

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО
«__» _____ 2021 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Технології комп'ютерного
конструювання верстатів, роботів та машин »**

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

**на тему: «Зварювання оцинкованих деталей з одночасним осьовим
навантаженням на розтяг»**

Виконав :

студент 2 курсу, групи МВ-01мп

Курочка Владислав Олександрович _____

Науковий керівник:

к.т.н., доцент Новік М.А. _____

Рецензент:

Керівник Grand KB Ющук Артем Миколайович _____

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

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма «Технології комп'ютерного
конструювання верстатів, роботів і машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Куручка Владислав Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Зварювання оцинкованих деталей з одночасним осьовим навантаженням на розтяг

науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Новік М.А.

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

затверджені наказом по університету від **“01” листопада 2021 року № 3611-с**

2. Термін подання студентом дисертації к.т.н., доцент Новік М.А.

3. Об'єкт дослідження установка для зварювання оцинкованих деталей з прикладанням навантаження на розтяг

4. Предмет дослідження термомеханічна поведінка та характеристики матеріалу, які слугують утворення тріщин, що провокуються в установці для імітації зварювання

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Літературний огляд по проблемі утворення тріщин, 2. Виготовлення проб для дослідів, 3. Розробка та розрахунок гідроприводу для установки для проведення дослідів, 4. Обробка результатів дослідів, 5. Підсумки та наведення рекомендацій

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 1. Плакат «Принципова схема гідроприводу», 2. Плакат «Розрахункова схема

гідроприводу», 3. Креслення деталей гідроприводу, 4. Плакат «Опис проведення дослідів», 5. Плакат «Модернізація установки», 6. Плакат «Результати вимірювання», 7. Плакат «Підсумки та рекомендації» Всього 7 плакатів

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів проекту

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

9. Дата видачі завдання **01.03.2021**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Літературний огляд по проблемі утворення тріщин	01.03.-14.03	
2	Виготовлення проб для дослідів	14.03.-01.06	
3	Розробка та розрахунок гідроприводу для установки для проведення дослідів	01.06.-15.08	
4	Обробка результатів дослідів	15.08.-01.10	
5	Підсумки та наведення рекомендацій	01.10.-20.10.	

Студент _____ Курочка В.О. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Новік М.А.

Анотація

Курочка В.О.

Магістерська дисертація на тему: «Зварювання оцинкованих деталей з одночасним осьовим навантаженням на розтяг»

Магістерська дисертація присвячена теоретичному огляду та експериментальному дослідженню проблем зварювання оцинкованих деталей. Для проведення дослідів для дослідження термомеханічних властивостей матеріалів, що спричиняють утворення тріщин, був модернізований стенд шляхом розробки гідроприводу для осьового розтягу, а також застосуванням техніки на базі цифрової кореляції зображення. Для проведення дослідів була розроблена методика підготовки проб.

Результатом роботи є застосування модернізованої установки, що дало змогу отримати та охарактеризувати властивості сталі, що слугують передумовою утворення тріщин, які в повній мірі підтверджують результати математичних моделей.

Ключові слова: цинкування, зварювання, цифрова кореляція зображення, гідропривод

Abstract

Thesis is devoted to the theoretical review and experimental research of welding problems of galvanized parts. To conduct experiments to study the thermomechanical properties of materials that cause cracking, the stand was upgraded by developing a hydraulic drive for tension, as well as the use of techniques based on digital image correlation. To conduct experiments, a method of sample preparation was developed.

The result is the use of a modernized installation, which allowed to obtain and characterize the properties of steel, which are a prerequisite for the formation of cracks, which fully confirm the results of mathematical models.

Key words: galvanizing, welding, digital image correlation, hydraulic drive

Зміст

Вступ	2
1.1 Поле напруження зразків у випробуванні PVR	7
1.2 Випробування DIC — Digital Image Correlation	10
2. Експериментальна частина	11
2.1 Зразки	11
2.1.1 Матеріал	11
2.1.2 Підготовка проби	13
2.2 Випробувальна установка	21
2.2.1 Основний принцип	21
2.2.2 Тест PVR	21
2.2.3 Установка PVR	23
2.2.4 Якість візерунка	40
3. Принципова схема гідроприводу розтягування із застосуванням крокового двигуна	46
4. Розрахункова схема гідроприводу розтягування із застосуванням крокового двигуна	51
5. Результати дослідів	64
6. Підсумки експерименту	79
7. Висновки	80
8. Список використаних джерел	82

Вступ

Мета: розробка установки для перевірки термомехічної поведінки оцинкованих деталей при утворенні тріщин

1. Проведений патентний і літературний пошук по проблемі дослідження процесу зварювання оцинкованих деталей. 2. Розроблений і виготовлений експериментальний стенд для дослідження процесу зварювання оцинкованих деталей. 3. Для переміщення зварювальної головки (електрода) по заданій траєкторії запропонований трикоординатний маніпулятор з цифровим керуванням. 4. Розроблена принципова схема гідравлічного розтяжного приводу. 5. Розроблена метода підготовки проб для проведення дослідів, 6. Для проведення оптичного вимірювання була підібрана оптична система. 7. Застосування програмного забезпечення GOM Correlate для обробки результатів дослідів.

Захист від корозії відіграє велику роль у сучасному машинобудуванні. Вартість захисту для різних сценаріїв становить близько 10% загального розподілу. [1] Метою цього є запобігання можливим збиткам, пов'язаним з корозією, яка тягне за собою великі витрати. У промислово розвинених країнах ці витрати становлять до 4% від внутрішнього валового продукту, тобто. до 104 млрд євро для Німеччини. [2]

Корозія - реакція металевого матеріалу з навколишнім середовищем, що викликає вимірні зміни в матеріалі і може призвести до корозійного пошкодження [3] - може бути запобігти декількома методами. До них відноситься, перш за все, цинкування.

Цей надійний процес має перевагу над іншими методами нанесення покриттів з економічної погляду (первісні і наступні витрати), а й характеризується довговічністю і стійкістю.[4] Необхідний для цього цинк наноситься за допомогою декількох процесів і служить пасивним захистом на поверхні деталі

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

завдяки утворенню ZnO , так і активним захистом від корозії. У цьому випадку цинковий шар є жертвним анодом, завдяки розчиненню якого захищається матеріал, що нижче лежить (зазвичай залізо, яке більш благородне, ніж цинк). [3]

Оскільки в результаті процесу зварювання оцинковані компоненти піддаються впливу більш високих температур, що значно перевищують температуру цинку ($419\text{ }^{\circ}\text{C}$), це збільшує ймовірність виникнення тріщин, спричинених рідким металом (LME — Liquid Metal Embrittlement) за наявності напружень. Виникнення таких тріщин є взаємодією різних змінних, що впливають, які присутні в трикутнику "напруга - матеріал - розплавлений цинк".

На рисунку 1 показаний результат крихкості рідкого металу (ліворуч) та мікроскопічне зображення тріщини LME.

Утворення тріщин, причини яких визначаються перемінними, перерахованими вище, ще не до кінця з'ясовано в порівнянні з тріщинами, які можуть бути викликані і описані суто механічним навантаженням, що обумовлює їх наукову актуальність [5,6]. Тому метою даної роботи є розробка установки та вимірювання механічних умов під час утворення тріщин. Це має дозволити охарактеризувати поле напруги/деформації на сприйнятливому до LME матеріалу залежно від часу.

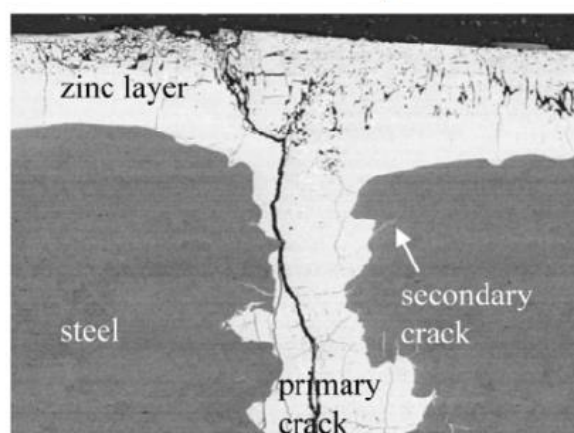


Рис. 1 Тріщина, спричиненим рідким металом та його макроскопічне зображення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Тріщини, спричинені рідким металом (LME — Liquid Metal Emrittlement) або розтріскування за допомогою рідкого металу (LMAC) - це термін, що використовується для опису ряду явищ, при яких рідкий метал в контактi з поверхнею твердого металу призводить до втрати пластичності або інших механічних властивостей основного матеріалу. Незважаючи на проведені дослідження, досі відсутнє розуміння механізму (механізмів), який дозволив би пояснити утворення тріщин LME, а також передбачити ймовірність їх появи у різних комбінаціях "рідина-твердий метал". [7]

На рисунку 2 показані змінні, що впливають, критичне перекриття яких призводить до утворення тріщин LME. [5]

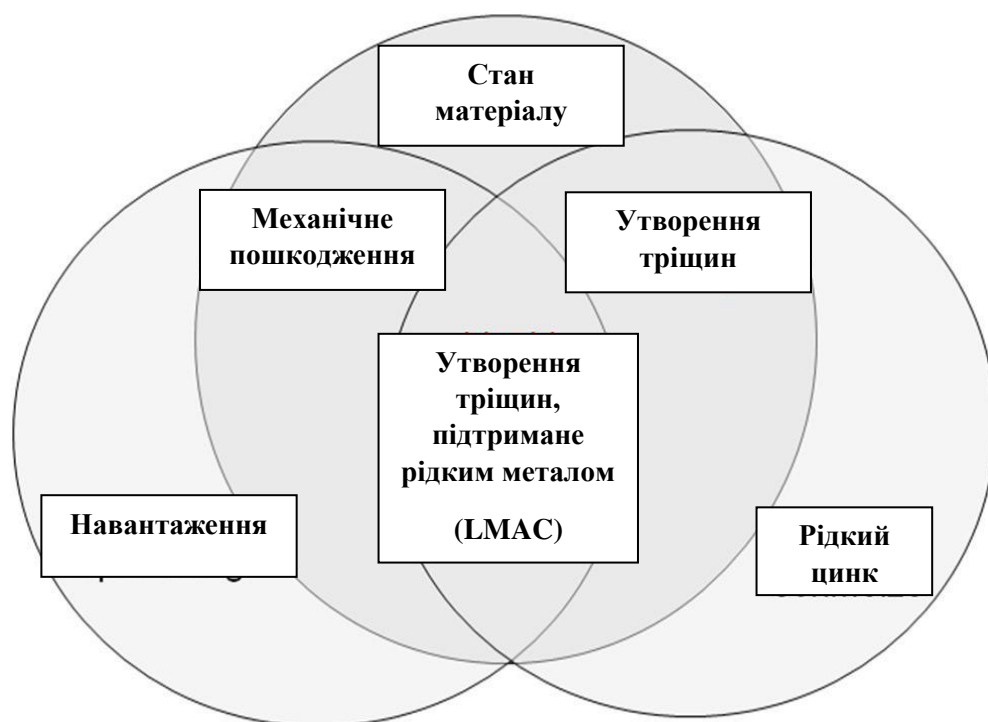


Рис. 2 Фактори, що спричиняють утворення тріщин

У літературі висунуто кілька теорій походження тріщин LME. Вони припускають механізм, заснований на дифузії, в результаті якого поєднання розтягуючих напруг (внутрішніх через охолодження та/або зовнішніх) та зменшення мікроструктурної суцільності призводить до появи тріщин.

Іншим фактором утворення тріщин LME може бути утворення поверхнево-активного рідкого середовища, яке може спричинити міжкристалітні поділи, зниження міцності і, як наслідок, утворення тріщин. Це явище руйнівної дії активних середовищ на поверхню твердого тіла засноване на ефект Ребіндера. Існуюча напруга збільшує можливість проникнення та впливу активних середовищ, що показано на рисунку 3. [5, 8]

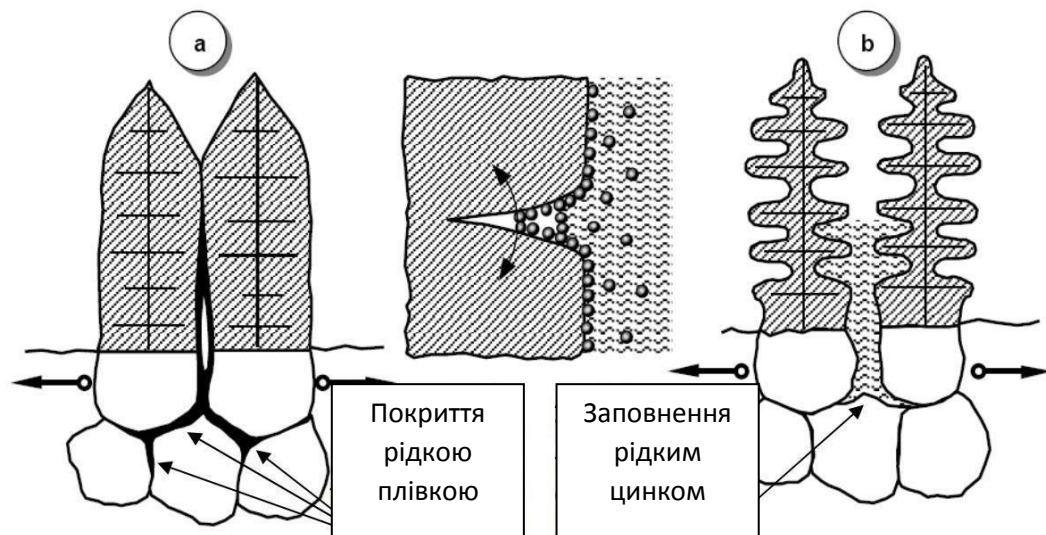


Рис. 3 Схема механізму утворення тріщин завдяки поверхневим активним середовищам

Іншим можливим механізмом пошкодження є проникнення атомів цинку з розплаву в межі зерен основного матеріалу, що розширюються в результаті напруги, що розтягує. Це призводить до зниження деформації основного матеріалу. Зростаюча напруга, яка поступово перевищує знижену пластичність матеріалу через атоми цинку, разом з дислокаційними заторами, що виникають на межах зерен, призводить до утворення міжзеренних тріщин, оскільки межі зерен є перешкодою для дислокацій. [5]

Описаний вище механізм проілюстровано рисунку 4.

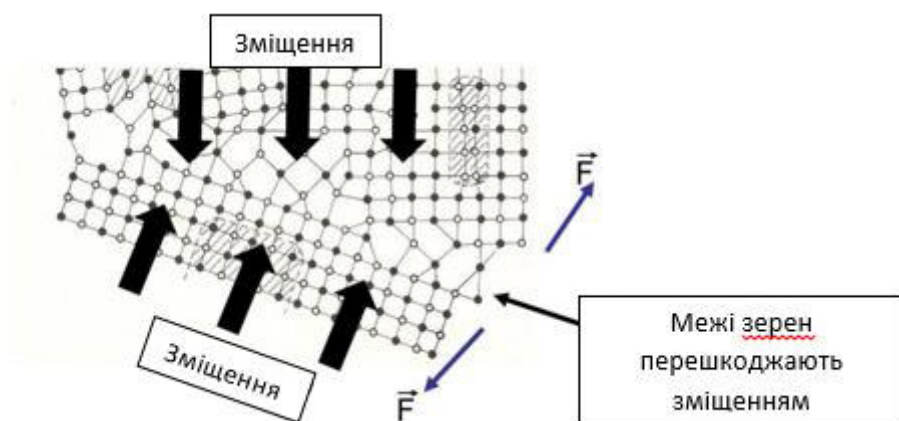


Рис. 5 Межі зерен як перешкоди для дислокацій

У [7] причини розтріскування КМЕ класифікуються за трьома категоріями: Міжфазне розтріскування, міжкристалічне проникнення та корозія рідкого металу. Найчастіше зародження тріщин у різних системах відбувається одночасно з декількома механізмами. Не виключено, що існують інші механізми, які ще не досліджені.

Виходячи з трьох категорій причин, пропонуються такі пріоритети досліджень:

- Міжфазне розтріскування: Для кращого розуміння цього механізму можна застосувати молекулярну динаміку. Однак це неможливо доти, доки не будуть встановлені аспекти пластичності, на які впливає присутність рідкого металу.

- Міжкристалічне проникнення: Швидкість проникнення розплавленого цинку та оцінки цього механізму з макротекстури можуть бути передбачені за допомогою існуючої граничної сітки. Однак це потребує визначення змочування як функції текстури меж зерен.

- Корозія рідкого металу: Необхідно досліджувати можливі хімічні реакції між основним матеріалом та розплавленим цинком, оскільки продукти реакції можуть призвести до зміни об'єму і, отже, виникнення тріщин.

1.1 Поле напруги зразків у випробуванні PVR

В дисертації [9] досліджувалось існуюче поле напружень та деформацій за допомогою моделювання. Загальне поле напружень у даній точці зразка є результатом зростаючої зовнішньої розтягуючої напруги V_{crit} і місцевих напружень, пов'язаних з процесом зварювання через підведення тепла та подальшого охолодження. На рисунку 6 показані результати чисельного розрахунку розподілу напружень у зразку PVR у різні часові інтервали. [9]

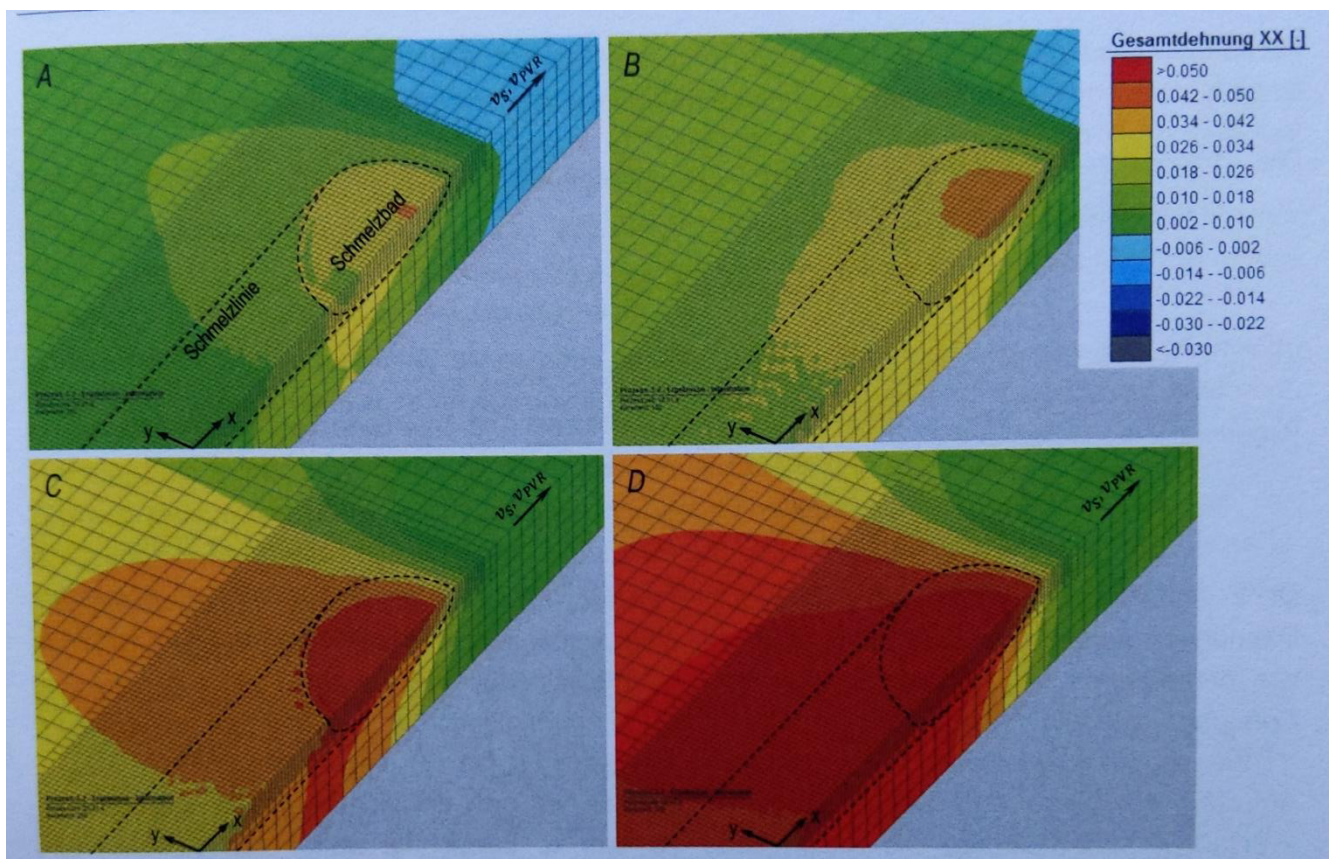


Рис. 6 Розподілення локального видовження у пробі в запрограмованому тесті на розтягування з одночасним зварюванням на різних проміжках часу A – $t = 12$ с., B – $t = 18$ с., C – $t = 25$ с., D – $t = 30$ с.

На початку процесу зварювання, при низьких швидкостях деформації, рисунку 6 можна виділити три діапазону напружень. Перед зварювальною ванною і частково поруч з нею (зона 1) переважають стискаючі напруги, що

виникають в результаті підведення тепла та відповідного розширення матеріалу. Безпосередньо перед басейном розплаву є майже вільна від напруги зона (зона 2), оскільки межа плинності перевищена через високі температури. Розтягувальні напруги присутні в області (область 3) за басейном розплаву, де відбувається охолодження та усадка матеріалу. Моделювання показує, що лінійно зростаюча швидкість деформації і, отже, зовнішня напруга, що розтягує, набувають все більшого значення для результуючого поля напружень в порівнянні з локальними впливами. Таким чином, ділянки 2 і 3 розчиняються в результаті збільшення напруги, що розтягує, а ділянка 1 залишається. Крім того, можна спостерігати швидкі відмінності в кривих деформації всього зразка та вибраного елемента зразка. Ця різниця видно на рисунку 7. [9]

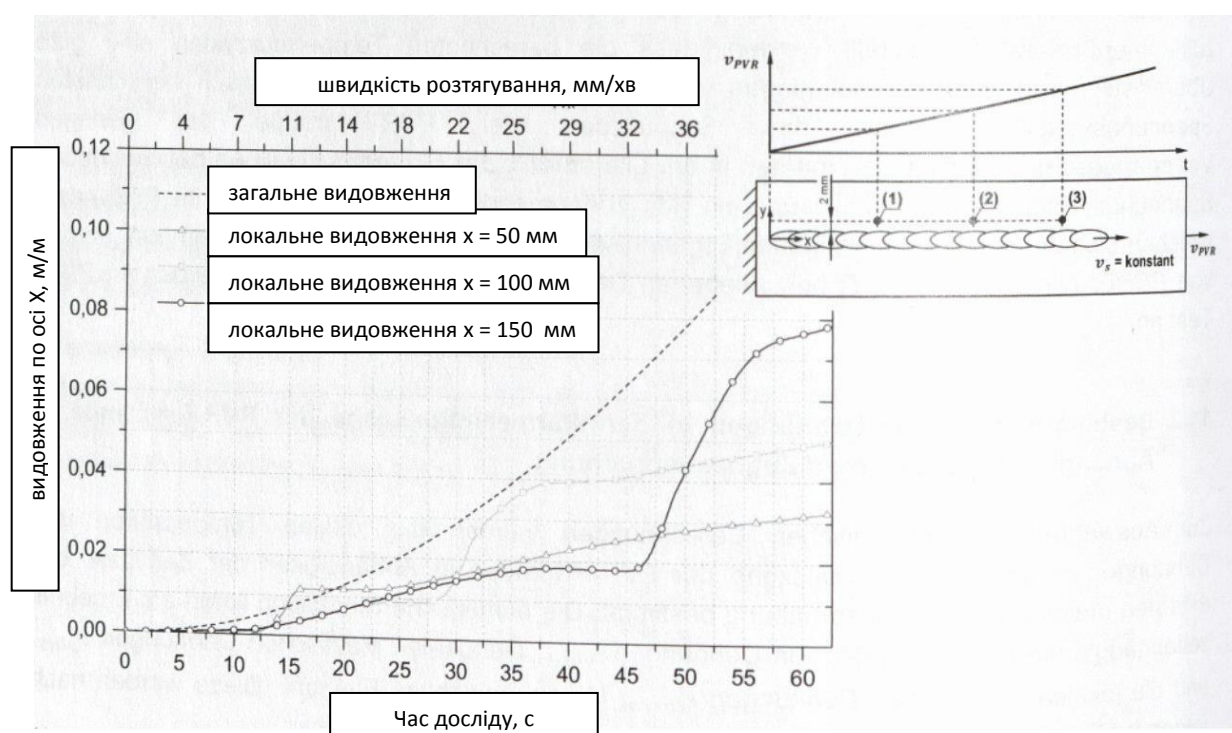


Рис. 7 Різниця глобального та локальних видовжень проби[9]

Для моделювання використано нікелевий сплав NiCr15Fe, який відрізняється від сталі TRIP, використаної для випробувань DIC. Проте отримані результати дають уявлення про приблизний розподіл напружень у зразку під час випробування PVR. Існує необхідність експериментального підтвердження моделювання за допомогою, наприклад, кореляції цифрових зображень, що вимагає великих метрологічних зусиль. [9]

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Модель, запропонована ZACHARIA для опису термомеханічної поведінки, відноситься до методології, що базується на напругах. Отримане поле напруги зразка під час зварювання показано на малюнку [10]

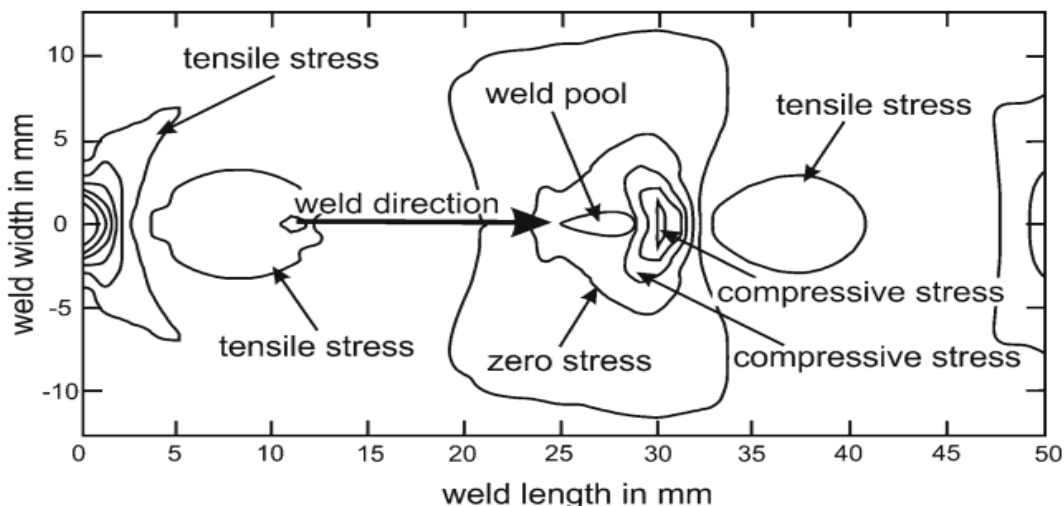


Рис. 8 Засноване на методології термомеханічної поведінки поле апруг при зварюванні

Аналогічно моделюванню, розглянутому вище, можна визначити стискаючі напруги перед зварювальною ванною, а також зони без напруги безпосередньо навколо зварювальної ванни.

Розмір областей з напругами, що розтягують або стискають, може залежати від параметрів зварювання. Ділянки з присутніми стискаючими напругами можуть бути зменшені шляхом застосування зовнішньої розтягуючої напруги до зразка. [10]

Однак поле напруг, що розглядається, є результатом термічної напруги, пов'язаного зі зварюванням, і тому порівняно з початковою стадією випробування, оскільки вплив зростаючої розтягуючої напруги на присутнє локальне поле напруг збільшується.

1.2 Випробування DIC – Digital Image Correlation

У цьому розділі пояснюється метод вимірювання за допомогою цифрової кореляції зображень (DIC — Digital Image Correlation, англ. цифрова кореляція зображень), який використовується для вимірювання поля напруги або деформації зразка під час випробування PVR. Вимірювання DIC відноситься до безконтактних, оптичних методів вимірювання деформації.

Метод заснований на аналізі значення сірого кольору стохастичного візерунка з високим контрастом, який може бути нанесений на зразок або при необхідності виявлений на певних поверхнях, хоча існують також застосування з регулярними візерунками. Деталь ділиться програмно на безліч чотирикутних граней, яким надається значення сірого кольору (порівняння граней). Еталонні грані та деформовані грані показані на малюнку.

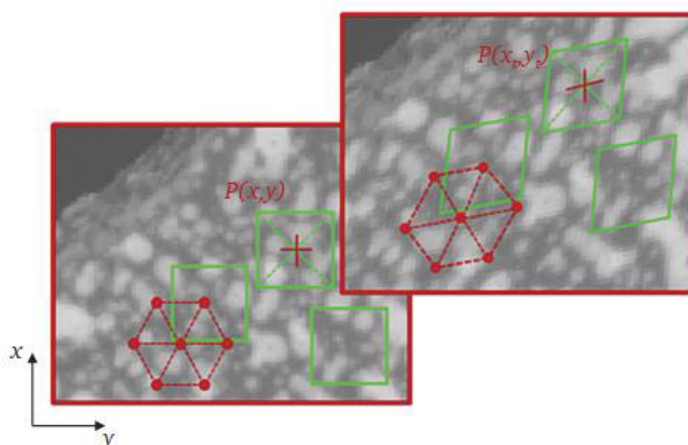


Рис. 9 Розподілення фасет та їх деформація[11]

2. Експериментальна частина

В цьому розділі йдеться про матеріал, який був використаний для виготовлення проб, його механічні властивості та хімічний склад. Важливим етапом проведення дослідів є підготовка проб та установки. Для цього наведений детальний опис кроків підготовки проб для проведення DIC-вимірювань, а також оптимізація існуючої установки для проведення цих досліджень. Окремо був розроблений та розрахований гідравлічний привід для розтягування проб

2.1 Зразки

2.1.1 Матеріал

Зразки для випробувань були виготовлені із сталі TRIP 1200 (позначення матеріалу CR850Y1180T-TR-EG53/53-U).

Таблица Хімічний склад

Елемент	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al
%	95,76	0,19	1,32	2,5	0,01	0,027	0,04	0,01	0,04

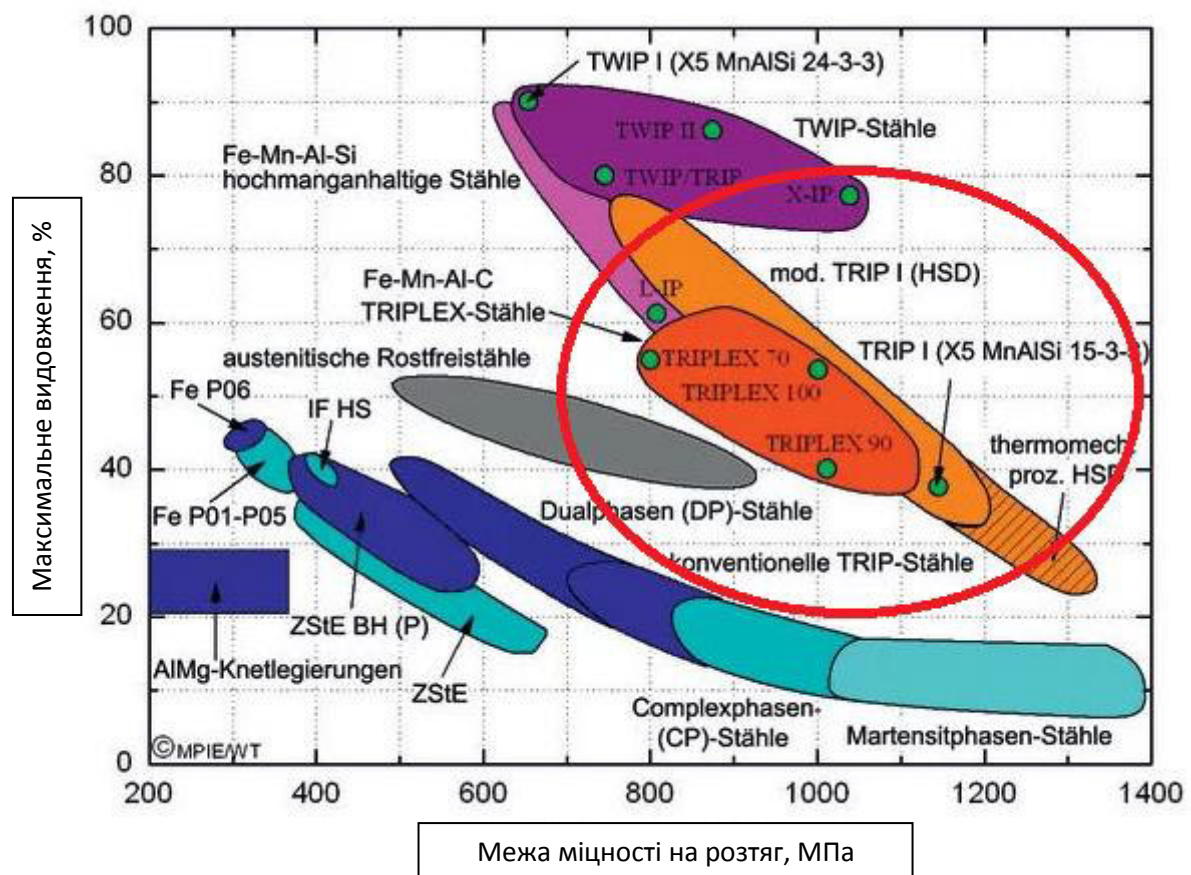


Рис. 10 Властивості сталі, використаної для проб у порівнянні з іншими сталями

Сталь TRIP 1200, як представник багатофазних сталей, демонструє вигідне поєднання міцності та подовження у широкому спектрі навантажень.

TRIP-сталі (**TR**anformation **I**nduced **P**lasticity) піддаються фазовому перетворенню, викликаному деформацією, з метастабільного аустеніту, що зберігається, в мартенсит. Це підвищує як здатність до деформації, і міцність. Порівняно зі звичайними сталями, деформації, що виникають під час деформації, можуть бути розподілені краще, і, таким чином, досягається оптимальне поглинання енергії.

Завдяки цій властивості сталі TRIP знаходять все ширше застосування у виробництві кузовів автомобілів.

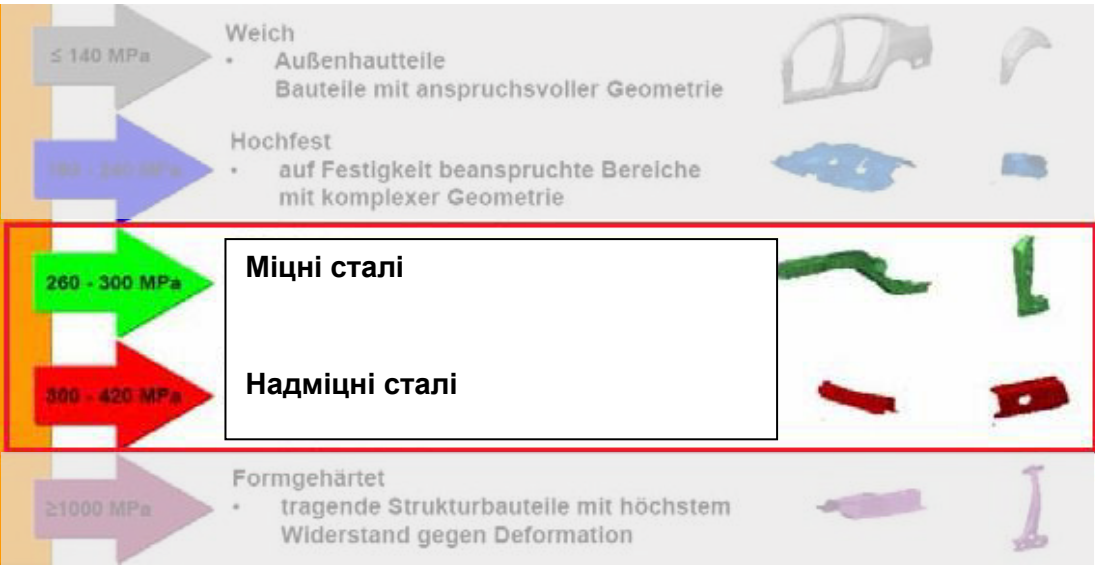


Рис. 11 Порівняння міцності TRIP сталей з іншими класами сталей та використання високоміцних та надвисокоміцних сталей у конструкції кузова автомобіля на прикладі VW Passat[12]

З діаграм видно, що TRIP-сталі в основному використовуються для тих частин кузова, які повинні забезпечувати високе поглинання енергії завдяки хорошій формованості під навантаженням. [12]

Листи TRIP 1200, з яких були вирізані зразки, піддаються електролітичному цинкуванню з обох боків таким же чином. Позначення EG53/53 відповідно до VDA 239-100.

Таблиця: Параметри гальванізації зразка

Тип	Позначення цинкування	Нанесена маса цинку, г/м ²	Товщина нанесеного шару μм	Густина, г/см ³
EG	53	53-73	7,5-10,3	7,1

На малюнку 12 показаний ескіз використовуваних зразків. Товщина зразка становить 1,48 мм.

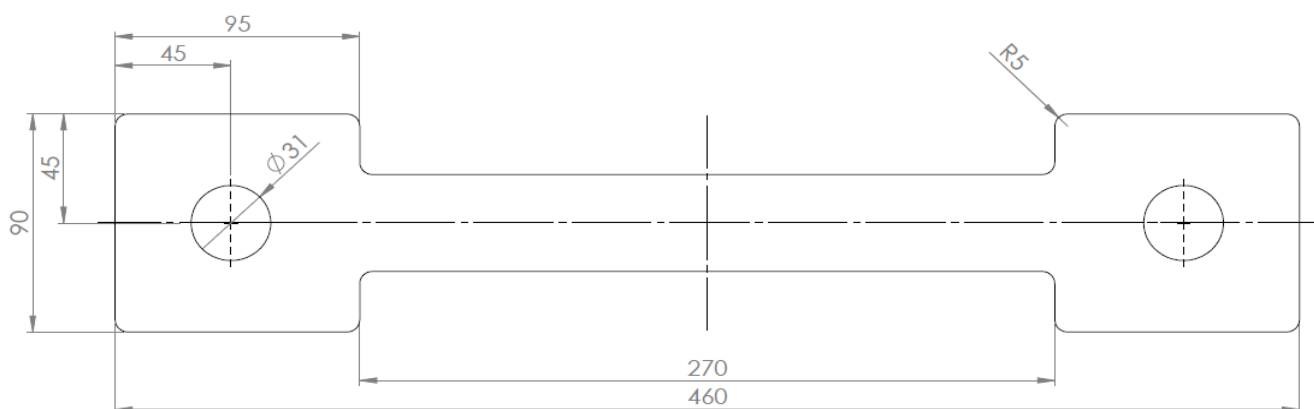


Рис. 12 Ескіз зразків, використаних для випробувань.

Ширина ділянки, що випробовується, - 39,8 мм.

2.1.2 Підготовка проби

Підготовка проби включає наступні етапи, узагальнені в таблиці.

Таблиця: Етапи підготовки проби

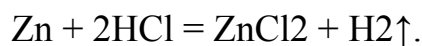
Етап	Мета
1. Зняття цинку з одного	Зняття шару задля уникнення виникнення

боку проби	диму під час зварювання задля кращих умов проведення досліду
2. Чистка та зняття жирових нанесень	Зняття корозійних продуктів після зняття цинку, знежирення поверхні для кращої адгезії фарби
3. Нанесення середньої смужки	Смужка запобігає нанесення лаку на області, в яких температура переважає 1200 градусів
4. Нанесення матової, термостійкої фарби як основи для утворення стохастичного візерунка	Створення контрастного візерунка
5. Нанесення сірої термостійкої матової фарби	Основа для розрахунку системи DIC
6. Спікання фарби	Досягнення необхідної термостійкості

У наступних розділах етапи підготовки розглядаються докладніше.

Однобічне видалення цинкового шару

Обезцинкування зразка проводиться з використанням соляної кислоти HCl з концентрацією 20% і протікає за наступною реакцією:



Процес відбувався у вихлопній системі. Сторона зразка, яка не повинна була зазнавати гальванізації, була покрита клейкою фольгою.

На фото зразок після одностороннього видалення цинку

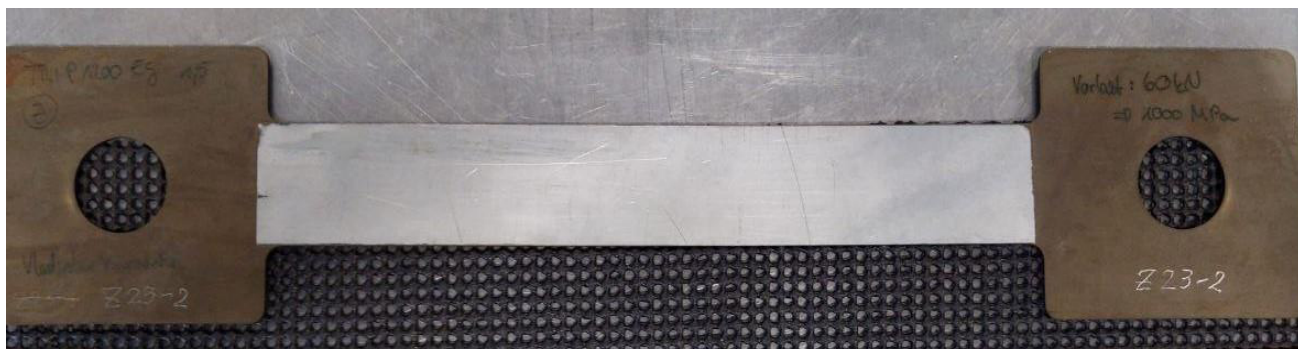


Рис. 13 Зразок з видаленим знизу шаром цинку (верхня сторона)

Очищення та знежирення

Оскільки після видалення цинку матеріал вільний від шару окислення, на повітрі виникають корозійні явища, які після можливості були видалені етанолом. Сторона зразка, що підлягає дослідженню, була відшліфована для видалення грубих продуктів корозії.

Прикріплення клейкої смуги

Оскільки температура піддається зразкам під час зварювання, значно перевищує $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ і, таким чином, перевищує значення опору фарб, середня частина зразка була заклеєна перед фарбуванням. Це запобігає впливу на зображення камери залишків цинкового покриття, яке згоряє і відпадає під час зварювання. Крім того, утворення диму зводиться до мінімуму. На рисунку 14 показаний пофарбований зразок з нанесеною перед ним клейкою смугою.



Рис. 14 Проба з нанесеною смугою

Для визначення необхідної ширини смуги було взято два значення.

По-перше, в [13] досліджувалось температурне поле під час випробування

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк. 16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PVR у рамках свого магістерського проекту. Зразки, що використовуються, були виготовлені з іншої сталі (DH 1200). Тим не менш, на підставі проведених досліджень можна визначити приблизні значення температури, що мають значення визначення ширини. [13]

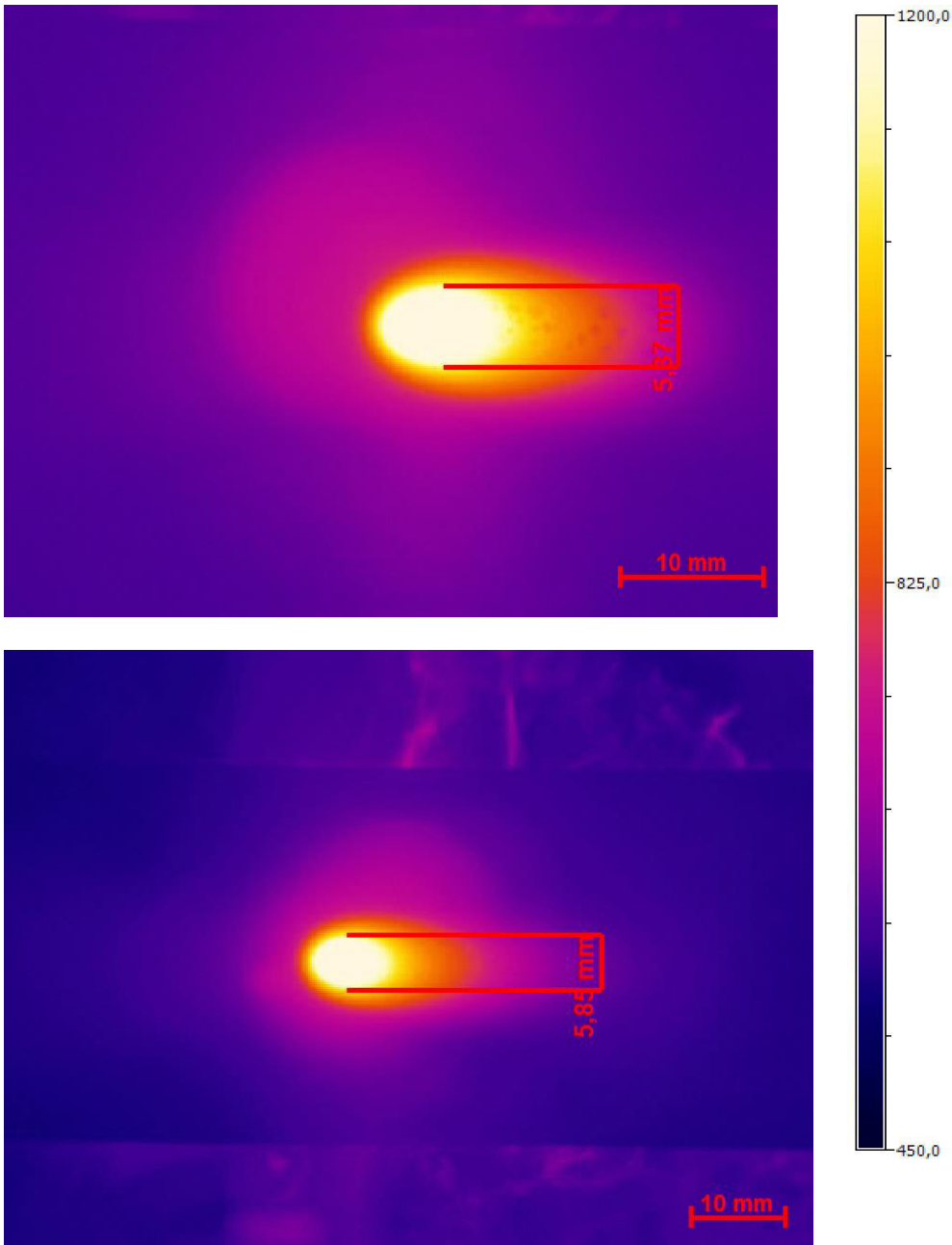


Рис. 15 Температурне поле під час зварювання [13]

На рисунку 15 виміряні області, де температура перевищує 1200С. Ширина критичних областей для кольорів становить 5,85 мм та 5,87 мм відповідно. Оскільки товщина зразків становить 1,18 мм – товщина зразків для DIC вимірювань становить 1,48 мм – можна припустити, що ширина смуги становить понад 6 мм.

Іншим критерієм визначення ширини смуги є розташування тріщин LME. Положення тріщин LME визначалося на основі зварених зразків. Виникнення тріщин дуже повторюване для матеріалу TRIP 1200. З цієї причини положення тріщин використовувалося як додаткова точка відліку для визначення ширини.

На рисунку 16 показано розріз зварного зразка. Відстань між тріщинами з обох боків становить 13 мм (загальна ширина 40 мм – 13 мм – 14 мм = 13 мм).

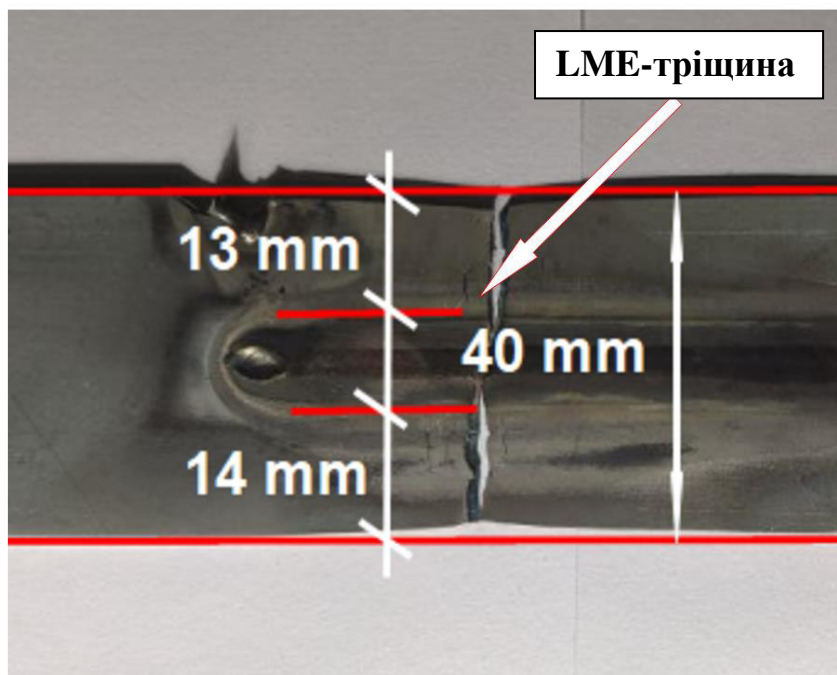


Рис.16 Розміри зварного зразка

Залежно від геометричного положення тріщин ширина смуги може бути менше 13 мм.

На підставі двох вищезгаданих критеріїв було визначено ширину смуги 10 мм. Запропонована ширина забезпечує, з одного боку, гарний захист від впливу температури, а з іншого боку - покриття ROI термостійкими фарбами.

Нанесення термостійкої базової фарби.

Наступним кроком було нанесення на зразки кількох шарів термостійкої фарби чорного матового кольору. На рисунку 17 показано пофарбований зразок.



Рис. 17 Зразок, пофарбований базовим кольором

Застосування стохастичного спекл-шаблону

Для створення стохастичного малюнка на зразках термостійка фарба сірого кольору наносилася на зразок зубною щіткою. Необхідна відстань між ними та колірне наповнення були визначені емпіричним шляхом. Зразок був покритий кількома шарами.

На рисунку 18 показано виріз готового лакованого зразка.



Рис.18 Застосований стохастичний спекл-візерунок

Після фарбування клейка смуга була видалена із зразків.

Процес зпiкання фарби

Термостійкі фарби набувають своєї стійкості тільки після процесу зпiкання. Для цього зразки випікалися в печі відповідно до рекомендованих виробником параметрів, які наведені в таблиці.

Таблиця: Параметри випалювання

Параметри зпiкання фарби			
Кроки	Триваліст ь	Температура	Помітки
1. Нагрівання печі	-	80 °C	-
2. Зпiкання перша стадія	30 хв	80 °C	-
3. Нагрівання	15 хв	з 80 °C до 190 °C	-
4. Зпiкання друга стадія	45 хв	190 °C	-
5. Охолодження	-	-	На повітрі

На малюнку 19 показано зразки після процесу зпiкання.



Рис. 19 Проби після зпiкання

Пiсля зпiкання на зразках було видно кольори вiдпуску, що показано рисунку 20.



Рис. 20 Кольори вiдпуску зразкiв

Зварювання зразкiв вiдбувається на верхнiй (незабарвленiй, оцинкованiй) сторонi, тодi як вимiрювання DIC вiдбувається на нижнiй (забарвленiй та знецинкованiй) сторонi.

2.2 Випробувальна установка

2.2.1 Основний принцип

Для дослідження явища тріщин LME було використано PVR-випробування (Programmierter Verformung Riss Versuch — запрограмований дослід на розтягування при зварюванні) з одночасним записом зразка за допомогою 2D DIC-камери. Таким чином, вся випробувальна установка є з'єднанням обох методів вимірювання. На рисунку 21 показано основний принцип вимірювання місцевих механічних умов.

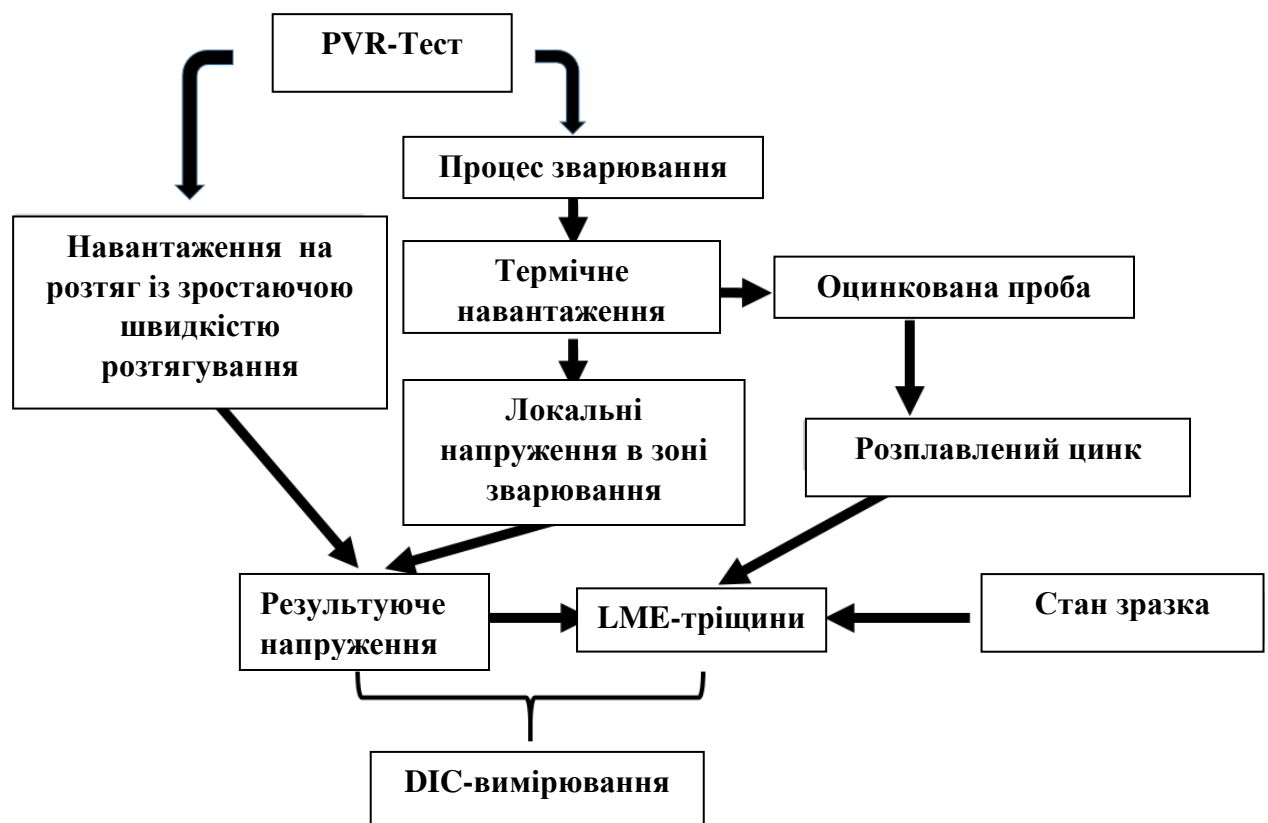


Рис. 21 Основний принцип дослідження

2.2.2 Тест PVR

Одним з найважливіших представників методів вимірювання зовнішньої напруги зразків для кількісної оцінки сприйнятливості до гарячого розтріскування є випробування на тріщиноутворення при програмованій деформації (PVR-випробування). Для цього тріщини викликаються комбінацією параметрів зварювання та механічного навантаження.

Випробування PVR дозволяє визначити сприйнятливість матеріалів до гарячого розтріскування відповідно до критерію. Цей критерій є критичною швидкістю розтягування v_{krit} . Для цього випробування зразок затискається в горизонтальному положенні машини для випробування на розтяг. Під час випробування цей зразок одночасно розтягується в горизонтальному напрямку при лінійно зростаючій швидкості розтягування v_{PVR} і зварюється при постійній швидкості зварювання v_s . Метод PVR дозволяє використовувати різні методи дугового зварювання з різними комбінаціями основного матеріалу та наповнювача. Така різноманітність комбінацій дозволяє уявити велику кількість різних умов. Випробування PVR схематично показано на наступному малюнку 9 [13]

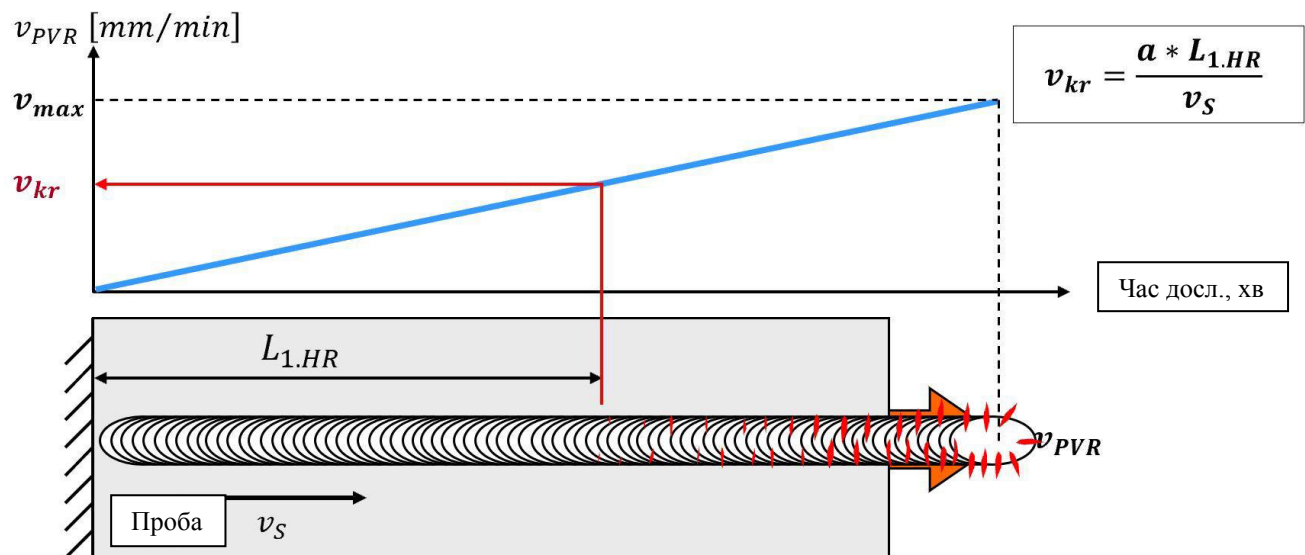


Рис. 22 Схематичне зображення дослідів PVR[13]

Під час випробування PVR деформація матеріалу збільшується експонентно. Це можна пояснити швидкістю деформації (v_{PVR}), що постійно збільшується. У той самий час зразок зварюється у горизонтальному напрямі за постійної швидкості зварювання (v_s). Це дозволяє кожній точці зразка мати швидкість деформації, яка може бути точно визначена через постійне збільшення. Критична швидкість розтягування визначається відстанню між лінією початку зварного шва та першою гарячою тріщиною, прискоренням деформації (a) та швидкістю зварювання за допомогою наступного рівняння

$$v_{krit} = \frac{L_{1.HR} * a}{v_s}$$

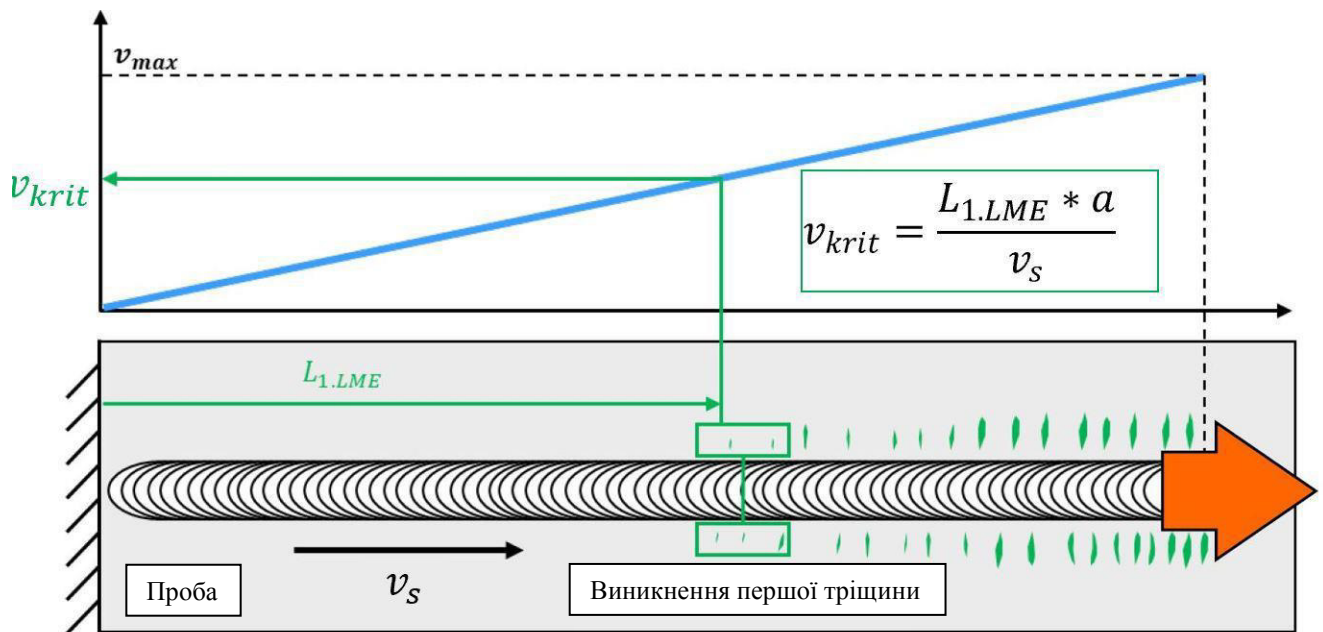


Рис. 23 Схема виявлення положення LME-тріщин[13]

Основним фактором визначення сприйнятливості до LME також є критична швидкість деформації. Рівняння визначення критичної швидкості деформації також може бути змінено, оскільки прискорення і швидкість зварювання також постійні. На відміну від випробування на сприйнятливості до гарячих тріщин, у разі тріщини LME, які є локалізованими, і відстань до початкової лінії вимірюється при 25-кратном збільшенні.

2.2.3 Установка PVR

Для дослідження характеристик матеріалу під час зварювання використовується установка фірми WPM Leipzig. Установка дозволяє проводити PVR-Тест (Programmierter-Verformungs-Riss Versuch, запрограмований деформаційний тест) під час якого проба одночасно піддається осьовому навантаженню та зварюється. Хоча тест використовує для дослідження схильності матеріалів до виникнення гарячих тріщин, він також підходить для дослідження LME-тріщин (Liquid Metal Embrittlement- тріщини, спричинені рідким металом)



Основні характеристики установки:

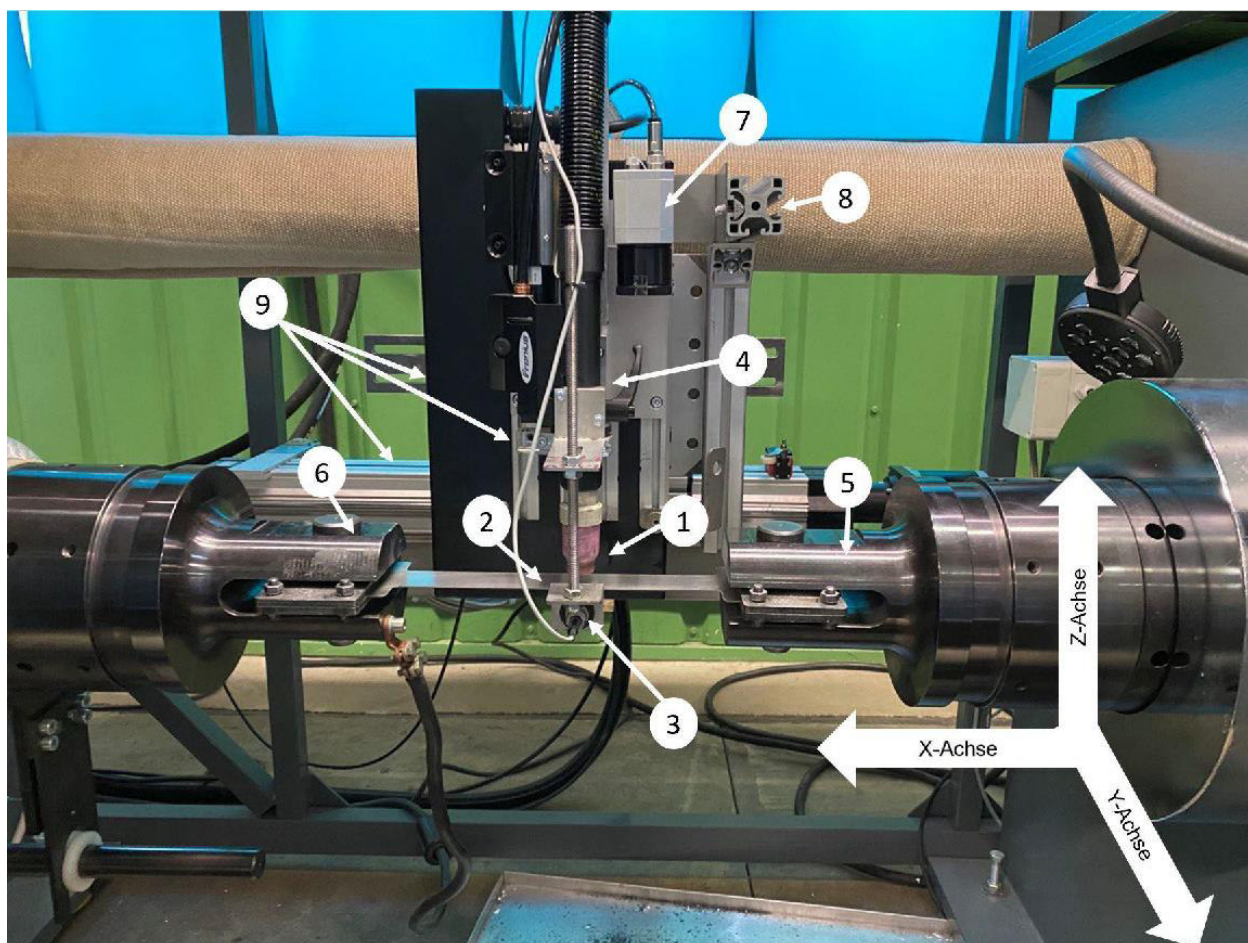
Швидкість розтягування, при якій навантаження прикладається до зразків, може бути встановлена в діапазоні від 1 мм/хв до 150 мм/хв.

1. Номінальне зусилля натягу: 550 кН (можливі більш високі зусилля натягу) [7]
2. Номінальне зусилля стиснення: 950 кН
3. Регульовані по швидкості переміщення натягу до 400 кН
4. Зварювальний маніпулятор, регульований по 3 осях
5. Раціональний вимір і оцінка в зв'язку завдяки комп'ютерному управлінні та відповідним програмним забезпеченням.
6. Випробувальний циліндр, який використовується в тестовій машині, являє собою диференційний циліндр з підшипниками низького тертя.

На наступному рисунку показані основні елементи установки

- 1 - Зварювальний пальник TIG
- 2 - Затиснутий зразок
- 3 - Датчик дуги
- 4 - Тримач зварювального пальника
- 5 - Гідравлічний циліндр (фіксована опора)
- 6 - Гідравлічний циліндр (рухома опора)
- 7 - Тепловізійна камера
- 8 - Тримач
- 9 - Лінійні маніпулятори

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ				
					25				



Показчик

Оскільки тест PVR в основному проводиться незалежно від вимірювання DIC, тимчасовий зв'язок поки що не може бути встановлений. Для того, щоб з'єднати два випробування в часі і таким чином об'єднати та скоординувати результати, був розроблений показчик або тригер, який кріпиться до записуючого пристрою системи PVR і переміщується разом із пальником під час процесу зварювання. Вказівник встановлюється таким чином, що він охоплює край зразка під собою, що фіксується камерою. З початком тесту PVR показчик переміщається, синхронізуючи два тести.

На рисунку 25 показано технічний малюнок показчика.

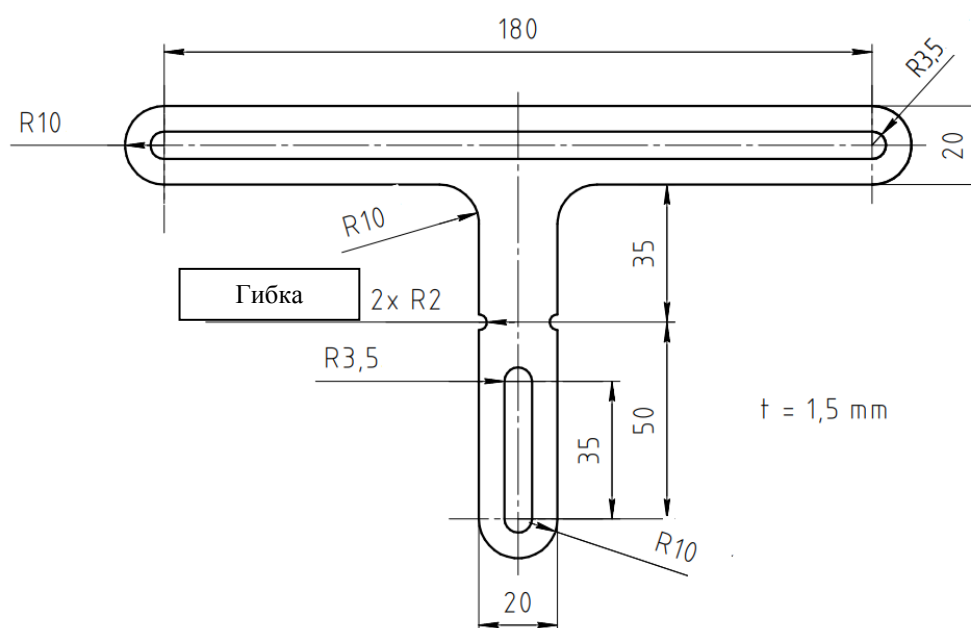


Рис. 25 Ексіз показчика

Покажчик був виготовлений з листа низьковуглецевої сталі завтовшки 1,5 мм методом лазерного різання. На рисунку 26 показаний готовий покажчик.

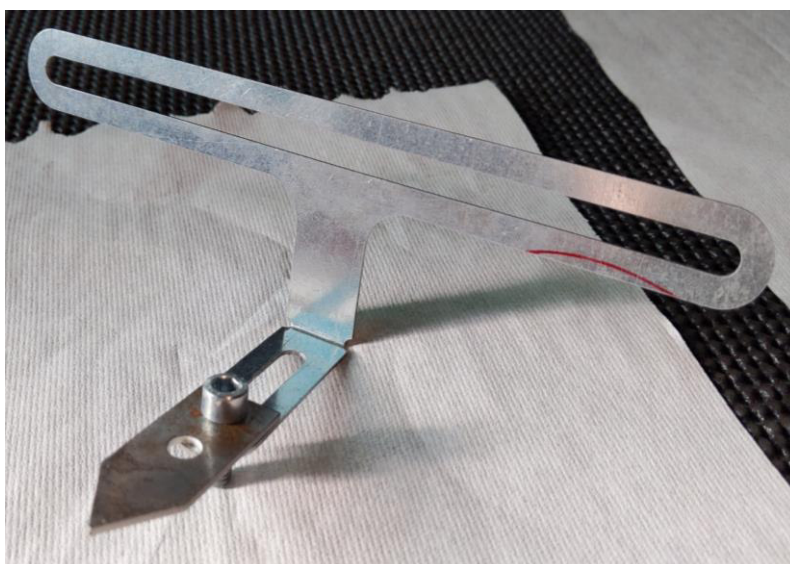


Рис. 26 Готовий показчик з утримувачем та його положення під зразком

3.2.2 Загальні умови

Дослідження зразка з одночасним застосуванням випробування PVR та вимірювання DIC потребує оцінки та розгляду загальних умов обох методів.

Щоб ознайомитись з технологією DIC та визначити її межі, було проведено випробування на розтяг на розривній машині ZWICK з одночасним записом зразка за допомогою 2D DIC-камери. Для цього до двох зразків TRIP 1200 було застосовано спекл-шаблон, що видно на рисунку 27.



Рис. 27 Зразки на розтягування для вимірювання DIC

Для реалізації запису було використано тестову установку, показану на рисунку 28.



Рис. 28 випробувальна установка для вимірювання DIC на розтягувальній машині ZWICK.

На малюнку 29 показаний зразок після випробування на розтяг та вікно програми оцінки GOM Correlate.

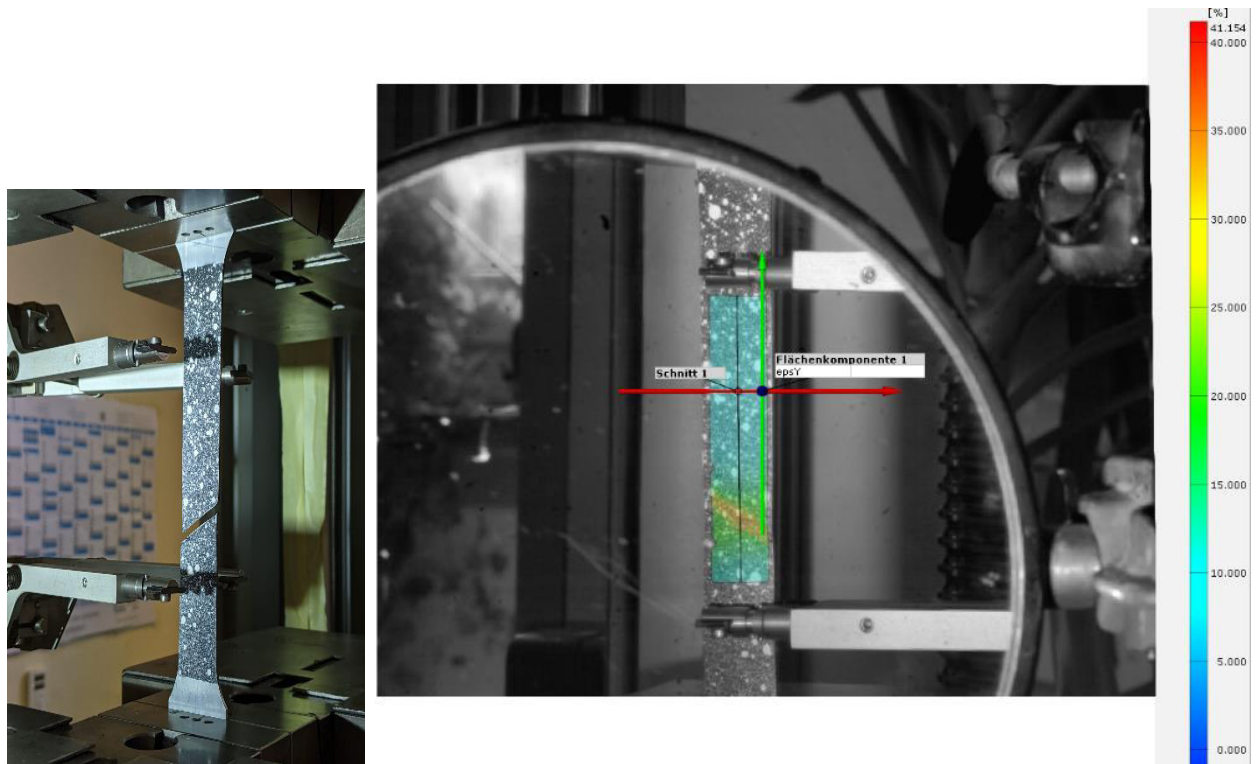


Рис. 29 Випробування системи при досліді на розтяг

На підставі описаних вище експериментів можна визначити межі або рамкові умови застосування методу DIC. Одним із них є оптична доступність зразка. Оскільки колони трактора були на шляху променя, траєкторію променя довелося перенаправити за допомогою дзеркала. У таблиці порівнюються деякі загальні умови вимірювання DIC та випробування PVR.

Таблиця Загальні умови

PVR-Тест	DIC-Вимірювання
Впливи, пов'язані із процесом зварювання: Високі температури, світлове випромінювання, утворення	Оптична доступність: можливості вирівнювання камери, фокусування, максимально повного захоплення ROI

диму тощо.	
Тривалість досліду	Контрастний стохастичний візерунок
Розміри випробувального простору (зокрема, відстань між зразком та опорною плитою)	Достатнє, рівномірно розподілене, додаткове освітлення зразка

Тому розробка випробувальної установки для проведення вимірювань DIC у поєднанні з випробуванням PVR повинна проводитись з урахуванням перерахованих вище рамових умов, за необхідності з необхідними коригуваннями. Детальніше вони описані в наступному розділі.

Захисна коробка/кріплення

У процесі дугового зварювання слід очікувати утворення диму, а також випадання залишків цинкового покриття, які можуть пошкодити камеру та відповідний кабель. Щоб уникнути цього, камера була поміщена у захисну коробку разом із кріпленням.



Рис 30 Захисна коробка з кришкою

Отвір для камери був передбачений у кришці, яка закрита пластиною з плексигласу. Для того, щоб можна було прокласти з'єднувальний кабель USB,

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

у бічній стінці коробки було вирізано отвір. Внутрішня частина коробки та кришка були пофарбовані чорною матовою фарбою, щоб уникнути відбиття зсередини.

Розміри коробки становлять 400 мм х 300 мм х 340 мм.

Для вибору відповідного ящика було враховано розміри випробувальної камери системи PVR.

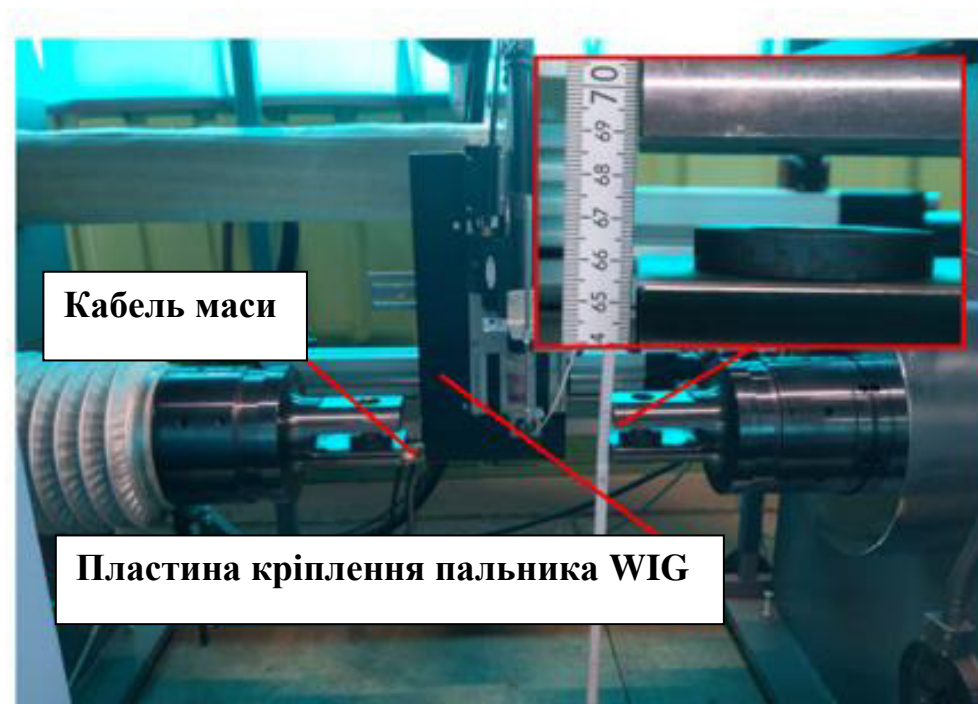


Рис. 31 Обмеження тестового простору системи PVR.

Найбільш важливими обмеженнями, які необхідно враховувати, є відстань від зразка до підлоги, яка становить 670 мм, відстань між краєм зразка та монтажною пластиною (87 мм), а також заземлювальний кабель, затиск якого був встановлений горизонтально.

Кріплення для камери складається з алюмінієвих профілів та шарового шарніра, як показано на рисунку 32.

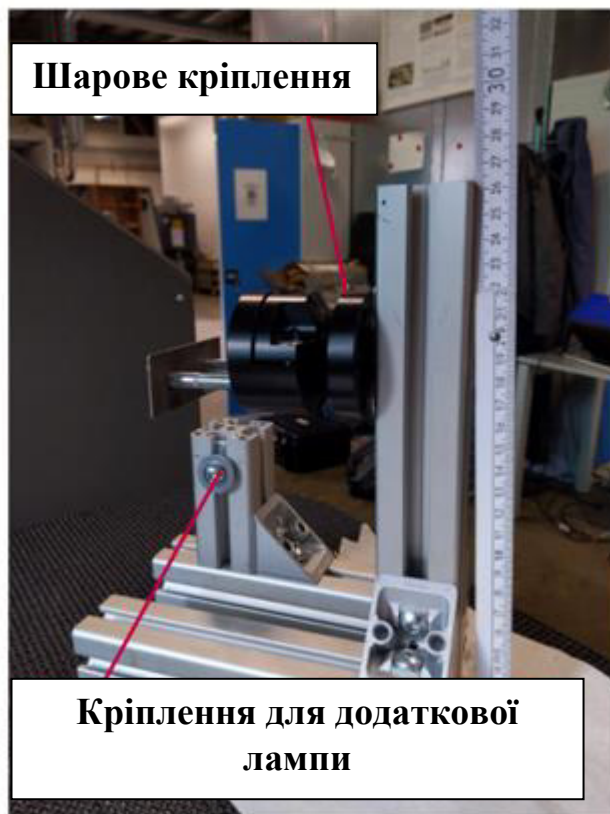


Рис. 32 Кріплення камери

Завдяки шаровому шарніру камера може бути встановлена перпендикулярно зразку за допомогою спиртового рівня. Оскільки відстань між зразком та камерою складала близько 17 см, для підтримки необхідної відстані під ящик довелося поставити додатковий дерев'яний піддон.



Рис. 33 Позиціонування камери за допомогою водяного рівня

Пристосування, яке використовується для випробувань, характеризується простотою монтажу, міцністю, можливістю універсального позиціонування камери. Крім того, було розглянуто можливість встановлення джерела світла. Однак камера затягується за допомогою пластини з двома болтами, що може призвести до пошкодження корпусу камери через необережне поводження (занадто велике зусилля затиску). Іншим критичним моментом монтажу є трудомісткість позиціонування з недостатньою повторюваністю та відносно невеликий діапазон регулювання – близько 200 мм.



Рис. 34 2D DIC камера

У таблиці наведено технічні дані камери, яка була застосована для вимірювань.

Таблиця: Технічні дані 2D DIC камери

Параметр	Значення
Розширення	2560 px * 2048 px
Частота зйомки	70 fps
Межа вимірювань	з 10 мм до 10 м

Розміри камери (без об'єктива) становлять 46 x 28 x 35

Об'єктив

Для камери використовувався об'єктив із фіксованою фокусною відстанню від KOWA.



Рис. 35 об'єктив Kowa $f = 50$ мм/F1.4

Найбільш важливі параметри об'єктива зведені у таблиці [14]

Таблиця: Налаштування лінзи [14]

Параметри	Значення
Фокусна відстань, мм	50, постійна
Величина сенсора	1
Значення бленди	1 : 1,4 ~ 16, мануально
Мін. фокусна відстань	0,5
Межа фокусування	0,5 - ∞ , мануально
Величина поля зору при мін фокусній відстані, горизонтально	121,8
Величина поля зору при мін фокусній відстані, горизонтально	91,3
Різьба для фільтру	M40,5 x 0,5
Від кріплення	C-Mount

Виходячи з технічних характеристик об'єктива мінімальний розмір зображення становить 121,8 мм x 91,3 мм. Цей розмір значно перевищує ширину зразка. Це означає, що зразок займатиме лише невелику частину зображення. Хоча при цьому захоплюється більша частина зразка, загальна роздільна здатність при цьому знижується. Щоб ширина зразка займала якомога більшу частину зображення, камера повинна бути розташована ближче (щодо мінімальної відстані фокусування 0,5 м) до зразка. Однак це перевищує мінімальну відстань об'єктива. Щоб мати можливість використовувати об'єктив на більш коротких відстанях, використовуються кільця-проставки.

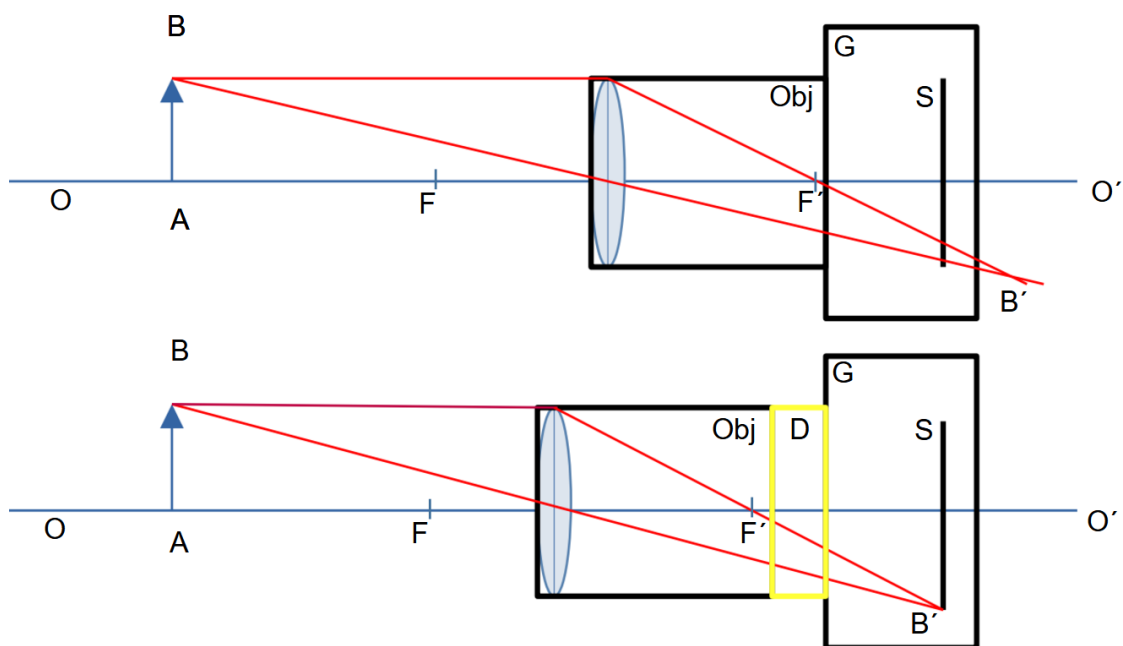


Рис. 36 Функціональний принцип кільце-проставок

На малюнку 36 показано принцип роботи дистанційних кільце. Об'єкт АВ знаходиться надто близько до об'єктиву (скорочено на малюнку). Оптична вісь називається О-О'. Таким чином, головні промені за датчиком S перетинаються у точці В '. Об'єкт розмитий. Для боротьби з цим між корпусом камери G та об'єктивом встановлюється дистанційне кільце D. Це збільшує відстань між об'єктивом та матрицею. Для простоти в об'єктиві показана тільки одна лінза, що збігається. Завдяки цьому зсув об'єкт АВ збільшується і різко зображується на матриці S.

Теоретично можна розрахувати довжину дистанційного кільця. І тому включається рівняння лінзи.

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$$

b - ширина зображення, відстань між площиною об'єктива та реальним зображенням

g - відстань до об'єкта, відстань між об'єктом та площиною об'єктива

f - фокусна відстань

Довжина кільця L розраховується за такою формулою [15]

$$L = \frac{-f^2 * z}{(g - f)((g - f) + z)}$$

Тут z означає зміну відстані до об'єкта ($g_2 - g_1$).

Для того щоб охопити весь діапазон використання камери з різними кільцями відстаней, відстані та відповідні поля вимірювання були визначені експериментально.

У таблиці сумовані значення при використанні двох різних кілець відстані (5 мм, 10 мм).

Таблиця Відстань з використанням дистанційних кілець 5 мм та 10 мм

Фокусування	Відстань до предмета	Поле зору у * х
min	40 см	75 мм x 100 мм
0,5	50 см	95 мм x 115 мм
0,7	65 см	125 мм x 155 мм
min (кільце 5 мм)	25 см	45 мм x 55 мм
0,5	26,5 см	50 мм x 60 мм
0,7	31,5 см	55 мм x 70 мм
min (кільце 10 мм)	17,5 см	30 мм x 40 мм
0,5	19 см	35 мм x 45 мм
0,7	21 см	40 мм x 50 мм

На наступному малюнку показано зображення зразка з різними відстанями між кільцями у вікні програми двовимірної візуалізації GOM Snap.

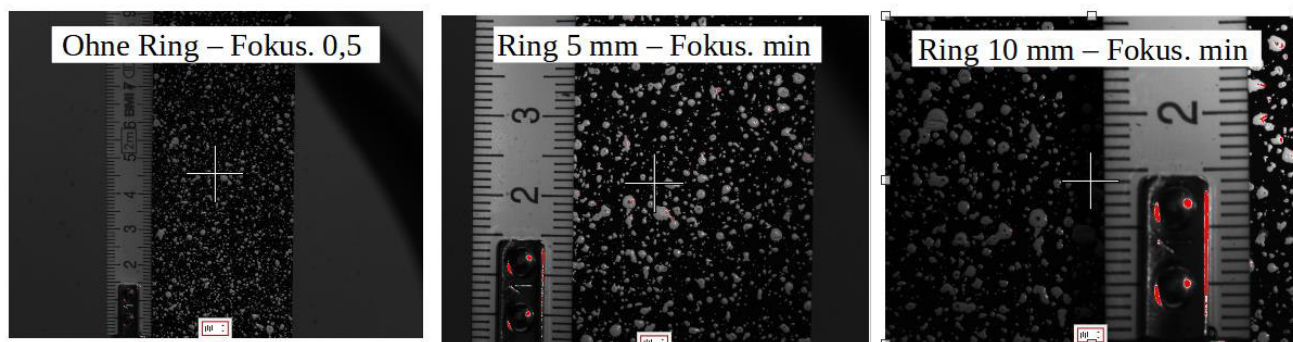


Рис. 37 Поле зору в залежності від налаштувань камери та дистанційного кільця (без кільця – кільце 5 мм – кільце 10 мм)

Згідно з отриманими даними, комбінація з дистанційним кільцем довжиною 10 мм виявилася підходящою. Отримане поле вимірювання (хв. 30 мм x 40 мм) відповідає ширині зразка PVR (≈ 40 мм).

Фільтр об'єктива

Завдяки різьбленню до об'єктиву можна прикріпити різні фільтри:

- сірий фільтр або ND-фільтр (пропускає менше світла, що дозволяє збільшити час експозиції);
- Поляризаційний фільтр (поляризує світло та пропускає тільки ті промені, які лежать у площині поляризації фільтра [16] . Це мінімізує відображення на металевих поверхнях);
- УФ-фільтр (фільтрує ультрафіолетове випромінювання та часто використовується для захисту лінз).

Для DIC-знімків до об'єктиву були приєднані поляризаційний фільтр (ліворуч) та УФ-фільтр (праворуч), які показані на рисунку 38.



Рис. 38 а) Поляризаційний фільтр; б) УФ-фільтр

Поляризаційний фільтр дозволяє мінімізувати відображення, як описано вище. Однак для цього необхідне правильне налаштування, яке важко врахувати під час налаштування.



а)



б)

Рис. 39 Ефект поляризаційного фільтра: а) без правильного налаштування; б) ефект, що досягається поворотом фільтра.

Використовуючи описані вище дистанційні кільця та фільтри, в результаті вийшло загальне встановлення камери, показане на рисунку 40.



Рис. 41 Загальна структура камери

Важливим моментом при зйомці фотоапарат є освітлення. Освітлення має бути розподілене якомога однорідніше і бути достатнім для досягнення гарного розмаїття у поєднанні з налаштуваннями діафрагми.

Для цієї мети спочатку використовувався різак, що постачається разом із приладдям компанією Me-Go. Лампа була встановлена на кріплення камери. Однак лампа не може бути встановлена коаксіально, тому існує певне зсув, яке означає, що лампа не закріплена вертикально. У результаті зразок висвітлюється нерівномірно, що показано малюнк. Ця неоднорідність може бути виявлена у програмі двовимірного запису GOM Snap.

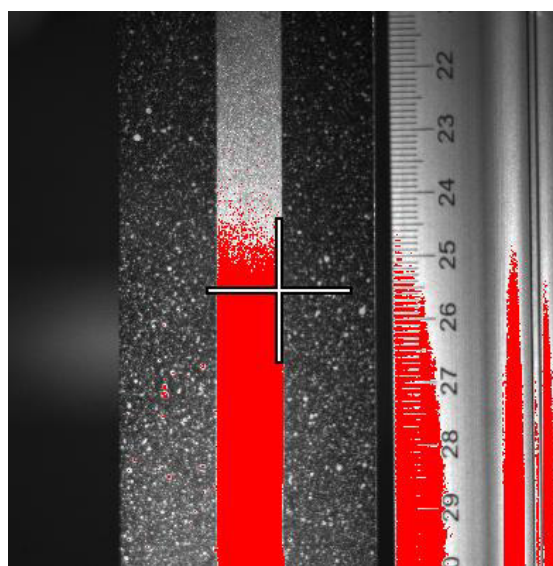


Рис. 41 Нерівномірне освітлення в результаті зміщення джерела світла

Ділянки, які переекспоновані у програмі, відмічені червоним кольором. Нерівномірність освітлення, показана малюнку, призводить до різної контрастності вздовж зразка. Для усунення цього ефекту в наступних експериментах замість ліхтарика використовувався кільцевий світильник із регульованою яскравістю, який встановлювався на об'єктив.



Рис. 42 Кільцеве підсвічування на об'єктив

GOM Snap

Для запису використовувався GOM Snap 2D. Програма дозволяє встановити різні параметри зйомки, а також проводити профілактичне тестування (наприклад, якість малюнка). Найбільш важливими параметрами налаштування GOM Snap 2D є, в основному, частота захоплення (кількість захоплених фотографій за секунду) та пов'язаний з експозицією. Як вихідна частота запису було взято 5 Гц. Після проведення тестових випробувань було встановлено, що ця частота недостатньо висока, оскільки не було досягнуто лише низької роздільної здатності. Тому частота була збільшена до 10 Гц. Хоча теоретично під час запису можна зробити необмежену кількість фотографій, проте їх кількість обмежена програмою ≈ 600 знімками. Кількість фотографій, поділена на частоту запису, дає запис або тривалість вимірювання DIC, що є одним з обмежень методу DIC.

2.2.4 Якість візерунка

GOM Snap 2D дозволяє оцінити якість стохастичного спекл-шаблону. У цьому контексті якість розуміється як здатність оцінити тест на основі існуючого зразка за заданих умов.

На малюнку різні деталі перевіряються на якість. Грубий візерунок а, показаний вище, характеризується своїми нерівностями. Смуга розподілу якості показана праворуч. Необхідно домогтися того, щоб на всі ділянки поверхні, що знаходяться в зеленій зоні смуги, було нанесено максимально тонкий і однорідний візерунок, що свідчить про хорошу структуру візерунка. Тут впадає у вічі бічне світло, оскільки поверхня освітлена нерівномірно

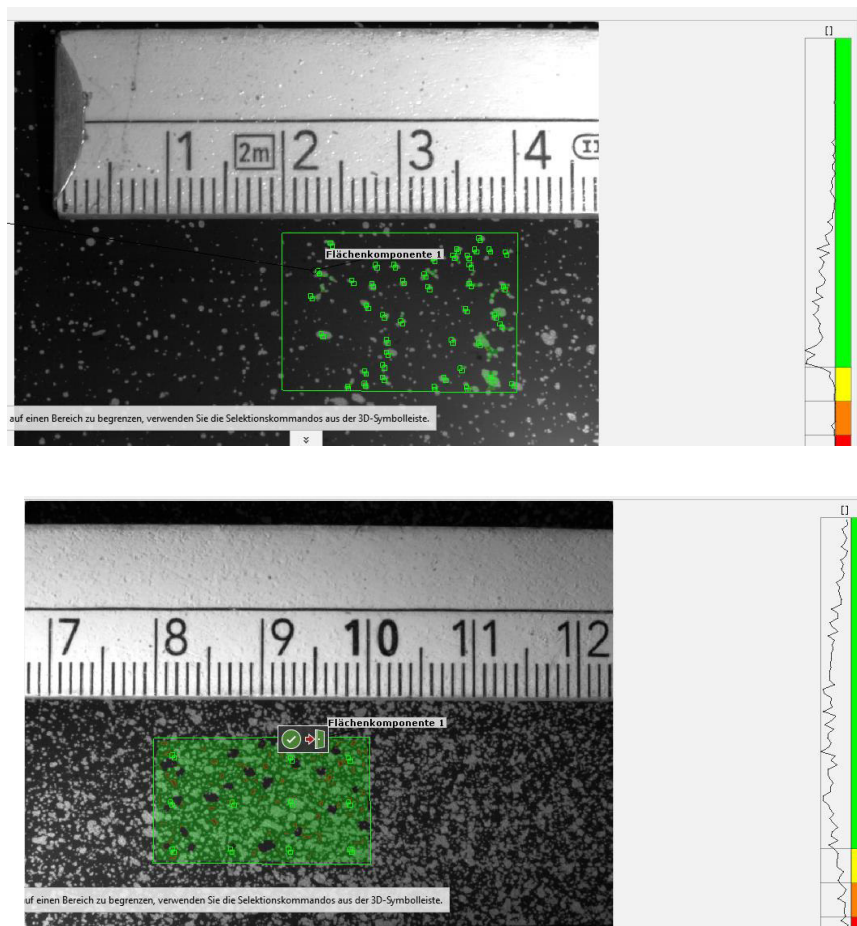


Рис. 43 Порівняння якості візерунків грубого (а) та тонкого (б).

Крім тонкощі стохастичної картини спекул, на якість також впливає яскравість освітлення. Як описано вище, ліхтар був замінений кільцевим ліхтарем. Важливість освітлення стає зрозумілою із малюнка 44.

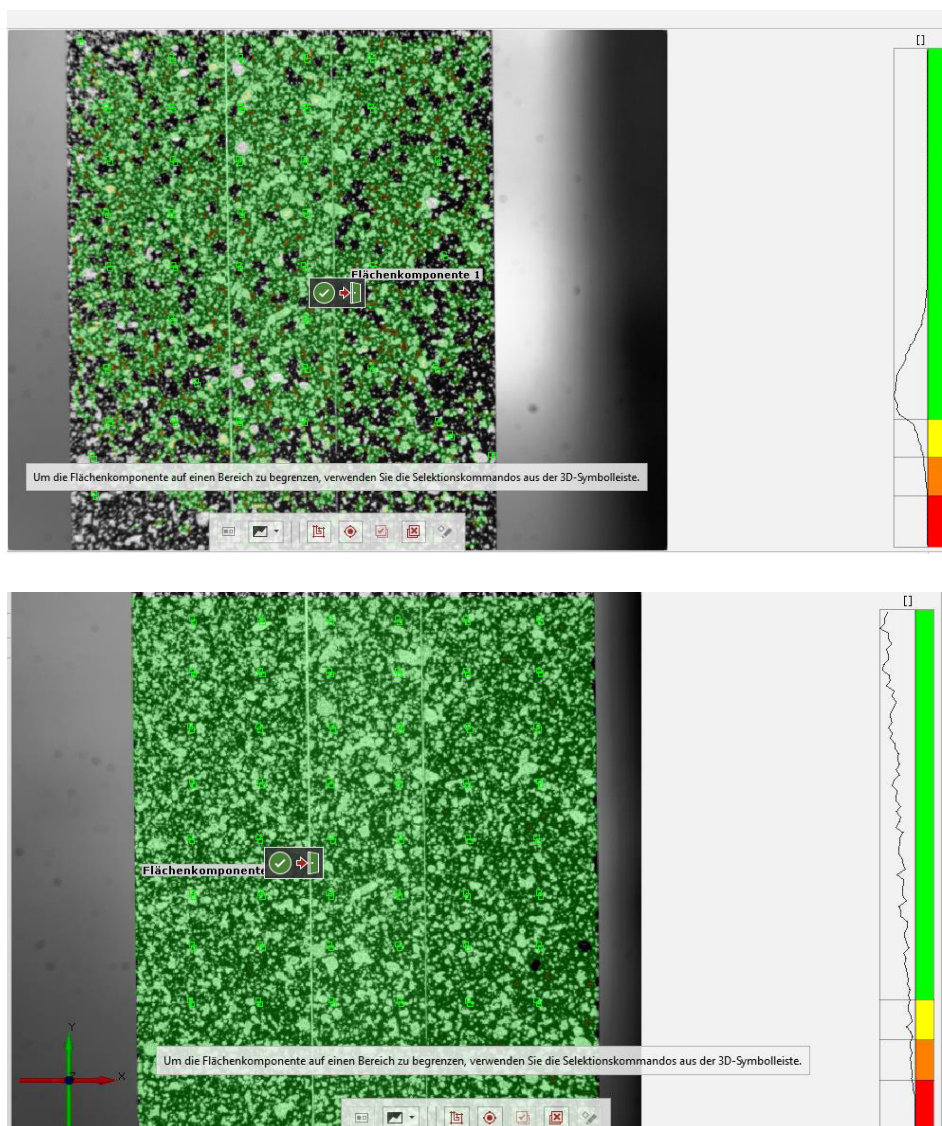


Рис. 43 Порівняння якості зразка за різного освітлення.

У верхній частині малюнка 43 зразок висвітлений слабким світлом. Тут якість деталі явно низька порівняно з невеликим переэкспонування зразка внизу. Це показує одну з кількох можливостей налаштування техніки DIC, а саме: хороше, однорідне освітлення з невеликим переэкспонуванням для кращого розмаїття і, отже, хорошої якості візерунка.

Оскільки спекл-візерунки наносяться в кілька шарів за допомогою зубної щітки, їх нанесення вимагає певної вправності. Проте, як видно з малюнку 43, деякі ділянки візерунка не розпізнаються програмою, що призводить до появи чорних прогалин, незважаючи на те, що візерунок досить тонкий і встановлене оптимальне освітлення. Для поліпшення цих ділянок і, відповідно, загальної якості деталі, їхнє положення було визначено та покращено вручну шляхом нанесення додаткового кольору на ці прогалини.

На рисунку 44 показаний зразок до та після обробки та зміна якості малюнка.

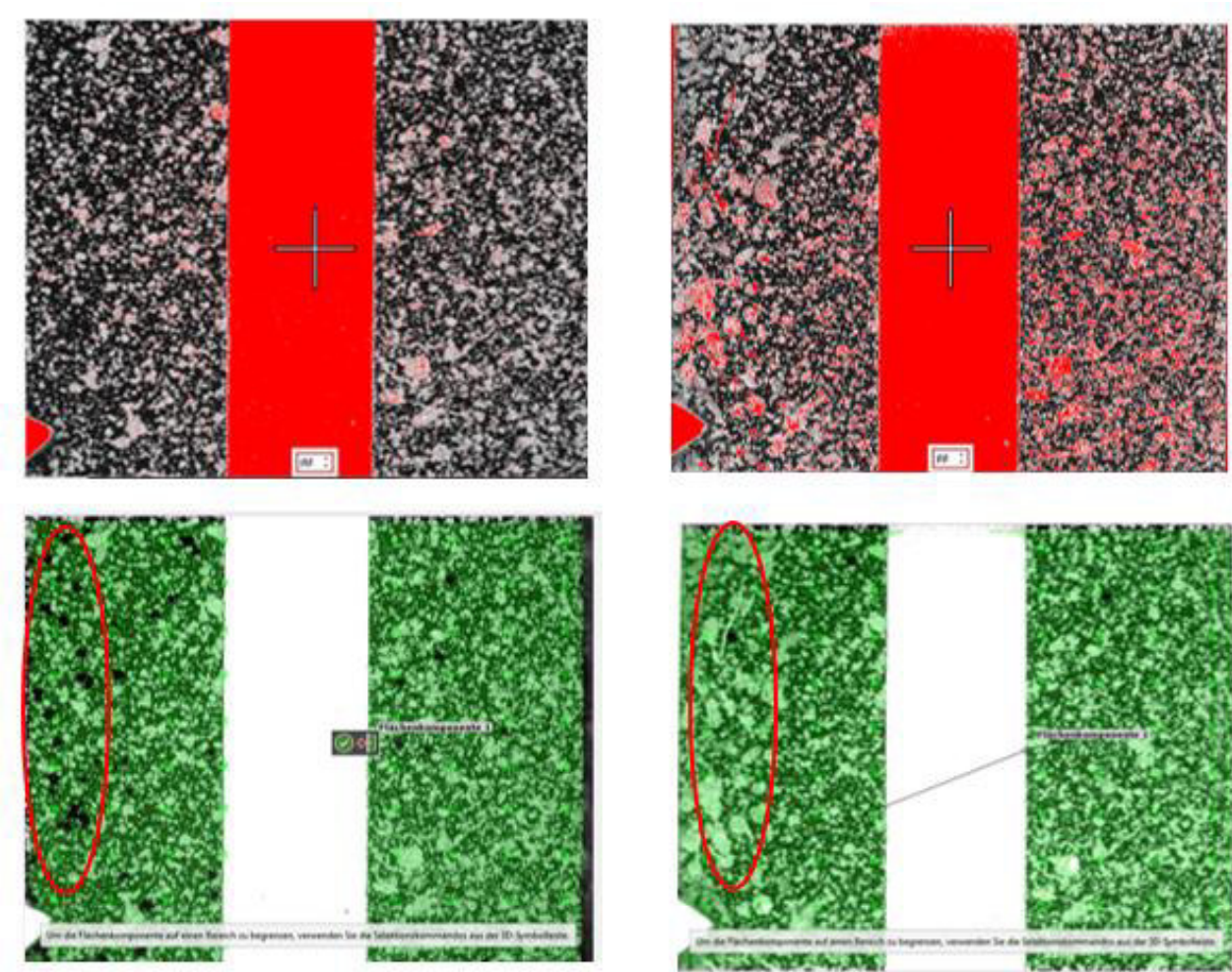


Рис 44 Порівняння та покращення якості візерунка

У верхній частині рисунка 44 зразок висвітлений слабким світлом. Тут якість деталі явно низька порівняно з невеликим переекспонуванням зразка внизу. Це показує одну з кількох можливостей налаштування техніки DIC, а саме: хороше, однорідне освітлення з невеликим переекспонуванням для кращого розмаїття і, отже, хорошої якості малюнка.

Оскільки спекл-візерунки наносяться в кілька шарів за допомогою зубної щітки, їх нанесення вимагає певної вправності. Проте, як видно з малюнку 44, деякі ділянки візерунка не розпізнаються програмою, що призводить до появи чорних прогалин, незважаючи на те, що візерунок досить тонкий і встановлене оптимальне освітлення. Для поліпшення цих ділянок і, відповідно, загальної якості деталі, їхнє положення було визначено та покращено вручну шляхом нанесення додаткового кольору на ці прогалини.

Заходи проти випромінювання, пов'язаного зі процесом зварювання

Світлове випромінювання, що генерується в процесі зварювання, є основною перешкодою камери. Для того, щоб умови освітлення залишалися якомога постійнішими під час вимірювання DIC, необхідно виключити перешкоди, спричинені випромінюванням (прямим або відбитим). Було вжито заходів для досягнення цієї мети. Один із них, як описано вище, полягав у фарбуванні захисної коробки чорною фарбою. Отвір у кришці було вирізане якнайменше. Однак найважливішим заходом було наклеювання алюмінієвої клейкої стрічки на обидва боки країв зразка. Вибираючи відповідний матеріал для екранування, виходили з існуючих високих температур. Алюмінієва фольга виявилася підходящою завдяки своїй достатній термостійкості та гнучкості. На малюнку показаний зразок із наклеєними на нього смужками алюмінієвої фольги.

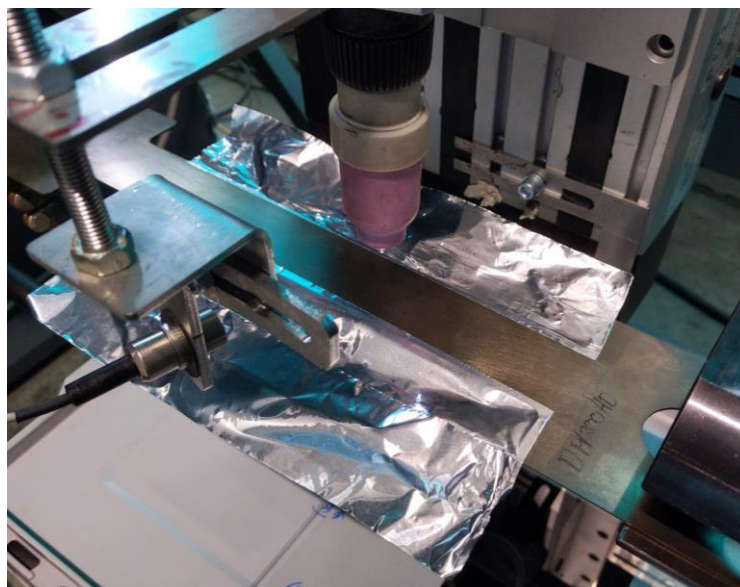


Рисунок 45 Зразок із наклеєними смужками алюмінієвої фольги

3. Принципова схема гідроприводу розтягування із застосуванням крокового двигуна

На рис. 46 показана принципова схема приводу для установки PVR.

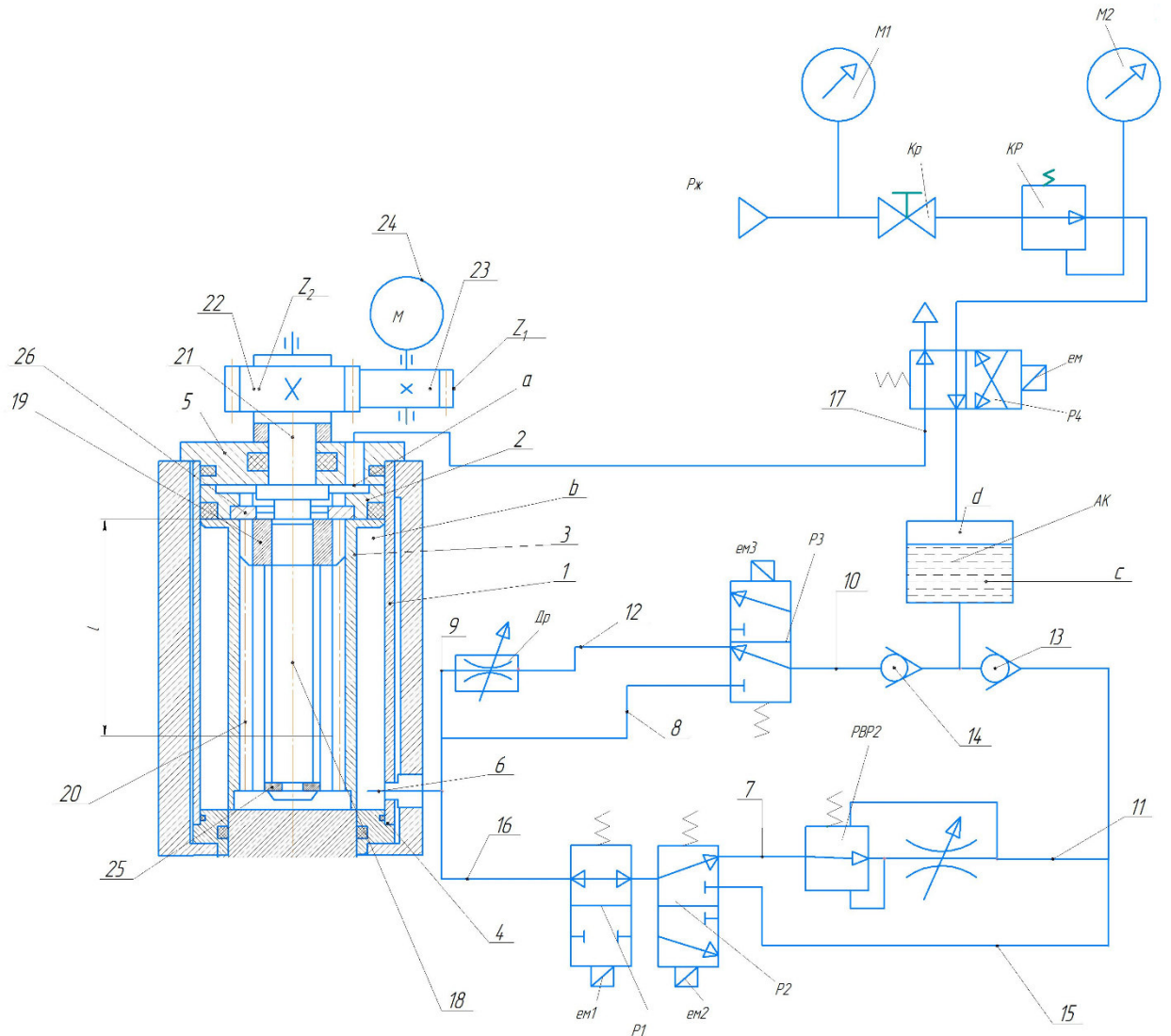


Рис. 46 Принципова схема приводу для установки PVR

В осьовій циліндричній розточці штока 3 і поршня 2 концентрично розміщений гвинт 18, на який нагвинчена гайка 19 з повздовжніми шліцевими пазами 20, виконаними на внутрішній циліндричній поверхні вихідного штока 3. На хвостовику 21 гвинта 18 закріплюється зубчасте колесо 22, яке зачеплюється з зубчастим колесом 23, вал якого з'єднаний з вихідним валом електричного крокового двигуна ЕКД 24. Переміщення гайки 19 в осьовому напрямку

обмежується стопорними кільцями 25 та 26. Довжина робочої частини l гвинта 18 дорівнює величині максимального переміщення

Принцип дії модернізованого вертикально-свердлильного верстата полягає в наступному. У вихідному положенні електромагніти ЕМ1-ЕМ розподільників Р1, Р2, Р3, Р4, ГР і обмотки електричного крокового двигуна (ЕКД) 24 знеструмлені. Поршень 2 і гайка 19 знаходяться у верхньому крайньому положенні (за кресленням). Для переміщення в задану позицію вниз спочатку подається необхідна кількість керуючих імпульсів струму на обмотки ЕКД 24, при цьому обертається гвинт 18, внаслідок чого гайка 19 переміщується вниз на задану величину. Величина переміщення гайки 19 вниз визначається по залежності

$$z = \frac{\varphi_0}{360^\circ} \times n_{\text{ім}} \times \frac{z_1}{z_2} \times t_{\text{гв}},$$

де φ_0 – кут повороту вихідного вала ЕКД 24 при опрацюванні одного керуючого імпульсу струму (дискретність ЕКД); $n_{\text{ім}}$ – число опрацьованих імпульсів; z_1, z_2 – числа зубців зубчатих коліс 23 та 22; $t_{\text{гв}}$ – крок гвинта 18. Так, наприклад, для переміщення гайки 17 вниз на величину $z = 60$ мм при значенні параметрів: $\varphi = 1,8^\circ$, $z_1 = 15$, $z_2 = 30$, $t_{\text{гв}} = 12$ мм необхідно на ЕКД 24 подати

$$n_{\text{ім}} = \frac{360^\circ}{\varphi} \times \frac{z}{t_{\text{гв}}} \times \frac{z_2}{z_1} = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} \times \frac{60}{12} \times \frac{30}{15} = 2000 \text{ (імпульсів)}$$

Після переміщення гайки 17 вниз на задану величину подається напруга на електромагніт em розподільника 16, який перемикається, при цьому тиск живлення Рж подається у камеру а циліндра 3, а камера b через регулятор витрати рідини 8 і зворотний клапан 13 з'єднується з камерою c акумулятора 15. Під дією тиску живлення в камері a поршень 2 зі штоком 3 і зміщуються вниз. При переміщенні поршня 2 вниз швидкість руху регулюється регулятором витрати рідини 8. Після виконання технологічної $gjhitym$ повертається у вихідне

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

положення , при цьому спочатку знеструмлюється електромагніт ем розподільника 16, який перемикається і з'єднує камеру а циліндра 6 з атмосферою , а в камеру d акумулятора 15 подається тиск живлення. Під дією пневматичного тиску в камері d акумулятора 15 рідина послідовно через зворотний клапан 8 і дросель 4 поступає в камеру b, при цьому поршень 2 зі штоком 3 рухаються вгору до упору поршня 2 в кришку 5. Після постановки поршня на упор подаються керуючі імпульси на обмотки ЕКД 24, при цьому гайка 19 переміщується в задану позицію. Так, наприклад, для переміщення гайки 19 на величину $z_n = 84$ мм вниз відносно верхнього крайнього положення необхідно на ЕКД 24 подати керуючих імпульсів:

$$n_{imm} = \frac{360^\circ}{\varphi^\circ} \times \frac{z_n - z}{t_{ze}} \times \frac{z_2}{z_1} = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} \times \frac{84 - 60}{12} \times \frac{30}{15} = 800 \text{ (імпульсів)}$$

Для переміщення гайки 19 вгору на величину, наприклад, $z_v = 24$ мм відносно верхнього крайнього положення необхідно в реверсному режимі на ЕКД 24 подати керуючих імпульсів:

$$n_{imm} = \frac{360^\circ}{\varphi^\circ} \times \frac{z - z_e}{t_{ze}} \times \frac{z_2}{z_1} = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} \times \frac{60 - 24}{12} \times \frac{30}{15} = 1200 \text{ (імпульсів)}$$

Після переміщення гайки 19 в задану позицію подається напруга на електромагніт ем при цьому розподільник Р4 перемикається і тиск живлення Рж від нього подається в камеру а. Під дією тиску в камері а поршень 2 зі штоком 3 переміщуються на задану величину. При цьому величина подачі регулюється і підтримується постійною незалежно від навантаження.

Привод забезпечує як швидке вниз, так і робочу швидкість (подачу). Для забезпечення швидкого руху вниз від програмного пристрою (контролера, який на схемі не показаний) подається напруга на електромагніти ем4, ем2 розподільників Р4 та Р1, які перемикаються і рідина із камери b витісняється в камеру с по ланцюгу: канал 10, розподільник Р1, розподільник Р3 і зворотний клапан 7. Для переходу швидкості руху на робочу подачу від контролера

подається команда на знеструмлення електромагніта ем2 розподільника Р2, який перемикається і рідина із камери *b* циліндра 1 поступає в камеру *c* акумулятора АК через регулятор витрати рідини РВР2, яким налаштовується постійна задана швидкість руху. Швидкість переміщення вгору здійснюється за допомогою дроселя Др. Так для забезпечення швидкого руху вниз необхідно знеструмити електромагніт ем4 розподільника Р4 і подати напругу на електромагніт ем3 розподільника Р3, який перемикається і рідина із камери *c* акумулятора АК поступає в камеру *b* циліндра 6 через зворотний клапан 20 і розподільник Р3 минувши дросель Др, чим і забезпечується швидкий рух. Для гальмування в кінці руху вгору знеструмлюється електромагніт ем3 розподільника Р3, який перемикається і рідина із камери *c* поступає в камеру *b* циліндра 1 через дросель Др, яким і регулюється гальмівна швидкість.

Тиск живлення до розподільника Р4 підводиться від джерела живлення Рж через кран Кр і редукційний клапан Кр. Налаштовується пневматичний тиск по манометрам М1 та М2.

Таким чином запропонована модернізація дає можливість забезпечити високу точність позиціонування, так як осьове позиціонування здійснюється по жорсткому механічному упору, тобто поршень 2 упирається в гайку 13. Привод забезпечує широкий діапазон позиціонування за заданою дискретністю, наприклад,

$$L_{\min} = \frac{\varphi}{360^\circ} \times n_{\min} \times \frac{z_1}{z_2} \times t_2 = \frac{1,8^\circ}{360^\circ} \times 1 \times \frac{15}{30} \times 12 = 0,03 \text{ мм}$$

Для зміни дискретності необхідно змінити , наприклад, параметри z_1 , z_2 , тгв, φ_0 .

Регулювання швидкості руху регулятором витрати рідини (наприклад Г55-22) дає можливість аналогово забезпечити широкий діапазон. Так, наприклад, регулятор витрати рідини типу МПГ55-22 забезпечує

								Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ			50

мінімальну витрату $Q_{\min} = 0,04$ л/хв та $Q_{\max} = 25$ л/хв при цьому швидкість руху визначається по залежностях:

$$V_{\min} = \frac{Q_{\min}}{F_y}; V_{\max} = \frac{Q_{\max}}{F_y}$$

Діапазон регулювання gthtvsotzzy:

$$C = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}}$$

Наприклад, при діаметрі поршня 2 циліндра 1 $D_p = 60$ мм мінімальні і максимальна подачі (швидкості руху шпинделя) будуть мати значення:

$$V_{\min} = \frac{4 \times Q_{\min}}{\pi \times D_n^2} = \frac{4 \times 0,04 \times 10^3}{\pi \times 6^2} = 1,42 \left(\frac{см}{хв} \right) \approx 0,24 \left(\frac{мм}{с} \right)$$

$$V_{\max} = \frac{4 \times Q_{\max}}{\pi \times D_n^2} = \frac{4 \times 25 \times 10^3}{\pi \times 6^2} = 885 \left(\frac{см}{хв} \right) = 147 \left(\frac{мм}{с} \right) = 0,147 \left(\frac{м}{с} \right)$$

Запропонований привід має значні переваги порівняно із стандартним приводом. По-перше, вирішується проблематика перегріву. Так як застосовується позиціонування по упору, при цьому забезпечується не лише висока точність, а також й незалежність від тривалості роботи. Також позбавляється велика дискретність стандартного приводу. Заміною зубчастих колес або кроком різьби гвинта можлива легка заміна дискретності.

4. Розрахункова схема гідроприводу розтягування із застосуванням крокового двигуна

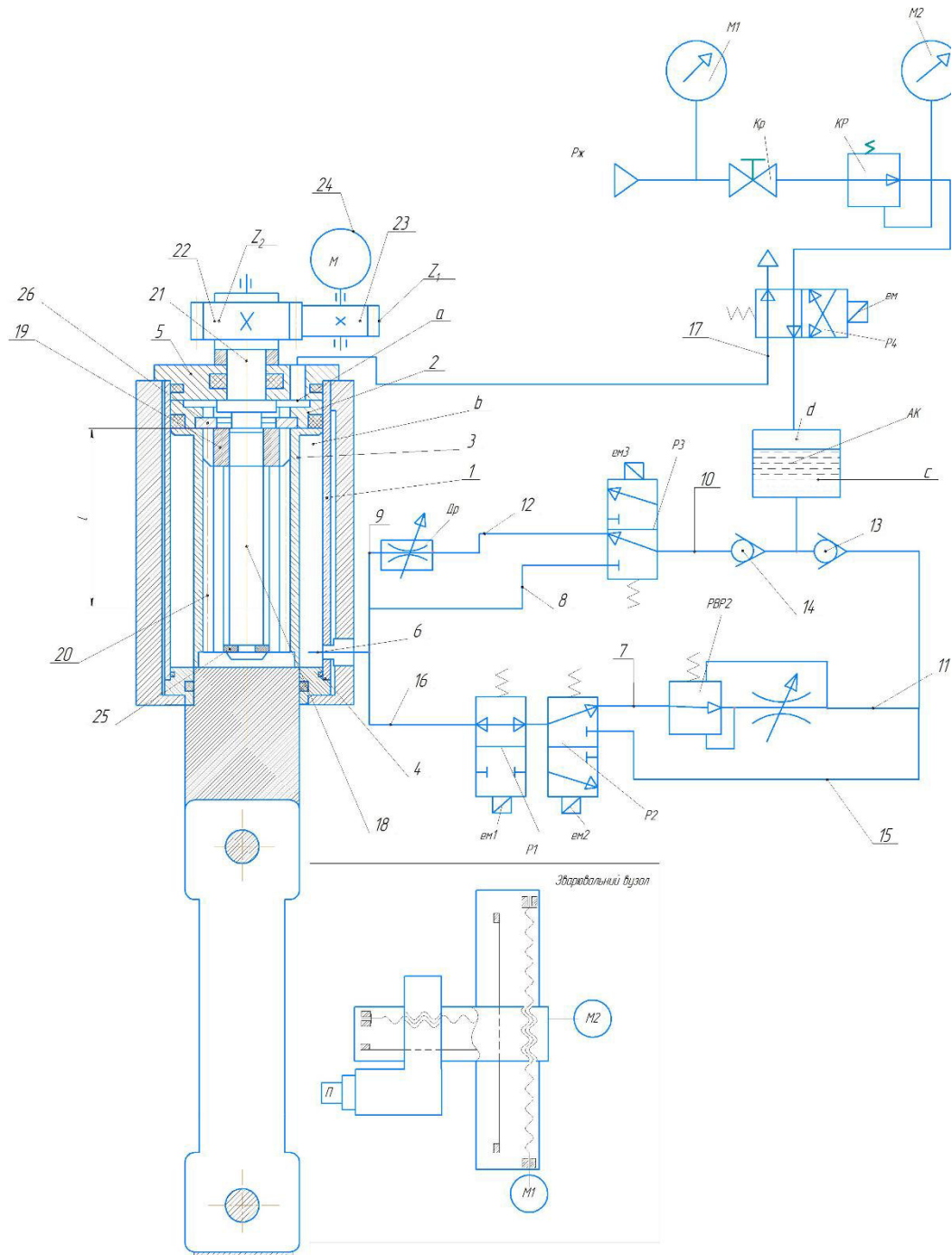


Рис. 47 Розрахункова схема гідроприводу

На рис. 47 показана розрахунова схема приводу. Поршень 1 і шток 2 утворюють геометричні камери: поршневу a та штокову b . Вихідний шток 2 з'єднаний з пробією. В осьовій розточці штока 2 розміщена на гвинті 4 гайка 5. Хвостовик 6 гвинта 2 через зубчасті колеса 7 та 8 з'єднаний з вихідним валом 9 електричного крокового двигуна (ЕКД). Поршнева камера a каналом через кран Кр 4 гідравлічний розподільник Рг з вихідним каналом насоса Н. Тиск живлення насоса Н налаштовується запобіжним клапаном КЗ по манометру М2. Камера a також через кран Кр2 та пневматичний розподільник РП з'єднана з вихідним каналом редукційного клапана РК з манометром М1.

Камера b циліндра 3 через канал 11, регулятор витрати рідини РВР, розподільник швидкого руху РШ, дросель Др, зворотні клапани Зк 1 та Зк 2, крани Кр 1 та Кр 3 з'єднана з вихідним каналом розподільника Рг, вихідним каналом пневмогідравлічного акумулятора Ак . пневматична камера c акумулятора Ак з'єднана з вихідним каналом редукційного клапана РК.

Переміщення може здійснюватись двома способами: або від насоса Н, при цьому необхідно перекрити крани Кр 1 та Кр 2, або від пневматичного тиску Рп, при цьому необхідно перекрити крани Кр 3 та Кр 4.

Розглянемо процес переміщення гідравлічним способом тобто при закритих кранах Кр 1 та Кр 2. Величина на задану величину z визначається опрацюванням ЕКД заданої кількості керуючих сигналів, тобто

$$z = \frac{\varphi^0}{360^0} \times n_{im} \times t_{zg},$$

де φ^0 – дискретність ЕКД; n_{im} - число опрацьованих імпульсів ЕКД; t_{zg} – крок гвинта 10.

Після переміщення гайки 5 на величину z подається напруга на електромагніт ем 2 розподільника РГ, при цьому рідина від розподільника РГ і кран Кр 4 поступає в камеру a , а камера b через увімкнений розподільник РШ,

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

зворотний клапан ЗК 1, кран Кр і розподільник РГ йде на злив. При цьому циклограма руху має вигляд: швидкий рух вниз і переміщення на робочій швидкості

Розглянемо алгоритм розрахунку характеристик приводу:

1. При заданому розрахунковому навантаженні P та тиску p із урахуванням механічного ККД $\eta_{\text{мех}}$ визначається діаметр поршня виконавчого приводу:

$$D = \sqrt{\frac{4p}{\pi p \eta_{\text{мех}}}}$$

2. Обирається необхідне значення P_{min} в робочій площині приводу:

$$P_{\text{min}} = \frac{4P}{\pi D^2 \eta_{\text{мех}}}$$

3. Обирається діаметр штока $d = (0,4 - 0,5)/D$ із урахуванням довжини ходу приводу та навантаження та округлюється до найближчого нормального значення, обираного із ряду 20, 25, 32, 40, 50, 60, 70, 80, 90 мм.

4. По заданій швидкості швидкого ходу приводу $V_{\text{шх}}$ визначається витрата рідини на лінії нагнітання:

$$Q_{\text{max}} = \frac{\pi D^2}{4} V_{\text{шх}}$$

5. По витраті рідини Q_{max} із урахуванням можливих втрат обирається потужність насоса та його типорозмір.

6. По потужності насоса $Q_{\text{нас}}$ обирається напорний золотник.

7. По витраті рідини Q_{max} обирається реверсний золотник, духходовий золотник із зворотним клапаном та фільтр, якщо він встановлений на лінії підводу рідини та фільтрує весь потік.

8. По витраті рідини Q_{max} та допустимій швидкості $V_{дон}$ рідини обирається діаметр трубопроводу $d_{m.p.}$ на лінії підводу:

$$d_{m.p.} = \sqrt{\frac{4Q_{max}}{\pi V_{дон}}}$$

Для напорної магістралі рекомендується приймати $V_{дон} = 3 - 3,5$ м/с при тиску 20×10^5 Н/м²; $V_{дон} = 4 - 5$ м/с при тиску до 50×10^5 Н/м². Знайдений діаметр округлюється до найближчого нормального значення із ряду 4, 6, 8, 10, 13, 15, 20, 25 мм.

9. Визначається витрата рідини на зливі при швидкому русі:

$$Q_{злmax} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times V_{вих}$$

10. По витраті рідини $Q_{зл max}$ обирається фільтр, якщо він встановлений і фільтрує весь потік рідини. По витраті рідини $Q_{зл max}$ та допустимій швидкості визначається діаметр зливного трубопроводу:

$$d_{ze} = \sqrt{\frac{4Q_{злmax}}{\pi V_{донзл}}}$$

Рекомендується $V_{дон зл} = 1,5 - 2,5$ м/с. Знайдений параметр округлюється до близького нормального значення.

11. Визначається витрата рідини на лінії підводу Q_1 та зливу Q_2 при робочому ході:

$$Q_1 = \frac{\pi D^2}{4} V_p$$

$$Q_2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} V_p$$

12. В залежності від місця установки по одній із витрат рідини обирається регулятор витрати рідини та фільтр, якщо він встановлений перед дроселем.

13. Визначаються дійсні значення швидкості масла в трубопроводі при робочому ході привода:

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_{mp}^2}$$

$$V_2 = \frac{4Q_2}{\pi d_{36}^2}$$

14. Визначається режим тиску рідини в трубопроводах на лініях підводу та зливу за числом Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{V_1 d_{mp}}{\gamma}$$

$$Re_2 = \frac{V_2 d_{36}}{\gamma}$$

де $\gamma - 2 \times 10^5 \text{ м/с}^2$ – кінематична в'язкість масла.

15. В залежності від режиму руху обираються коефіцієнти тертя для рідини

$$\lambda_{1,2} = \frac{64}{Re}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{0,3146}{Re^{0,25}}$$

16. Визначаються втрати тиску на тертя по довжині трубопровода для лінії підводу та зливу на робочому ході:

$$\Delta P_{L_2} = \lambda_2 \frac{L_2}{d_{36}} \frac{V_2^2}{2q} \gamma \quad \Delta P_{L_1} = \lambda_1 \frac{L_1}{d_{mp}} \frac{V_1^2}{2q} \gamma$$

та

$$\Delta P_{L_2} = \lambda_2 \frac{L_2}{d_{36}} \frac{V_2^2}{2q} \gamma$$

де $\gamma = 9,2 \times 10^3 \text{ Нм}^3$ – питома вага мінерального масла; l_1 та l_2 – довжина трубопроводу.

17. Визначаються втрати на місцевих опорах при робочому ході привода. Втрати тиску в гідравлічних апаратах приводяться в таблицях їх типорозмірів/ втрати вказані для максимальної витрати рідини через апарат.

а) для апаратів лінії підводу

$$\Delta p_{M_1} = \Delta p_{\text{мтабл}} \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{табл}}} \right)^2$$

б) для апаратів лінії зливу

$$\Delta p_{M_2} = \Delta p_{\text{мтабл}} \left(\frac{Q_2}{Q_{\text{табл}}} \right)^2$$

Враховуються втрати тільки в тих апаратах, через які проходить робочий потік рідини при руху привода із швидкістю робочої подачі. Для дрочелів слід приймати втрати тиску при робочій подачі $\Delta p_{\text{м др}} = 2-3 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$.

18. Визначаються сумарні втрати тиску на лінії підвода $\Delta p_{n1} = \Delta p_{l1} + \Sigma \Delta p_{M_1}$,

та на лінії зливу $\Delta p_{n2} = \Delta p_{l2} + \Sigma \Delta p_{M_2}$

19. Сумарні втрати на лінії зливу приводяться до робочої площини, враховуючи різницю ефективних площин в середині циліндра:

$$\Delta p_{\text{прив}} = \Delta p_2 \frac{D^2 - d^2}{D^2}$$

20. Визначається робочий тиск, на який має бути налаштований напірний золотник:

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$p_{роб} = p_{\min} + \Delta p_1 + \Delta p_{2прив}$$

21. Визначається потужність приводного двигуна насоса:

$$N = \frac{P_{роб} Q_{нас}}{\eta_{ef}}$$

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

4.1 Вихідні значення для розрахунку

1. Тип розподільника – реверсивний золотник із гідрокеруванням;
2. Регулятор швидкості робочого ходу – дросель із регулятором, встановленим на вході;
3. Фільтр встановлений перед дроселем із регулятором;
4. Розрахункове навантаження $P = 40$ кН;
5. Розрахунковий тиск $p = 20 \times 10^5$ Н/м² ;
6. Механічний ККД приводу $\eta_{\text{мех}} = 0,90$;
7. Максимальна подача $V_{\text{штп}} = 2,5 \times 10^{-2}$ м/с ;
8. Швидкість робочого ходу $V_p = 1,4 \times 10^{-2}$ м/с ;
9. Довжина ходу $S = 0,4$ м;
10. Довжина робочого ходу $S_p = 0,1$ м;
11. Довжина трубопроводу на лінії підводу $l_1 = 5$ м;
12. Довжина трубопроводу на лінії підводу $l_2 = 6$ м;

В якості робочої рідини приймаємо мінеральне масло індустріальне 20 із середньою кінематичною в'язкістю $\gamma - 2 \times 10^5$ м/с²

4.2 Розрахунок і вибір параметрів гідросистеми

1. Обираємо діаметр поршня:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi p \eta_{\text{мех}}}} = \sqrt{\frac{4 \times 40000}{\pi \times 20 \times 10^5 \times 0,9}} = 0,16 \text{ м}$$

Приймаємо $D = 160$ мм.

2. Обираємо необхідне значення P_{min} в робочій площині приводу:

$$P_{\text{min}} = \frac{4P}{\pi D^2 \eta_{\text{мех}}} = \frac{4 \times 40000}{\pi \times 0,16^2 \times 0,9} = 22 \times 10^5 \text{ Н / м}^2$$

3. Обираємо діаметр штока із урахуванням довжини ходу приводу та навантаження та округлюється до найближчого нормального:

$$d = (0,4 - 0,5) / D = 0,0168 - 0,021$$

Приймаємо $d = 80$ мм.

4. По заданій швидкості швидкого ходу привода V_{ux} визначаємо витрату рідини на лінії нагнітання

$$Q_{\max} = \frac{\pi D^2}{4} V_{ux} = \frac{\pi 0,16^2}{4} \times 2,5 \times 10^{-2} = 1,07 \times 10^{-4} \text{ м}^3 = 10,6 \text{ л / хв}$$

По витраті рідини обираємо насос типу Г12-22 із номінальною продуктивністю $Q_{\max} = 12$ л/хв.

Максимальний робочий тиск $P_{\max} = 63$ кгс/см². Частота приводного електродвигуна $n = 1440$ об/хв. Ефективний ККД $\eta_{\text{мех}} = 0,82$.

6. Обираємо напірний золотник – запобіжний клапан із переливним золотником типу Г52-14 із пропускною здатністю 3-70 л/хв.

7. По витраті рідини обираємо гідророзподільник – реверсивний золотник із гідрокеруванням типу Г72-32 та двухходовий золотник із оберненим клапаном типу Г74-11.

8. По витраті рідини $Q_{\max}$ та допустимій швидкості $V_{\text{дон}}$ рідини обираємо діаметр трубопроводу $d_{\text{м.р.}}$ на лінії підводу:

$$d_{\text{м.р.}} = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi V_{\text{дон}}}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,34 \times 10^{-4}}{\pi \times 4,5}} = 4,1 \text{ мм}$$

Приймаємо $d_{\text{мр}} = 8$ мм

9. Визначаємо витрату рідини на зливі при швидкому русі:

$$Q_{\text{зл max}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times V_{ux} = \frac{\pi(0,16^2 - 0,08^2)}{4} \times 2,5 \times 10^{-2} = 0,34 \times 10^{-4} = 2,06 \text{ л / хв}$$

10. По витраті рідини $Q_{\text{зл max}}$ та допустимій швидкості визначаємо діаметр зливного трубопроводу:

$$d_{ze} = \sqrt{\frac{4Q_{злmax}}{\pi V_{донзл}}} = \sqrt{\frac{4 \times 2,06 \times 10^{-4}}{\pi 2,5}} = 0,002 м.$$

Приймаємо $d_{зв} = 8$ мм.

11. Визначаємо витрата рідини на лінії підводу Q_1 та зливу Q_2 при робочому ході:

а) на лінії підводу Q_1

$$Q_1 = \frac{\pi D^2}{4} V_p = \frac{\pi 0,16^2}{4} \times 1,4 \times 10^{-2} = 1,2 \times 10^{-4} = 7,5 л / хв$$

б) та зливу Q_2

$$Q_2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} V_p = \frac{\pi(0,160^2 - 0,08^2)}{4} 1,4 \times 10^{-2} = 3,7 \times 10^{-4} = 2,2 л / хв$$

12. По витраті робочої рідини обираємо дросель із регулятором типу Г55-21 та фільтр пластинчастий типу 0,08 Г41-12.

13. Визначаємо дійсні значення швидкості масла в трубопроводі при робочому ході привода:

а) на лінії підвода

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_{mp}^2} = \frac{4 \times 1,2 \times 10^{-4}}{\pi \times 0,8^2 \times 10^{-4}} = 2,3 м / с$$

б) на лінії зливу

$$V_2 = \frac{4Q_2}{\pi d_{зв}^2} = \frac{4 \times 3,7 \times 10^{-4}}{\pi \times 0,8^2 \times 10^{-4}} = 0,71 м / с$$

14. Визначаємо режим руху робочої рідини по числу Рейнольдса:

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а) на лінії підводу

$$Re_1 = \frac{V_1 d_{mp}}{\gamma} = \frac{2,3 \times 8 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-5}} = 920$$

б) на лінії зливу

$$Re_2 = \frac{V_2 d_{зл}}{\gamma} = \frac{0,71 \times 8 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-5}} = 284$$

так як Re_1 та $Re_2 < Re_{кр} 2300$, то режим руху ламінарний;

15. Визначаємо коефіцієнти тертя для мастила:

а) для підводу рідини $\lambda_1 = \frac{64}{Re_1} = \frac{64}{920} = 0,07$

б) для зливу $\lambda_2 = \frac{64}{Re_2} = \frac{64}{284} = 0,2$

16. Визначаємо втрати тиску на тертя по довжини трубопроводу на лінії підводу та зливу:

$$\Delta P_{l_1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_{mp}} \frac{V_1^2}{2g} \gamma = 0,07 \frac{5}{8 \times 10^{-3}} \frac{2,3}{2 \times 9,81} \times 9,2 \times 10^3 = 0,21 \times 10^5 \text{ Н / м}^2$$

$$\Delta P_{l_2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_{зл}} \frac{V_2^2}{2g} \gamma = 0,2 \frac{6}{8 \times 10^{-3}} \frac{0,71}{2 \times 9,81} \times 9,2 \times 10^3 = 0,3 \times 10^5 \text{ Н / м}^2$$

17. Визначаємо втрати тиску в місцевих опорах:

а) на лінії підводу:

- в реверсивному золотнику

$$\Delta p_{M_1} = \Delta p_{mp3} \left(\frac{Q_1}{Q_{табл}} \right)^2 = 2 \left(\frac{1,2}{70} \right)^2 \times 10^5 = 0,002 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

- в фільтрі

$$\Delta p_{M_1} = \Delta p_{\phi} \left(\frac{Q_1}{Q_{табл}} \right)^2 = 1 \times 10^5 \left(\frac{1,2}{8} \right)^2 = 0,8 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

- в реверсивному золотнику

$$\Delta p_{M_2} = \Delta p_{p3} \left(\frac{Q_2}{Q_{табл}} \right)^2 = 2 \times 10^5 \left(\frac{3,7}{70} \right)^2 = 0,0016 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

18. Визначаємо сумарні втрати руху:

а) на лінії підводу

$$\Delta p_{n1} = \Delta p_{l1} + \Sigma \Delta p_{M_1} = (0,3 + 0,002 + 0,8) \times 10^5 = 1,12 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

б) на лінії зливу

$$\Delta p_{n2} = \Delta p_{l2} + \Sigma \Delta p_{M_2} = (0,3 + 0,2) \times 10^5 = 0,50 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

19. Приводимо втрати тиску на лінії зливу в робочій площині:

$$\Delta p_{прив} = \Delta p_2 \frac{D^2 - d^2}{D^2} = 0,50 \times 10^5 \frac{0,160^2 - 0,80^2}{0,160^2} = 0,22 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

20. Визначаємо робочий тиск, на який повинен бути налаштований напірний золотник:

$$p_{роб} = p_{min} + \Delta p_1 + \Delta p_{2прив} = (20 + 1,12 + 0,50) \times 10^5 = 21,62 \times 10^5 \text{ H / м}^2$$

21. Визначаємо потужність приводного двигуна насосної станції

$$N = \frac{P_{роб} Q_{нас}}{\eta_{ef}} = \frac{22 \times 10^5 \times 0,199 \times 10^{-3}}{0,82} = 500 \text{ Вт} = 0,5 \text{ кВт}$$

							Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ		63

Аналогічно проводиться розрахунок при використанні пневматичного тиску живлення. При цьому використання пневматичного тиску живлення при незначних осьових навантаженнях на свердло.

Запропонований алгоритм і приклад розрахунку приводу дає можливість на стадії проектування визначити основні параметри руху.

					МВ-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

5. Результати дослідів

Загалом 4 зразки з позначеннями G23-1, Z23-1, Z24-1 та Z24-2 були зварені та виміряні протягом цього часу з використанням технології DIC.

Оцінка за допомогою GOM Correlate проводилася у наступні етапи:

1. визначення масштабу: ширина незабарвленої частини зразка була прийнята за масштаб, що становить 10 мм;
2. створення компонентів області: компоненти області представляють оцінювану область зразка. Розмір фасетки становив 19 пікселів, а крок точок – 16 пікселів.
3. Вимірювання деформації (перевірка епсілон (ϵ)): Вимірювання деформації в напрямку Y. Напрямок Y відповідає виміру вздовж зразка. Можна реєструвати як справжні, і технічні деформації.

Зразок G23-1, який служив як тестовий зразок, мав низьку якість через грубе нанесення зразка. Тому оцінка за допомогою GOM Correlate була неможлива. На рисунку 48 показано зразок у фіксованому стані програми оцінки.

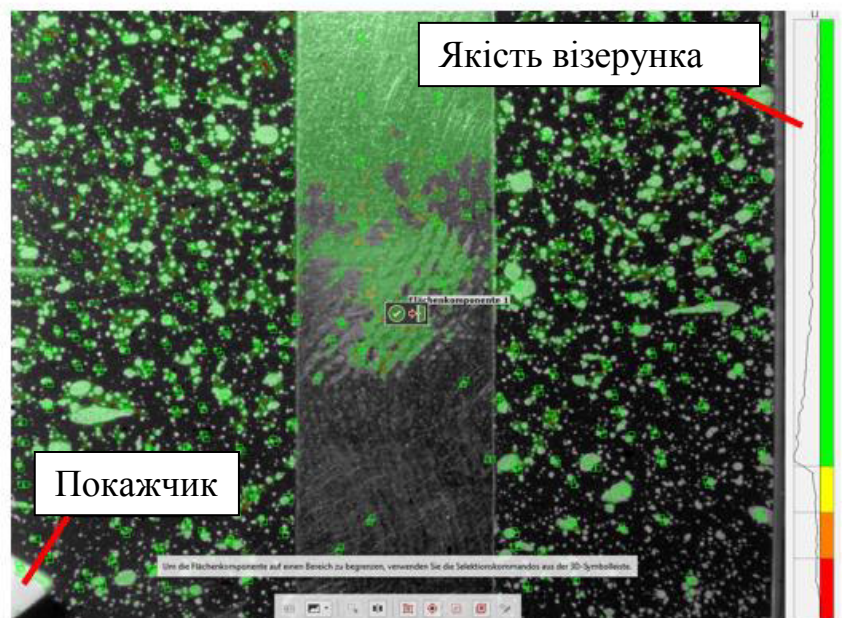


Рис. 48 Якість візерунка зразка G23-1.

На рисунку видно, що малюнок недостатньо точний, і оцінити можна тільки ті ділянки, де є кілька кольорових точок. Області з гарною якістю малюнка та їх розподіл відзначені зеленим кольором.

Така сама проблема виникла і із зразком Z23-2. Артефакт відображення впадає у вічі. Під час запису за допомогою GOM Snap 2D було помічено непередбачувану зупинку програми. Для протидії цьому у наступних тестах було проведено пробні запуски програми перед фактичним записом. Зразок Z23-2 показаний рисунку 49.

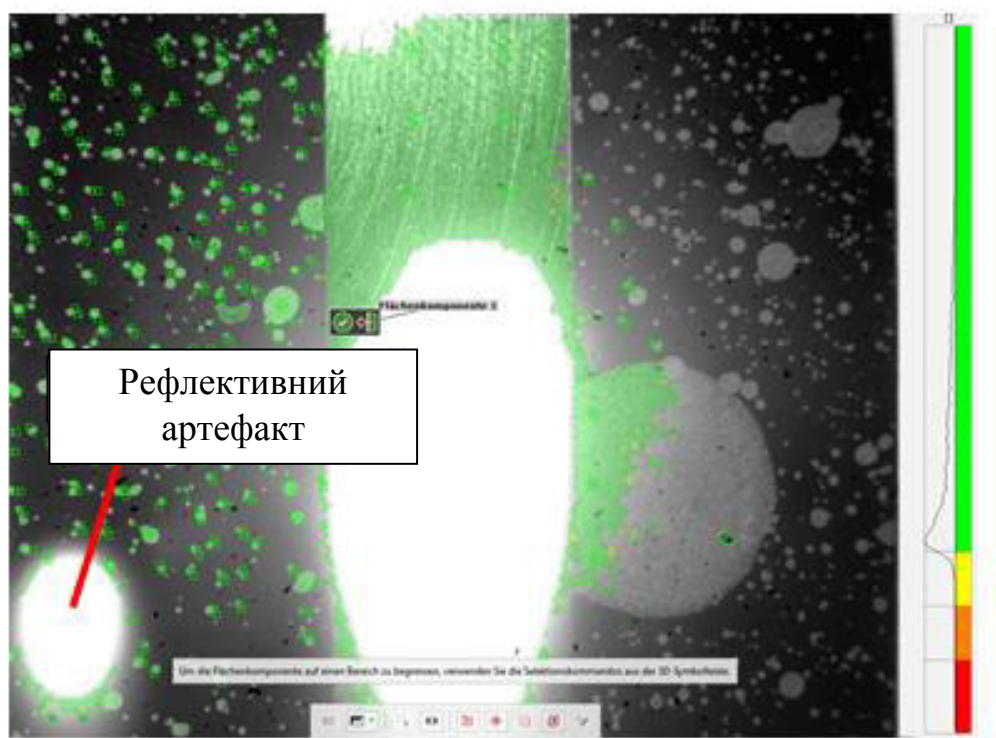


Рис. 49 Зразок Z23-2 з плямою відображення.

Незважаючи на те, що оцінка була неможливою, тріщина LME могла бути зареєстрована, що видно на рисунку 50.

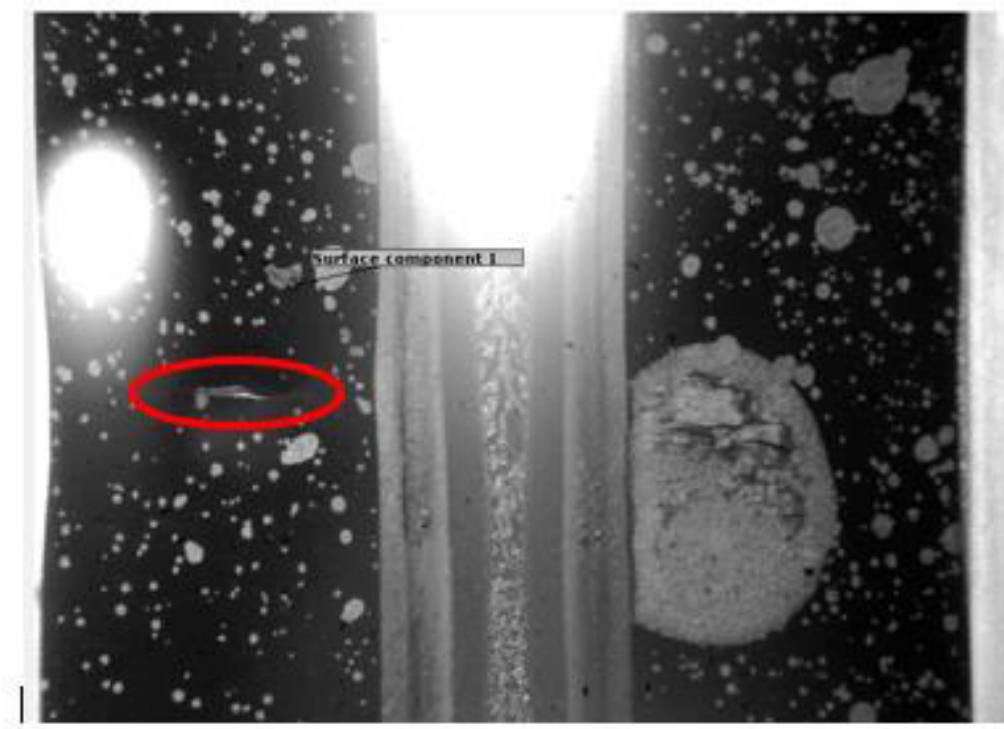


Рис. 50 тріщина LME на зразку Z23-2.

Відразу ж після тріщини LME у записі був розлом. Оскільки запис проводився на частоті 5 Гц, подальше поширення тріщини простежити не вдалося. Щоб краще розрізняти окремі етапи запису, частота запису було збільшено до 10 Гц.

Більш тонкий малюнок зразків Z24-1 та Z24-2 показав гарну якість візерунка, завдяки чому стало можливим оцінити параметри деформації. На рисунку 51 показано якість візерунка зразка Z24-1:

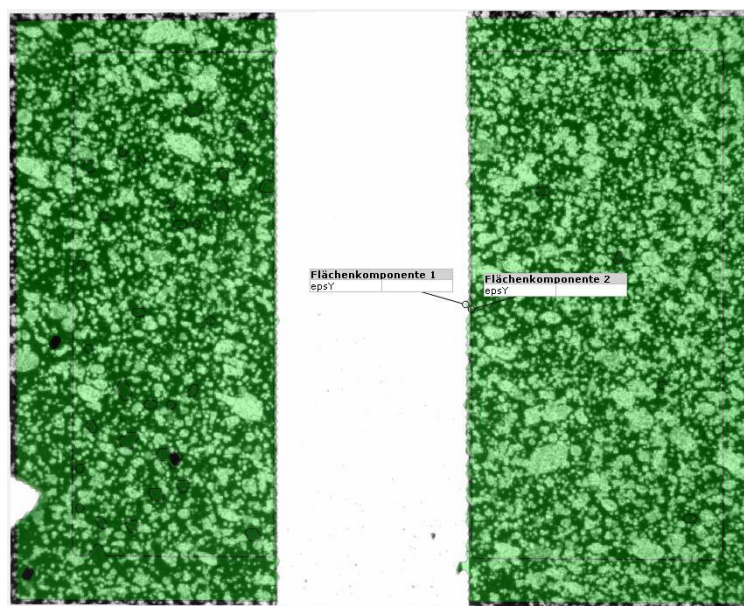


Рис. 51 Якість візерунка зразка Z24-1

Позначена зеленим кольором область вказує на хорошу якість деталі. Проте, існують окремі невеликі ділянки, які виявляються програмою.

Вимірювання деформації проводилося для обраної області. Результати можуть бути представлені у вигляді кольорової прогресії, а також вибірково. Крім того, результати представлені на 5 точок у часі. Оскільки FOV камери не охоплює всю область вимірювання, деформації були представлені на різних етапах: на початку випробування PVR при запуску басейну розплаву, при появі критичних деформацій, при появі тріщини LME і при руйнуванні зразка. Це дозволяє реєструвати деформації до та після ванни розплаву. Також використовувалося виявлення за точками. Для цього на поверхні з інтервалом 5 мм х 3 мм було розміщено кілька фланців відхилення, що дозволило контролювати значення деформації під час випробування PVR.

Початок вимірювання DIC було встановлено як контрольний рівень. Вимірювання ЦВД було розпочато до проведення тесту PVR. Це дозволяло контролювати нормальний процес запису. З цього була отримана часова різниця між прогресіями обох вимірів. Завдяки показчику результати можна синхронізувати та зробити їх порівнянними.

$T = 0$, початок тесту PVR

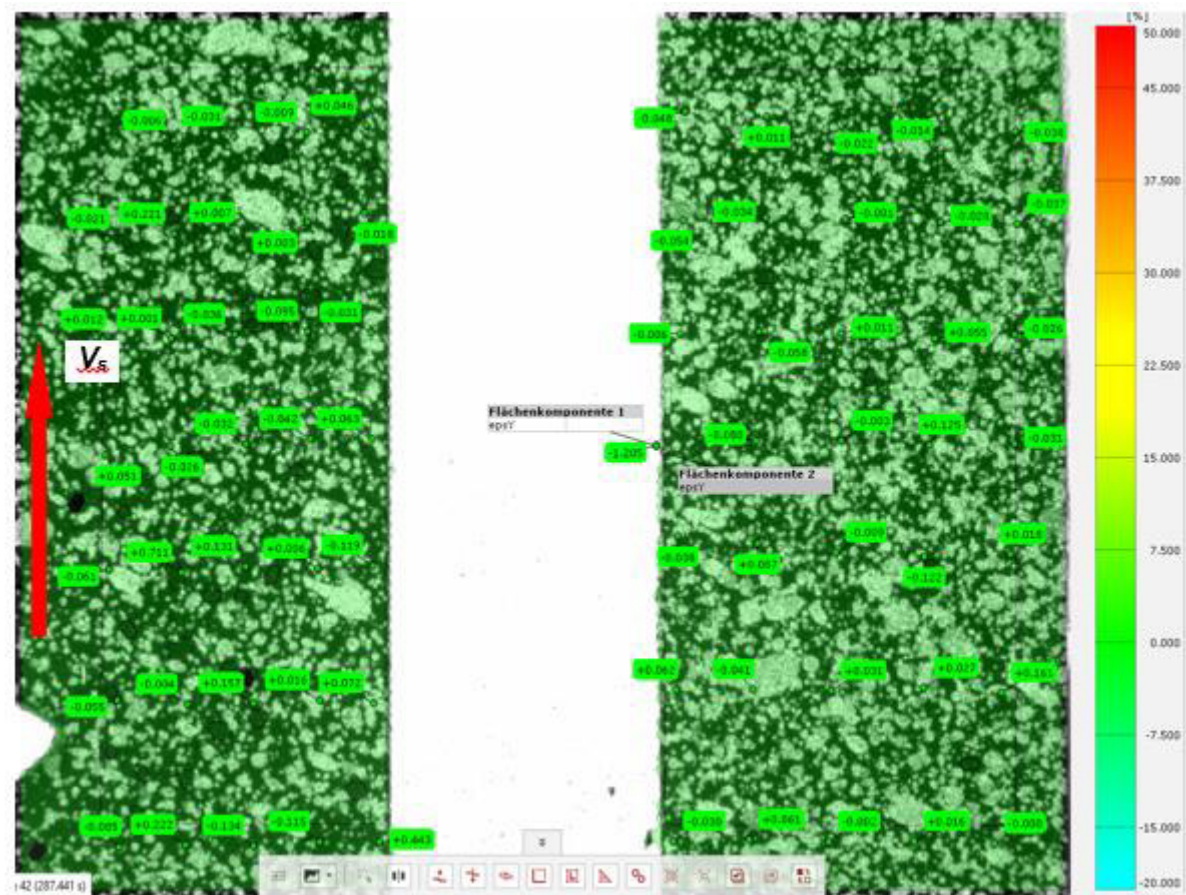


Рис. 52 Поле деформації зразка Z24-1 на початку випробування PVR.

На малюнку 52 показано значення технічної деформації зразка в момент часу $T = 0$. Відхилення значень від нуля можна пояснити шумом при вимірюванні та можливими вібраціями та впливами системи PVR. Між початком вимірювання DIC та тестами PVR проходить 8 с.

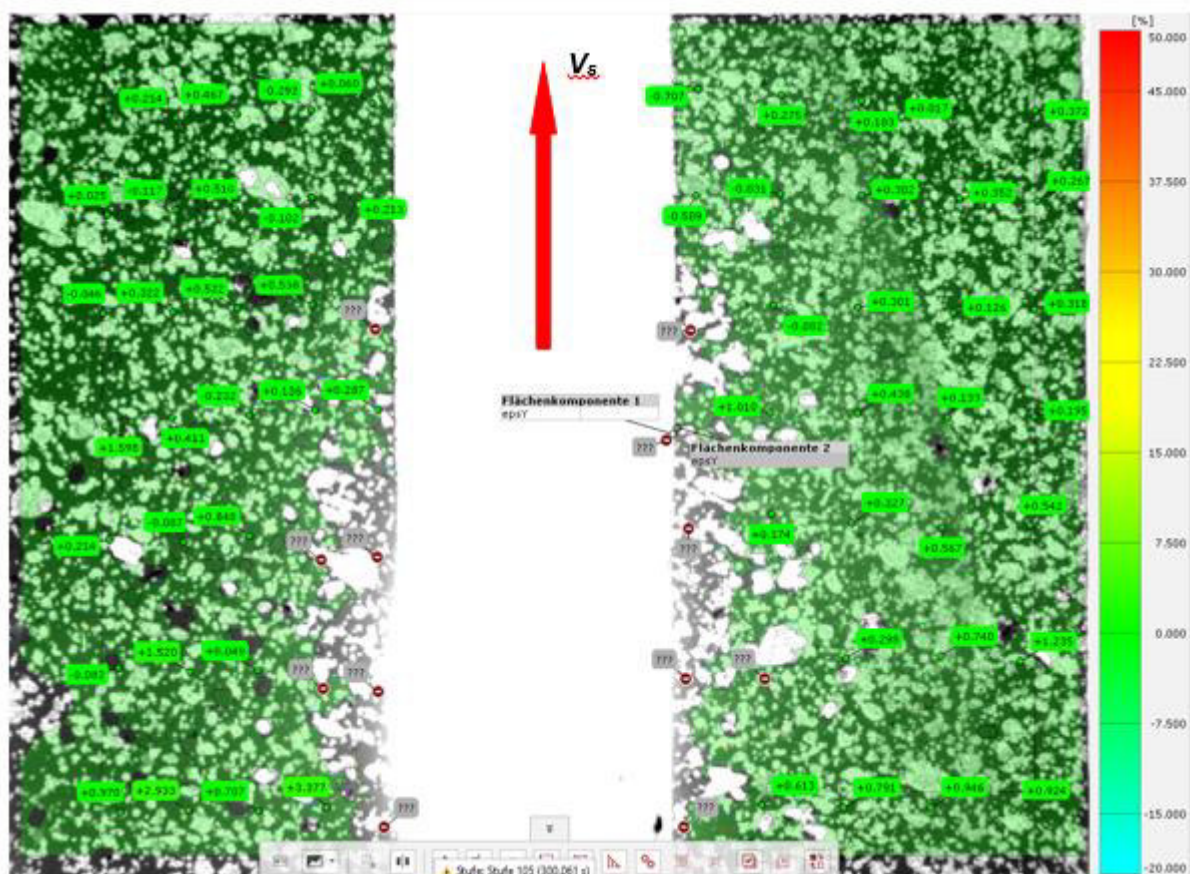


Рис. 53 Поле деформації в момент часу $T = 12,62$ с

Тепловий ефект зварювання добре видно на зображенні. Виникаюче випромінювання знижує контрастність, що означає неможливість оцінки в областях, що межують із розплавленим басейном. Можна відзначити розподіл деформації. Перед басейном розплаву присутні позитивні деформації, тоді як на ділянках, розташованих поблизу басейну розплаву, деформації низькі або відсутні. Така поведінка корелює із наведеними вище результатами моделювання.

$T = 21,45$ с, виникнення критичних деформацій

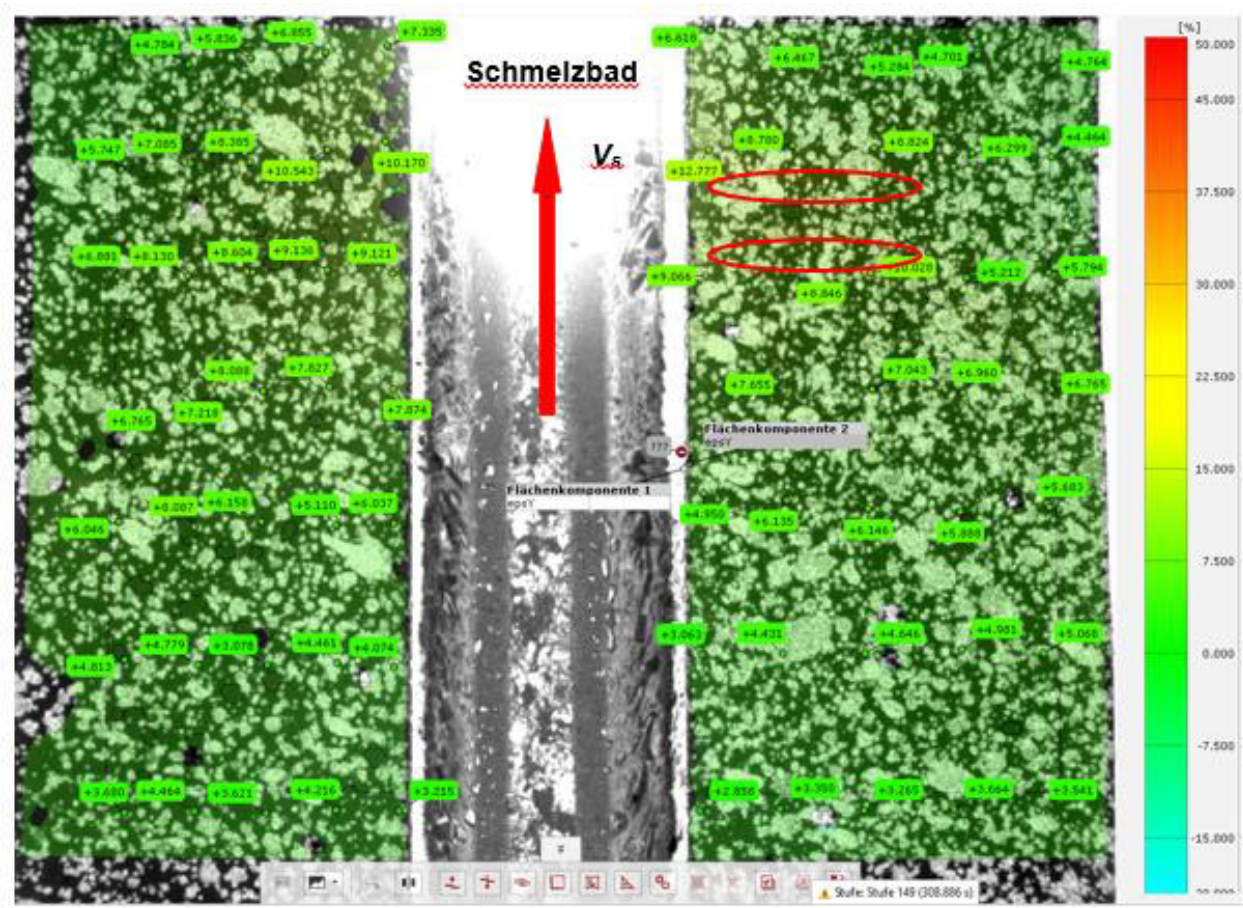


Рис. 54 Поле деформації в момент часу $T = 21,45$ с

У момент часу $T = 21,45$ з басейном розплаву майже залишає FOV. Можна виявити деформації за басейном розплаву, які перевищують деформації розтягування на краях зразка, а також деформації на більшій відстані за басейном розплаву, що узгоджується з моделюванням FINK. Привертають увагу дві поздовжні області з великими деформаціями, які відзначені червоним кольором. Слід звернути увагу на шнурування зразка. На рисунку 55 показано утворення тріщини LME.

$T = 23,45$ с, розвиток тріщини LME

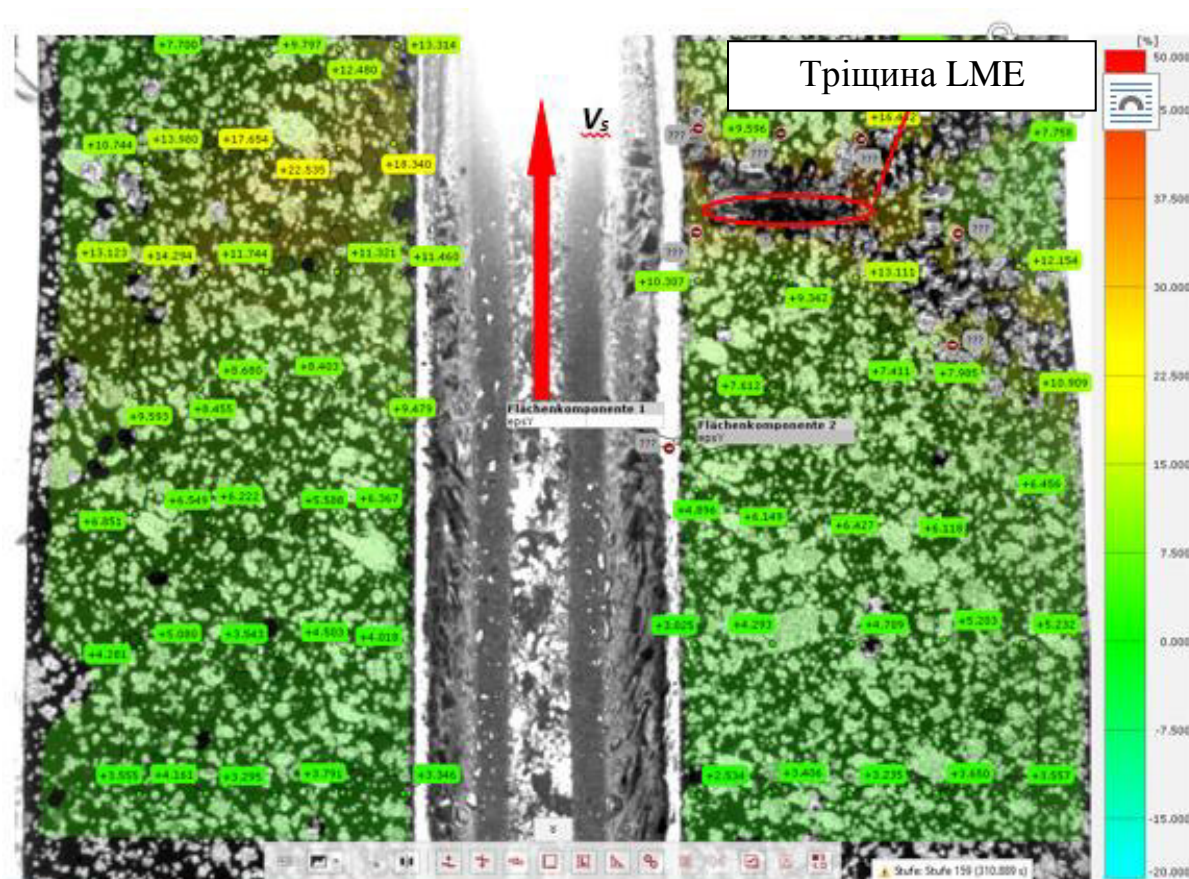


Рис. 55 Утворення тріщини LME

У міру виконання вимірювання від краю, перпендикулярного зварному шву, утворюється Y-подібна область, де зміщення точок деталі дуже велике і не може бути виявлено. У цій області відбуваються сильні пластичні деформації. Тріщина LME відзначена червоним кольором. Крім того, ділянки з високими деформаціями розтягування присутні і з іншого боку зразка, де технічна деформація розтягування перевищує 20%. Це вказує на те, що деформації розтягування в області LME все ще значно вищі.

Відразу ж після тріщини LME було руйнування зразка, що видно на рисунку 56. Після руйнування зразка можна спостерігати за деформацією розтягування. Причиною цього є пластична деформація зразка. При цьому точки проби зміщуються, що реєструється програмою як деформація після розриву.

$T = 28,86$ с, розрив

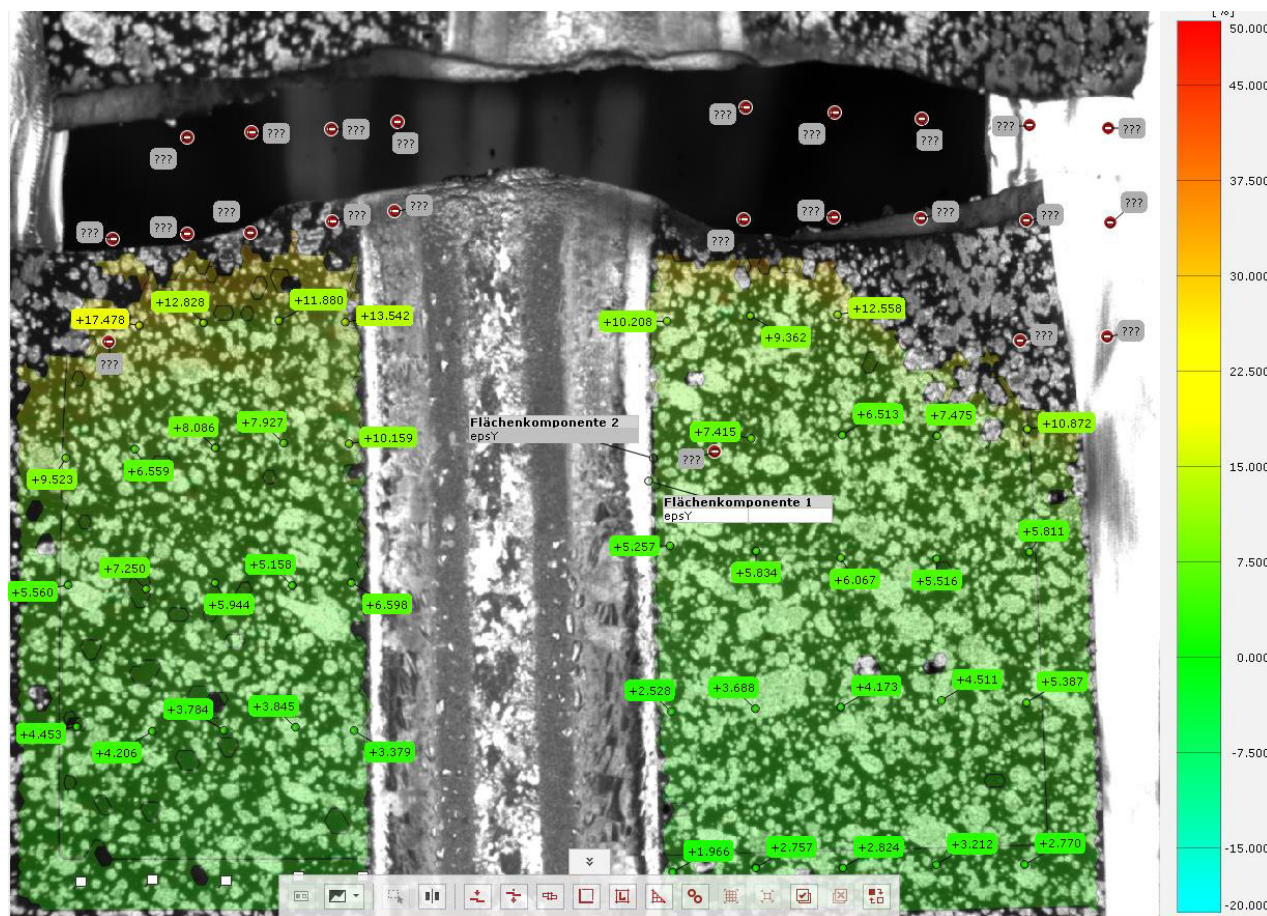


Рис. 56 Злам зразка

Щоб більш точно оцінити місцеві деформації, значення, присутні у діапазоні LME, розглядаються ретельніше. На малюнку () показаний ділянку зразка в момент часу $T = 20,84$ с, в якому надалі випробування виникає тріщина LME. На основі цього точнішого спостереження можна реєструвати деформації, що передують появі тріщини. Вимірювання проводилися за допомогою прапорців відхилення, встановлених навколо ділянок з високими деформаціями. Як пункт відліку був обраний прапорець відхилення на краю зразка. Присутні видовження становлять 0,1.

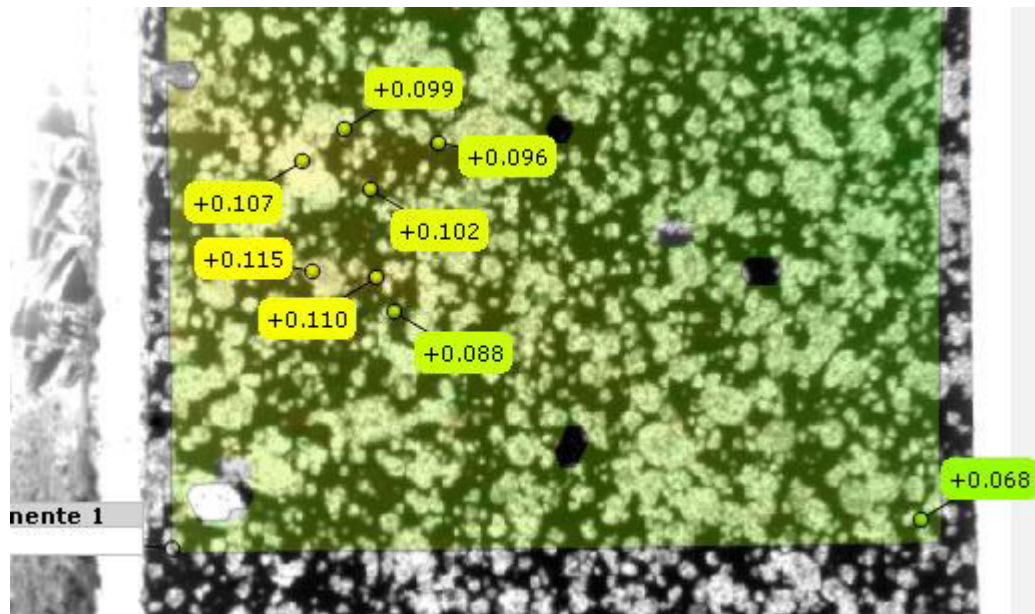


Рис. 56 Деформації в діапазоні LME T = 20,84 с

В таблиці наведені основні параметри та налаштування, які були обрані для вимірювання

Умова	Значення
Стартовий пунт	30 мм (Напрямок X)
Положення покажчика	50 мм (Напрямок X від початкової точки)
Величина поля зору	30 мм x 39,8 мм
Положення FOV	45 мм (Напрямок X від початкової точки)
Положення точок вимірювання	17,85 mm (Напрямок X до покажчика)
Відстань до точок	2 мм
Відстань між точками вимірювання	1,5 мм

Для оцінки значень деформації використовувалися три точки виміру. у полі зору програми оцінки. На рисунку показано положення ROI, яка позначена пунктирною лінією. Відстань між точками один до одного становить 1,5 мм

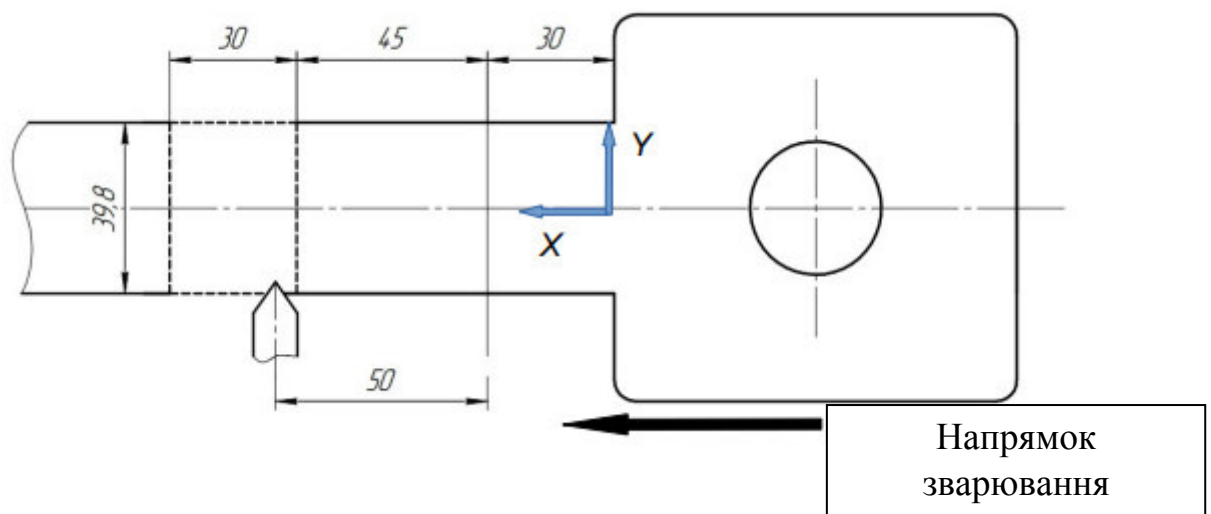


Рис. 57 Положення вимірювального поля

X - Напрямок зварювання

На рисунку 58 показано положення точок виміру по відношенню до положення покажчика та незабарвлену смугу.

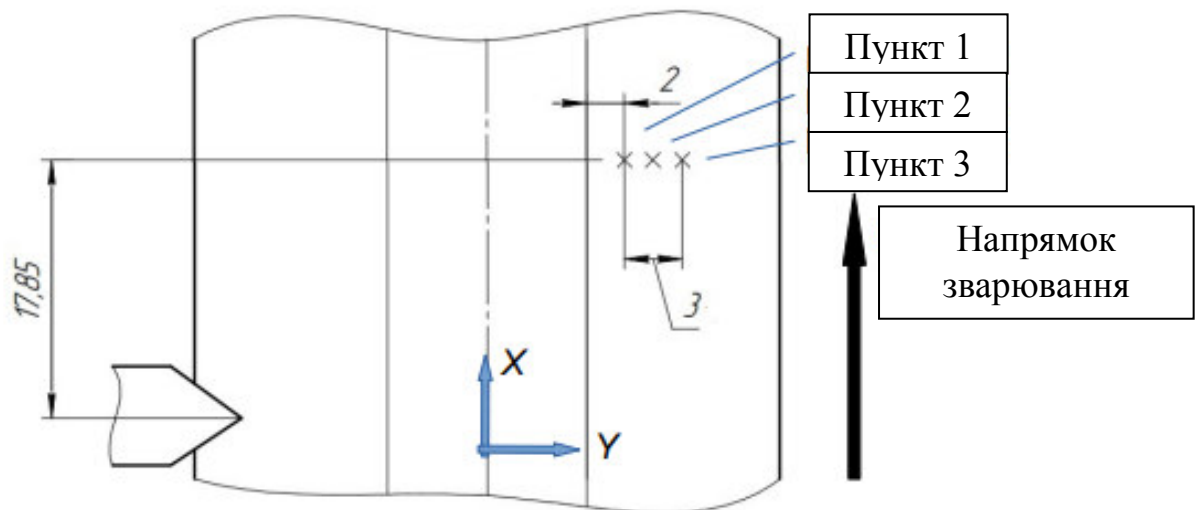


Рис. 58 Розташування точок вимірювання

На рисунку показано значення деформації під час випробування PVR.

Різкі переривання графічних ліній спричинені переекспозицією. Через інтенсивне нагрівання і викликане ним світлове випромінювання в той час, коли

розплаву наближається до точок виміру, оцінка неможлива.

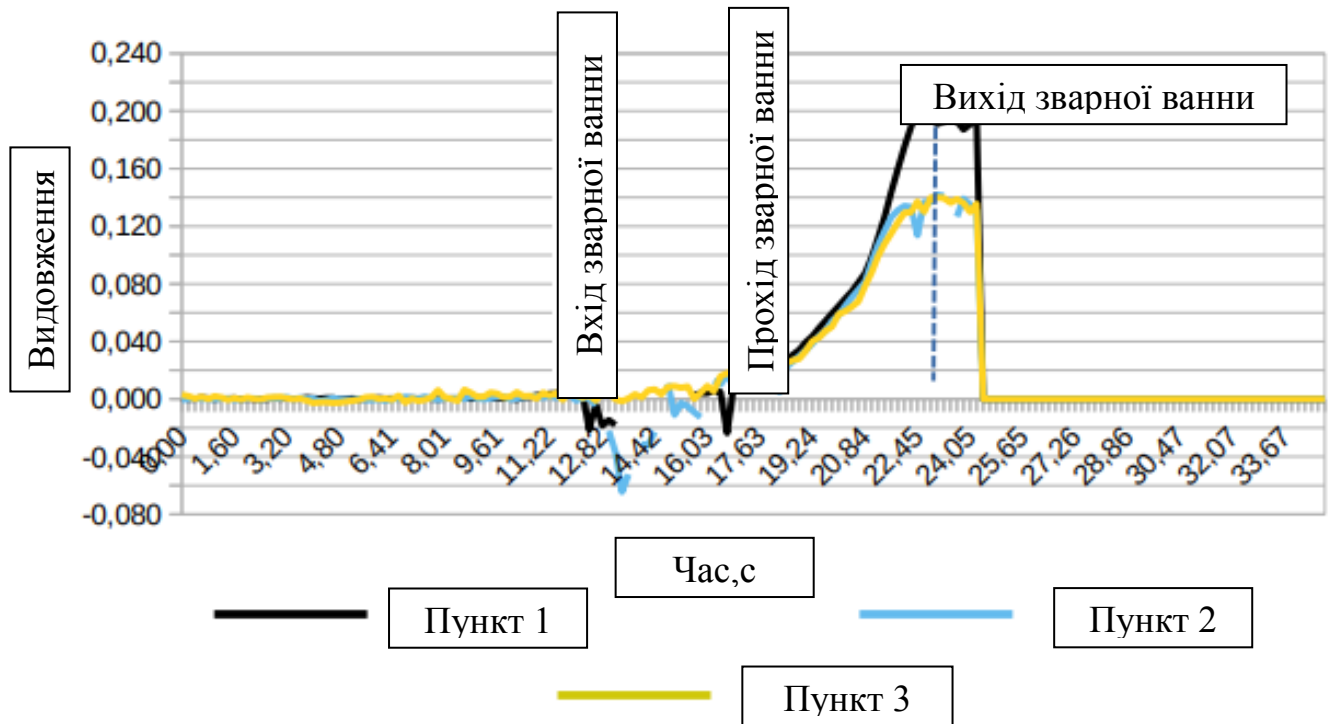


Рис. 59 Значення видовження в точках вимірювання

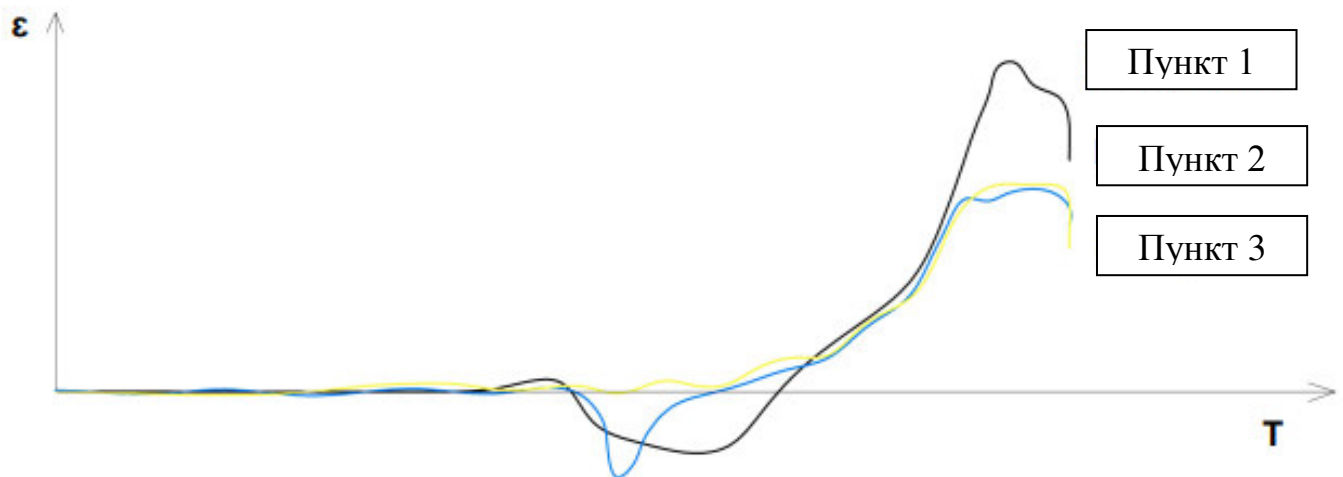


Рис. 60 Інтерпольований розподіл деформації для точок вимірювання

На малюнку видно, що у лівій точці виміру 1 (позначена чорним кольором) реєструються негативні значення деформації.

(відзначені чорним кольором), негативні значення деформації можуть бути зареєстровані, коли плавильна ванна проходить через точки що вказує на наявність стискаючих напружень. З виходом басейну розплаву та в міру віддалення від точки вимірювання деформація збільшується

швидко збільшується проти іншими точками. У точці вимірювання 3 (позначена жовтим кольором), найбільш віддалених від центру зразка, немає негативної деформації і, отже, немає негативні деформації і, отже, немає стискаючих напружень.

Температурне поле

В роботі [13] був визначений розподіл температури при проведенні зварювання. На рисунку 61 приведений графік розподілу. Визначення температури необхідне для визначення модуля Е, що дає змогу визначити напруження по видовженню.

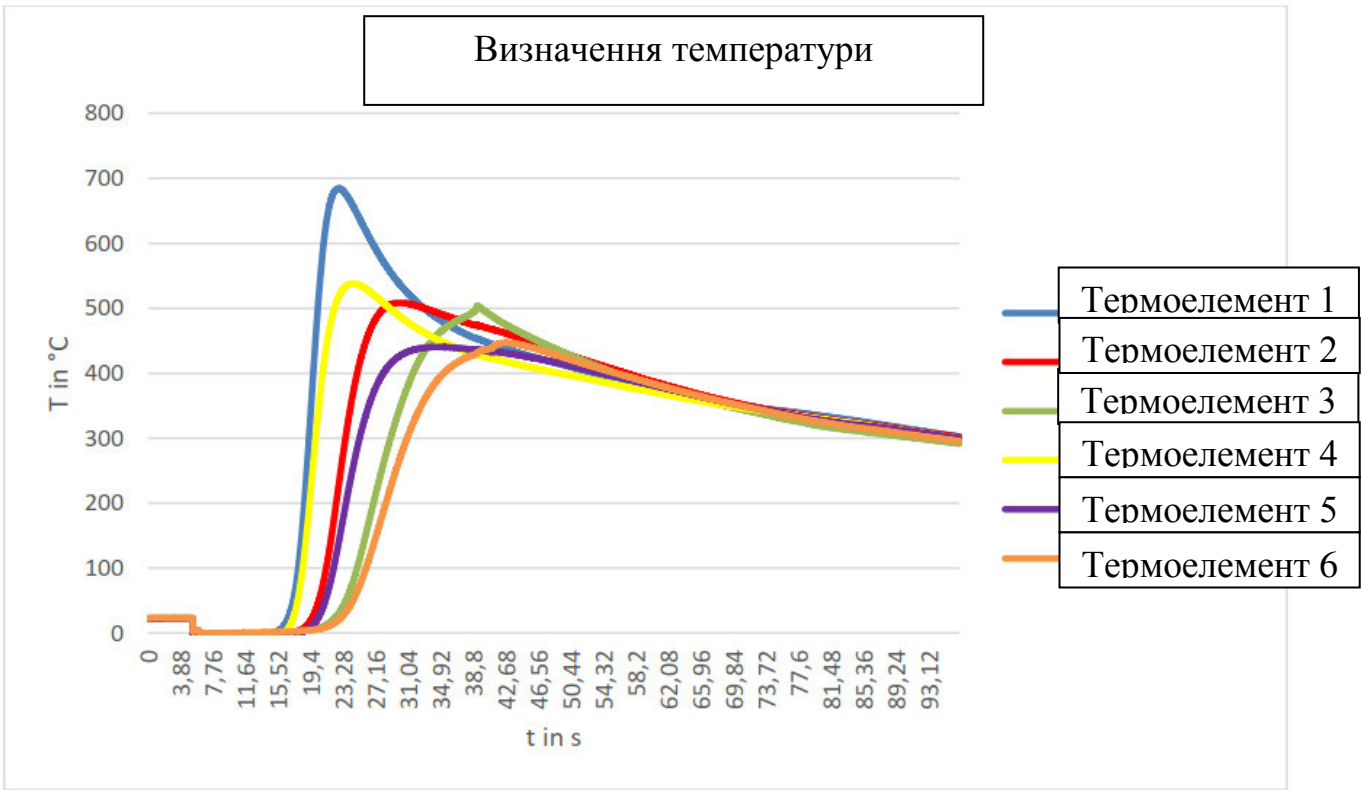


Рис. 61 Температурне поле [13]

Завдяки відомому часу до утворення тріщини можливе визначення температури, яка була присутня в зоні утворення тріщини. В таблиці наведені температури для всіх термоелементів. Для вимірювань найбільш важливим є термоелемент 4. В подальшому був проведений розрахунок Е-Модуля для різних температур, які можливі при процесі зварювання

Термоелемент 1	680 °C
Термоелемент 2	120 °C
Термоелемент 3	20 °C
Термоелемент 4	480 °C
Термоелемент 5	50 °C
Термоелемент 6	20 °C

На рисунку 62 показано положення термоелементів, температури для яких наведено в таблиці.

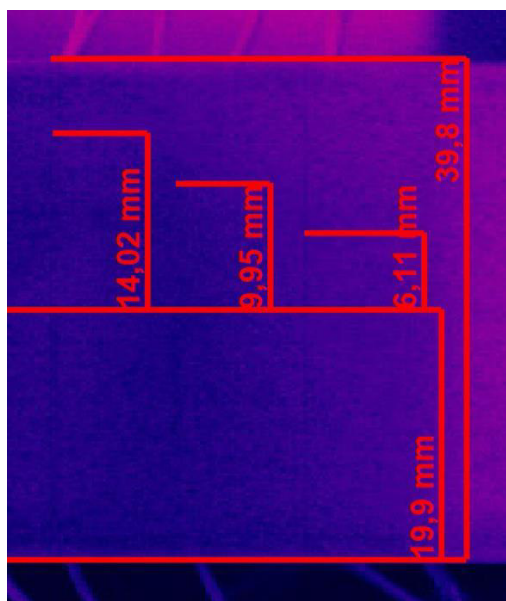


Рис. 62 Положення термоелементі [13]

Е-модуль

Оскільки під час зварювання зразок піддається дії високих температур, модуль пружності змінюється. Для того щоб мати можливість визначити напругу на місці, необхідно розрахувати модуль пружності, який залежить від температури. У літературі можна знайти модуль пружності для нелегованих, мікролегованих або низьколегованих сталей для температур в діапазоні від -200 °C до 650 °C. Визначення Е-модуля є важливим, оскільки це є одним з характеристик матеріалу, яка має вплив на термо-механічну поведінку матеріала.

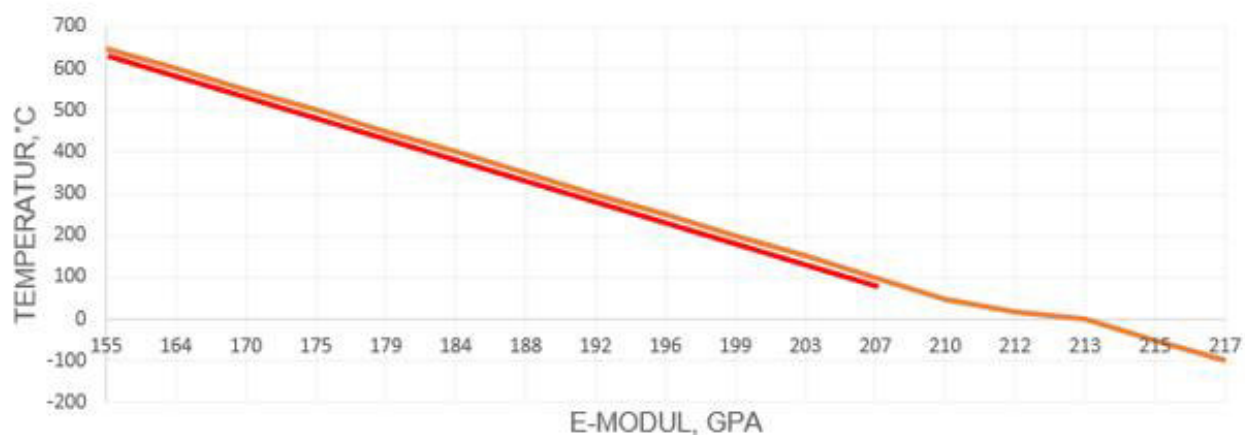


Рис. 63 Е-модуль залежно від температури.

Для оцінки, однак, актуальні температури до 1200 °С (гранична температура термостійких фарб). Оскільки в літературі модуль пружності наводиться лише до 650 °С, його необхідно розрахувати для більш високих температур. На малюнку видно, що модуль пружності зменшується майже лінійно від 100 °С і до 650 °С, що показано червоною лінією. Ця залежність може бути описана лінійною функцією. Е-модулі при 100 °С і 650 °С були використані як відправні точки для функції. Наступна формула описує залежність модуля пружності від температури:

$$T = -10,58 \times E + 2290$$

T означає існуючу температуру. Значення модуля Юнга, розраховані за наведеною вище формулою для температур 700 °С - 1200 °С, наведені в таблиці:

Таблиця (): Розрахунковий модуль Юнга для температур від 700 °С до 1200 °С

T, °C	E, ГПа
700	150
800	141
900	131
1000	122
1100	112
1200	103

6. Підсумки експерименту

Під час експерименту була застосована установка, опробована методика створення та нанесення стохастичного візерунка. Під час експерименту було встановлена необхідна густота точок візерунка.

Були встановлені основні термомеханічні параметри та поведінка матеріалу. Так в області утворення тріщини були визначенні видовження, напруження та температура, що передували утворенню тріщини. Напруження було визначено шляхом відомих температури та видовження.

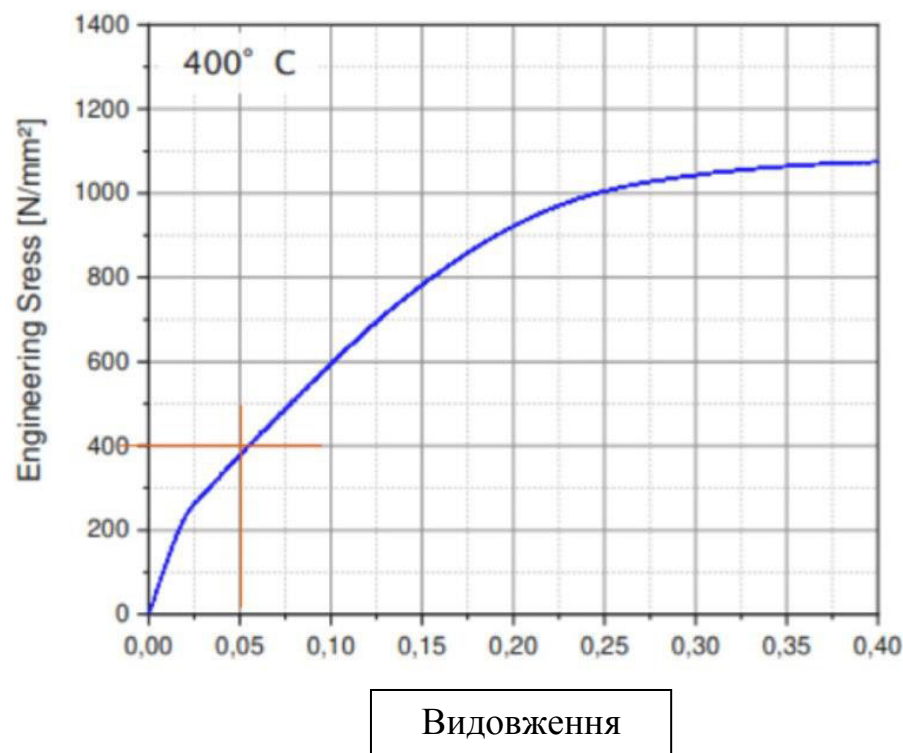


Рис. 64 Залежність видовження та напруження при температурі 400 Градусів
Основні параметри, які були визначені або розраховані, наведені в таблиці:

Параметр	Температура	Видовження	Напруження
Значення	400°C	0,05	400 МПа

7. Висновки

В магістерській дисертації були досягнені поставлені цілі, а саме:

- Огляд теорій утворення тріщин LME
- Огляд існуючої установки для перевірки проб, визначення недоліків
- Розробка гідроприводу для установки
- Модернізація установки шляхом встановлення системи DIC
- Виготовлення проб та проведення дослідів
- Наведення шляхів оптимізації

Для проведення дослідів була використана установка PVR, для якої був розроблений оригінальний гідро привід.

Результати проведених дослідів корелюють з теоретичними розрахунками та моделями стосовно напружень та видовження в деталях.

Виходячи із отриманих результатів є можливі наступні пропозиції щодо уникнення або зменшення впливу тріщин.

Пропозиція	Опис
Використання альтернативних матеріалів та методів	Використання зклеювання деталей або використання сталей, що не проявляють схильності до утворення подібних тріщин
Оптимізація процесу зварювання	Використання інших газів як наприклад аргону Ar, який звужує зону термічного впливу, зменшення струму зварювання, внесення як можна невеликих термічних впливів
Оптимізація матерілу	Цинкування з нанесенням досить тонких шарів цинку
Модернізовані процеси зварювання	Використання «Холодного зварювання» «cold metal transfer»

8. Список використаних джерел

1. Брошюра «Kosten im Stahlbau 2021» Видавництво Bauforumstahl
2. Lacke und Farben.de [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Захист від корозії. – Режим доступу: <https://www.lacke-und-farben.de> (дата звернення 20.09.2021)
3. TU-Dresden.de [Електронний ресурс] : [Портал університету]. – Електронні дані. – Prof. Dr. Martina Zimmermann Schadensanalyse WW, лекції по корозії. – Режим доступу: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/wpc/ressourcen/dateien/Einfuehrung> (дата звернення 20.09.2021)
4. Feuerferzinken.de [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Цинкування та його ефективність. – Режим доступу: <https://www.feuerverzinken.com/korrosionsschutz/kosten-preise-wirtschaftlichkeit> (дата звернення 20.09.2021)
5. Dipl. Phys. D. Körber: Einflussgrößen auf die flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion beim Feuerverzinken, Doctoral dissertation / Technische Universität Darmstadt 2013
6. Kay Langschwager, M.Sc.: Lokales Deformations- und Schädigungsverhalten zyklisch elastisch-plastisch beansprucht Schweißverbindungen, Doctoral dissertation / Darmstadt 2019
7. J.E. Norkett, M.D. Dickey, and V.M. Miller: A Review of Liquid Metal Embrittlement: Cracking Open the Disparate Mechanisms/The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2021
8. Microsclerometry as Applied to Studying Rebinger Effect. Review. E.D. Shchukin, V.I. Savenko. Colloid Journal, 2020, Vol. 82
9. Carolin Fink, Dr.-Ing.: Ductility Dip Cracking beim Schweißen von Nickel-Basislegierungen-Phänomenologische und experimentelle Betrachtung, Doctoral dissertation / Magdeburg 2016

					MB-9109МП.МД000.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Christian Gollnow, Thomas Kannengießer, Research Paper, Hot racking analysis using in situ digital image correlation technique, International Institute of Welding 2013

11. Kay Langschwager, M.Sc.: Lokales Deformations- und Schädigungsverhalten zyklisch elastisch-plastisch beansprucht Schweißverbindungen, Doctoral dissertation / Darmstadt 2019

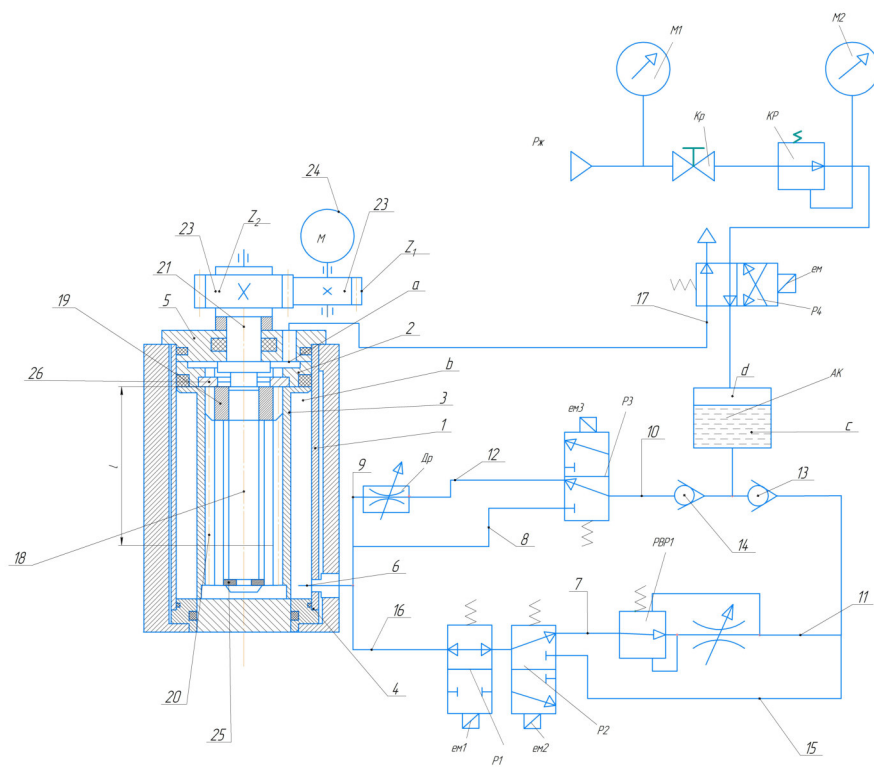
12. Mischbauweisen Karroseriekonzepte- Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau, Dr. Martin Goede, Dr. Hans Ferkel, Jürgen Stieg, Dr. Klaus Dröder, Volkswagen AG Konzernforschung, Aachener Kolloquium Fahrzeug und Mototechnik 2020

13. B. Sc. Henrik Miedlig: Temperaturfeldcharakterisierung im PVR-Test mittels Wärmebildkamera, Scientific work/ OVGU Magdeburg 2021

14. Kowa lenses.com [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Оптична техніка. – Режим доступу: <https://www.kowa-lenses.com/lm50c> (дата звернення 20.09.2021)

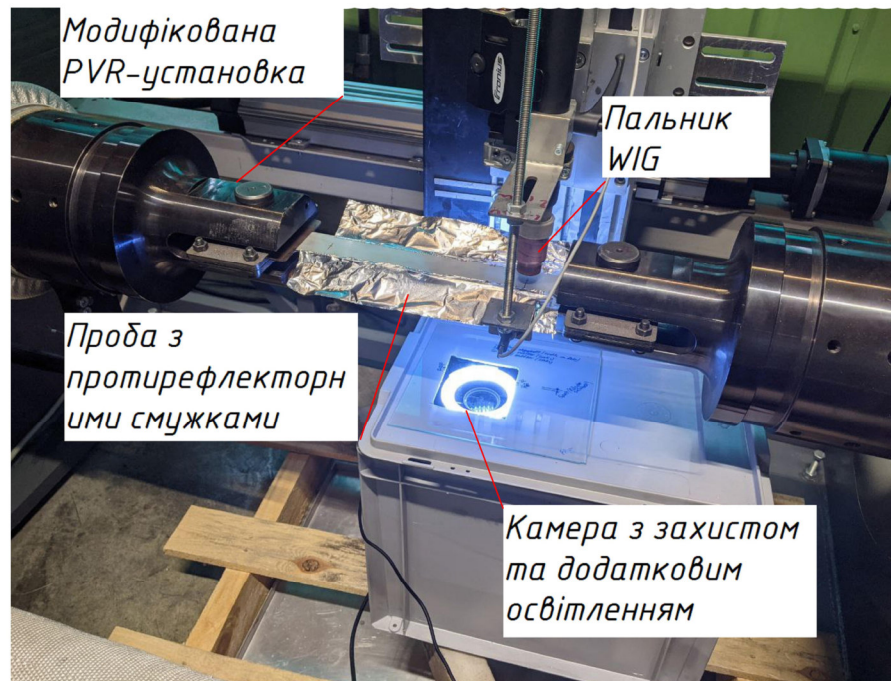
15. Optowiki.info [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Розрахунок товщини кільця. – Режим доступу: <https://www.optowiki.info/de/wie-bestimmt-man-die-lange-der-notigen-zwischenringe> (дата звернення 20.09.2021)

16. univie.ac.at [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – Поляризаційні фільтри. – Режим доступу: https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_Grundlagen (дата звернення 20.09.2021)

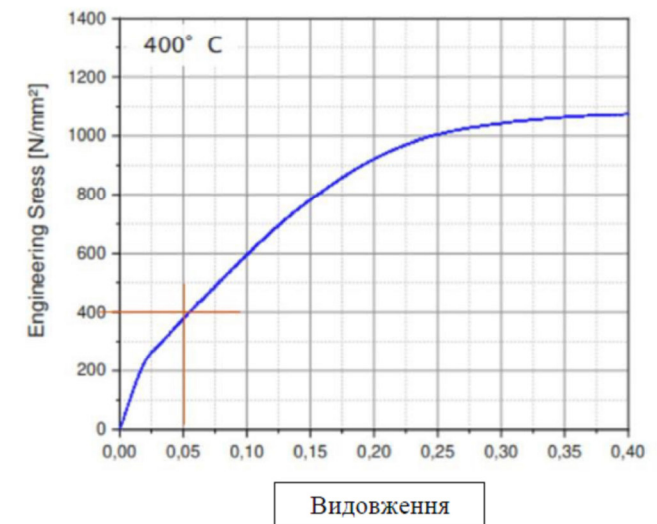


Принципова схема гідроприводу розтягування

[illegible]



Комбінована установка PVR для DIC-вимірювання



Отримані сумарні термомеханічні характеристики під час дослідів

Параметр	Температура	Видовження	Напруження
Значення	400°C	0,05	400 МПа

Шляхи зменшення проявів тріщин внаслідок рідкого цинку

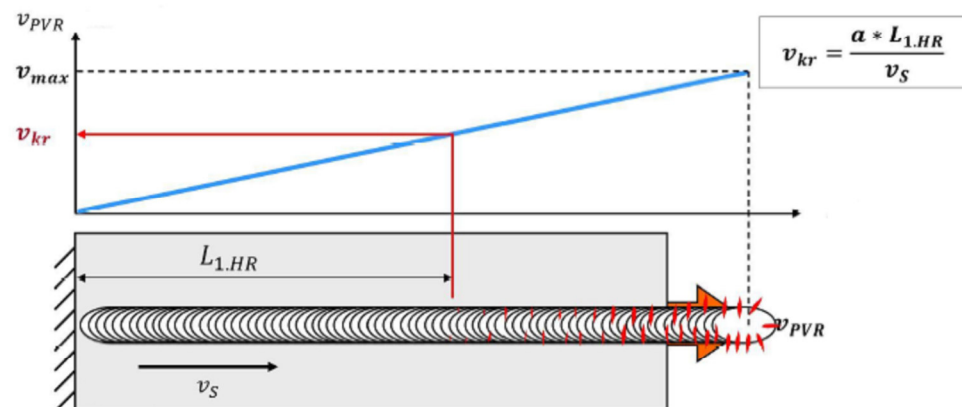
Пропозиція	Опис
Використання альтернативних матеріалів та методів	Використання <u>зклеювання</u> деталей або використання сталей, що не проявляють схильності до утворення подібних <u>тріщин</u>
Оптимізація процесу зварювання	Використання інших газів як наприклад аргону Ar, який звужує зону термічного впливу, зменшення струму зварювання, внесення як можна невеликих термічних впливів
Оптимізація <u>матеріалу</u>	Цинкування з нанесенням досить тонких шарів цинку
Модернізовані процеси зварювання	Використання «Холодного зварювання» « <u>cold metal transfer</u> »

КПІ імені Ігоря Сікорського,
ММІ, МВ-01мп

Розробник: _____ (Курочка В.О.)
Керівник: _____ (Новік М.А.)

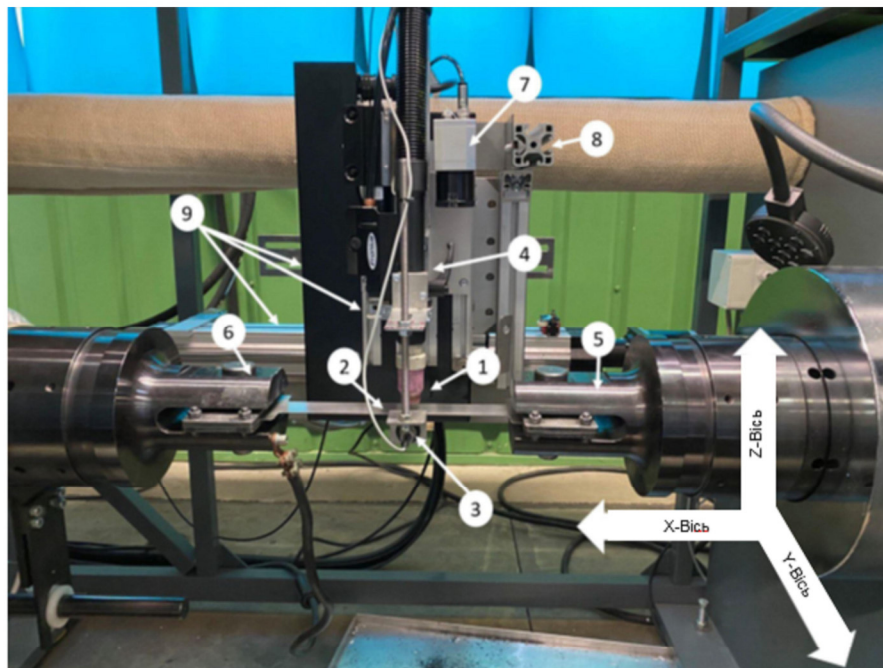


Установка для PVR-тесту



Принцип дослідів та визначення критичної швидкості

Суть PVR-тесту (запрограмований зварювальний тест з навантаженням на розтяг) полягає у утворенні тріщин на деталях під час зварювання завдяки варіації осьового навантаження та параметрів зварювання. При цьому можливе порівняння матеріалів до схильності утворення тріщин



- 1 – Зварювальний пальник TIG 2 – Затиснутий зразок
- 3 – Датчик дуги
- 4 – Тримач зварювального пальника 5 – Гідравлічний циліндр (фіксована опора)
- 6 – Гідравлічний циліндр (рухома опора) 7 – Теплоізійна камера
- 8 – Тримач
- 9 – Лінійні маніпулятори

Розробник: _____ (Курочка В.О.)
Керівник: _____ (Новік М.А.)

Оптимізація та розширення вимірювальних можливостей існуючої установки шляхом додаткового DIC-обладнання та нового гідроприводу

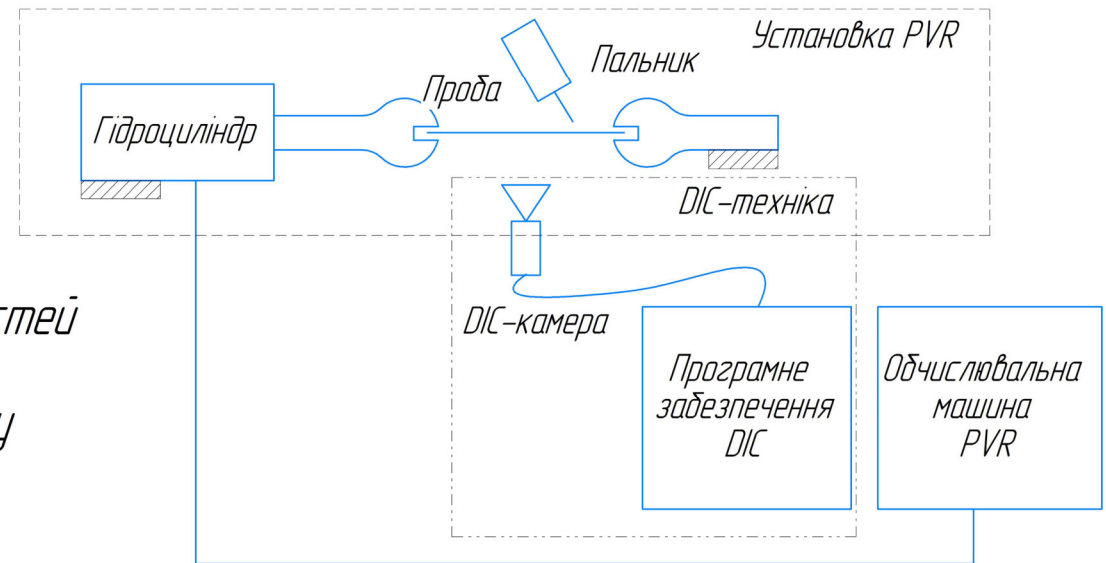
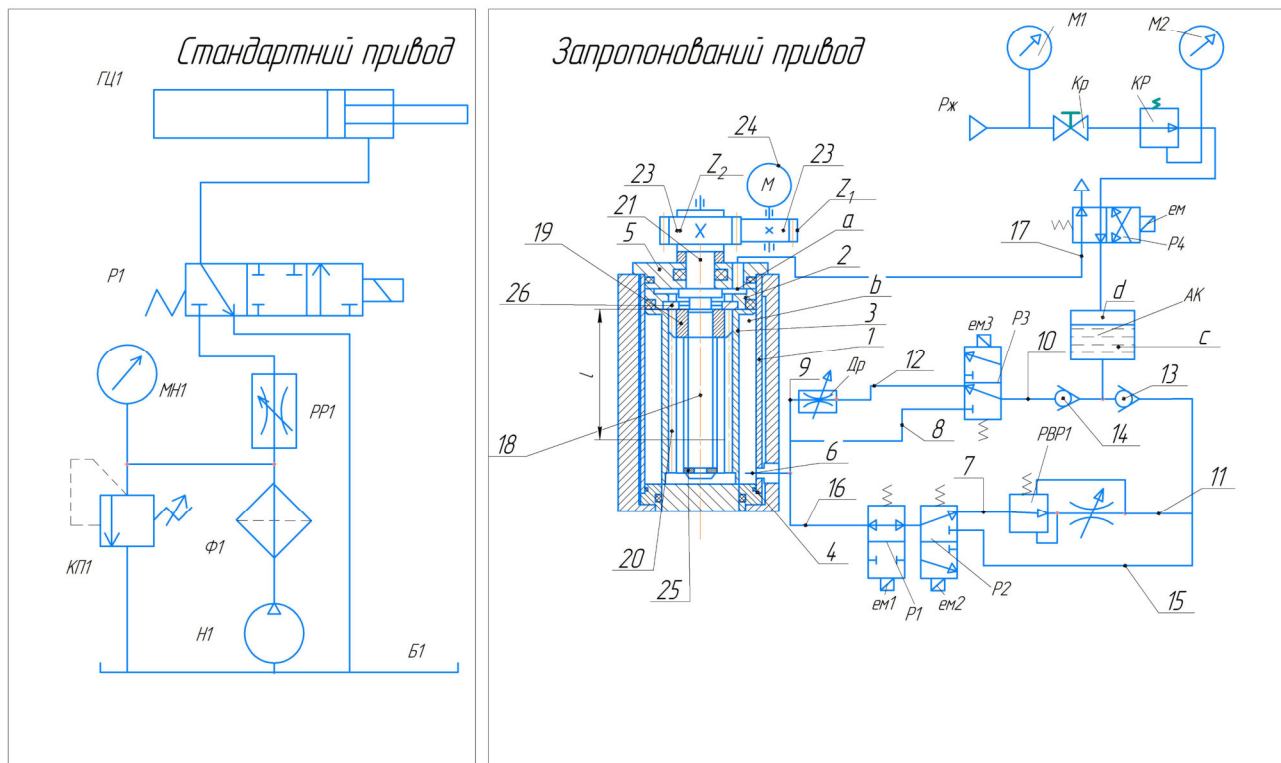


Схема оптимізованої установки

Заміна гідроприводу

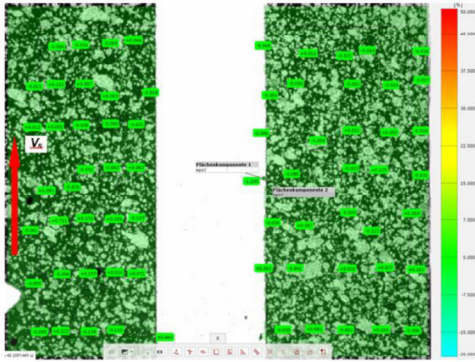


КПІ імені Ігоря Сікорського,
ММІ, МВ-01мп

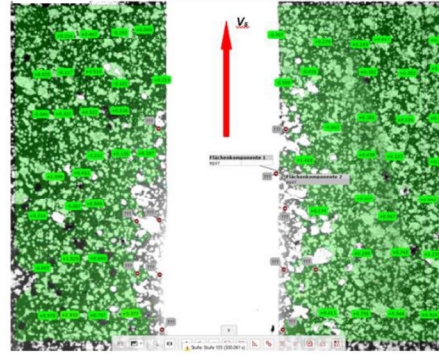
Розробник: _____ (Курочка В.О)
Керівник: _____ (Новік М.А.)

Результати вимірювання в програмному забезпеченні GOM Correlate

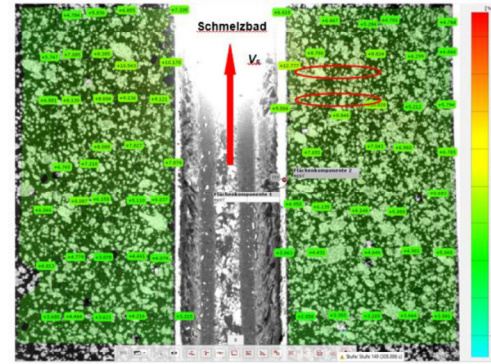
T = 0, початок тесту PVR



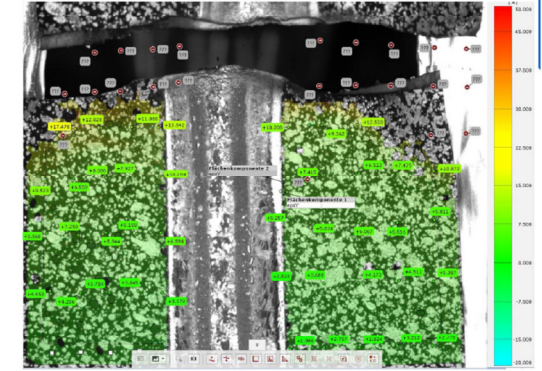
T = 12,62 c



T = 21,45 c, виникнення критичних деформацій

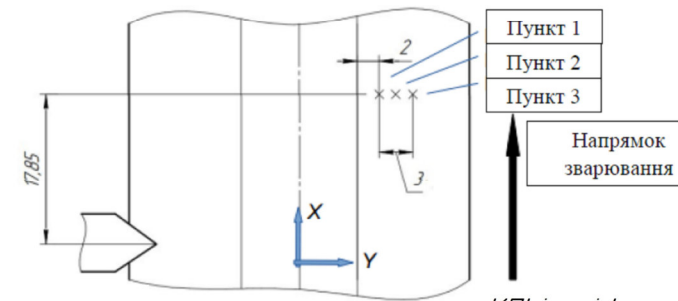
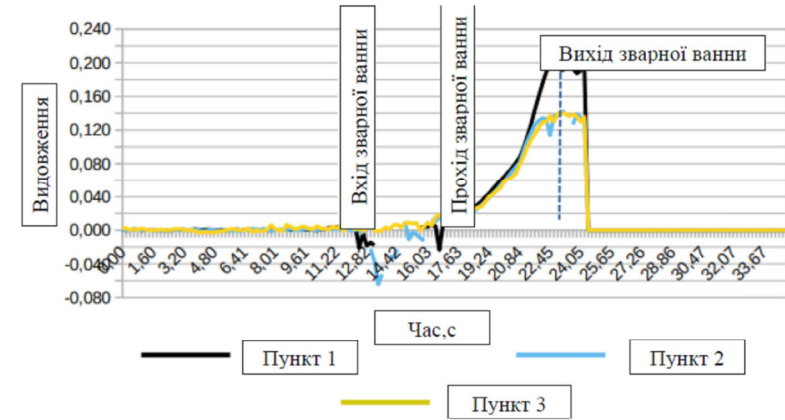
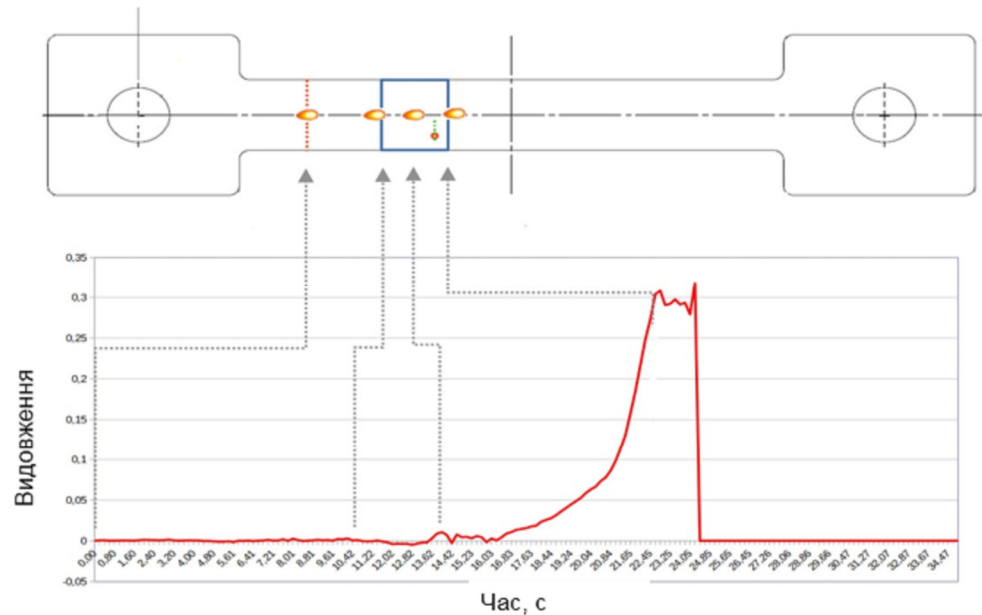


T = 28,86 c, розрив



Результати вимірювання для трьох точок (видовження)

Результати вимірювання для одної точки (видовження)



КПІ імені Ігоря Сікорського,
ММІ, МВ-01мп

Розробник: _____ (Курочка В.О.)
Керівник: _____ (Новік М.А.)