із фізичного опису явища втоми. Як наслідок, повинна бути прийнято статистична функція розподілу. Найбільш відомою такою функцією є функція нормального розподілу (інакше називається функцією Гауссового розподілу). Рівняння для ймовірності значень $v \leq x$ має такий вигляд:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2} dv \quad (2.1)$$

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

У цьому рівнянні μ – середнє значення, σ – середньоквадратичне відхилення, ν - змінна інтегрування. Лінійна залежність між функцією $P(x)$ та змінною x (тут кількість циклів навантаження) показана на рисунку 2.2. Нахил прямої лінії залежить від σ . Зазвичай як змінною x приймається $\log(N)$ для оцінки результатів аналогічних втомних випробувань [16].

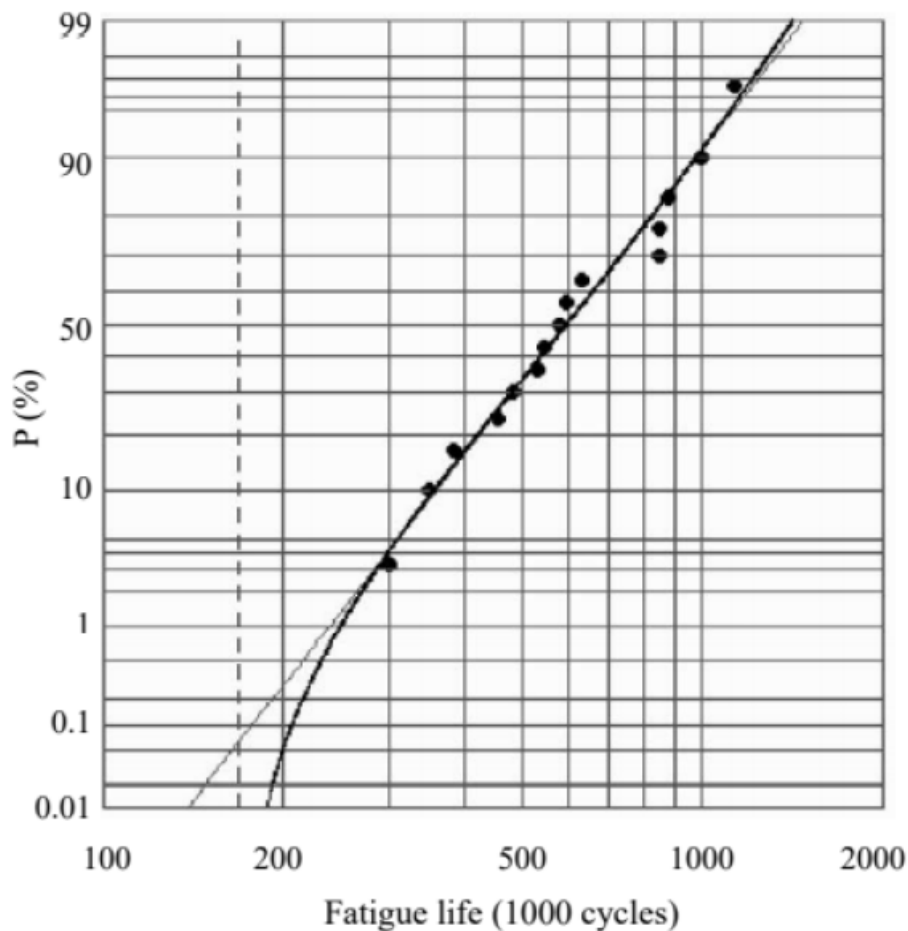


Рисунок 2.2 – Залежність ймовірності руйнування зразків кількості циклів навантаження: пряма лінія – це нормальний розподіл, крива – розподілу Вейбулла. [16]

Іншою популярною функцією розподілу є трипараметрична функція розподілу Вейбулла, що описується наступним виразом:

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^b} \quad (2.2)$$

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

У цьому рівнянні три параметри. Функція має нижню межу x_0 , для якого $P(x)=0$. Це означає, що довговічність не може опуститися нижче значення N_0 де $x_0=\log(N_0)$. Це робить цю функцію розподілу більш реалістичною. Параметр a називається параметром масштабу, а b – параметром форми з урахуванням їхнього впливу на криву щільності ймовірності. В деяких публікаціях x_0 приймається рівним нулю, роблячи таким чином функцію розподілу Вейбулла двопараметричною.

Третя застосовувана функція також є трипараметричною з нижньою межею втомної довговічності. У ній застосовується все також функція ймовірності (2.1), однак x виходить з наступного рівняння:

$$x = \log(N - N_0) \quad (2.3)$$

Насправді ця функція розподілу все також визначає нормальний розподіл, однак у ній є третій параметр – параметр розташування, роль якого відіграє нижню межу довговічності N_0 . Для подібних випробувань ймовірність відмови визначається такою формулою:

$$P = \frac{i - 0,4}{n + 0,2}, \quad (2.4)$$

де n – число результатів випробувань; i – рангове число для даних втомної довговічності в порядку зростання (Ранг 1 має зразок з найменшою довговічністю).

У цій роботі буде використовуватись двопараметричний розподіл Вейбулла. Він дозволяє оцінити розкид навантаження та довговічності, які можна порівняти з експериментальними даними. Функція двопараметричного розподілу Вейбулла наведена в наступному рівнянні [17]:

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^b} \quad (2.5)$$

Функція має два параметри: b – параметр форми розподілу та T – параметр масштабування. Параметр форми також відомий як нахил Вейбулла. Це пов'язано з тим, що значення дорівнює нахилу лінії графіка ймовірності. Різні значення параметра форми можуть помітно впливати на поведінку розподілу. На практиці деякі значення параметра форми можуть призвести до того, що рівняння розподілу Вейбулла буде зведено до рівнянь інших розподілів. Так, наприклад, експоненційний розподіл є окремим випадком розподілу Вейбулла, в якому $b = 1$ [18]. Параметр b є безрозмірним числом.

Графік на рисунку 2.3 чудово ілюструє нахил графіка ймовірності змінюється залежно від значення параметра форми. З $b < 1$ мають частоту відмов, яка зменшується з часом (ранні відмови). Розподіли Вейбулла з b , близьким або рівним 1 мають постійну частоту відмов. Розподіли Вейбулла з $b > 1$ мають частоту відмов, що збільшується з часом (відмови при зносі). Усі прямі представлені на графіці мають однаковий параметр масштабу.

Крім того, що за параметром форми можна судити про нахилі ймовірнісного графіка, цей параметр також має і прикладний зміст. Якщо його значення менше одиниці (цей період називають періодом ранніх відмов), це може вказувати на:

- нестача адекватного контролю процесу;
- незадовільне розбракування за примусовою відмовою або за навантаженням;
- проблеми виробництва, неправильне складання, поганий контроль якості;
- опрацювання або знос.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

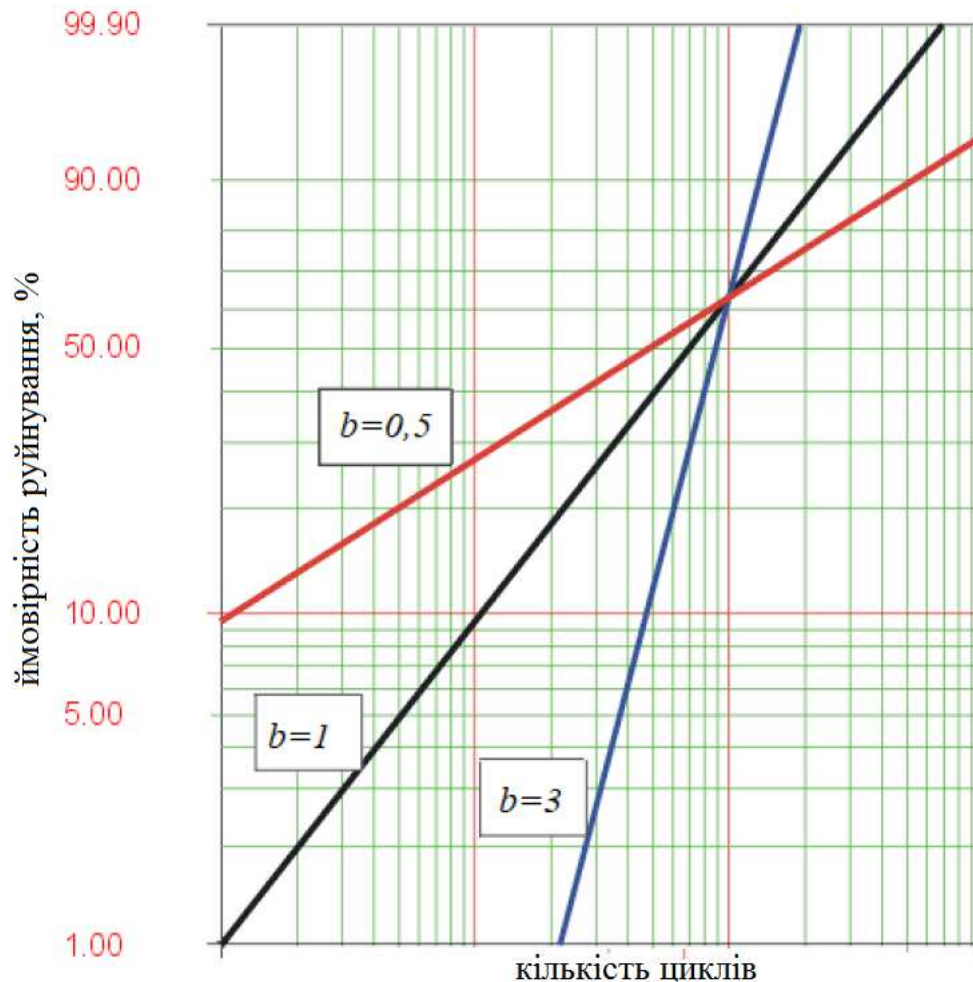


Рисунок 2.3 – Вплив параметра форми на нахил імовірного графіка

Коли параметр форми дорівнює одиниці, це вважається періодом випадкових відмов, оскільки у часі відбуваються випадково. Тому можна припустити будь-яку з таких ситуацій:

- наявність випадкових помилок технічного обслуговування, помилки персоналу;
- наявність випадкових перевантажень;
- відмови, пов'язані з особливостями об'єкта, природні ушкодження, спричинені зовнішніми об'єктами, удари блискавки;
- змішування даних про напрацювання за трьома та більше режимами відмов.

У тому випадку, коли параметр b більше одиниці говорять про спрацювання. деякими типовими прикладами цього випадку є:

- знос;
- корозія;
- множинні тріщини;
- втома;
- поглинання вологи;
- дифузія;
- випаровування (втрата ваги);
- накопичення ушкоджень.

Значення параметра масштабу T є напрацюванням, протягом якого в середньому руйнуються 63,2 % об'єктів, що спостерігаються [18]. Значення, що дорівнює 63,2 %, отримано при підстановці $N=T$ у формулу (2.5).

2.2. Обладнання та зразки для досліджень

У ході експерименту використовувалися дві партії зразків: для вимірювання залишкових напружень та для випробувань на втому. Обидві партії були з одного матеріалу – титановий сплав OT4-0. Геометрія зразків представлена на рисунках 2.4 та 2.5.

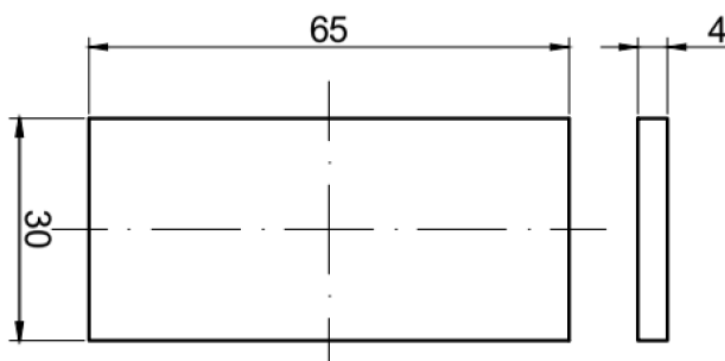


Рисунок 2.4 – Геометрія зразків для вимірювання залишкових напружень

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

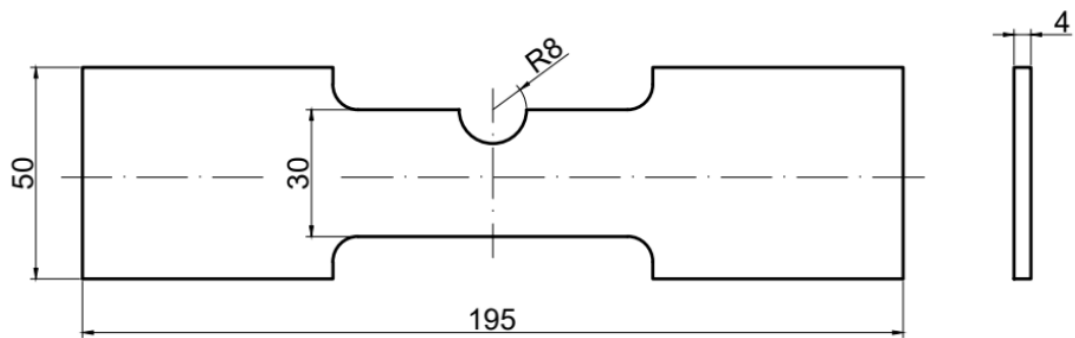


Рисунок 2.5 – Геометрія зразків для втомних випробувань

Лазерна установка. Залишкові напруження створювалися з допомогою імпульсного лазерного випромінювання лазера Nd:YAG. Зовнішній вигляд установки лазерного зміцнення в час роботи представлений рисунку 2.6. Параметри установки зведені у таблицю 2.1. Основні елементи установки: Nd:YAG лазер (рисунок 2.7), шестикоординатний робот-маніпулятор КУКА (рисунок 2.8), зразок, система подачі води, система подачі повітря.

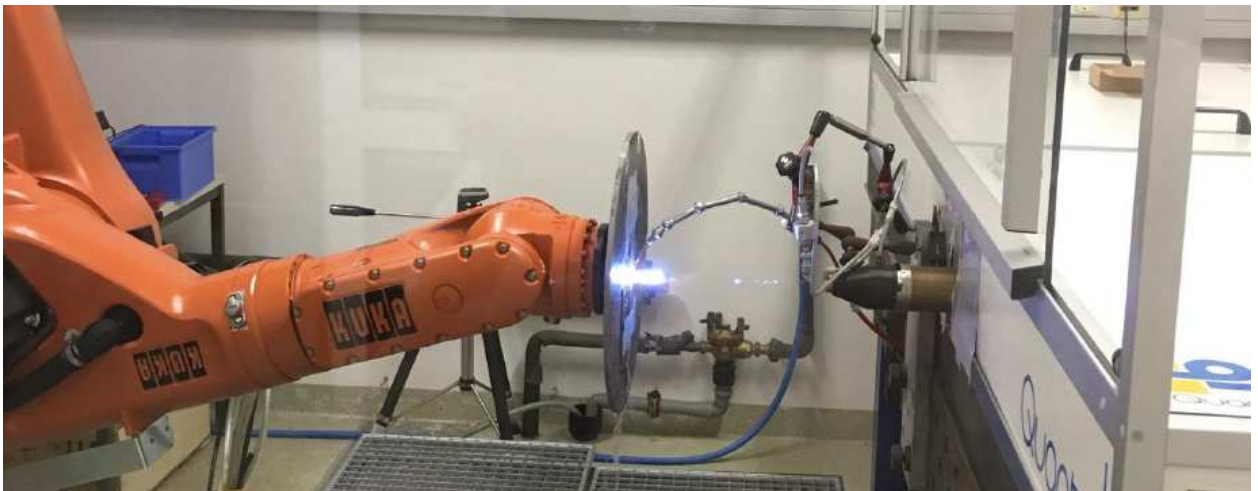


Рисунок 2.6 – Встановлення лазерного ударного зміцнення під час роботи

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 2.7 – Nd:YAG лазер

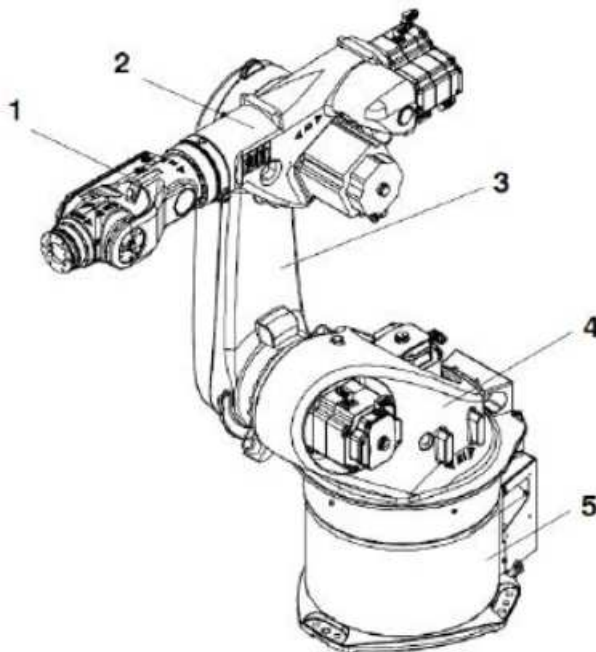


Рисунок 2.8 – Робот-маніпулятор КУКА 30 НА [19]: 1 – зап'ястя; 2 – рука; 3 – ланка руки; 4 - колона, що обертається; 5 – опора

Таблиця 2.1 – Характеристики лазерної установки

Параметр	Величина
Довжина хвилі, нм	1064
Максимальна енергія імпульсу, Дж	5
Тривалість імпульсу, нс	10, 20
Частота імпульсів, Гц	10

Розглянемо докладніше лазерну систему [20]. Для налаштування системи застосовується гелій-неоновий лазер. Для транспортування випромінювання використовуються поворотні дзеркала із оптичного скла. Оскільки на виході потрібно отримати високі значення енергії та короткі тривалості імпульсу, застосовується підсилювальний режим генерації, тобто система: генератор, що задає - підсилювач. У такій системі осцилятор формує первинний лазерний імпульс із необхідними оптичними характеристиками, а потім з допомогою каскадів посилення здійснюється перетворення необхідного рівня енергії.

Тривалість імпульсу першого осцилятора – 10 нс (рисунок 2.9), другого – 20 нс. Вибір осцилятора здійснюється за допомогою блока керування. Кожен осцилятор складається з генератора, що задає (циліндр Nd:YAG діаметром 6 мм), накачування якого відбувається за допомогою двох імпульсних ксенонових ламп.

Повна схема оптичного блоку представлена рисунку 2.10. Він складається з:

- Двох осциляторів, що забезпечують імпульси з частотою повторення 10 Гц та гаусової форми імпульсу за часом. Тривалість імпульсу першого осцилятора 10 нс, другого – 20 нс.
- Першого ступеня посилення, який у свою чергу складається з двох лазерних головок з активним середовищем (Nd:YAG) діаметром 9 мм, що

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

працюють на частоті 10 Гц. На цій стадії посилення відбувається від 300 мДж до 2 Дж.

- Другий шабель, що складається з двох головок діаметром 16 мм. Посилення відбувається від 2 Дж до 5 Дж.

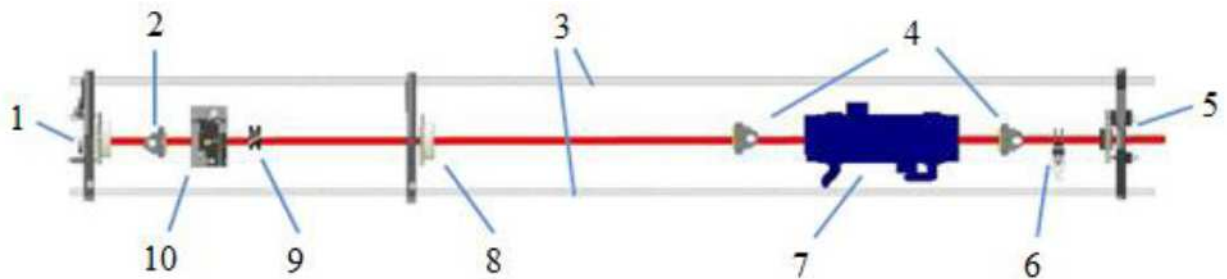


Рисунок 2.9 – Схема осцилятора:

1 – глухе дзеркало резонатора; 2 – чвертьхвильова платівка; 3 – вуглепластикові стінки; 4 – апертури 5 мм; 5 – вихідне дзеркало резонатора; 6 – електромеханічний затвор; 7 – модуль накачування; 8 – лінза; 9 – поляризатор; 10 – комірка Поккельса

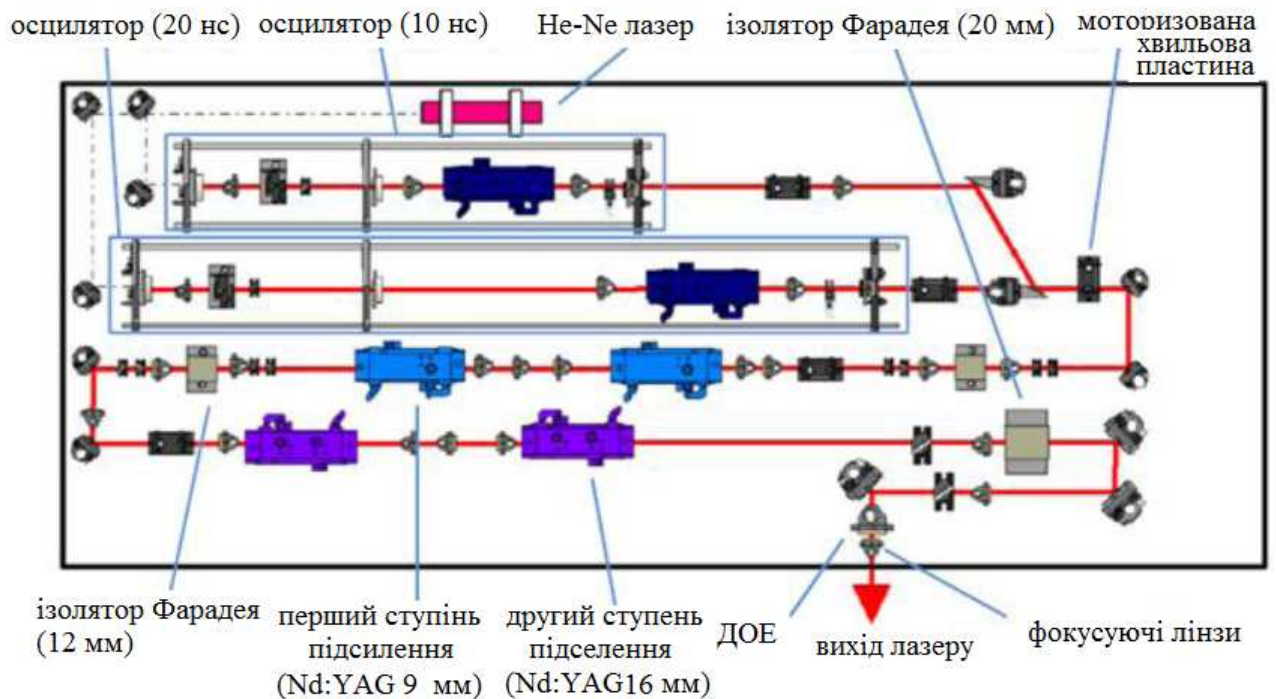


Рисунок 2.10 – Схема оптичного блоку

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Дифракційні оптичні елементи, які гомогенізують просторовий розподіл інтенсивності лазерного випромінювання на відстані 300 мм від вихідного вікна. Енергія випромінювання в площині фокусування 5 Дж. Доступні 3 оптичні системи для різних розмірів плями: 1x1 мм, 3x3 мм, 5x5 мм.

2.2.3. Вимірювання залишкових напружень методом свердління отворів

Сучасні методи вимірювання розподілу залишкових напружень за товщиною в матеріалах зазвичай включають покрокові вимірювання деформації поверхні у міру поступового видалення напруженого матеріалу. Прикладами таких методів є свердління отворів або кільцевих проточок, нарізка канавок та пошарове видалення матеріалу. У даній роботі для вимірювання залишкової напружень використовувався метод свердління отворів у поєднанні з електронною спекл-інтерферометрією.

Метод свердління отворів ґрунтується на бурінні невеликого отвору в досліджуваному матеріалі. Це призводить до перерозподілу залишкових напружень навколо нього (рисунок 2.11), після чого проводять вимір деформацій релаксації та на основі цих вимірювань оцінюють залишкові напруження у шарі [21].

Стандартна система для проведення подібних вимірювань Prism (рисунок 2.12) включає такі елементи: блок підсвічування, джерело лазерного випромінювання, відео блок з системою оптичного збільшення, оптоволоконні кабелі; оптичний стіл, встановлення високошвидкісного свердління, контролер переміщень та комп'ютер.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

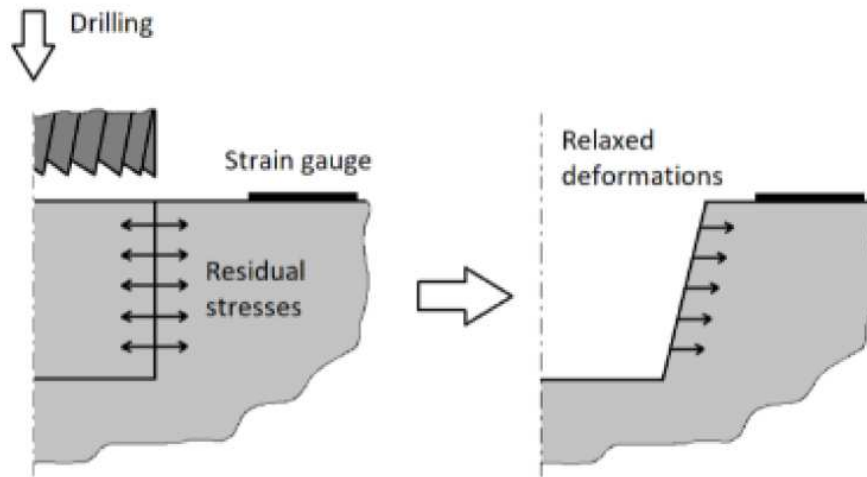


Рисунок 2.11 – Метод свердління отворів [22]

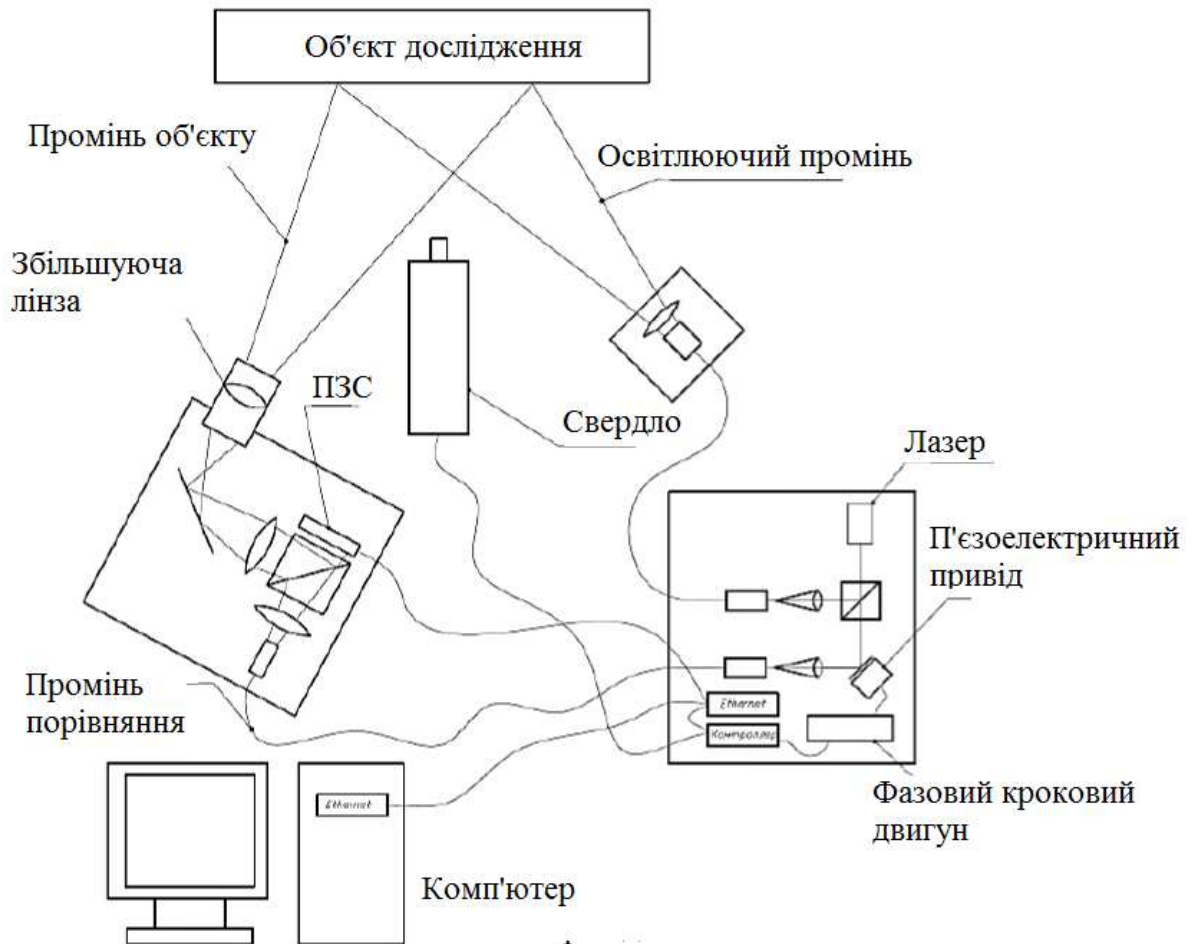


Рисунок 2.12 – Схема установки Prizm для вимірювання залишкових напружень

Спеклінтерферометрія - це один із методів просторової інтерферометрії, заснований на аналізі зернистої структури зображення об'єкта. Основні характеристики установки вимірювання залишкових напружень наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики установки Prism

Параметр	Значення
Довжина хвилі, нм	532
Потужність випромінювання, мВт	5
Діаметр свердла, мм	0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 2.0
Швидкість обертання свердла, об/хв	5000-30000
Швидкість подачі свердла, мм/с	0.4; 0.05; 0.01

Принцип роботи установки полягає в наступному: випромінювання лазерного джерела поділяється на предметний та опорний пучок. Предметний пучок висвітлює поверхню зразка, зображення якого формуються в ПЗЗ - матриці. А опорний пучок проходить через п'єзоелектричний фазообертач і далі оптоволоконним кабелем потрапляє безпосередньо на поверхню ПЗЗ - матриці. Ці два пучки поєднуються на даній поверхні для формування електронної спекл - структури. Локальна фаза цієї структури визначається в кожній точці поверхні набором із чотирьох зрушених по фазі електронних спекл - структур. Деформація вимірюваної поверхні оцінюється за допомогою створення послідовного набору спекл - структур, зрушених по фазі, обчислення локальних фазових кутів та віднімання початкових вимірювань фазового кута. Такі набори для спекл - структур виходять кожної глибини свердління, яку ми вибираємо на початку роботи.

Основні переваги методу:

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

- легкість підготовки зразків (у них має бути чиста поверхня з низьким коефіцієнтом відбиття);
- висока швидкість аналізу (5-30 хвилин);
- простота роботи з пристроєм (автоматичне свердління, яке контролюється комп'ютером);
- висока роздільна здатність (вимір залишкових напружень з точністю 7 МПа);
- можливість вимірювання напружень на одній певній глибині або отримання всього профілю розподілу напружень;
- отримання повного аналізу, корегування результатів якого не потрібне;
- мінімальний контакт із поверхнею матеріалу, тензометричні датчики не потрібні;
- можливість вимірювання напружень у будь-якому матеріалі.

Оскільки для вимірювання залишкових напружень руйнування здійснюються тільки на невеликій ділянці деталі, даний метод розглядається як випробування з частковим руйнуванням зразка.

Програмне забезпечення має різні методи виміру залишкових напружень. Результати надаються у вигляді графіків та таблиць. Prism зберігає дані на комп'ютері. Програма розраховує горизонтальні та вертикальні складові напружень.

2.2.4. Втомні випробування

Для проведення втомних випробувань застосовувалася серво - гідравлічна машина Schenck (рисунок 2.13). Дана система розділена на статичну та динамічну частини і дозволяє виконувати динамічні випробування за будь-якого обраного ступеня асиметрії циклу R . Великий стіл машини з Т-подібними пазами та регульований вертикальний простір

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

для випробувань дозволяють проводити випробування широкого діапазону деталей з різними розмірами. Робоча частота вбирається у 20 Гц.



Рисунок 2.13 – Серво-гідравлічна машина Schenck

Машина складається з силової рами, силового гідравлічного приводу, датчика сили, датчика переміщень, допоміжних пристроїв для підтримки, фіксації або захоплення зразків, комплексу вимірювально-обчислювального і керуючого (далі контролер), гідравлічної станції.

Силова рама складається з нерухомої основи із закріпленими на ньому двома або чотирма сталевими напрямними колонами та поперечини. Поперечка може переміщатися на колонах для зміни робочого простору між

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

основою та поперечкою з фіксацією у необхідному положенні стопорами. Силовий гідравлічний привід монтується на рамі і приводиться в дію тиском, що створюється гідравлічною станцією.

Випробуваний зразок встановлюється між рухомим елементом силового приводу та нерухомими елементами рами за допомогою допоміжних пристроїв. Сила, що створюється силовим приводом і прикладається до зразка, що випробовується, вимірюється датчиком сили. Датчик переміщення, розташований усередині приводу, вимірює лінійне переміщення рухомого силового елемента гідравлічного приводу. Сигнали від датчиків сили та переміщення надходять у контролер.

2.2.5 Мікроструктурні дослідження

Для кращого розуміння впливу ЛУЗ на втомну довговічність, поверхні руйнування випробуваних зразків спостерігалися під мікроскопом. Для дослідження мікроструктури після проведення втомних випробувань було взято чотири зразки. Перша пара зразків – базовий матеріал та зразок з ЛУЗ, які випробовувалися при 500 МПа, а друга – при 100 МПа. Дослідження структури проходило на електронному мікроскопі JEOL JSM-6490LV (рисунок 2.13), основні параметри якого представлені в таблиці 2.3.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55



Рисунок 2.13 – Скануючий електронний мікроскоп JEOL JSM-6490LV

Таблиця 2.3 – Основні характеристики мікроскопа JEOL JSM-6490LV

Нитка напруження	Вольфрам
Напруженья	25 кВт
Струм випромінювання	75 мкА
Кут нахилу зразка	0°
Робоча відстань	10 мм
Діафрагма	30 мкм
Збільшення	35х-3000х

2.3. Програма випробувань

Основне завдання експерименту було визначення впливу лазерного ударного зміцнення на втомну довговічність титанових зразків.

На першому етапі проводилося лазерне зміцнення та вимірювання залишкових напружень зразків першої партії, їх геометрія була наведена в пункті 2.2.1. Усього випробовувалося п'ять зразків. Вони піддавалися лазерній обробці з метою знаходження оптимальних параметрів ЛУЗ другого етапу випробувань. Вимірювання залишкових напружень проводилося з використанням методу свердління отворів.

Після цього розпочинався другий етап експериментів. Для нього використовувалися зразки другої партії, що складалася із 20 штук. Половина їх піддавалася ЛУЗ, друга – ні (базовий матеріал).

Спочатку п'ять необроблених зразків випробовувалися на малоциклову втому з фіксованим значенням напруження 500 МПа. Потім ті ж таки тести проводилися з обробленими зразками. Це робилося для того, щоб для малоциклової втоми була можливість побудувати розподіл Вейбулла.

Зразки, що залишилися, випробовувалися при різних напруженнях, величина якої дорівнювала 375, 250, 150, 100, 90 і 80 МПа. Різні величини були взяті для того, щоб зразки вийшли з малоциклової зони і перейшли в перехідну та зону втоми багатоциклової. На основі отриманих результатів будувалася крива Велера.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вимірювання залишкових напружень

Лазерна обробка зразків першої партії проводилася за допомогою лазера, пристрій якого описано в пункті 2.2.2.

Виходячи з огляду літератури були обрані такі параметри обробки, які представлені в таблиці 3.1. Було вирішено зробити кілька тестів для порівняння їх впливу на якість обробки та величину залишкової напружень.

Таблиця 3.1 – Параметри ЛУЗ зразків першої партії

Зразок	Енергія, Дж	Тривалість імпульсу, нс	Кількість перекриттів
1	5	20	1
2	5	20	2
3	3	10	1
4	3	10	2
5	3	10	3

Зона обробки також була підібрана з аналогічних досліджень. Наприклад, у роботі [22] було показано, що обробка конкретної обмеженої області набагато ефективніша, ніж обробка зразка по всій його ширині. Виходячи з цього, а також розмірів зразків була обрана зона ЛУЗ, показана на рисунку 3.1.

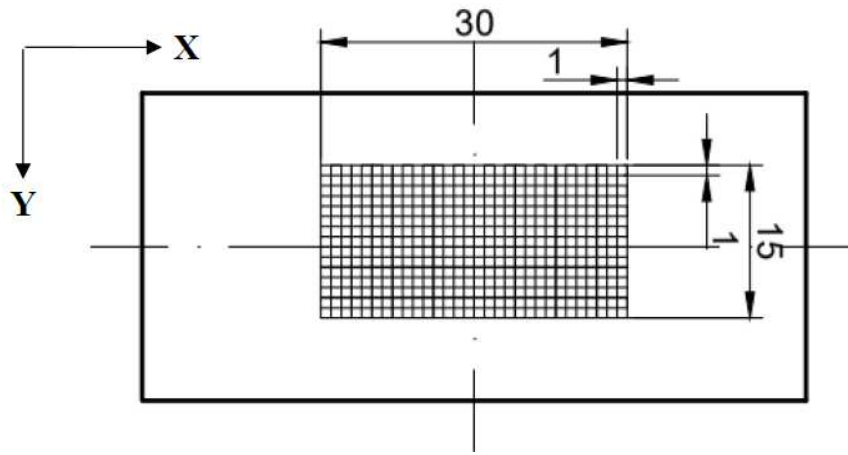


Рисунок 3.1 – Зона ЛУЗ для зразків із першої партії

Перед вимірюванням залишкових напружень на всі зразки була нанесена біла фарба для збільшення коефіцієнта відображення. Вимірювання залишкових напружень проводилися в трьох точках з двох сторін зразка (рисунок 3.2). Для вимірювання використовувалася система PRISM, описана у пункті 2.2.3. Використовувалося свердло діаметром 2 мм, глибина отвору 1 мм.



Рисунок 3.2 – Вимірювання залишкових напружень

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

В результаті були отримані значення напружень вздовж осей X і Y. На основі цих даних були обчислені середні значення та відхилення залишкових напружень і побудовані графіки цих напружень по глибині зразків, які показані на рисунках 3.3 – 3.6.

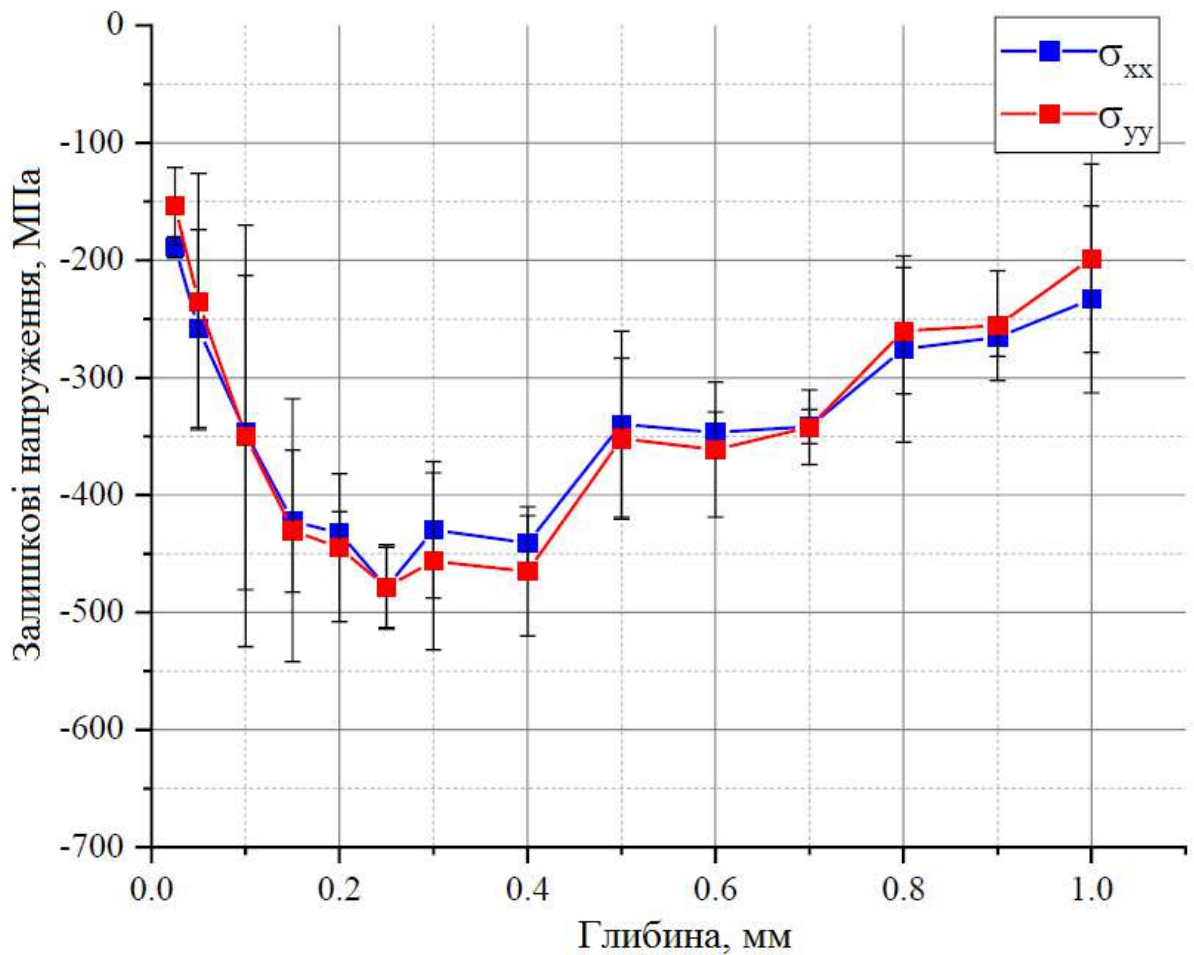


Рисунок 3.3 – Залишкові напружень у зразку, обробленому при 5 Дж та 20 нс з одноразовим перекриттям

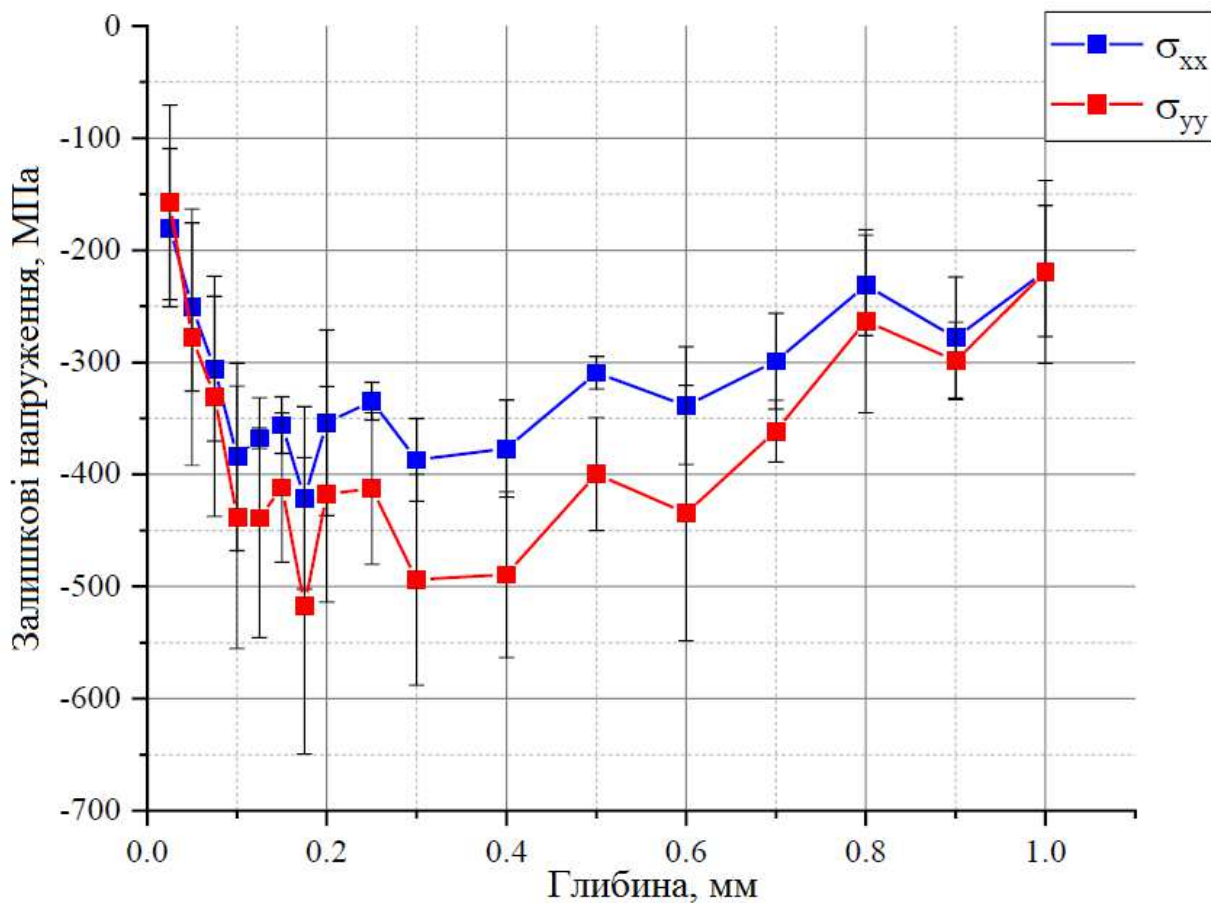


Рисунок 3.4 – Залишкові напружень у зразку, обробленому при 3 Дж і 10 нс з дворазовим перекриттям

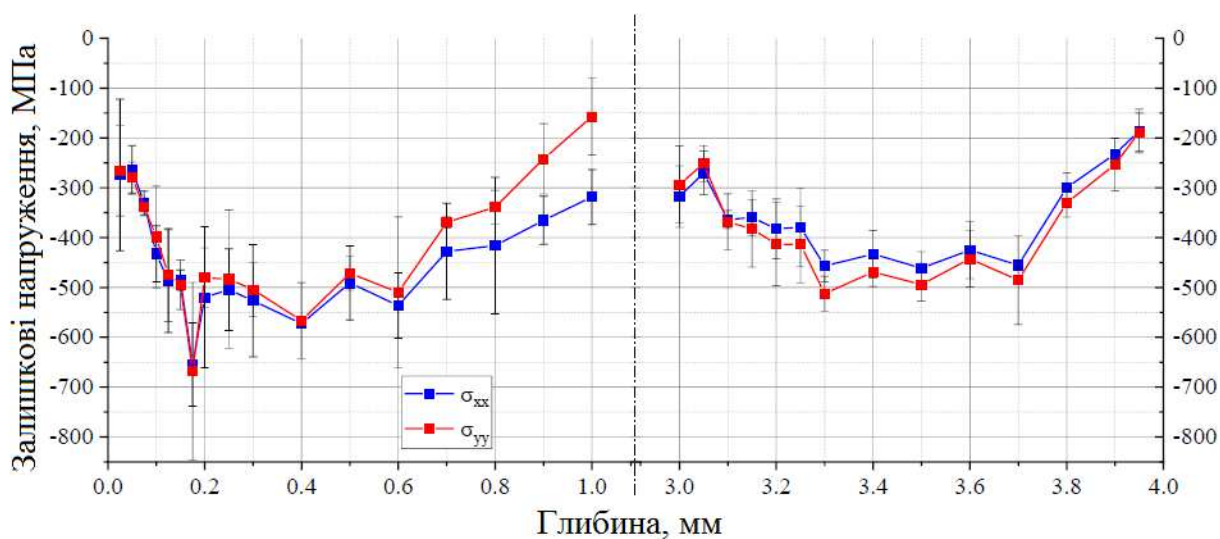


Рисунок 3.5 – Залишкові напружень у зразку, обробленому при 3 Дж і 10 нс з одноразовим перекриттям

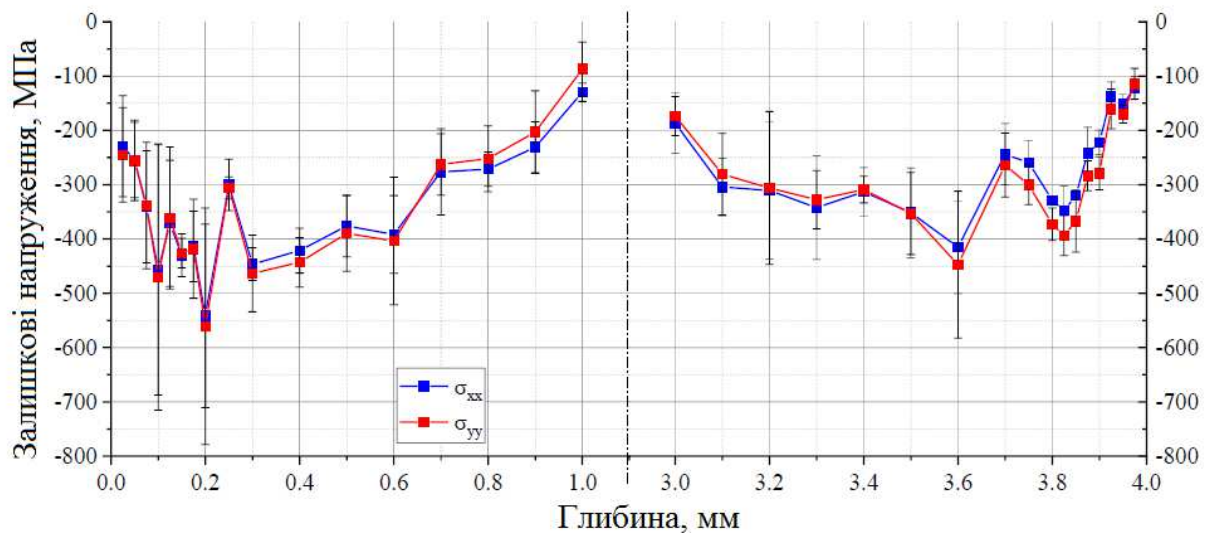


Рисунок 3.6 – Залишкові напружень у зразку, обробленому при 3 Дж і 10 нс з триразовим перекриттям

З графіків видно, що при триразовому перекритті поверхневі залишкові напруження виходять глибше, ніж при одноразовому. Проте, величини залишкових напружень відрізняються несуттєво. У свою чергу, складність та час обробки збільшується. Також варто зазначити, що у разі коли залишкові напруження перевищують 80 відсотків від межі плинності, як у випадку, з триразовим перекриттям, результати містять помилку і вимагають коригування, що докладно описано у [23].

Також окремо варто відзначити, що ЛУЗ зі значенням енергії в 5 Дж проходило з ускладненнями, пов'язаними з розривом металевої фольги, використаної як поглинаючий шар. Це призводило до деформування поверхні, що можна побачити на рисунку 3.7. Отриманий результат можна пов'язати з кількома факторами: поверхневі дефекти зразків, нещільне прилягання фольги, якість фольги.

Також дана проблема може траплятися при повторній обробці зразків. Виходячи з цього і факторів, описаних вище (приблизно однакові напружень, помилка у вимірах залишкових напружень) для другого етапу випробувань вибрали 3 Дж і 10 нс, так як цього достатньо для впровадження в матеріал

глибоких залишкових напружень, і даний процес легко відтворюємо і не вимагає великих часових витрат.



Рисунок 3.7 – Результат лазерної обробки зразка при 5 Дж.

Лазерна обробка зразків другої партії. Геометрія області лазерної обробки представлена рисунку 3.8. Обробка проводилася із двох сторін.

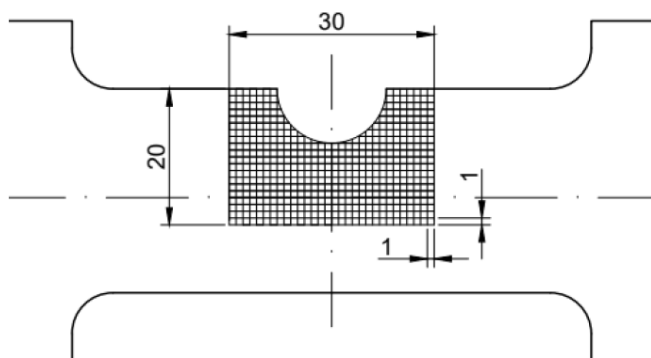


Рисунок 3.8 – Зона лазерної обробки

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Оброблений зразок, закріплений на підкладці, можна побачити на рисунку 3.9. Також для збереження цілісності фольги в процесі обробки були виготовлені круглі деталі, які поміщалися в напівкруглий отвір зразків.

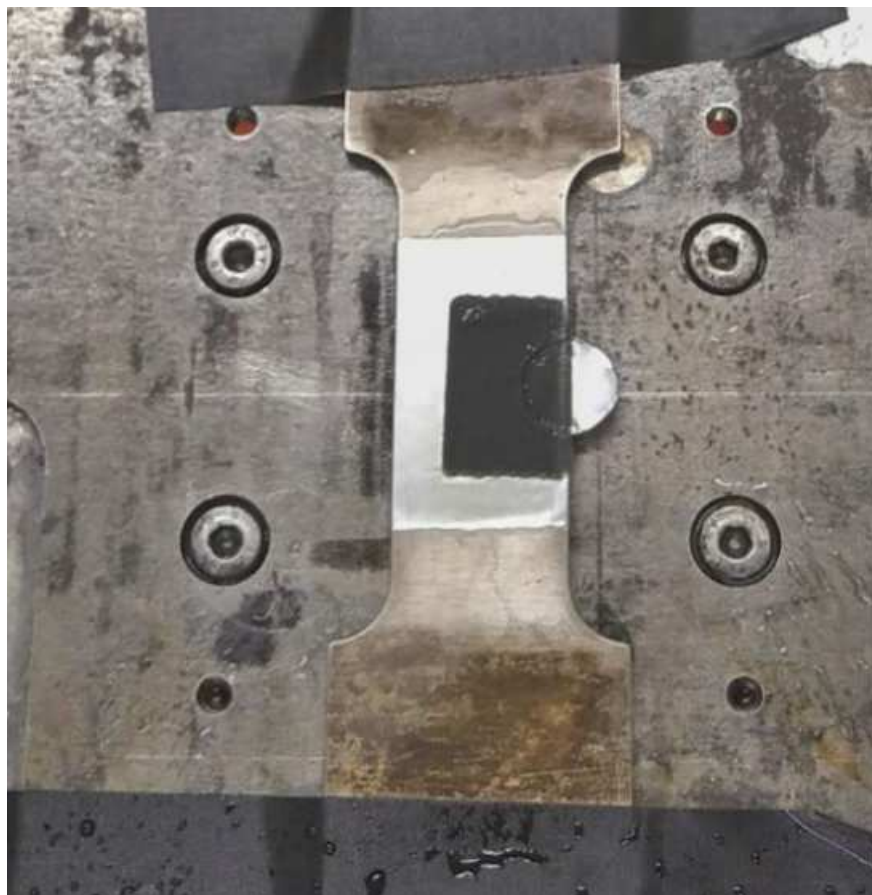


Рисунок 3.9 – Зразок після ЛУЗ.

У зв'язку зі складною геометрією, а саме - наявністю у зразків заокруглень, при обробці виникала проблема - на межі між отвором та круглою деталлю рвалася фольга, що призводило до невеликих дефектів на обробленій поверхні. Наочно це показано рисунку 3.10 і 3.11.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



Рисунок 3.10 – Деформація фольги після ЛУЗ.

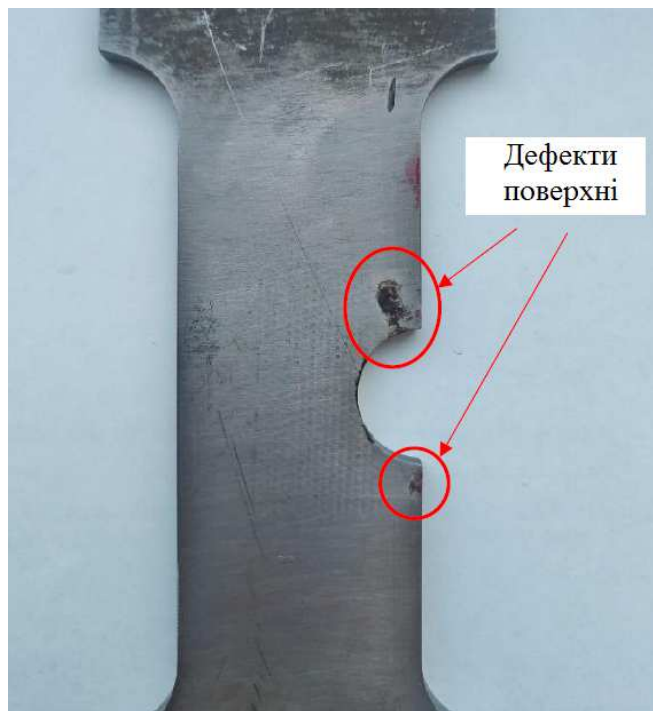


Рисунок 3.11 – Дефект поверхні після ЛУЗ

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

З цього приводу спочатку було зроблено припущення, що цей дефект не позначиться на подальших результатах. Подібне припущення обумовлено тим, що дефект поверхні відбувався у віддалених від зони концентратора напруг області. А саме в цій зоні має зростати тріщина, оскільки титан вкрай вразливий до концентраторів напружень. Також, забігаючи вперед, слід зазначити, що зразки, в яких було спотворення поверхні, показали хороші результати в процесі втомних випробувань, що робить наше вихідне припущення вірним, і дані поверхневі дефекти на краях зони обробки не мають істотного впливу на втомні властивості зразків.

3.2 Результати втомних випробувань

Втомні випробування зразків другої партії. Усі випробування можна умовно поділити на дві групи. Перша – це випробування у зоні малоциклової втоми. Виходячи з наукової роботи з дослідження малоциклової втоми титану [29], а також спираючись на величину межі плинності були обрані значення максимальних напружень 500 МПа, частоти 15 Гц, а коефіцієнт асиметрії циклу - 0,1. Для експериментів використовувалися 5 зразків без ЛУЗ та 4 з ЛУЗ. Забігаючи наперед слід зазначити, що з ЛУЗ було взято зразків менше, тому що позитивний ефект від обробки чітко проглядався після чотирьох випробувань. Саме тому було прийнято рішення залишити п'ятий зразок для експериментів у зоні багато циклової втоми, щоб отримати більше точок для σ -N кривої. Параметри циклу для випробувань у зоні мало циклової втоми наведено у таблиці 3.2.

Друга група випробувань – це випробування з різним рівнем навантаження з метою побудови кривої Велера, вони проводились у перехідній зоні та зоні багато циклової втоми. Випробовувалося 5 необроблених зразків та 6 оброблених. Параметри циклів представлені у таблиці 3.3. Частота у цьому експерименті була взята 10 Гц.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Таблиця 3.2 – Параметри циклу для випробувань у зоні мало циклової втоми.

Максимальне напруження, σ_{\max}	500 МПа
Мінімальне напруження, σ_{\min}	50 МПа
Ступінь асиметрії, R	0,1
Амплітуда циклу, σ_a	225 МПа
Середня напруга, σ_m	275 МПа

Таблиця 3.3 – Параметри циклу для випробувань із змінними напруженнями.

1	2	3	4	5	6	5*	№ Зразка
375	250	150	100	90	85	80	Максимальна напруга σ_{\max} , МПа
37,5	25	15	10	9	8,5	8	Мінімальна напруга σ_{\min} , МПа
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Ступінь асиметрії R
168,75	112,5	67,5	45	40,5	38,25	36	Амплітуда циклу σ_a , МПа
206,25	137,5	82,5	55	49,5	46,75	44	Середня напруга σ_m , МПа

П'ятий зразок випробовувався двічі. Спочатку при 80 МПа, і при цій напрузі він вийшов на межу втоми, витримавши 10 мільйонів циклів. А потім, так як руйнування та будь-яких деформацій не відбулося, він зазнавав при напрузі 90 МПа.

Результати першого етапу втомних випробувань для базових зразків наведені в таблиці 3.4. Результати представлені за зростанням втомної довговічності, а ймовірність відмови розраховувалася за формулою (2.4). Далі за отриманими експериментальними даними за допомогою пакету Origin будувався розподіл Вейбулла, описаний формулою (2.5). Воно наведено на рисунку 3.12. Параметр форми у цьому розподілі дорівнює 11,35; параметр масштабування – 1038

Таблиця 3.4 – Результати втомних випробувань для базового матеріалу.

Зразок	Кількість циклів	Імовірність руйнування, %
1	901	11,91
2	945	30,95
3	973	50
4	1013	69,05
5	1150	88,1

Далі в таблиці 3.5 наведено результати втомних випробувань для оброблених лазером зразків. Розподіл Вейбулла їм представлено на рисунку 3.13. Параметр форми у цьому розподілі дорівнює 10,65; параметр масштабування – 1774.

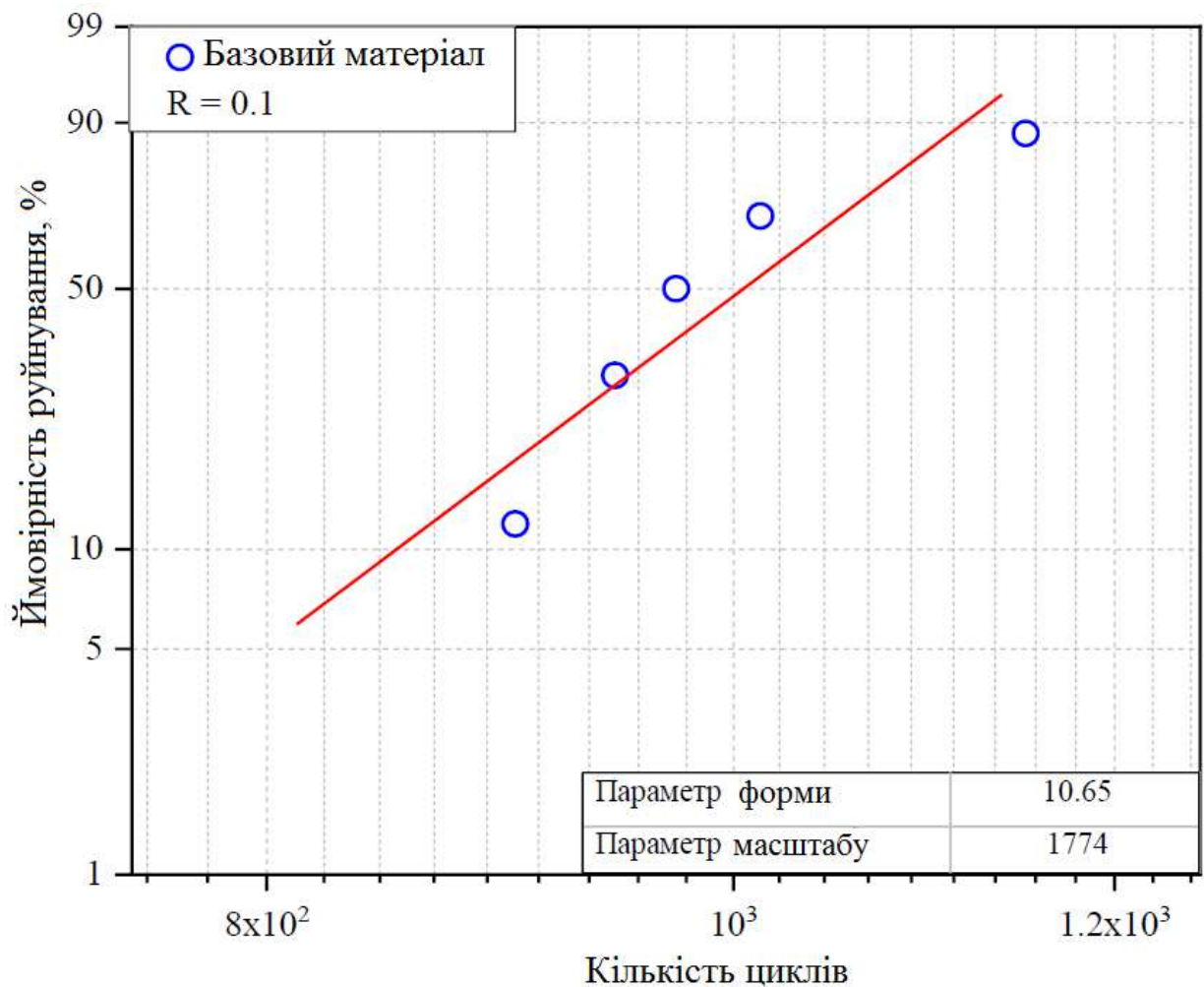


Рисунок 3.12 – Розподіл Вейбулла для базового матеріалу

Таблиця 3.5 – Результати мало циклових втомних випробувань оброблених зразків.

Зразок	Кількість циклів	Ймовірність руйнування, %
1	1491	14,71
2	1559	38,24
3	1786	61,77
4	1935	85,29

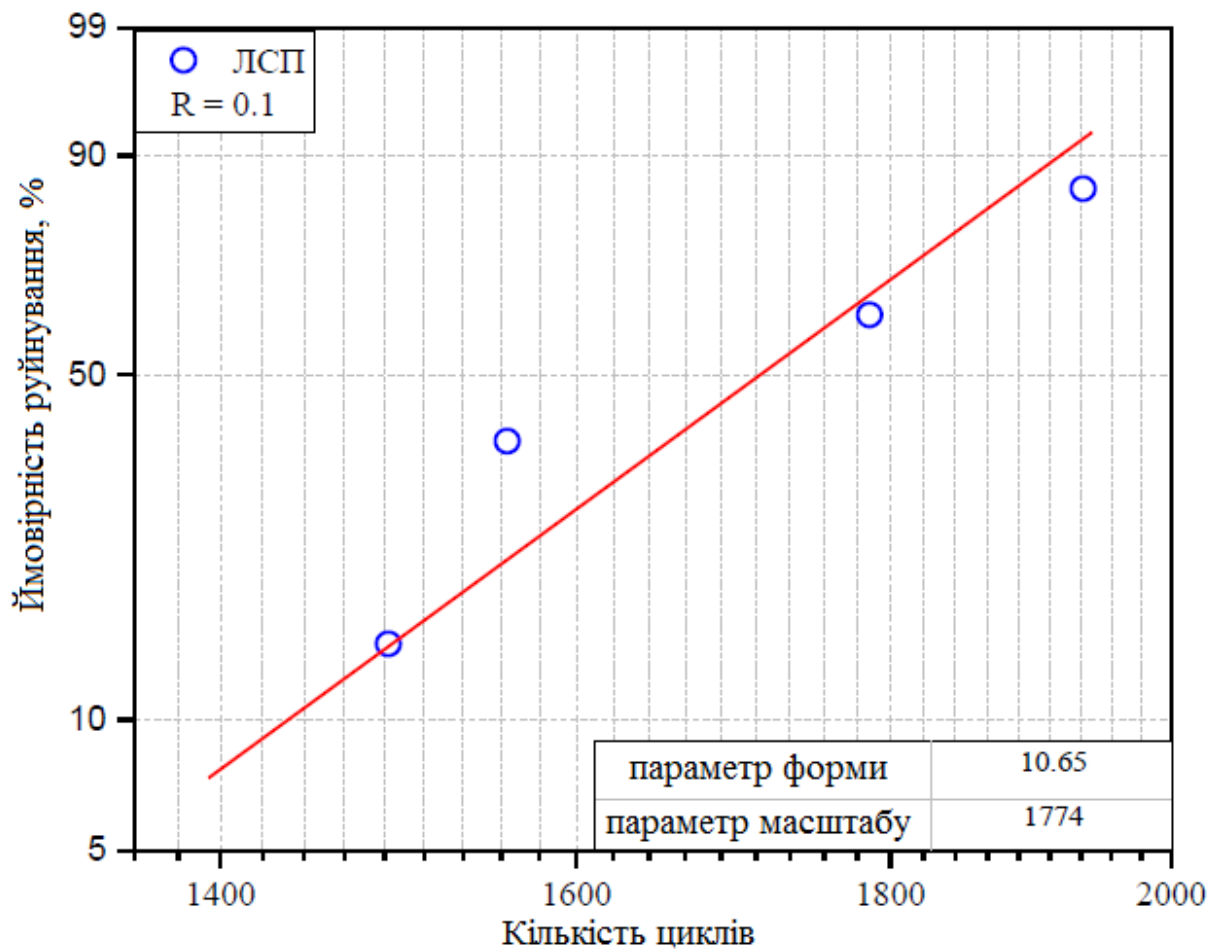


Рисунок 3.13 – Розподіл Вейбулла для оброблених зразків

Розподіли одним графіком представлені рисунку 3.14. З отриманих результатів можна дійти висновку у тому, що лазерне ударне зміцнення значно збільшує втомну довговічність.

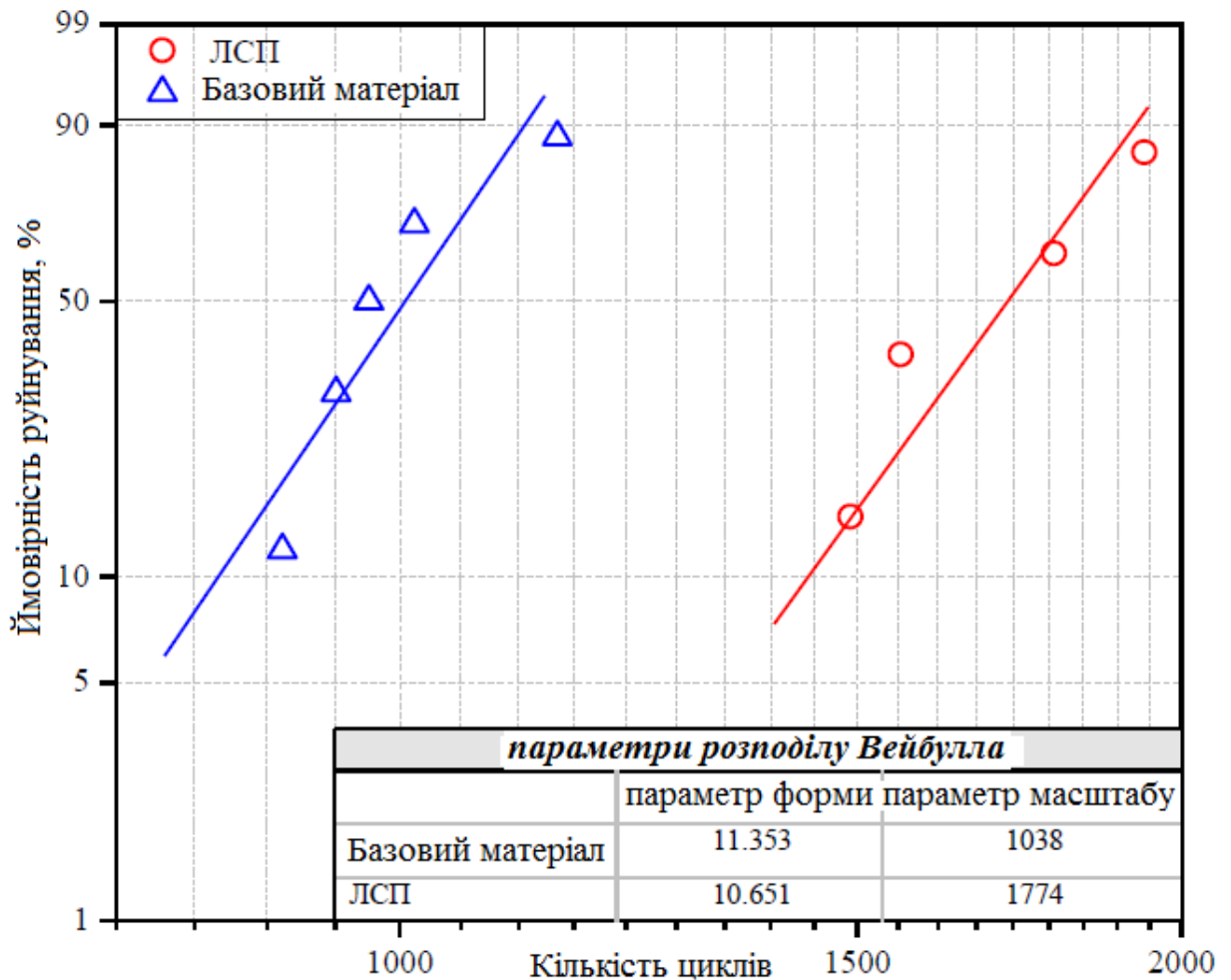


Рисунок 3.14 – Розподіл Вейбулла для всіх зразків

Параметр масштабу використовувався як характерна кількість, що описує втомне життя групи зразків. А параметр форми відбиває розкид у значеннях - що більше параметр форми, то менше розкид значень у розподілі. У результаті, розглянувши параметри масштабу базового матеріалу та зміцнених зразків, можна дійти висновку у тому, що застосування ЛУЗ збільшує їх втомну довговічність приблизно на 70 відсотків. Параметр форми у свою чергу трохи зменшується, але говорити про те, що ЛУЗ збільшує розкид значень і робить процес менш передбачуваним неправильно, оскільки було проаналізовано лише невелику кількість зразків, що недостатньо для отримання повної статистичної картини.

Результати втомних випробувань другої групи для необроблених зразків наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати тестів втоми для базових зразків

Зразок	Кількість циклів	Напруження, МПа
1	4221	375
2	11120	250
3	44193	150
4	242731	100
5	511086	90
5*	1000000	80

При проведенні втомних випробувань неминучі випадкові помилки, викликані зміною властивостей матеріалу, помилками у випробувальних машинах та обладнанні для обробки даних. Коефіцієнт $1/T\sigma$ (інакше індекс розсіювання $\sigma-N$ кривих) – це параметр, який може кількісно визначити ступінь кореляції між даними про втому та дисперсію апроксимуючої кривої [28]. На рисунку 3.15 представлений аналіз $\sigma-N$ кривою для базового матеріалу. Безперервною червоною лінією позначено середнє значення, пунктиром – середнє значення ± 2 стандартні відхилення відповідно. Крапки на графіку – це експериментальні дані. Зворотний нахил кривої – 3,57, а індекс розсіювання –2,99.

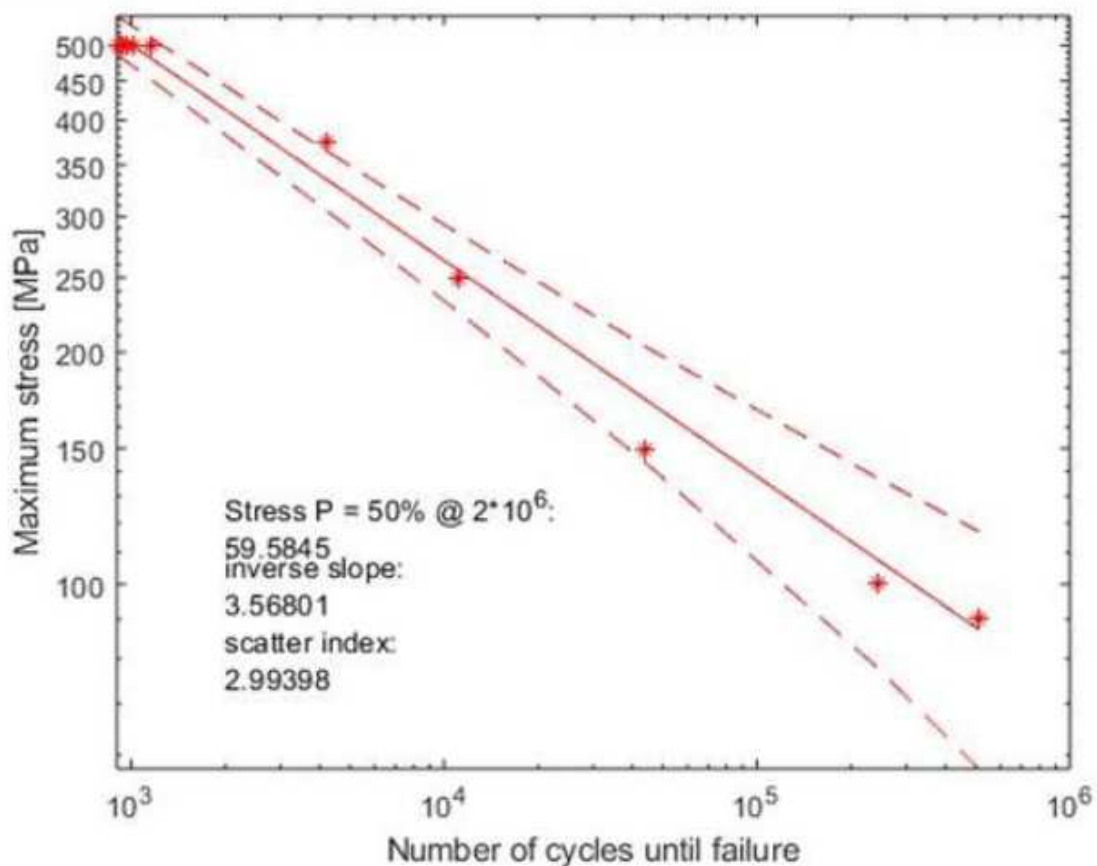


Рисунок 3.15 – σ -N крива для базових зразків

Аналогічно, в таблиці 3.7 представлені результати втомних випробувань для зміцнених зразків, а на рисунку 3.16 зображено аналіз σ -N кривою для них. Зворотний нахил кривої – 3,6, а індекс розсіювання –1,64.

Таблиця 3.7 – Результати тестів втоми для зміцнених зразків

Зразок	Кількість циклів	Напружень, МПа
1	4612	375
2	19345	250
3	104793	150
4	613436	100
5	831228	90
6	1208018	85

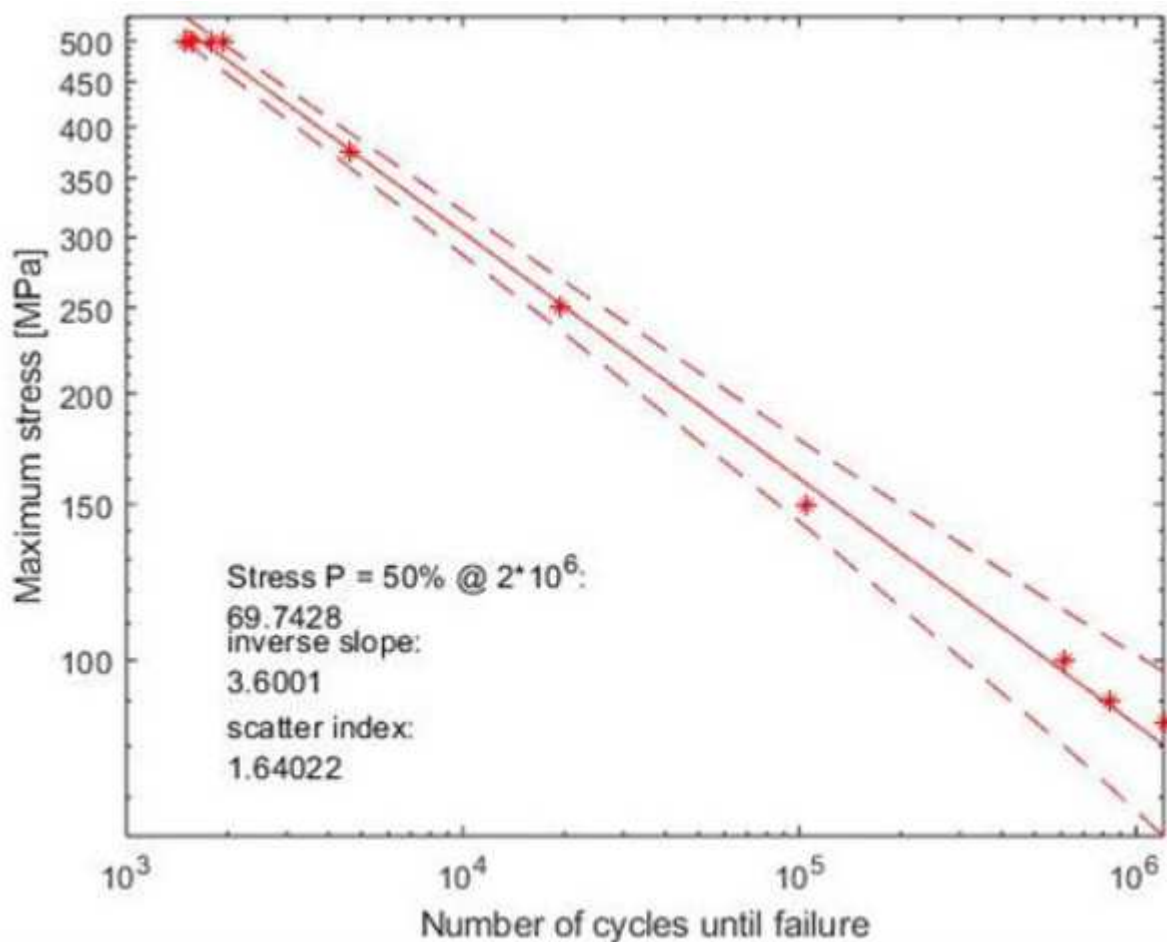


Рисунок 3.16 – σ -N крива для зміцнених зразків

Аналізуючи отримані дані, можна відзначити, що характер кривої втоми зразків з ЛУЗ майже не змінився, про що говорить зворотний нахил, зазначений раніше. А ось розкид даних став значно меншим, це можна помітити з отриманих значень індексу розсіювання.

Підсумкові результати експериментів зведені в таблицю 3.8, в якій у відсотках зазначено позитивний вплив лазерної обробки на довговічність втоми зразків.

Таблиця 3.8 – Порівняння результатів втомних випробувань зразків з ЛУЗ та без ЛУЗ

Напруження, МПа / Цикли	БМ	ЛУЗ	Поліпшення, %
500	996	1693	70
375	4221	4612	9,3
250	11120	19345	74
150	44193	104793	137,1
100	242731	613436	152,7
90	511086	831228	62,6
85	-	1208018	-

На рисунку 3.17 зображені обидві σ -N криві у логарифмічному вигляді.

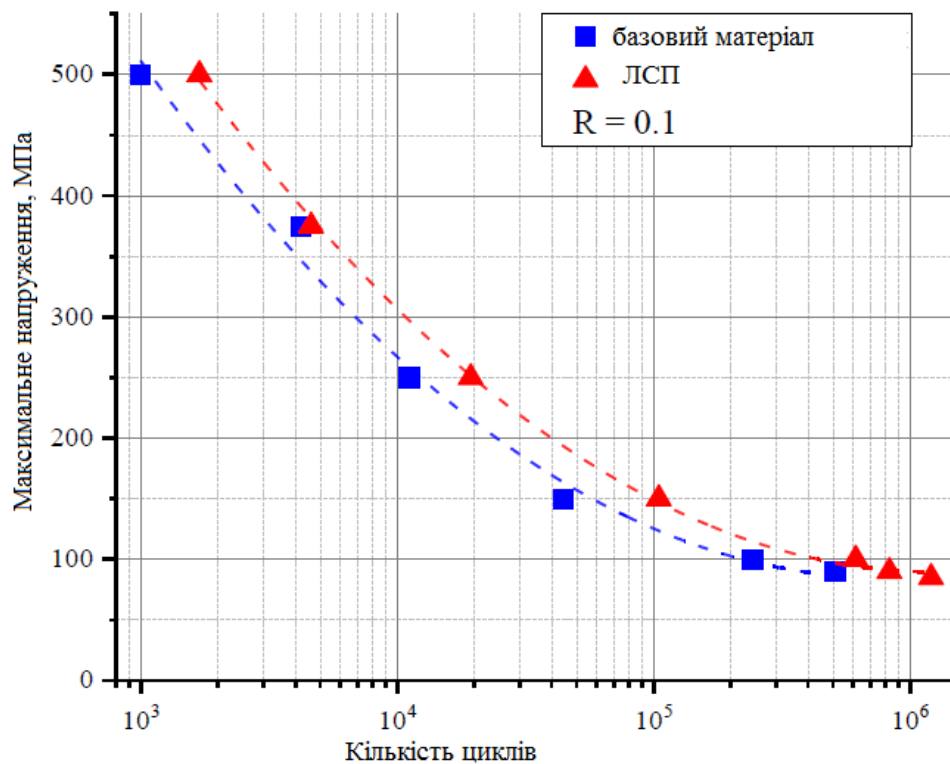


Рисунок 3.17 – Порівняння σ -N кривих оброблених та базових зразків

Що стосується точки 80 МПа, було прийнято рішення не включати її в підсумковий графік і аналіз, так як є велика статистична похибка і ця точка не вписується в отримані в ході експерименту результати. Говорячи про результати, отримані при 500 МПа, у таблиці вказані середні значення, для наочного порівняння поліпшення у відсотковому співвідношенні.

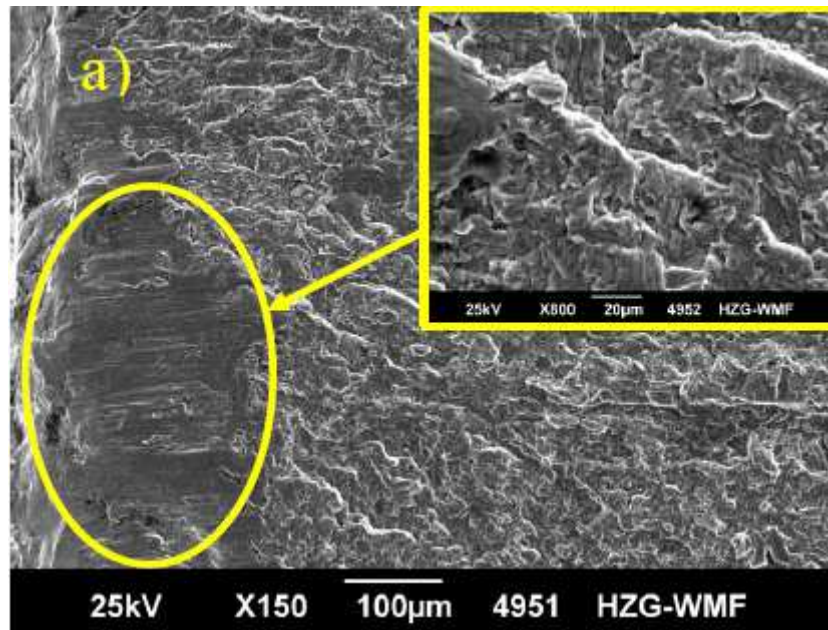
3.3. Результати мікрофрактографії

На рисунку 3.18 можна побачити поверхні руйнування зразків базового матеріалу (рисунок 3.18 а, в) і ЛУЗ (рисунок 3.18 б, г) першої пари поблизу отвору. Порівнюючи фотографії зі збільшенням 150, можна побачити, що базовий зразок (малюнок 3.18 а) має явно виражену гладку поверхню, а зразок з ЛУЗ (малюнок 3.18 б) її не має. З цього можна дійти висновку у тому, що тріщина в обробленому зразку зростала набагато повільніше, ніж у тому, що не піддавався лазерному зміцненню. На фотографіях з великим збільшенням в 800 (рисунок 3.18, г) видно, що перепади висот траєкторій тріщин у необробленого зразка виражені помітніше, ніж у зразка з ЛУЗ.

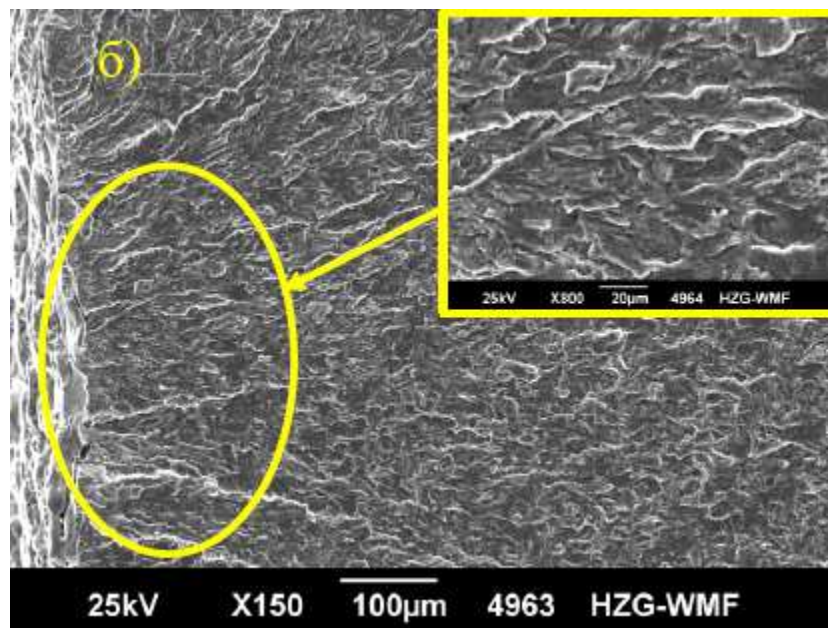
Подібну картину можна побачити у базового зразка, випробуваного при 100 МПа (рисунок 3.19 а), де поверхня траєкторії руйнування виглядають гладкою, в той час, як оброблена зразка вона більш шорстка (рисунок 3.19 б).

На рисунку 3.20 представлена морфологія перехідної зони обох зразків першої групи. Вона характеризується наявністю порожнин і западин. Порівняно з БМ, у зразку з ЛУЗ кількість западин невеликого розміру помітно збільшилася, також вони стали розташовуватися щільніше один до одного. Це говорить про те, що ЛУЗ може покращити пластичність перехідної зони та поширення тріщини, тим самим покращуючи втомні характеристики.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76



а)



б)

Рисунок 3.18 – Поверхні руйнування зразків:
 а – БМ із збільшенням x150, б – ЛУЗ із збільшенням x150

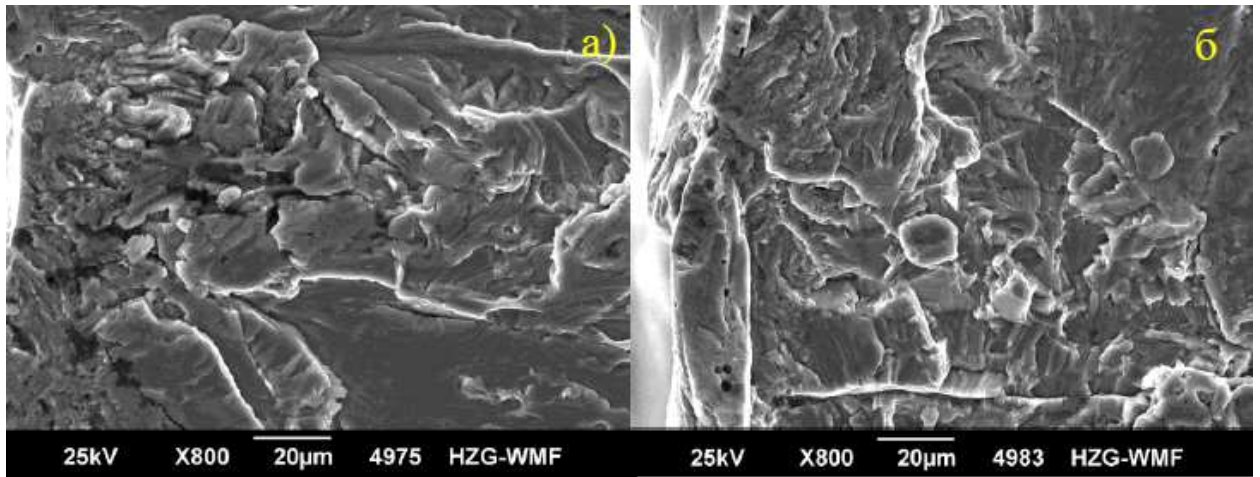


Рисунок 3.19 – Поверхні траєкторій руйнування зразків, випробуваних при 100 МПа:
а – БМ, б – з ЛУЗ

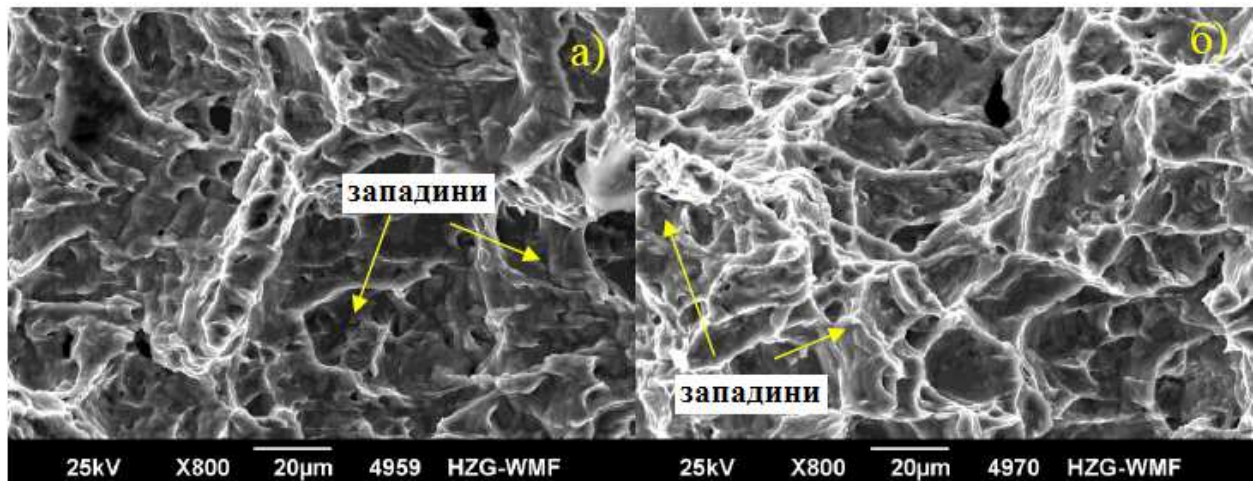


Рисунок 3.20 – Перехідна зона зразків першої групи:
а – БМ, б – з ЛУЗ

Подібні результати були отримані для іншого титанового сплаву в роботі [29], де також спостерігалось збільшення щільності западин та зменшення їх розміру після лазерного зміцнення.

Що стосується галузі утворення втомної тріщини, то зміну її положення можна чітко побачити на зразках другої групи (рис. 3.21). У необробленого зразка виникнення тріщини відбувається в кутку отвору (рисунок 3.21, а), у місці найбільшої концентрації напружень. Після обробки

зразків з двох сторін область утворення тріщини змістилося далі від краю (рисунок 3.21, б). Це зумовлено тим, що створені ЛУЗ стискаючі залишкові напружень зменшують напружень, що розтягують, зосереджені на краю отвору, де їх концентрація максимальна. Тим самим сумарні напруження на поверхневому шарі стають меншими за втомну межу зміцненого шару, а область утворення тріщини змістилася з поверхні на перед поверхневий шар, де залишкові напруження не настільки великі.

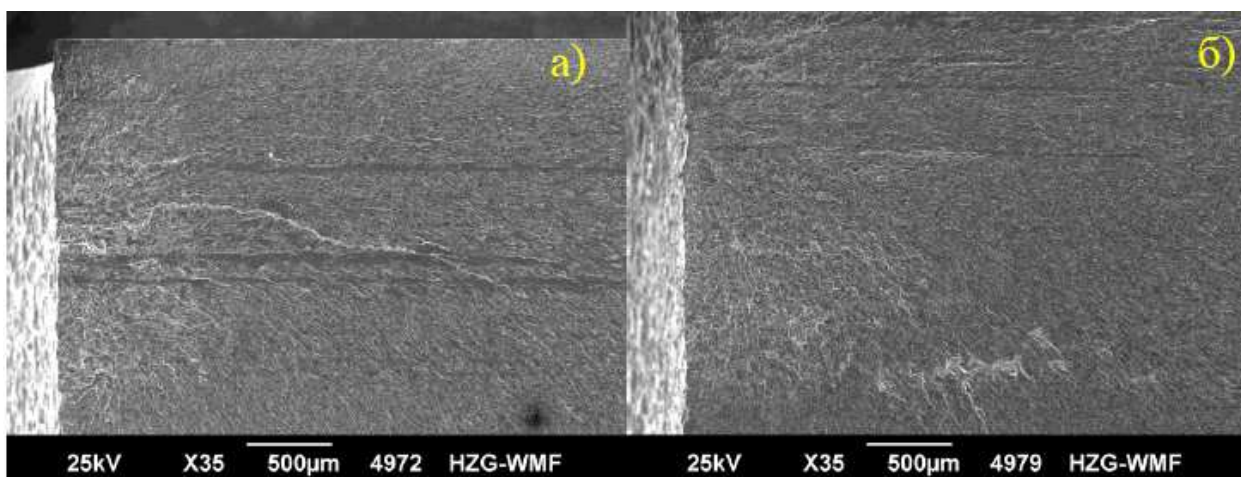


Рисунок 3.21 – Поверхня зламу поблизу отвору: а – БМ, б – з ЛУЗ

Подібні результати узгоджуються з тими, що були отримані у роботі [13], де досліджувався вплив лазерного ударного зміцнення на втомний ресурс алюмінієвого сплаву АА2024.

Також на фотографіях зразків першої групи (рисунок 3.22) можна помітити втомні борозенки. Кожна така борозенка прикладене до зразка навантаження. Вони паралельні один одному і перпендикулярні до зростання тріщини. Відстань між цими борозенками тісно пов'язана зі швидкістю поширення втомної тріщини – чим менша відстань, тим менша швидкість зростання тріщини. У обробленого зразка спостерігається більш висока щільність втомних борозенок, ніж у базового матеріалу, що вказує на більш

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

повільне зростання втомної тріщини. У середньому відстань між борозенками зменшилась на 0,39 мкм.

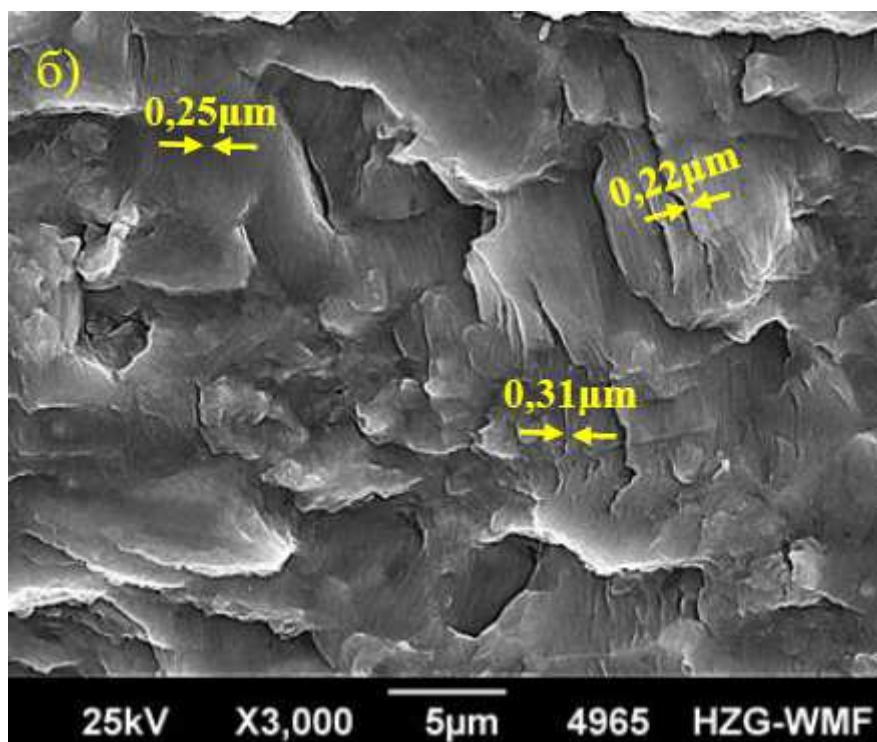
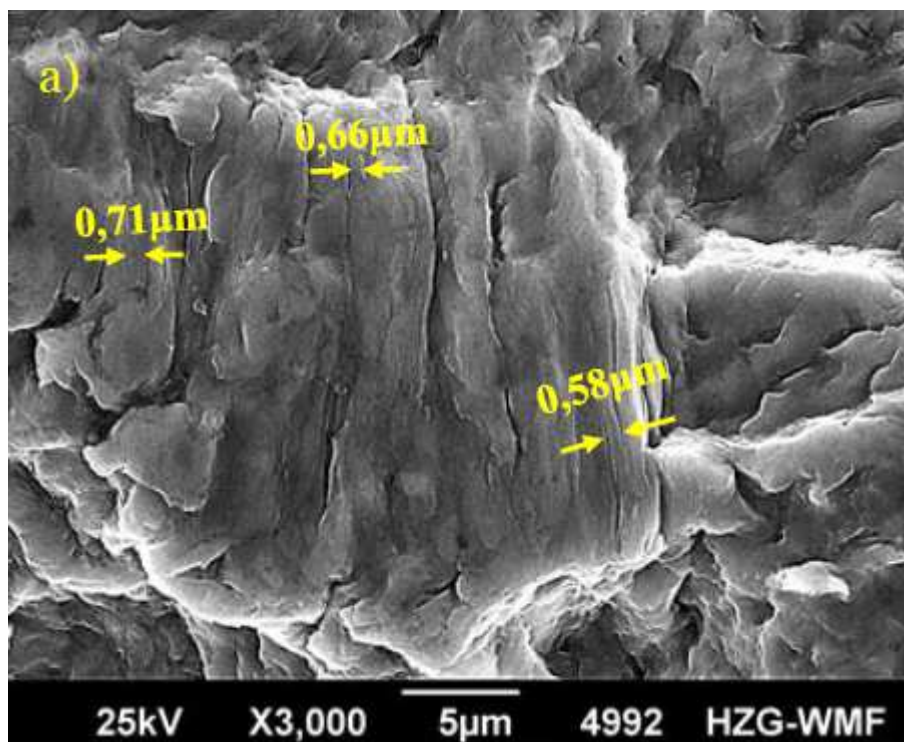


Рисунок 3.22 – Втомні борозенки:

а – БМ, б – з ЛУЗ

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

ВИСНОВКИ

1. За результатами досліджень доведено, що ЛУЗ має значний вплив на втомну довговічність титанового сплаву ОТ4-0. Помітний ефект спостерігається у явній мало цикловій зоні при 500 МПа, де покращення довговічності становить близько 70 %. Такі результати видно у перехідній зоні, де поліпшення становить приблизно 74%. У зоні близької до перехідної помічається незначна зміна 9,3 %, подібні результати можна пояснити великим розкидом експериментальних даних, пов'язаним з ймовірним характером втоми.

2. Помітний ефект спостерігається в області багато циклової втоми при напруженнях 150 МПа і 100 МПа. Втомна довговічність у цій зоні збільшується на 137 та 152 % відповідно. Також при аналізі втомних кривих було помічено, що результати зразків з ЛУЗ мають менший розкид, ніж у базового матеріалу.

3. Результати мікрофрактографії також підтверджують позитивний вплив лазерного наклепу на характеристики втоми. При аналізі мікроструктури було виявлено, що після обробки зростання втомної тріщини значно сповільнювалося. Також було встановлено, що після обробки область зародження тріщини зміщується з поверхні на перед поверхневий шар.

4. ЛУЗ помітно впливає на довговічність титанових зразків у всіх зонах втомної кривої. У результаті аналізу отриманих експериментальних даних було проведено якісний аналіз впливу лазерного ударного зміцнення на втомну довговічність зразків. Для кількісної оцінки потрібна більша кількість зразків, а також статистичний аналіз, щоб з необхідною точністю визначити статистичну помилку.

5. Що стосується практичного застосування, то з упевненістю можна сказати, що лазерне ударне зміцнення є вкрай перспективною технологією

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

поверхневої обробки, яка може застосовуватися в різних галузях науки та техніки. На основі отриманих результатів, можна припустити, що ЛУЗ може стати чудовим інструментом для збільшення втомного ресурсу машин і агрегатів, деталі яких виготовлені з титану або його сплавів.

6. Окремо варто відзначити позитивний вплив лазерного наклепу у всіх зонах втомної кривої, що говорить про можливість застосування цього виду обробки до різних деталей, що працюють при різних режимах експлуатації. Наприклад, двигуни літальних апаратів працюють в умовах мало циклової втоми, а фюзеляжі – багато циклової, а підвищити довговічність цих, несхожих один на одного деталей можна одним способом. Таким чином, за рахунок цієї універсальності ЛУЗ можна скоротити витрати на обладнання для зміцнення деталей.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Spanrad S. Fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoils subjected to foreign object damage. / Spanrad S., Tong J. // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. – 2012.

2. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 513 с.

3. Лебедев А. О. Механіка матеріалів для інженерів. Навчальний посібник / А. О. Лебедев, М. І. Бобир, В. П. Ламашевський. – Київ: Політехніка, 2006. – 286 с.

4. Gopi, R. Investigation of shot peening process on stainless steel and its effects for tribological applications./ Gopi R., Saravanan I., Devaraju A., Ganesh babu loganathan // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 22. – P. 580-584.

5. Abdullahi K. Gujba. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening / Abdullahi K. Gujba, Mamoun Medraj // Materials. – 2014. - № 7. – P. 7295-7974.

6. Fomin F. Surface modification methods for fatigue properties improvement of laser-beam-welded Ti-6Al-4V butt joints. / Fomin, F., Klusemann, B., Kashaev, N. // Procedia Structural Integrity. – 2018. – Vol. 13. – P. 273–278.

7. Електронний ресурс. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Авіаційна_промисловість_України

8. Gujba A. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. / Gujba A., Medraj M. // Materials. – 2014. – Vol. 7(12) – P. 7925–7974.

9. Luo K. Y. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing. / Luo K. Y.,

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

Wang C. Y., L, Y. M [and other] // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 313, – P. 600–606.

10. Dane C. Shot peening with laser. / Dane C. Hackel L., Daly J. // Adv. Mater. Process. – 1998. – Vol. 153, – P. 37–48.

11. Hatamleh, O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints. // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31(5), – P. 974–988.

12. Y.F. Jiang. Study on the effect of laser peening with different power densities on fatigue life of fastener hole / Y.F. Jiang, B. Ji, X.D. Gan, Ch. Hua, X. Li, H. Zhu // Optics and Laser Technology. – 2018. – № 106. – P. 311-320.

13. Kashaev N. Fatigue Life Extension of AA2024 Specimens and Integral Structures by Laser Shock Peening. / Kashaev N., Chupakhin S., Ventzke V // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 165(8).

14. Dane C. Shot peening with laser. / Dane C. Hackel L., Daly J. // Adv. Mater. Process. – 1998. – Vol. 153, – P. 37–48.

15. Hatamleh, O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints. // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31(5), – P. 974–988.

16. J. Schijve. Statistical distribution functions and fatigue of structures // International Journal of Fatigue. – 2005. – № 27. – P. 1031-1039.

17. Djeghader D. Weibull analysis of fatigue test in jute reinforced polyester composite material. / Djeghader D., Redjel B. // Composites Communications. – 2019. – Vol. 17, – P. 123-128.

18. Ji W. Time-aware conversion prediction. / Ji W., Wang X., Zhu F. // Frontiers of Computer Science. – 2016– Vol. 11(4), – P. 702–716.

19. KUKA KR 30 HA Specification. 2005.

20. Quantel Nd: AG laser system. User's manual. Version A. 2012.

21. Steinzig M., Ponslet E. Residual Stress Measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry, Parts I-IV / Steinzig M. // Experimental Techniques. – 2003. – № 27. – P. 25-45.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

22. M. Achintha. Fatigue behavior of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modeling / M. Achintha D., Nowell D., Fufari E.E., Sackett M.R. // International Journal of Fatigue. – 2014. – № 62. – P. 171-179.

23. Chupakhin S. Artificial neural network for correction of effects of plasticity in equibiaxial residual stress profiles measured by hole drilling. / Chupakhin S., Kashaev N., Klusemann B., Huber N. // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2017. – Vol. 52(3), – P. 137–151.

24. Yang Peng. Experimental Data Assessment and Fatigue Design Recommendation for Stainless-Steel Welded Joints. / Yang Peng, Jie Chen and Jun Dong // Metals. – 2019. – Vol. 9(7), – P. 723.

25. Sun R. Fatigue behavior of Ti-17 titanium alloy subjected to different laser shock peened regions and its microstructural response. / Sun R., Che Z., Cao Z., Zou S [and other] // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 383.

26. Adu-Gyamfi S. The effects of laser shock peening scanning patterns on residual stress distribution and fatigue life of AA2024 aluminium alloy. / Adu-Gyamfi S., Ren X. D., Larson E. A. [and other] // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 108, – P. 177–185.

27. Zhang Qinglai. Warm Laser Shock Peening and Low Cycle Fatigue Behavior of Extruded AZ80-T6 Magnesium Alloy / Zhang Qinglai, Liu Hui, Zhang Bingxin [and other] // Chinese Journal of Lasers. – 2015. – №42(11).

28. Enoch Asuako Larson. Effects of scanning path gradient on the residual stress distribution and fatigue life of AA2024-T351 aluminium alloy induced by LSP / Enoch Asuako Larson, Xudong Ren, Samuel Adu-Gyamfi [and other] // Results in Physics, – 2019. – Vol. 13.

29. Zhou J. Z., Meng X. K., Huang S. Effects of warm laser peening at elevated temperature on the low-cycle fatigue behavior of Ti6Al4V alloy. / Zhou J. Z., Meng X. K., Huang S. [and other] // Materials Science and Engineering: A, – 2015. – Vol. 643, – P. 86–95.

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

ДОДАТКИ

					ДРМТВАТАМ 23.18001.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86