

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 620.179.12

ШУТКЕВИЧ ОЛЕКСІЙ ПЕТРОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ І ЛАЗЕРНОЇ
ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ**

Спеціальність – 132 Матеріалознавство
Галузь знань – 13 Механічна інженерія
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


О.П. Шуткевич

Науковий керівник: к.т.н., В.В. Савицький

Київ – 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ.....	23
1.1 Традиційні напрямки дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань	23
1.2 Оптико-цифрові методи вимірювання переміщень	35
1.3 Використання ефекту електропластичності для локальної релаксації напружень	45
1.4 Висновки по розділу 1	49
РОЗДІЛ 2. ПРИЛАДИ І МЕТОДОЛОГІЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ І ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ	50
2.1 Спекл-інтерферометричний метод і апаратура для вимірювання переміщень	50
2.2 Метод ширографії і обладнання для вимірювання деформацій	54
2.3 Імпульсне джерело струму високої щільності для локальної релаксації напружень.	59
2.4 Розробка методології визначення напружень на тестових зразках	63
2.5 Дослідження впливу напруги U та індуктивності L на коефіцієнти k_{xx} та b_{xx} функції σ_{xx}^{im}	76
2.6 Застосування методу ширографії для оцінки залишкових напружень	81
Висновки по розділу 2	91
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ АМг5 та АМг6 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДЛЯ ЇХ РЕЛАКСАЦІЇ ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ.....	92
3.1 Програмне забезпечення для реєстрації та обробки деформацій і переміщень точок поверхні.	92
3.2 Дослідження залишкових напружень у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів	96
Висновки по розділу 3	101
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

АНОТАЦІЯ

Шуткевич О.П. Визначення залишкових напружень із застосуванням імпульсу струму високої щільності і лазерної інтерферометрії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ – 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі визначення залишкових напружень із застосуванням для їх релаксації імпульсу струму високої щільності і лазерної інтерферометрії. Впливу електропластичного ефекту на локальну релаксацію напружень. В роботі були організовані та проведені експериментальні та теоретичні дослідження впливу імпульсу струму високої щільності на локальну релаксацію напружень. Було проведено дослідження впливу параметрів електродної системи на локальну релаксацію напружень. Проведено вдосконалення електродної системи імпульсного типу дії та розроблено оснащення для позиціонування електроду відносно дослідної деталі. В ході експериментальних досліджень було проведене тепловізійне вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею досліджуваного зразка. Вдосконалено програмне забезпечення для обробки спекл-картин та широграм. Розроблена математична модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення імпульсу струму. Проведені експерименти, з метою порівняння результатів визначення напружень на реальному зварному з'єднанні, що отримані методами отворів і введення ІСВЩ.

Об'єкт дослідження – технологія неруйнівного визначення залишкових напружень на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності та методів лазерної інтерферометрії.

Предмет досліджень – процес релаксації залишкових напружень, що виникає внаслідок електропластичного ефекту, процес реєстрації переміщень та деформацій в околі введення імпульсу струму високої щільності.

Мета роботи – розробка приладу та технології для неруйнівного визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях, на основі використання імпульсів струму високої щільності у поєднанні з методами лазерної інтерферометрії.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено наукові засади методу визначення залишкових зварювальних напружень із застосуванням електропластичного ефекту у поєднанні з методами ширографії та спекл інтерферометрії.
2. Отримало подальший розвиток застосування електропластичного ефекту для локальної релаксації напружень та використання його для визначення залишкових напружень.
3. Розроблено методику розрахунку залишкових напружень на основі даних про деформацію та переміщення в околі місця введення імпульсів струму високої щільності для локальної релаксації напружень.
4. Запропоновано комплексний підхід визначення оптимальних параметрів електродної системи, яка використовується для введення імпульсу струму високої щільності, та налаштувань вимірювальних систем.
5. Розроблено математичну модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення імпульсу струму високої щільності у напружений матеріал.

Практичне значення отриманих результатів.

Виявлені в роботі особливості та закономірності релаксації напружень під дією ІСВЩ дозволили розширити уявлення про процес визначення ЗН і на

основі цього надати рекомендації з вибору оптимальних параметрів електродних систем та налаштувань приладів для вимірювання переміщень та деформацій.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Вдосконалено спекл-інтерферометричний та ширографічний прилади для вимірювання переміщень та деформацій на ділянці діаметром до 5мм, що дозволило отримувати більш точні результати експериментальних досліджень та зменшити час їх виконання.
2. Розроблено оснащення для фіксації електроду та його позиціонування відносно дослідної деталі з точністю до 0.5мм.
3. Розроблено математичну модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення ІСВЩ, яка може використовуватись для подальших досліджень.
4. Модернізовано програмне забезпечення для опрацювання спекл-картин та широграм, що дозволило зменшити час опрацювання експериментальних результатів.
5. Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили розробити технологію неруйнівного визначення ЗН на основі використання ІСВЩ та лазерної інтерферометрії.

У першому розділі проведено критичний аналіз сучасного стану методів визначення та регулювання залишкових напружень. За результатами огляду сформульована мета і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено опис використаного в роботі обладнання, для введення імпульсу струму високої щільності та реєстрації переміщень, що утворюються при цьому. Вказано матеріали, що застосовувались під час досліджень. Наведено методологію визначення напружень на тестових зразках.

У третьому розділі наведено опис використаного в роботі програмного забезпечення для реєстрації та обробки значень переміщень та деформацій, що

виникають внаслідок введення ІСВЩ. Наведено порівняння результатів визначення ЗН на зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, використовуючи для їх релаксації ІСВЩ та метод отворів.

Ключові слова: електропластичний ефект, залишкові напруження, спекл-інтерферометрія, ширографія, імпульс струму високої щільності, локальна релаксація напружень.

ABSTRACT

O. Shutkevych. Determination of residual stresses using high-density current impulses and laser interferometry. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 132 Materials Science. - E.O. Paton Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is dedicated to solving a scientific and technical problem of residual stress determination using high-density current pulse and laser interferometry for relaxation. It explores the influence of electroplastic effect on local stress relaxation. The study involves both experimental and theoretical investigations on the impact of high-density current pulse on local stress relaxation. It also investigates the influence of electrode system parameters on local stress relaxation. Improvements were made to the pulse-type electrode system, and equipment was developed for electrode positioning in relation to the test sample. During experimental research, thermal imaging measurements of the temperature field at the contact point between the electrode and the surface of the test specimen were conducted. Software for processing speckle patterns and shearograms was enhanced. A mathematical model was developed to assess the impact of shear shift on the derivative distribution in stressed material after the application of a current pulse. Experiments were carried out to compare stress determination results on a real welded joint using the hole-drilling method and the high-density current pulse introduction.

Object of research – the non-destructive determination of residual stresses using high-density current pulses and laser interferometry methods for their relaxation.

Subject of research – the process of residual stress relaxation resulting from the electroplastic effect, the registration of displacements and deformations in the vicinity of the introduction of high-density current pulses.

The purpose of the work – develop a device and technology for the non-destructive determination of residual stresses in welded joints, based on the use of high-density current pulses in combination with laser interferometry methods.

Scientific novelty includes the following provisions:

1. Scientific principles have been developed for the method of determining residual welding stresses using the electroplastic effect in combination with shearography and speckle interferometry methods.
2. The application of the electroplastic effect for local stress relaxation and its use in determining residual stresses have further advanced.
3. A methodology for calculating residual stresses based on deformation and displacement data around the site of high-density current pulse introduction for local stress relaxation has been developed.
4. A comprehensive approach for determining the optimal parameters of the electrode system used for introducing high-density current pulses and for adjusting measurement systems has been proposed.
5. A mathematical model for the influence of shear shift on the distribution of derivatives in stressed material after the introduction of high-density current pulses into the stressed material has been developed.

Practical significance of the obtained results.

In summary, the practical value of this work lies in its ability to enhance our understanding of stress relaxation processes and to offer practical guidance for choosing the right parameters and settings in non-destructive testing procedures. These insights can lead to more accurate and effective measurements, ultimately benefiting industries and research fields where residual stress determination is critical.

The practical value of this work is as follows:

1. Improved speckle interferometry and shearography instruments for measuring displacements and deformations in a region with a diameter of up to 5 mm, which allowed for more accurate experimental results and reduced the time required for experiments.
2. Developed equipment for electrode fixation and precise positioning relative to the test specimen with an accuracy of up to 0.5 mm.
3. Developed a mathematical model for the influence of shear shift on the distribution of derivatives in stressed material after the introduction of high-density current pulses. This model can be used for further research and applications.
4. Modernized software for processing speckle patterns and shearograms, reducing the time needed for processing experimental results.
5. The results of both theoretical and experimental research have led to the development of a non-destructive technology for determining residual stresses based on the use of high-density current pulses and laser interferometry.

In the first chapter, a critical analysis of the current state of methods for determining and regulating residual stresses is conducted. Based on the findings of this review, the objectives and goals of the dissertation work are formulated.

In the second chapter, the equipment used in the study is described. This equipment is utilized for the introduction of high-density current pulses and the registration of displacements that occur as a result. The materials used in the research are also specified. The methodology for determining stresses on test samples is provided.

In the third chapter, the dissertation outlines the software used for recording and processing displacement and deformation data resulting from the introduction of high-density current pulses. A comparison of the results of residual stress determination on aluminum alloy weld joints using high-density current pulses and the hole-drilling method is presented.

Keywords: electroplastic effect, residual stresses, speckle interferometry, shearography, high-density current pulse, local stress relaxation.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus:

1. Calculation-experimental procedure for determining welding deformations and stresses based on a digital image correlation method / Volodymyr Korzhyk, Vladyslav Khaskin, Viktor Savitsky, Illia Klochkov, Viktor Kvasnytskyi, Andrii Perepichay, Sviatoslav Peleshenko, Andriy Grinyuk, Andrii Aloshyn, **Oleksii Shutkevych**. // Eastern-European Journal of Enterprise 5/1 (119) 2022. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.265767

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Неруйнівний контроль елементів титанових стільникових панелей методом широкографії з використанням вакуумного навантаження / Лобанов Л.М., Савицький В.В., Киянець І.В., Шиян К.В., **Шуткевич О.П.** // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2021, №4, стор. 19-24.
<https://doi.org/10.37434/tdnk2021.04.02>
3. Візуалізація дефектів в елементах авіаційних конструкцій методом електронної широкографії / Лобанов Л.М., Знова В.Я., Савицький В.В., Киянець І.В., **Шуткевич О.П.** // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2022, №3, стор. 12-18. <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.02>
4. Дистанційна оцінка пошкоджень київської телевежі на основі застосування аерофотозйомки та методу фотограмметрії / Лобанов Л.М., Стельмах Д.І., Савицький В.В., Дядін В.П., **Шуткевич О.П.**, Козачек А.Г. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2023, №3, стор. 16-20.
<https://doi.org/10.37434/tdnk2023.03.03>

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

5. Non-destructive testing of thin-walled multilayer constructions by the laser shearography method / **Oleksii Shutkevych** // International conference “Welding and related technologies-present and future”. Kyiv, 2018.
6. Автоматический поиск дефектов в многослойных композиционных панелях с периодической внутренней структурой при неразрушающем

- контроле качества методом широкографии / Лобанов Л.М., Савицкий В.В., Стецюк П.І., **Шуткевич О.П.** // Спеціальне приладобудування: стан та перспективи. Київ, 2018.
7. Определение остаточных напряжений методом спекл-интерферометрии в сочетании с методом отверстий с учетом платического эффекта / Лобанов Л.М., Савицкий В.В., **Шуткевич О.П.** // Спеціальне приладобудування: стан та перспективи. Київ, 2018.
 8. Визначення НДС великогабаритних циліндричних об'єктів при їх статичному випробуванні методами лазерної широкографії та цифрової кореляції зображень / Лобанов Л.М., Савицкий В.В., Клименко Д.В., Харченко В.М., **Шуткевич О.П.** // Современные расчетно-экспериментальные методы определения характеристик ракетно-космической техники. Дніпро, 2019.
 9. Неруйнівний контроль якості елементів стільникових панелей методом широкографії з використанням вакуумного навантаження / Савицкий В.В., Киянець І.В., **Шуткевич О.П.** // Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні PolyWeld. Київ, 2021.
 10. Ширографічна система для неруйнівного контролю якості елементів стільникових панелей з використанням вакуумного навантаження / Лобанов Л.М., Савицкий В.В., Киянець І.В., **Шуткевич О.П.** // Друга науково-практична конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану». Одеса, 2021.
 11. Non-destructive testing of honeycomb panels by shearography method / Leonid Lobanov, Viktor Savitsky, Iryna Kyianets, Yaroslav Borovyk, **Oleksii Shutkevych** // 75nd IIW Annual Assembly - COMMISSION V NDT and Quality Assurance of Welded Products. Tokyo, Japan, 2022.
 12. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на основі використання імпульсів струму високої щільності та широкографії / Лобанов Л.М., Савицкий В.В., Киянець І.В., Шиян К.В.,

Шуткевич О.П. // Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України. Київ, 2022.

13. Non-destructive Evaluation of Residual Stress using Shearography and high Density Current Impulses / Leonid Lobanov, Viktor Savitsky, **Oleksii Shutkevych**, Iryna Kyianets, Kostiantyn Shyian // 76nd IIW Annual Assembly - COMMISSION V NDT and Quality Assurance of Welded Products. Singapore, 2023.
14. Application of electro-plasticity effect and shearography method for non-destructive determination of residual stresses / D.Stelmakh, I. Shkurat, **O. Shutkevych**, // International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering. Lviv, 2023.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗН – залишкові напруження

ЕП – електропластичність

ЕПЕ – електропластичний ефект

ІСВЩ – імпульс струму високої щільності ($10^7 - 10^{11} \text{ A/m}^2$)

ЕДО – електродинамічна обробка

ІЕС – імпульс електричного струму

НДС – напружено-деформований стан

ВСТУП

Залишкові напруження спричиняють суттєвий вплив на працездатність конструкцій. Як значення, так і розподіл напружень, можуть бути критичними для робочих характеристик і повинні враховуватися при розробці виробів і конструкцій. Ця проблема розв'язується дослідженнями в декількох напрямках. Серед них важлива роль належить розробці і широкому впровадженню сучасних методів і засобів визначення залишкових напружень, ефективність яких визначається, перш за все, їх надійністю в роботі і достовірністю отриманих результатів.

Незважаючи на значні досягнення в розвитку математичних методів розрахунку і прогнозування залишкових напружень, в багатьох випадках необхідне експериментальне визначення напруженого стану. Дослідження залишкових напружень традиційними експериментальними методами є трудомісткими і потребує виконання великого об'єму вимірювань з використанням спеціального обладнання і приладів. У зв'язку з цим розвиток нових ефективних методів і засобів оперативного визначення залишкових напружень в елементах зварних конструкцій на етапі їх виготовлення і експлуатації являється *актуальною* науково-технічною задачею.

На даний момент існують різні методи визначення залишкових напружень. Кожен з них має свої переваги і недоліки. Найбільш розповсюджений метод дослідження напруженого стану конструкції – метод отворів, який полягає в тому, що для локальної релаксації напружень висвердлюється некрізний отвір. В околі висвердленого отвору за допомогою спекл-інтерферометра вимірюють переміщення і використовуючи дані вимірів вираховують значення залишкових напружень, що існували в зоні свердління. Слід зазначити, що на даний момент метод отворів регламентовано стандартом ДСТУ 8852:2019. Однак не зважаючи на всю свою затребуваність, метод отворів все ж є руйнівним, що накладає обмеження на його використання в ряді задач.

Починаючи з 2000-х, досліджувалась можливість визначення залишкових напружень, використовуючи для їх релаксації ІСВЩ. Вказаний метод дозволяє створити джерело живлення та електродну систему з можливістю регулювання основних електричних параметрів.

Слід зазначити, що для реєстрації деформацій поверхні після введення імпульсу струму високої щільності, можна використовувати широкографічний інтерферометр, який має ряд переваг над спекл-інтерферометричним приладом такі як: непотрібність висококогерентного джерела освітлення, відсутність необхідності віброзахисту, можливість використовувати широкографічний прилад у різних просторових положеннях.

Об'єкт дослідження – технологія неруйнівного визначення залишкових напружень на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності та методів лазерної інтерферометрії.

Предмет досліджень – процес релаксації залишкових напружень, що виникає внаслідок електропластичного ефекту, процес реєстрації переміщень та деформацій в околі введення імпульсу струму високої щільності.

Зв'язок з науковими програмами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами підтверджує її актуальність. Основні результати дисертаційної роботи автор отримав як виконавець науково-дослідних робіт згідно з:

- Відомча, відомче замовлення НАН України у 2016-2018 р. за темою «Розробка та дослідження процесів бездеформаційного зварювання перспективних конструкцій нової техніки і технології зміцнюючої обробки зварних з'єднань, удосконалення методів їх діагностики із застосуванням електронної широкографії і спекл-інтерферометрії». Державний реєстраційний номер 0115U006756. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.39.5 (8,39/5). Виконувалась за постановою Бюро ВФТПМ НАН України від 03.11.15, прот. № 17.

- Інфраструктурні програми «Програма наукового приладобудування НАН України» у 2018-2019 р. за темою «Розробка автоматизованого приладу для визначення залишкових напружень в конструкційних матеріалах методом електронної спекл-інтерферометрії». Державний реєстраційний номер роботи 0118U100005. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.8. (8/8). Виконувалась за розпорядженням Президії НАН України від 05.03.2019 № 146 дог. № 9-710-2019 від 11.03.2019.

- Відомча, цільова наукова програма ВФТПМ НАНУ «Перспективні конструкційні та функціональні матеріали з тривалим терміном експлуатації, фундаментальні основи їх одержання, з'єднання та обробки» у 2017-2021р. за темою «Підвищення надійності та довговічності елементів конструкцій авіаційної та космічної техніки на основі розвитку автоматизованих методів лазерної діагностики і технологій електродинамічної обробки та регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань» Державний реєстраційний номер 0117U001182. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.31 (8/31). Виконувалась за постановою Бюро ВФТПМ НАН України від 22.11.2016, прот. № 16.

- Відомча, відомче замовлення НАН України у 2022-2024 р. за темою «Проведення комплексу досліджень і розробка нових технологій зміцнюючи обробок зварних з'єднань імпульсними електромагнітними полями, оптико-електронних методів їх безконтактної діагностики та перспективних конструкцій перетворюваного об'єму, що адаптовані до умов космічного простору». Державний реєстраційний номер 0122U001194. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.3.8.1 (8/1). Виконується за постановою Бюро ВФТПМ НАН України від 09.11.2021, прот. № 18.

- Інфраструктурні програми «Програма наукового приладобудування НАН України» у 2020-2022 р. за темою «Розробка тривимірного методу цифрової кореляції зображень для безконтактного вимірювання переміщень великогабаритних циліндричних об'єктів». Державний реєстраційний номер

роботи 0120U102483. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.9. (8/9). Виконувалась за розпорядженням Президії НАН України від 10.02.2021 № 82 дог. № 5-751-2021 від 11.02.2021.

- Відомча, відомче замовлення НАН України у 2019-2021 р. за темою «Розробка та дослідження технологій і устаткування для зварювання тонкостінних і розкривних конструкцій із високоміцних легких сплавів з мінімальними деформаціями, електроімпульсної обробки і діагностики лазерно-інтерферометричними методами». Державний реєстраційний номер 0118U100510. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.7. (8/7). Виконувалась за постановою Бюро ВФТПМ НАН України від 30.10.2018, прот. № 15.

- Програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» у 2022-2023 р. за темою «Дослідження впливу локальних імпульсів струму на напружений стан легких сплавів і опору руйнуванню їх зварних з'єднань та створення оптико-цифрових засобів визначення залишкових напружень» Державний реєстраційний номер роботи 0122U000907. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.3.8.3.36 (8,3/36). Виконується за постановою Президії НАН України від 22.12.2021 № 419 дог. № 44/22 від 04.01.2022.

Мета роботи – розробка приладу та технології для неруйнівного визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях, на основі використання імпульсів струму високої щільності у поєднанні з методами лазерної інтерферометрії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Критичний аналіз сучасного розвитку методів визначення залишкових напружень. Постановка мети та задач дослідження.

2. Розробка методики та вдосконалення обладнання для проведення досліджень.
3. Верифікація результатів оцінки ЗН із застосуванням нового методу і електронної спекл-інтерферометрії.
4. Дослідження особливостей проявлення ЕПЕ під час введення в досліджуваний об'єкт імпульсу струму високої щільності.
5. Дослідження впливу параметрів електродної системи на локальну релаксацію напружень в околі введення ІСВЩ.
6. Оцінка впливу широзсуву на вимірювання деформації поверхні в околі введення імпульсу струму високої щільності.
7. Розробка методології та обладнання для неруйнівного визначення залишкових напружень на базі ЕПЕ.

У першому розділі проведено критичний аналіз сучасного стану методів визначення та регулювання залишкових напружень. За результатами огляду сформульована мета і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено опис використаного в роботі обладнання, для введення імпульсу струму високої щільності та реєстрації переміщень, що утворюються при цьому. Вказано матеріали, що застосовувались під час досліджень. Наведено методологію визначення напружень на тестових зразках.

У третьому розділі наведено опис використаного в роботі програмного забезпечення для реєстрації та обробки значень переміщень та деформацій, що виникають внаслідок введення ІСВЩ. Наведено порівняння результатів визначення ЗН на зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, використовуючи для їх релаксації ІСВЩ та метод отворів.

В результаті проведених досліджень отримані наступні результати, що мають **наукову новизну і практичну цінність**.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено наукові засади методу визначення залишкових зварювальних напружень із застосуванням електропластичного ефекту у поєднанні з методами ширографії та спекл інтерферометрії.
2. Отримало подальший розвиток застосування електропластичного ефекту для локальної релаксації напружень та використання його для визначення залишкових напружень.
3. Розроблено методику розрахунку залишкових напружень на основі даних про деформацію та переміщення в околі місця введення імпульсів струму високої щільності для локальної релаксації напружень.
4. Запропоновано комплексний підхід визначення оптимальних параметрів електродної системи, яка використовується для введення імпульсу струму високої щільності, та налаштувань вимірювальних систем.
5. Розроблено математичну модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення імпульсу струму високої щільності у напружений матеріал.

Практичне значення отриманих результатів.

Виявлені в роботі особливості та закономірності релаксації напружень під дією ІСВІЩ дозволили розширити уявлення про процес визначення ЗН і на основі цього надати рекомендації з вибору оптимальних параметрів електродних систем та налаштувань приладів для вимірювання переміщень та деформацій.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. Вдосконалено спекл-інтерферометричний та ширографічний прилади для вимірювання переміщень та деформацій на ділянці діаметром до

- 5мм, що дозволило отримувати більш точні результати експериментальних досліджень та зменшити час їх виконання.
2. Розроблено оснащення для фіксації електроду та його позиціонування відносно дослідної деталі з точністю до 0.5мм.
 3. Розроблено математичну модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення ІСВЩ, яка може використовуватись для подальших досліджень.
 4. Модернізовано програмне забезпечення для опрацювання спекл-картин та широгам, що дозволило зменшити час опрацювання експериментальних результатів.
 5. Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили розробити технологію неруйнівного визначення ЗН на основі використання ІСВЩ та лазерної інтерферометрії.

Особистий внесок здобувача. При безпосередній участі автора отримані результати досліджень та проведено їх аналіз, на основі чого сформульовано положення наукової новизни, згідно із відображеними в дисертаційній роботі матеріалами. Автором спільно з науковим керівником сформульовано мету роботи, поставлені задачі для проведення досліджень та прийнято методики їх вирішення. Автором виконано аналітичний огляд, узагальнено результати та сформульовано основні висновки. За участю автора були організовані та проведені експериментальні та теоретичні дослідження впливу імпульсу струму високої щільності на локальну релаксацію напружень. Здобувачем самостійно було проведено дослідження впливу параметрів електродної системи на локальну релаксацію напружень. Автор провів вдосконалення електродної системи імпульсного типу дії та розробив оснащення для позиціонування електроду відносно дослідної деталі. При особистій участі автора було вдосконалено програмне забезпечення для опрацювання спекл-картин та широгам. Автором розроблена математична модель впливу широзсуву на розподіл похідної у напруженому матеріалі після введення імпульсу струму.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних та вітчизняних конференціях: International conference “Welding and related technologies-present and future” (Kyiv, 2018), Спеціальне приладобудування: стан та перспективи (Київ, 2018), Современные расчетно-экспериментальные методы определения характеристик ракетно-космической техники (Дніпро, 2019), Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні PolyWeld (Київ, 2021), Друга науково-практична конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» (Одеса, 2021), 75nd IIW Annual Assembly - COMMISSION V NDT and Quality Assurance of Welded Products (Tokyo, Japan, 2022), Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України (Київ, 2022), 76nd IIW Annual Assembly - COMMISSION V NDT and Quality Assurance of Welded Products (Singapore, 2023), International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (Lviv, 2023).

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 14 робіт, з них 1 стаття що входить до наукометричної бази Scopus, 3 статті у фахових виданнях України, 10 публікацій у збірниках наукових праць та матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 118 сторінках і складається із вступу, 3 розділів, загальних висновків та списку використаної літератури. Обсяг основного тексту складає 100 сторінок машинописного тексту, містить 43 рисунки, 2 таблиці, список літератури із 136 найменувань на 14 сторінках.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

1.1 Традиційні напрямки дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань

Забезпечення високої якості виготовлення конструкцій – одна з найбільш важливих науково–технічних і виробничих проблем в області судно -, авіа -, машинобудування та інших провідних галузей сучасної промисловості, значення якої все більше зростає в міру ускладнення конструкції.

Ця проблема є багатогранною і вирішується в кількох напрямках. Серед них важлива роль належить розробці та широкому застосуванню сучасних методів визначення залишкових напружень, ефективність яких визначається, перш за все, їх достовірністю і продуктивністю.

Втробництво конструкцій, виготовлених з різних матеріалів, зазвичай супроводжується виникненням залишкових напружень, які в ряді випадків знижують їх працездатність. У зв'язку з цим актуальним є розвиток ефективних методів отримання повної інформації про величину і розподіл залишкових напружень.

Механізми виникнення залишкових напружень можна умовно класифікувати наступним чином:

1. механічні (напруження виникають в результаті процесів, які викликають неоднорідну пластичну деформацію);
2. термічні (напруження виникають внаслідок послідовного неоднорідного нагрівання та охолодження, що призводить до температурних градієнтів і збільшення внутрішніх напружень);
3. фізико–хімічні (напруження виникають в результаті зміни об'єму внаслідок хімічних реакцій, структурних і фазових перетворень).

Механічна обробка, як правило, викликає появу значних залишкових напружень [1,2] в поверхневому шарі виробу. Обробка металів тиском

(кування, штампування, прокатка, волочіння, пресування) також призводить до нерівномірної пластичної деформації уздовж перерізу деталі, що є причиною виникнення залишкових напружень.

Характерним для термічного механізму утворення залишкових напружень є ливарні процеси – в основному, в результаті нерівномірного охолодження і усадки ділянок вилівка у форму. Залишкові напруження у литій деталі можуть призвести до її викривлення і появи тріщини. Значні залишкові напруження виникають при наплавленні [3] і ремонті конструкцій [4]. В даний час при розробці і проектуванні конструкцій широке застосування знаходять вузли з різнорідних матеріалів. При пайці таких вузлів основною проблемою є виникнення залишкових напружень деформацій, обумовлених відмінністю фізико-механічних властивостей матеріалів. Залишкові напруження можуть знизити продуктивність роботи з'єднання, а в тендітних матеріалах викликати руйнування відразу після пайки. В роботі [5] досліджено механізм виникнення залишкових напружень при пайці різнорідних матеріалів.

Хімічна поверхнева обробка і покриття також можуть викликати істотний градієнт залишкових напружень в поверхневих шарах виробу. Азотування викликає напруження стиску через розширення решітки і випадання в осад нітратів. Подібний ефект викликає також коксування [6].

Залишкові напруження в елементах зварних конструкцій розглядалися в багатьох роботах [7-8]. Зазвичай всі три механізми (механічний, термічний, фізико-хімічний) впливають на утворення залишкових напружень після зварювання: умови попереднього механічного навантаження, температурні напруження при швидкому нагріванні до розплавлення і подальшому охолодженні матеріалу, неоднорідні структурні перетворення в зварному шві та прилеглих до шва зонах.

Залишкові напруження істотно впливають на працездатність конструкцій. Вони можуть бути досить високими аби спричинити локальну пластичну деформацію, що може мати значний вплив на поведінку виробу. Як значення,

так і розподіл напружень, можуть бути критичними для робочих характеристик і повинні враховуватися при розробці виробів і конструкцій.

Напруження розтягу на поверхні виробу зазвичай небажані, оскільки вони вносять вклад, а в більшості випадків є і причиною тріщини, втомного руйнування і корозійного розтріскування. Вплив залишкових напружень на працездатність деталей проявляється в умовах статичних, динамічних та циклічних навантажень [9], в агресивних середовищах. Вони певним чином змінюють мало-циклічну втому [10, 11], яка пов'язана з появою циклічних пластичних деформацій. У роботі [12] розглянуто вплив залишкових напружень на міцність від втоми.

Напруження стиску, які виникають в поверхневому шарі конструкції, зазвичай бажані, оскільки вони збільшують як втомну міцність, так і опір корозійному розтріскуванню. Наявність стискаючих залишкових напружень в поверхневому шарі деталі підвищує втомну міцність, особливо в місцях концентрації напружень [13]. Тому для створення сприятливого розподілу залишкових напружень застосовують різні види зміцнювальної обробки, зокрема з використанням лазера [14,15], також використовують плазмове напилення покриття на поверхню виробу. Відомий метод наведення залишкових напружень для гальмування втомних тріщин [6,13,16].

З огляду на негативний вплив залишкових напружень розтягу, розробляються способи бездеформаційного зварювання, які дозволяють зменшити рівень залишкових напружень в зварних виробах. Можна зазначити роботи в цьому напрямку, в яких розглянуто використання попереднього силового або температурного навантаження [17], попередньої деформації [18], примусового охолодження [19, 20] для зниження рівня залишкових напружень.

Відомі також різні технології, які розроблені для зниження залишкових напружень після зварювання [21], наприклад, дробоструйна обробка, обробка вибухом [22-24]. низькотемпературне відпалювання, накладення локальних полів підвищених температур (термічна правка), обкатка, проковка та ін. В роботі [25] проведені експериментальні і теоретичні дослідження показали

ефективність зниження залишкових напружень в результаті застосування віброобробки в режимі змінної резонансної частоти. Під впливом вібрації в конструкціях відбувалися нерівномірні по перерізу зміни залишкових напружень. Зниження залишкових напружень поблизу зварних швів досягало 65...70%.

З огляду на те, що залишкові напруження, які виникають в результаті впливу на матеріал металургійних і механічних процесів істотно впливають на працездатність конструкцій, актуальним є визначення рівня напружень, який повинен враховуватися при розрахунках на міцність.

Останніми роками в різних галузях промисловості інтенсивний розвиток отримали розрахункові методи визначення залишкових напружень і оцінки їх впливу на працездатність конструкцій [26-28]. Використання чисельного моделювання в ряді випадків дає можливість уникати дорогих експериментів і отримувати дані про залишкові напруження, що виникають в процесі зварювання, та їх вплив на поведінку конструкцій. У монографії [13] викладені загальні підходи розрахункового дослідження кінетики напружень і деформацій в процесі зварювання і при подальшому навантаженні елементів зварних конструкцій зовнішнім силовим або температурним впливом, а також представлений найбільш загальний підхід вирішення задачі по визначенню напружень і деформацій з використанням методів теорії термопластичності.

Найбільше застосування при моделюванні зварювальних процесів знаходять розрахункові моделі з використанням методу скінченних елементів [30], оскільки він дає можливість моделювати неоднорідність матеріалу, обумовлену наявністю зон пластичності, а також враховувати залежність фізико-механічних характеристик матеріалу від температури і фазового складу.

Підвищення швидкодії сучасної комп'ютерної техніки дозволило істотно розширити клас розв'язуваних задач. Стало можливим моделювання утворення залишкових напружень не тільки в результаті механічного і термічного, а й фізико-хімічного механізму [31, 32]. Чисельне дослідження фазових

перетворень дає можливість отримати більш точне прогнозування величини залишкових зварювальних напружень.

В даний час розроблені великі комерційні математичні пакети програм, такі як ABAQUS, SYSWELD, ANSYS та ін., які дозволяють створювати тривимірне моделювання зварювальних процесів. Так, в праці [33] розроблена методологія і скінченно-елементний алгоритм визначення розподілу залишкових напружень в зварних трубах, в яких для розрахунків використаний пакет програм ABAQUS. В роботі [5] розраховані поля напружень, що виникають в результаті пайки різнорідних матеріалів із застосуванням пакету програм ANSYS.

При цьому необхідно зазначити, що моделювання застосовується тільки для відносно простих конфігурацій конструкцій, оскільки для складних зварних вузлів і конструкцій трудомісткість рішень значно зростає. Також немає строгих математичних моделей, які могли б передбачити вплив ультразвукової обробки, радіаційного випромінювання та ін. на зміну напруженого стану в досліджуваному об'єкті. Тому, незважаючи на істотний прогрес в чисельному моделюванні зварювальних напружень, актуальними є експериментальні дослідження полів напружень в конструкціях для визначення рівня їх завантаженості, а також для оцінки ефективності застосування різних видів обробки, що знижують залишкові напруження в натурних виробках.

Експериментальні методи визначення залишкових напружень умовно діляться на механічні (пов'язані з повним або частковим руйнуванням досліджуваного об'єкта) і фізичні (досліджувана конструкція залишається неушкодженою).

Механічні методи засновані на використанні явища пружного розвантаження об'єму метала при його звільненні від залишкових напружень шляхом розрізання.

На відміну від фізичних методів визначення залишкових напружень, механічні методи дозволяють проводити експерименти на металах незалежно

від неоднорідності їх фізико-хімічних властивостей, тобто є універсальними методами.

Вимірювання утворених при пружному розвантаженні деформацій дозволяє оцінити напружений стан виробу за допомогою відомих розв'язків теорії пружності. Для вимірювання деформацій і переміщень застосовують різні тензодатчики - механічні деформометри, дротові і напівпровідникові тензорезистори, оптично активні покриття, різного роду ділильні сітки, що наносяться на поверхню деталей і методи лазерної та муарової інтерферометрії [29, 34].

У.Уєда запропонував загальний метод для визначення тривісних залишкових напружень [35]. Особливість цього методу полягає в тому, що в результаті розрізання знаходять концентратор залишкових напружень всередині виробу, і за допомогою методу скінченних елементів визначають поле залишкових напружень, що існувало до розрізання. М.Р.Хілл і Д.В. Нельсон [36] розвинули цей метод, змінивши вид функцій, що використовувались при інтерполяції напружень. Це дозволило значно зменшити як кількість розеток тензорезисторів, так і трудомісткість та вартість експериментального дослідження напруженого стану.

До недоліків механічних руйнівних методів необхідно віднести велику базу вимірювання деформацій і значний час, необхідний для визначення напруженого стану. Використання цих методів ускладнено при діагностиці діючих конструкцій - кранів, мостів і т.п. внаслідок того, що в результаті дослідження виникає порушення цілісності конструкцій. Тому розробляються альтернативні методи визначення залишкових напружень з мінімальними ушкодженнями досліджуваних конструкцій.

При визначенні напруженого стану в конструкціях як під час їх виготовлення, так і експлуатації кращими є частково-руйнівні методи, що передбачають вилучення малої частини матеріалу на досліджуваній ділянці для пружності розвантаження залишкових напружень. Відомі методи надрізів і канавок [37], які вносять в конструкцію дефекти, незначно впливаючи на

працездатність великогабаритних конструкцій (наприклад, трубопроводів, кранів, мостів). До недоліків методу канавок і надрізів слід віднести те, що з їх допомогою можна отримати розподіл тільки однієї компоненти напружень, а це істотно обмежує сферу застосування цих методів.

У групі частково руйнівних методів перевага віддається, перш за все, методу Матара [38]. На його основі розроблений метод отворів, який полягає в тому, що для пружного розвантаження напружень висвердлюється некрізний отвір з глибиною рівною його діаметру, що є малим в порівнянні з товщиною протестованого об'єкту. У певних точках околу створеного отвору за допомогою тензорезисторів вимірюють деформації зміни напружено-деформованого стану, використовуючи дані вимірювань, обчислюють значення залишкових напружень, які діяли в зоні свердління [39, 40]. Слід зазначити, на даний момент - це єдиний експериментальний метод визначення залишкових напружень, застосування якого регламентовано міжнародним стандартом ASTM [39].

До недоліків цього методу слід віднести те, що потрібна спеціальна підготовка поверхні досліджуваного об'єкта, наклейка тензорезисторів, складні механічні системи позиціонування пристрою для висвердлювання та ін.

Неруйнівні (або фізичні) методи засновані на зміні тих чи інших фізичних властивостей матеріалу залежно від ступеня пружного деформування. Відомі різні методи такого виду.

Рентгенівський метод визначення залишкових напружень базується на визначенні відстані між кристалографічними площинами [41, 42]. Застосування рентгенівського випромінювання для дослідження напруженого стану металів і сплавів базується на появі його дифракції при проходженні через кристалічну решітку досліджуваного матеріалу. Знаючи довжину хвилі рентгенівського випромінювання і кут, що відповідає максимальній величині піку дифракції, можна оцінити відстань між піками, асоційованими з площиною кристалографічної решітки. За цими даними, використовуючи закон Брегга, визначають міжплощинні відстані кристалічної решітки. Далі, знаючи

міжплощинні відстані кристалічної решітки, які відповідають матеріалу без напружень, визначають деформації в досліджуваній площині. Використовуючи константи пружності матеріалу, за відомими формулами визначають значення напружень в досліджуваній точці об'єкта.

Один з головних недоліків методу рентгенівської дифракції пов'язаний з обмеженнями, розміром геометрії протестованого зразка, його мікроструктурними властивостями. Геометрія повинна бути такою, щоб рентгенівські промені, падаючи на зразок і дифрагуючи на ньому не зустрічали на своєму шляху ніяких перешкод. Оскільки даний метод дозволяє визначити напружений стан тільки в поверхневому шарі близько 10-30 мкм глибиною в залежності від матеріалу і джерела випромінювання, то необхідно, щоб поверхня була гладкою. Оскільки виріб повинен розташовуватися в камері дифрактометра, то це накладає обмеження на розмір досліджуваних об'єктів. Слід зазначити, що метод непридатний при дослідженні матеріалів, які не мають чіткої кристалічної структури (аморфні матеріали, а також, матеріали що зазнали пластичну деформацію). Тому найбільше застосування метод рентгенівської дифракції знаходить при визначенні залишкових напружень в тонких плівках [43], покриттях нанесених на поверхню виробів [44, 45], і напружень, що виникають в результаті обробки поверхні. Відсутність стандарту обробки дифракційних піків призводить до істотного розкиду результатів вимірювань на різних рентгенівських установках [46]. В останнє десятиліття розроблені портативні дифрактометри, які можна використовувати в польових умовах [42].

Застосування синхротрона, який забезпечує рентгенівське випромінювання з високою енергією (жорстке рентгенівське випромінювання), надає нові можливості для визначення залишкових напружень. Це випромінювання має велику глибину проникнення в порівнянні зі звичайним рентгенівським випромінюванням, і становить близько 50 мм для алюмінію [47]. Істотне збільшення глибини проникнення випромінювання означає, що використання синхротронної рентгенівської дифракції забезпечує високу

просторову роздільну здатність, дозволяє створити тривимірну карту розподілу напружень в досліджуваному зразку [47-49]. Інша перевага полягає в тому, що синхротрон дає можливість створювати пучок діаметром від 10 мкм до 1 мм. Внаслідок цього просторова роздільна здатність обмежується не приладом, а розміром кристалічної решітки досліджуваного зразка. Слід наголосити, що в зазначеному методі вимірювання виконуються значно швидше в порівнянні зі звичайною рентгенівською дифракцією.

Як і інші дифракційні методи, метод нейтронної дифракції заснований на вимірюванні пружних деформацій всередині полікристалічних матеріалів. Вимірювання проводяться способом, багато в чому подібному методу рентгенівської дифракції, з використанням рухомого детектора відносного зразка, що дозволяє локалізувати положення високої інтенсивності дифрагуючих пучків нейтронів [50]. Найголовніша перевага використання нейтронів в порівнянні з рентгенівським випромінюванням полягає в тому, що нейтрони, мають значно більшу глибину проникнення. Це дає можливість вимірюванню деформацій при глибинах від 0,2 мм до 100 мм в алюмінієвих сплавах [51] і до 25 мм в сталі, в той час як звичайна рентгенівська дифракція дозволяє вимірювати деформації тільки в поверхневих шарах виробів (до 30 мкм в алюмінії і 5 мкм в сталі [41]). Нейтронна дифракція дозволяє отримати повну тривимірну карту розподілу деформацій досліджуваних об'єктів з хорошим просторовим розширенням [52, 53], цього можна досягти за рахунок переміщення і повороту досліджуваного виробу [53].

До недоліків цього методу слід віднести громіздкість, високу вартість використання, складність обладнання. Цей метод заборонений для використання в недержавних лабораторіях, оскільки вимагає застосування інтенсивного джерела нейтронного випромінювання - ядерного реактора.

Широке застосування для оцінки напруженого стану конструктивних елементів отримав метод, заснований на використанні залежності швидкості поширення зсувних ультразвукових хвиль в твердому тілі від його напруженого стану [54-57].

Оскільки зміна швидкості залежить від поля напружень по всьому шляху, пройденому хвилею, то просторова роздільна здатність методу низька [58]. Істотні погрішності в результаті вимірювань вносять мікро-структурні неоднорідності, оскільки при цьому помітно змінюються параметри пружної хвилі, що значно спотворює ефект від залишкових напружень.

Електромагнітні методи визначення залишкових напружень засновані на залежності зовнішнього електромагнітного поля від поля напружень, в досліджуваному твердому тілі.

Відомо, що під дією механічних напружень значно змінюються властивості феромагнітних матеріалів. Це пояснюється тим, що при наявності в кристалічному тілі напружень деформується решітка, і атоми зміщуються щодо положення, яке вони займали при відсутності напружень в результаті чого змінюється і характер магнітних взаємовідносин між атомами кристалу – магнітна проникність. Максимальне відхилення магнітної проникності буде мати місце за направленням дій напружень. У напрямі дій напружень розтягнення магнітна проникність зростає, і у напрямку стискаючих напружень - падає. Для визначення напружень за виміряною магнітною проникністю для даного матеріалу необхідно попередньо провести торирування [58,59]. Відомо застосування магнітно-пружного методу для визначення залишкових напружень в деталях конструкцій, виготовлених зі сталі 50D [60, 61].

Також активно ведуться дослідження по застосуванню магнітно-шумового методу для оцінки напружень у феромагнітних матеріалах, включаючи і аморфні [62]. Інтерес до цього методу обумовлений високою магнітно-пружною чутливістю параметрів шуму Баркгаузена, відсутністю магнітно-пружного гістерезису, можливості контролю виробів складної форми [63, 93]. Розроблено різні типи приладів для реалізації методу. Проте, є фактори, що обмежують точність вимірювання напружень цим методом. Це різні внески поверхневих шарів різної глибини в сигнал перетворювача, залежність параметрів шуму від кута між напрямками зовнішнього змінного магнітного поля і головних напружень, відмінність у впливі на параметри шуму

нормальних і дотичних напружень. На жаль, магнітно-шумовий метод непридатний для визначення напружень в нержавіючих сталях, алюмінієвих сплавах і інших немагнітних матеріалах.

Переваги магнітних методів полягають в тому, що вимірювання виконуються за короткий час (зазвичай кілька секунд), а обладнання портативне. Головні недоліки магнітних методів це обмежене коло матеріалів, в яких можливе визначення напружень, необхідність тарування приладу для кожного матеріалу, а також сильний вплив на точність вимірювань неоднорідності мікроструктури - дислокацій, включень і т.п..

Огляд основних напрямків досліджень залишкових напружень в зварних конструкціях свідчить про те, що, незважаючи на значні досягнення в розвитку методів вивчення напруженого стану зварних з'єднань, визначення напружень, сформованих в кожному конкретному випадку зварювання конструкцій, пов'язане з труднощами. Розрахункові методи базуються на досягненнях механіки твердого тіла, що деформується з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки, вони дозволяють прогнозувати напружений стан різних типів зварних з'єднань. Їх можливості обмежені у випадках зварних конструкцій зі складними геометричними формами і з наявністю зон концентрації напружень. Крім того, в розрахункових схемах не вдасться відобразити і врахувати вплив всього комплексу термо-деформаційних зварювальних процесів конструктивно-технологічних факторів.

Експериментальні методи застосовуються в основному для визначення залишкових напружень у зварних конструкціях, при цьому неруйнівні фізичні методи контролю не забезпечують необхідну точність і достовірність результатів вимірювань. Тому необхідні подальші дослідження, спрямовані на вдосконалення та розробку нових високоточних і надійних методів визначення залишкових напружень.

Одна з найбільш необхідних задач - це визначення залишкових напружень в елементах конструкцій і матеріалах після зварювальних процесів. Термічний цикл зварювання характеризується пружно-в'язко-пластичною

поведінкою металу, складним характером навантаження, високим рівнем температури при різко нерівномірному і нестаціонарному її розподілі. Це призводить до структурних перетворень металу, що накладає певні обмеження на використання фізичних методів для дослідження залишкових напружень. Механічні ж методи практично не залежать від структури досліджуваного об'єкта, тому на даний час найбільш оптимальним методом визначення залишкових напружень в промислових і лабораторних умовах є метод отворів в поєднанні з тензорезисторами.

Метод отворів і реєстрація виникаючих при цьому деформації за допомогою тензорезисторів є дуже поширеною. Проте використання дрітчастих тензорезисторів передбачає накладання жорстких вимог щодо навколишнього середовища [64]. Тому ведуться розробки альтернативних методів реєстрації переміщень та деформацій. Так, замість використання тензорезисторів, запропоновано використовувати фотопружні інтерференційні методи, що дозволяють здійснювати безконтактне вимірювання виникаючих у результаті релаксації переміщень. Для уникнення труднощів, пов'язаних з використанням тензорезисторів ідуть на деяке зменшення точності вимірювань і застосовують інші, вільні від перерахованих вище недоліків способи. Один з них - застосування оптично активних покриттів в якості датчиків деформації [65]. Відомо, що деякі аморфні матеріали під дією напружень набувають властивості кристалів, і в них з'являються оптичні осі, спрямовані вздовж дії головних напружень. Це називають фотопружністю і широко застосовують для вимірювання напруженого стану. До недоліків використання оптично активних покриттів слід віднести необхідність наклеювання датчиків, зниження чутливості порівняно з тензорезисторами, великий обсяг ручної роботи оператора, громіздкість поляризаційно-оптичного обладнання.

1.2 Оптико-цифрові методи вимірювання переміщень

На сьогоднішній день інтерферометричні методи дозволяють вимірювати переміщення (статичні та динамічні) і досліджувати форму об'єкта з точністю близько частини довжини хвилі джерела лазерного випромінювання. Починаючи з 1980 - х , досліджувалася можливість визначення залишкових напружень використовуючи оптичні методи разом з висвердлюванням отворів, ідея якої полягала в тому, щоб замінити функції розетки тензорезисторів оптичним визначенням переміщення точок поверхні, викликаних локальним розвантаженням напружень у зв'язку зі створенням отвору.

Андервуд Д.Х. [66], використовував оптичну інтерферометрію для вимірювання переміщень, що виникають в результаті висвердлювання отвору. Однак цей метод не знайшов практичного застосування, оскільки вимірювання можна проводити тільки в лабораторії: потрібен віброзахист, спеціальна підготовка поверхні об'єкта, що досліджується, надання їй правильної форми, спеціальне освітлення та обладнання. Л.М.Лобанов та В.А.Півторак вперше запропонували використати голографічну інтерферометрію спільно з висвердлюванням отвору для визначення залишкових зварювальних напружень [67]. Можливість голографічної інтерферометрії у поєднанні з методом отворів для дослідження залишкових напружень було показано також А.А. Антоновим [68], Д.Х.Бассом [69], та Д.В. Нельсоном [70]. Використання голографічної інтерферометрії дозволяє досліджувати в зоні висвердлювання локальні переміщення безконтактним способом без попередньої підготовки поверхні та дає можливість отримати високу чутливість, яка регулюється оптичною схемою голографічної установки. За виміряними переміщеннями визначаються значення та напрями головних напружень у зоні висвердлювання.

Основи оптичної голографії було закладено 1949 р. Д. Габором [71, 72]. Однак тоді голографія не набула розвитку через відсутність потужних джерел випромінювання когерентного світла. Тільки завдяки винаходу лазера з'явилися реальні можливості для подальшого розвитку голографії.

Інтенсивний розвиток методу голографічної інтерферометрії почався з середини 60-х років, коли американські вчені Е. Лейт і Ю. Упатнієкс [73, 74] запропонували для отримання голограм схему з похилим опорним пучком [75].

Принцип цього методу заснований на голографічному відновленні хвиль. Смуги інтерференції показують переміщення об'єкта як цілого, і деформацію його поверхні. Цей метод, описаний вперше Пауеллом і Стетсоном [76], називається голографічною інтерферометрією. Його основні переваги: безконтактність вимірів, висока чутливість до переміщень (порядком близько частини довжини світлової хвилі), можливість реєстрації загальної картини поля переміщень поверхні об'єктів складної форми із різних матеріалів [77]. Л.М.Лобанов та В.А.Півторак застосували метод трьох голограм для визначення векторів переміщень у напруженому об'єкті [78]. Однак необхідність отримання для досліджуваного об'єкта одночасно трьох голограм, призводить до суттєвого ускладнення оптичної схеми, що обмежує застосування методу для вирішення конкретних завдань. Автори розробили методику визначення залишкових напружень з використанням однієї голограми [79, 90-92, 94, 96-98]. Відомо, що найпростіша і малогабаритна оптична схема, використовувана в голографічній інтерферометрії, дозволяє реєструвати нормальну компоненту вектору переміщень (перпендикулярну до поверхні тіла). При цьому, на відміну від тензометрування, де вимірювання виконуються для окремих точок, даний метод реєструє лінії рівня переміщень на всій області освітленої ділянки поверхні тіла в околі зондувального отвору, що дозволяє візуально визначати напрями головних напружень і робити якісні висновки про напруження ще до підрахунку числових значень відповідних величин.

Реєструючі матеріали накладають суттєві обмеження на застосування голографічної інтерферометрії. У більшості лабораторних і серійних голографічних систем для реєстрації голограм застосовувалися спеціальні плівки або пластини з високою роздільною здатністю, на основі емульсії з галоїдного срібла. Такий спосіб реєстрації голограм використовується, в

основному, в лабораторних умовах і при його застосуванні потрібен значний час на хімічну обробку спеціальних матеріалів, що застосовуються. При цьому між записом, проявом фотопластинки та спостереженням інтерферограм проходить не менше 10 хвилин. Застосування термопластичних матеріалів дозволяє скоротити час запису голограм до 3 с. Однак, оскільки термопластичні матеріали зазвичай мають розміри 3х3 см, виникає необхідність використання відео-систем для збільшення інтерферограм, що веде до збільшення вартості обладнання. Після реєстрації голограм за допомогою термопластичної камери, зображення інтерферограм, за допомогою відео-системи, виводиться з необхідним збільшенням на монітор. Після аналізу картин смуг, за допомогою коронного розряду, запис стирається і камера знову готова для запису нової голограм. При цьому реверсивність середовища для запису інтерферограм становить близько 1000 циклів. Використання системи миттєвої реєстрації голограм на основі термопластики дозволило створити компактні голографічні прилади для оперативного вимірювання залишкових напружень в конструкціях у виробничих умовах.

Однак методика визначення напружень, описана в роботі [79], має ряд недоліків. При використанні цього методу використовуються значення переміщень у чотирьох точках на кромці отвору по дві на кожній головній осі. Тим не менш, відомо, що інтерференційні смуги біля отвору розмиті та спотворені внаслідок того, що механічний спосіб отримання отворів не дозволяє отримувати точний отвір без пластичної деформації на кромці отвору. Крім цього, деяку похибку при визначенні напружень вносить те, що підрахунок смуг відбувається вручну, і до краю отвору виникає великий градієнт смуг, внаслідок якого, через зашумленість інтерференційної картини, дуже складно підрахувати порядок смуги за їх високої щільності. Ще одним недоліком є те, що в результаті висвердлювання отвору, залежно від механічних властивостей матеріалу та способу свердління, навіть у ненавантаженому зразку поруч з кромкою отвору можуть виникнути інтерференційні смуги, які згасають на відстані близько чверті діаметра отвору

від його кромки. Тому необхідно виконати попередній вимір кількості смуг, які виникають після свердління отвору в ненапруженому зразку, для того, щоб враховувати їх при визначенні залишкових напружень у досліджуваних об'єктах з подібного матеріалу.

Зазначені похибки суттєво обмежили широке поширення методу визначення залишкових напружень на основі висвердлювання отвору та реєстрації поза-площинних переміщень за методикою, запропонованою О.О.Антоновим. Як вказав Ф.М.Фургіель [80], при використанні методу отворів поза-площинні переміщення пов'язані з ефектом коефіцієнта Пуассона і тому значно менші, ніж площинні переміщення. Тому кращим є використання оптичної схеми для вимірювання переміщень у площині. Слід також зазначити, що використання термопластичної камери для запису та відновлення голограм не дозволяє застосовувати оптичну схему, яка реєструвала б лише площинні переміщення. Д.В.Нельсон у своїй роботі запропонував використовувати оптичну схему, яка дозволяє реєструвати суперпозицію площинних та поза-площинних (нормальних) переміщень, та методику підрахунку смуг, що дозволяє виключити вплив нормальних до поверхні переміщень.

Значно менш жорсткі вимоги до реєструючих матеріалів пред'являються при використанні одного з різновидів інтерференційних методів – спекл-інтерферометрії. Спекл інтерферометрія була вперше описана у роботі [81]. Метою ранніх робіт у цій галузі було подолання низки проблем, властивих голографічній інтерферометрії [82]. Метод заснований на особливості лазерного випромінювання утворювати хаотичну спекл - структуру при відбитті від дифузно-відбиваючої поверхні. Явище утворення спеклів нерозривно пов'язане з використанням високо-когерентного світла. Кожна точка об'єкта розсіює деяку кількість світла у напрямку спостерігача. Внаслідок своєї високої когерентності лазерне світло, розсіяне однією з точок об'єкта, інтерферує зі світлом, розсіяним будь-якою іншою точкою об'єкта. Реєструюче середовище, наприклад фотопластинка, розміщенна у світловому полі, реєструє картину хаотичної інтерференційної структури. Хаотичність

обумовлена шорсткістю поверхні. Для того щоб отримати інтерференційну картину (спеклограму) в площині зображення встановлюється фотопластинка. Її експонують, освітлюючи об'єкт двома пучками когерентного лазерного випромінювання з плоским хвильовим фронтом. Пластинку проявляють і встановлюють точно у вихідне положення. Потім об'єкт знову освітлюють і спостерігають через проявлену пластинку поверхню об'єкта зі спекл картиною. Оскільки на пластинці зображення спеклів негативне, світлі спекли в розсіяному світлі висвітлюють свої темні зображення, а темні спекли висвітлюють прозорі ділянки пластинки. Тому, якщо об'єкт нерухомий, то кількість світла, що проходить через зображення спекл-картини, недостатня. Однак якщо ділянка об'єкта перемістилася на невелику відстань, то спекл-картина, утворена розсіяним світлом у площині фотопластинки, не корелюватиме із зареєстрованим зображенням спекл-картини, і світло проходитиме через прозорі ділянки фотопластинки. При спостереженні або фотографуванні об'єкта через фотопластинку із зображенням спекл картини на його поверхні будуть видні світлі та темні смуги, що моделюють покриті спеклами зображення об'єкта. Смуги з'єднують точки об'єкта, що мають однакові компоненти зсуву, нормальні до бісектриси кута між двома напрямками освітлення.

Вимоги до роздільної здатності реєструючого середовища для методу спекл-інтерферометрії є нижчими порівняно з методом голографічної інтерферометрії. Це пов'язано з тим, що потрібно забезпечити лише розширення спекл-структури, а не тонкої структури смуг, що виникають на голограмі в результаті інтерференції предметної та опорної хвилі. Типові розміри спеклів лежать у межах 0.5-5.0 мкм, і, отже, для запису спекл структури можна використовувати стандартну цифрову камеру. Таким чином, для отримання картини спекл-кореляційних смуг поряд з фотопластинками можна використовувати відеозапис. Цей метод називають електронною спекл-інтерферометрією. Важлива відмінна риса методу у тому, що він дозволяє представляти динамічну картину кореляційних смуг на дисплеї комп'ютера,

минаючи будь-який фотозапис, точну установку фотопластинки тощо. Розвиток комп'ютерної та обчислювальної техніки дозволило вдосконалити метод спекл-інтерферометрії.

В даний час електронні спеклограми отримують за допомогою комп'ютера шляхом віднімання отриманих сигналів. Хвильовий фронт, дифузно-розсіяний об'єктом (спекл - картина) початкового та кінцевого стану, потрапляє на високочутливу матрицю цифрової камери і вводиться в комп'ютер. В результаті опрацювання двох спекл-картин за допомогою комп'ютерної програми отримують інтерференційну картину – спеклограму. Вона являє собою картину з чорними та білими областями або смугами, яка характеризує переміщення точок поверхні об'єкта, що досліджується. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення завдань, пов'язаних з аналізом деформацій [83, 84]. Між звичайним та електронним методами немає теоретичних відмінностей, але технічно останній – це комп'ютеризований процес, який виключає мокрий хімічний або електростатичний прояв та подальше відновлення картин інтерференції. Слід зазначити, що спекл-зображення можуть записуватися на комп'ютер, таким чином час обробки зображень на два порядки менший, ніж при використанні термопластичної камери або фотопластинки. Це робить метод електронної спекл-інтерферометрії менш сприйнятливим до вібрації та інших зовнішніх збурень. Така перевага робить електронний метод більш практичним та ефективним.

Застосування електронної спекл-інтерферометрії дозволяє автоматизувати процес кількісної оцінки переміщень, використовуючи для цього або метод фазових кроків, або Фур'є-перетворення [85-87].

Таким чином, для заміни тензорезисторів при реєстрації переміщень одним із варіантів є метод електронної спекл-інтерферометрії. Це безконтактний метод вимірювання переміщень з високою точністю, який не вимагає спеціальної підготовки поверхні досліджуваного матеріалу, вільний від перерахованих вище недоліків, притаманних вимірюванню деформацій за

допомогою тензорезисторів. На відміну від інших інтерференційних методів, він дозволяє створити компактний прилад, а також суттєво прискорити процес отримання інтерферограм за рахунок того, що немає необхідності в проміжній реєстрації спеклограм за допомогою хімічного прояву фотопластинок, при цьому є можливість повної автоматизації запису та обробки інтерферограм за рахунок використання комп'ютера.

У роботі [88], використовується вдавлення в поверхню індентора, розглянуто можливість застосування електронної широкографії в якості методу реєстрації деформацій. Однак істотним недоліком цього методу є те, що індентор сам вносить додаткові напруження і, по суті, вимірюється суперпозиція залишкових напружень з внесеними, що призводить до похибки методу при дослідженні напруженого стану. Слід також зазначити, що цей метод непридатний для вимірювання напружень у твердих або крихких матеріалах.

Для визначення переміщень все частіше використовують метод цифрової кореляції зображень (DIC – Digital Image Correlation), який отримав розвиток за рахунок істотного збільшення якості та зниження вартості цифрових камер, а також збільшення швидкодії комп'ютерної техніки. Він ґрунтується на розрахунковій обробці оптичного потоку, який несе інформацію про деформацію твердих тіл. В основі його дії лежить обчислення векторів переміщень та подальший розрахунок компонентів деформації за допомогою процедури чисельного диференціювання. DIC метод є одним з найпоширеніших підходів до вивчення процесів деформації та руйнування структурно-неоднорідних матеріалів.

Комерційного поширення набули апаратно-програмні комплекси, принцип дії яких заснований на кореляції цифрових зображень. До таких комерційних систем належить продукція Correlated Solutions Inc. (VIC 3D), LaVision GmbH (StrainMaster) та ін. Зазначені комплекси, як правило, обладнуються штатними оптичними системами, калібрування яких проводиться перед проведенням експерименту залежно від умов відео (фото)

спостереження. Однак комп'ютерний код, що постачається у складі таких систем, є закритим, що не дозволяє ефективно вирішувати ряд прикладних завдань. Тому окремі науково-дослідні колективи займаються розвитком власних програмно-алгоритмічних рішень, а також розробкою апаратних засобів для вивчення процесів деформації та руйнування[89]. Одним із перспективних підходів до визначення деформацій та руйнувань є розрахунок стандартних параметрів на основі DIC методу.

У порівнянні з інтерференційними оптичними методами, що використовуються для вимірювання плоскої деформації, метод DIC має такі переваги:

1) Простота експериментальної установки: не потрібне обов'язкове використання джерел когерентного випромінювання та фазозсувних оптоелектронних компонентів.

2) Мінімальна підготовка поверхні об'єкта, що досліджується: не потрібна попередня підготовка поверхні (якщо у природної поверхні об'єкта спостерігається випадковий розподіл інтенсивності сірого кольору). При необхідності можна створити штучні спекли, наприклад, розпилюванням фарби на поверхню об'єкта, що досліджується, та іншими способами.

3) Низькі вимоги до умов освітлення: на відміну від поширених інтерференційних методів, DIC не вимагає висококогерентного лазерного джерела. Для освітлення під час навантаження може використовуватися біле джерело світла або природне світло. Таким чином, метод може бути використаний як за лабораторних, так і за промислових умов.

4) Широкий діапазон чутливості вимірювання та роздільної здатності: так як DIC метод обробляє цифрові зображення, його безпосередньо можна застосовувати до зображень, отриманих різними оптичними приладами.

До недоліків цього методу можна віднести те, що він вимірює переміщення більші ніж 1 мкм, що для ряду задач є не раціональним. Для технічної діагностики все частіше використовують метод фотограмметрії. Фотограмметрія — це технологія отримання надійної інформації про фізичні

об'єкти та навколишнє середовище за допомогою процесів запису, вимірювання та інтерпретації фотографічних зображень. Як випливає з назви технології, методологія спочатку складалася з аналізу фотографій, однак використання плівкових камер значно зменшилося на користь цифрових сенсорів. Фотограмметрія розширилася, щоб включити аналіз інших записів, таких як цифрові зображення, випромінювана акустична енергія, лазерні вимірювання та магнітні явища.

За останні роки фотограмметрія з її можливостями комп'ютерної обробки та залученням нових інструментів збору даних відкрила багато нових сфер застосування: дистанційна візуалізація, робототехніка, віртуальна реальність, 3D анімація тощо. У промисловій інспекції і контролі якості фотограмметричні методи та системи знайшли своє призначення у таких сферах, як: автошляхи, мости, трубопроводи, вітрові турбіни, лінії електропередач.

Існує два основних типи фотограмметрії: повітряна (з камерою в повітрі) і наземна (з камерою в руках або на штативі). Наземна фотограмметрія має справу з відстанями до об'єктів близько 200 м, її також називають ближньою фотограмметрією. Малоформатна аерофотограмметрія певним чином використовує ці два типи, поєднуючи точку огляду з повітря з близькими відстанями до об'єктів і високою деталізацією зображення.

Метод фотограмметрії базується на геометрично-математичній реконструкції шляхів променів від об'єкта до сенсора цифрової камери в момент експонування, що дозволяє дистанційно визначити дефектні ділянки, отримати точні геометричні розміри пошкоджень та їх розташування на конструкції. Для цього спочатку використовуються алгоритми орієнтації для визначення внутрішніх і зовнішніх параметрів кожного зображення, таких як фокусна відстань, точка центру фокусування, положення й орієнтація камери і точки зйомки. На наступному етапі виконується спільна обробка зображень, вони вирівнюються, щоб забезпечити правильну взаємну позицію та відповідність точок на фото. Після вирівнювання зображень можна визначити 3D-координати точок поверхні об'єкта, використовуючи методи, які базуються

на їх відносних позиціях на зображеннях. На основі 3D-координат хмари точок створюється тривимірна модель об'єкта. Після отримання 3D-моделі на основі фотограмметрії проводиться її масштабування.

Однак застосування даного методу для вимірювання переміщень точок поверхні є неможливим.

Перспективним для інженерних застосувань є метод зсувної спекл-інтерферометрії (ширографії) [99-100]. Цей метод дозволяє безпосередньо отримати значення похідних від переміщень і є ефективним при аналізі деформацій. Метод широкографії не чутливий до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації, а також не потребує особливого захисту від вібрацій.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод широкографії і розробити метод цифрової широкографії [101-107]. Важливою характерною особливістю методу цифрової широкографії є те, що він дозволяє спостерігати динамічну картину інтерференційних смуг на моніторі в режимі реального масштабу часу. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво більш складних задач, які пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій, у лабораторних та промислових умовах.

На даний час цифрова широкографія інтенсивно розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, висока чутливість, можливість виконання досліджень об'єктів складної форми та значних розмірів в реальному масштабі часу. Окрім цього, важливою перевагою, як було згадано вище, є нечутливість до вібрацій.

1.3 Використання ефекту електропластичності для локальної релаксації напружень

Електропластичність — це явище, коли матеріал втрачає здатність чинити опір деформації, кожного разу, коли на нього діє електричний імпульс високої щільності. Відкриття цього явища належить Троїцькому та Ліхтману [108], які першими спостерігали зменшення напружень під час проходження імпульсів струму через монокристали Zn. Відтоді було визнано, що повторне застосування електричних імпульсів у швидкій послідовності під час деформації знижує напруження не лише під час імпульсів, але й між імпульсами [109–111]. Таким чином, повторювані електроімпульси під час деформації імітують ознаки гарячої обробки, хоча й за значно нижчих витрат енергії. Це спонукало до розвитку галузей промислового виробництва, таких як електричне виробництво, які використовують явище ЕП у промислових масштабах. Незважаючи на збільшення зусиль щодо використання переваг ЕП у обробній промисловості, механізми, що сприяють ЕП, залишаються недостатньо вивченими.

Протягом багатьох років дослідники запропонували кілька різних теорій, щоб пояснити зменшення напружень під час електроімпульсного впливу, але не досягли консенсусу щодо механізму, який домінує у феномені ЕП. Найбільш ранньою теорією, яка пояснює електропластичне розм'якшення, є теорія Джоулевого нагрівання; електрична енергія, що передається до матеріалу, перетворюється на тепло, що призводить до термічного розм'якшення матеріалу. Це найпростіше пояснення ЕП, але воно далеко не одностайно прийняте. Декілька експериментів показують, що підвищення температури внаслідок одного електричного імпульсу є занадто малим, щоб бути співмірним із зменшенням напружень [112-114], тоді як деякі пізніші дослідження приписують спостережуване розм'якшення лише під час електроімпульсного впливу [115, 116]. Неоднозначність навколо Джоулевого нагрівання як домінуючого механізму ЕП спонукала до розробки теорій, які могли б пояснити

зменшення напружень за рахунок дії електричного струму без підвищення температури матеріалу. Конрад із співавторами [112, 113] представили першу серед атермічних теорій, яка базується на передачі імпульсу від електронів, що течуть, до дислокацій. Вона також відома як теорія «сили електронного вітру» і вважалася основною причиною ЕП, поки Молоцький та ін. не представили аналіз, який продемонстрував, що її ефект невеликий порівняно зі зменшенням у напруженнях, що спостерігається під час експериментів. Молоцький та співавтори також пропонують інше пояснення зменшення напружень. Вони стверджують, що індуктивне магнітне поле через прикладений струм змінює електронні стани зв'язків між перешкодами та ядрами дислокацій, що сприяє відкріпленню дислокацій від таких перешкод. Їхня теорія вимагає, щоб перешкоди мали парамагнітний характер. У [117] також представлений аналіз зменшення напружень внаслідок такого ефекту та виявлено, що розм'якшення є досить значним порівняно з двома попередніми механізмами.

На сьогоднішній день теорія Джоулево нагріву, сили електронного вітру та депінінгу від парамагнітних перешкод є найбільш часто використовуваними поясненнями випадків ЕП, що спостерігаються в різних матеріалах. Відсутність згоди в науковому співтоваристві щодо того, який механізм домінує в електропластичній поведінці, частково спричинена труднощами, пов'язаними з експериментальною перевіркою депінінгу дислокацій і сили електронного вітру на дислокаціях через електроімпульси.

В роботі [118] оглянуто існуючі уявлення про вплив обробки конструкційних матеріалів імпульсами струму на їх механічні властивості. Проведена класифікація типів електроімпульсної обробки на струмопровідних матеріалах і відмічено перспективи її застосування для підвищення механічних властивостей зварних з'єднань.

Одним із перспективних шляхів підвищення ресурсу зварних конструкцій є обробка металу шва та навколошовної зони імпульсами струму різної тривалості та конфігурації, а також вплив на конструкційні матеріали електромагнітними полями [119]. Одним з нових методів впливу струму на

метали та сплави є ЕДО, заснована на ініціюванні в матеріалі електродинамічних сил, що виникають при перехідних процесах, що супроводжують проходження у матеріалі розряду струму. При сумуванні електродинамічних сил із зовнішнім статичним навантаженням, прикладеним до зварної конструкції, можуть виникати пластичні деформації, що позитивно впливають на релаксацію залишкових напружень і як наслідок на ресурсні характеристики конструкцій.

У дослідженні [120] розглянуто вплив ЕДО на напружено-деформований стан плоских зразків із сплаву АМгб при різних схемах попереднього навантаження. На основі неруйнівного ультразвукового методу розроблено методику та проведено вимірювання залишкових напружень у стикових зварних з'єднаннях. Встановлено, що ЕДО дозволяє знизити залишкові напруження в зварних з'єднаннях сплаву АМгб на 50...65%, також досліджувався вплив електродинамічної обробки імпульсами струму на напружений стан низьковуглецевої сталі Ст3 та її зварних з'єднань [121]. Розроблено експериментальну методику, за допомогою якої вивчено механізм дискретного падіння зусилля навантаження плоских зразків при одноактній електродинамічній дії. Встановлено, що ЕДО стикових зварних з'єднань сталі Ст3 дозволяє знизити рівень залишкових зварювальних напружень більш ніж на 50%.

У роботі [122] визначено, що після проходження імпульсу електричного струму через зразки алюмінієвого сплаву АМгб підвищується ефективність ЕДО, знижуються локальні внутрішні напруження через впорядкованість дислокаційної субструктури. Результати, одержані під час застосування ударного навантаження (без проходження ІЕС), а також взаємодії ударного навантаження і проходження ІЕС, підтверджують гіпотезу про вплив електрон-дислокаційної взаємодії на внутрішні напруження у сплаві АМгб.

Описано розрахункову модель процесу ударної взаємодії електрода-індентора з пластиною з алюмінієвого сплаву АМгб при електродинамічній обробці зварних з'єднань [123]. Задача розв'язувалась у плоскій двовимірній

лагранжевій постановці з використанням програми ANSYS/LS-DYNA. Представлено результати розрахунку процесу формування областей залишкових напружень і пластичних деформацій при ударному пружно-пластичному впливі електрода-індентора.

У [124] досліджено особливості еволюції структуроутворення алюмінієвих сплавів АМг5, АМг6 та їх зварювальних з'єднань при електродинамічній обробці в умовах пружного навантаження. Встановлено, що при ЕДО збільшується в'язка складова зруйнування, має місце пластична деформація за механізмом ковзання, яка викликає деформаційне зміцнення металу до 40%. Рівень початкових розтягуючих напружень при ЕДО знижується на 50–60%.

Досліджено вплив ЕДО на особливості формування макропластичних деформацій при одновісному розтязі основного металу та зварних з'єднань маловуглецевої сталі Ст3 [125]. Досліджено механізм формування смуг Чернова-Людерса при одновісному розтязі зразків Ст3 в умовах електродинамічного впливу. Металографічний аналіз зразків Ст20, показав, що при ЕДО відбувається еволюція феритно-перлітної структури.

Розглянуто результати фактографічних досліджень впливу електродинамічної обробки на підвищення спротиву руйнуванню плоских зразків алюмінієвого сплаву АМг6 при циклічному навантаженні [126]. Показано, що умови закріплення оброблюваних зразків мають суттєвий вплив на стійкість сплаву АМг6 до зародження тріщини при симетричному циклі навантаження з близькою до умовного порогу плинності металу амплітудою.

У роботі [127] розроблено експериментальну методику, на основі якої досліджено вплив різної конфігурації розрядного контуру на амплітудні значення імпульсного струму та динамічного навантаження при електродинамічних впливах. Показано вплив імпульсного струму, динамічного навантаження, а також їхньої суперпозиції на зміну структури алюмінієвого сплаву АМг6. На основі даних структурного аналізу показано, що максимальна еволюція структури сплаву АМг6 має місце при суперпозиції впливів

імпульсного струму і динамічного навантаження, а мінімальна при впливі тільки імпульсного струму.

Враховуючи наведене, слід зазначити, що ЕПЕ можна застосовувати для локальної релаксації ЗН. Це створює передумови для розробки наукових засад неруйнівного методу визначення ЗН на базі застосування ЕПЕ.

За рахунок кореляції локальних напружених станів внаслідок висвердлювання некрізного отвору і локального введення електричного струму можливо розробити методику неруйнівного оцінювання ЗН.

1.4 Висновки по розділу 1

1. Поведений аналіз сучасних методів дослідження напруженого стану конструкційних матеріалах показав, що необхідна розробка нових та вдосконалення існуючих підходів до експериментального вимірювання залишкових напружень.
2. Сучасні методи лазерної інтерферометрії такі як, спекл-інтерферометрія та широкографія, дозволяють безконтактне вимірювання переміщень і деформацій точок поверхні, а програмне забезпечення пришвидшує обробку отриманих результатів, що робить ці методи перспективними для вирішення задач експериментальної механіки.
3. Показано, що застосування ефекту електропластичності може замінити традиційне висвердлювання некрізного отвору, що дозволить створити неруйнівний спосіб визначення залишкових напружень на основі ІСВЩ та лазерної інтерферометрії.

РОЗДІЛ 2. ПРИЛАДИ І МЕТОДОЛОГІЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ І ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

2.1 Спекл-інтерферометричний метод і апаратура для вимірювання переміщень

Метод спекл інтерферометрії заснований на інтерференційному порівнянні оптичних образів двох станів об'єкта: початкового та зміненого (зміщеного або деформованого).

Когерентне лазерне світло, потрапляючи на шорсткий дифузно-відбивний об'єкт, зазнає випадкової модуляції, яка проявляється в структурі розсіяного випромінювання, роблячи його просторово неоднорідним. Вони розташовуються випадковим чином в площині спостереження, маючи при цьому випадкову форму та розміри. Утворені плямисті світлові поля називають спекл-структурами або спекл-картинами. Вважається, що площа зображення об'єкту співпадає з площиною спостереження.

Зміщення або деформація поверхні об'єкта несе за собою відповідні просторові зміни спекл-структури, вимірювання яких дозволяє визначити переміщення точок поверхні.

Для вимірювання використовують реєстрацію спекл-структур, відповідних початковому (I_1) і зміненому (I_2) стану об'єкта, з наступним спостереженням картини інтерференційних смуг.

У роботі використовується інтерферометр, схема якого зображена на рис. 2.1.

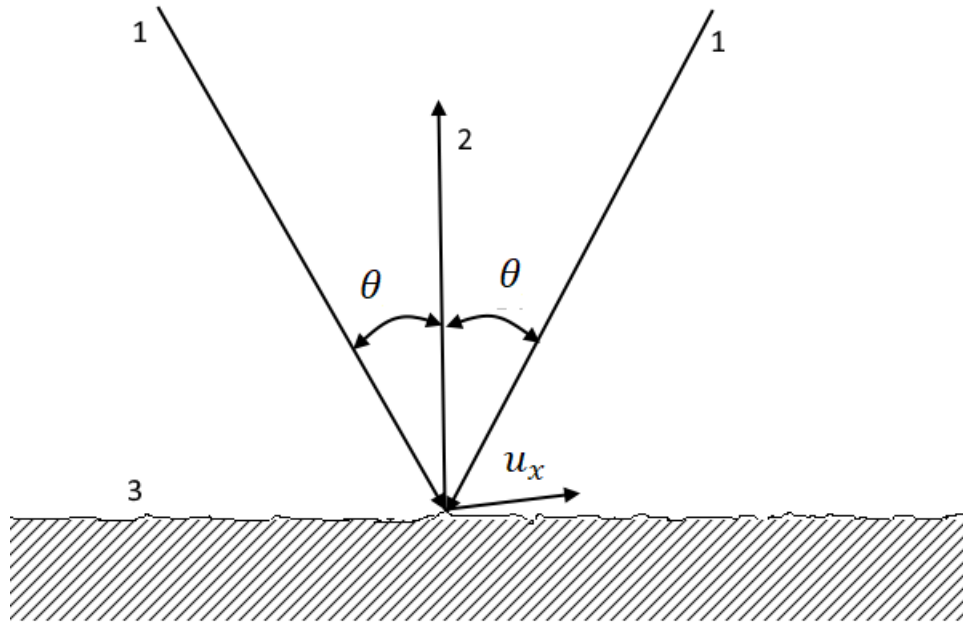


Рис. 2.1. Оптична схема спекл-інтерферометру, де 1 – напрямок освітлення, 2 – напрямок спостереження, 3 – поверхня досліджуваного об’єкта.

У загальному випадку кореляція між двома спекл-зображеннями визначається за формулою

$$\rho_{I_1 I_2} = \frac{1 + \cos(\Delta\varphi(\vec{u}))}{2} \quad (2.1)$$

де $\Delta\varphi$ – зміна фази у точках поверхні, що обумовлена зміщенням та визначається у ході експерименту.

За формулою 2.2 обчислюються значення проекції переміщень u на вісь ОХ.

$$u_x = \frac{\lambda}{4\pi \sin \theta} \Delta\varphi(\vec{u}) \quad (2.2)$$

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено спекл-інтерферометричний прилад для вимірювання площинних переміщень точок поверхні. Блок-схема цієї системи наведена на рис. 2.2.

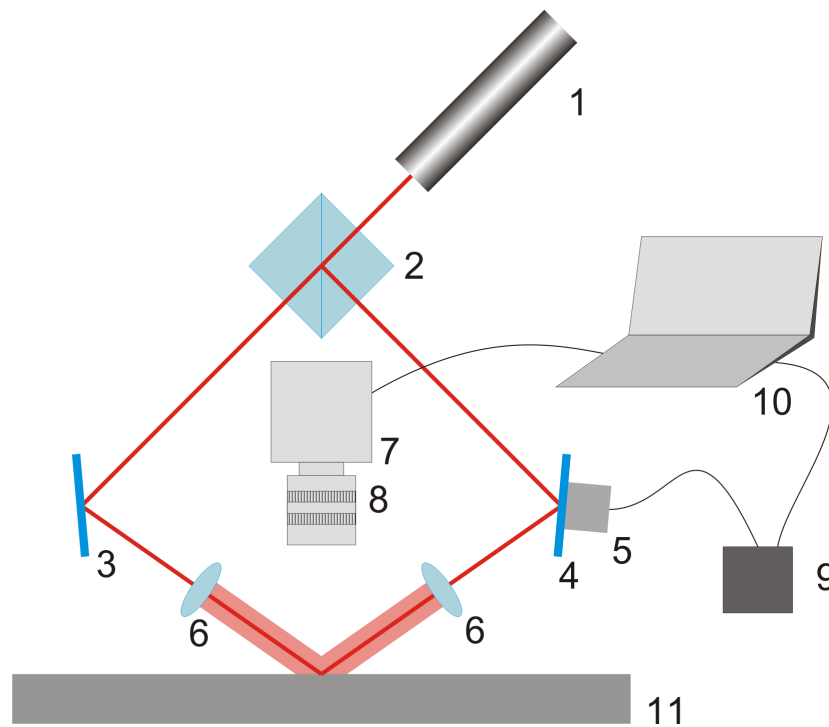


Рис. 2.2. Блок-схема спекл-інтерферометричної системи для вимірювання площинних переміщень: 1 – лазер, 2 – розділювач світла, 3 – дзеркало, 4, 5 – п'єзокероване дзеркало, 6 – розширювач лазерного променя, 7, 8 – цифрова камера з об'єктивом, 9 – п'єзоконтролер, 10 – комп'ютер, 11 – досліджуваний зразок.

Спекл-інтерферометричний вимірювальний блок складається з джерела когерентного випромінювання оптичного діапазону (лазер) (1), подільника лазерного світла (2) на два взаємокогерентні промені, статично закріпленого дзеркала (3) та дзеркала (4), що рухається за допомогою п'єзоелектричного перетворювача (5), лінз (6), що розширюють лазерні промені для освітлення ділянки досліджуваного зразка (11) та цифрової камери (7) з об'єктивом (8). Дзеркала (3) і (4) встановлюються таким чином, щоб забезпечити симетричне відносно вектору нормалі до поверхні об'єкту (11) освітлення двома променями лазерного світла, кут між променями має бути в межах від 90° до 124° . Для управління п'єзокерованим дзеркалом, а також опрацювання спеклограм з наступним визначенням переміщень в точках поверхні об'єкту (11) на основі фазозсувної технології, в комп'ютер (10) встановлюється спеціалізоване

програмне забезпечення. Зовнішній вигляд спекл-інтерферометричного приладу наведено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд спекл-інтерферометричного приладу для вимірювання площинних переміщень точок поверхні [130].

Оскільки відбиток від електроду складає менше 0,5мм у діаметрі необхідно було змінити оптичне збільшення спекл-інтерферометричного приладу. На основі теоретичних та експериментальних досліджень, було змінено елементи 7, 8, що наведені на рис. 2.2. Дане вдосконалення дозволило зменшити видиму область та отримувати більш чіткі спекл-зображення.

2.2 Метод ширографії і обладнання для вимірювання деформацій

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено автоматизовану ширографічну систему на основі модифікованого інтерферометра Майкельсона із змінним кутом нахилу дзеркала в одному з оптичних плечей. Блок-схема цієї системи для неруйнівного контролю якості наведена на рис. 2.4.

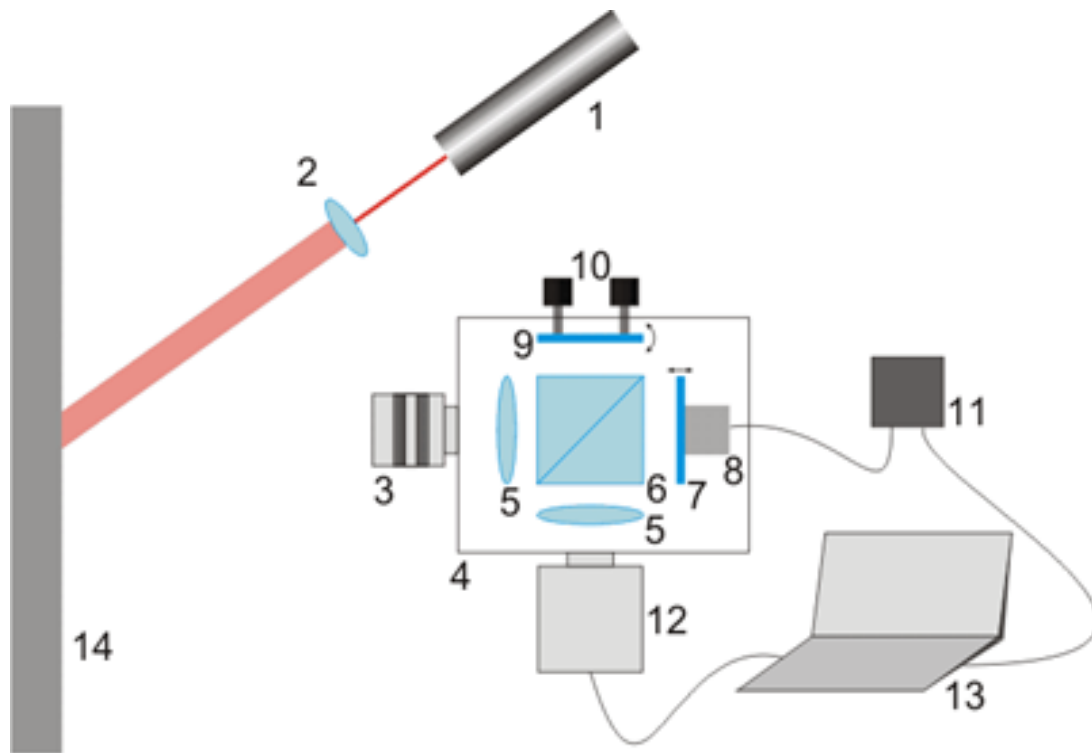


Рис. 2.4. Блок-схема ширографічної системи: 1 – джерело когерентного випромінювання; 2 – розширювач лазерного променя; 3 – об'єктив; 4 – ширографічний інтерферометр, який включає в себе лінзи 5, ділильний кубик 6, дзеркало 7, закріплене на п'єзоелементі 8, дзеркало 9, яке створює зміщення зображення за допомогою гвинтів 10; 11 – контролер для керування п'єзоелементом 8; 12 – цифрова камера; 13 – ноутбук; 14 – досліджуваний зразок.

Ширографічна система (рис. 2.4) включає такі основні компоненти: лазерна освітлювальна система (1, 2), об'єктив (3), інтерферометр (4), цифрова

камера (12), ноутбук або комп'ютер з монітором (13), фазозсувна система (7, 8, 11). П'єзoeлектричний фазозсувний елемент із джерелом живлення - забезпечує необхідний зсув фаз між двома хвильовими фронтами в результаті зміщення дзеркала в одному із оптичних плечей інтерферометра на величину $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання. Широ-дзеркало 9 слугує для створення широзсуву. Змінюючи кут нахилу дзеркала в інтерферометрі за допомогою гвинтів 10 можна задавати необхідну величину зсуву. При цьому величина широзсуву впливає на чутливість вимірювань системи контролю. Лазер призначений для освітлення об'єктів дослідження та формування на ньому спекл-структури. Змінний об'єктив 3, встановлений на широмодуль 4, дозволяє отримати та сфокусувати отримані спекл-картини на матрицю цифрової камери 12 для подальшого їхнього цифрового опрацювання. Змінюючи об'єктиви можливо налаштувати інтерферометр для дослідження ділянок об'єктів різної площі. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями наведений на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Зовнішній вигляд широкографічного інтерферометра із лазерними модулями (1) та змінним об'єктивом (2).

Отримати чутливість інтерферометра до різних видів деформування (у площині або поза площинне) можна змінюючи взаємне розташування об'єкта, освітлюючого лазерного проміння та напрямку спостереження крізь об'єктив інтерферометра. З метою досягнення максимальної чутливості оптичної схеми інтерферометра до поза площинного деформування потрібно, аби кут між напрямками освітлення та спостереження був мінімальним, тому лазери закріплюються безпосередньо на ширографічному інтерферометрі.

Розроблена автоматизована ширографічна система працює за наступним алгоритмом. Хвильовий фронт від лазера, відбитий від поверхні досліджуваного об'єкта, проходить крізь інтерферометр та фокусується на матрицю цифрової камери, за допомогою якої передається до комп'ютера для подальшого цифрового опрацювання. Потім об'єкт навантажують (внаслідок чого він деформується) і знов записують зображення досліджуваної поверхні. Зображення, що отримані до та після навантаження, опрацьовуються до одержання широграми за допомогою розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України програмного забезпечення. Така широграма являє собою картину поперемінних світлих та темних ділянок (смуг), що потребує подальшого опрацювання, а саме зниження рівня спеклшуму, підвищення контрасту смуг та деякі інші.

До параметрів комп'ютерного опрацювання, окрім стандартних операцій – отримання інтерференційних картин, фільтрація та зшивка – належить додаткова фільтрація, оскільки картина інтерференційних смуг може бути «зашумленою» та недостатньо контрастною. Занадто велика кількість інтерференційних смуг призводить до зниження контрасту зображення, а це збільшує час і зменшує ефективність комп'ютерного опрацювання. Кількість інтерференційних смуг обирається для швидкого та ефективного опрацювання широграми. Змінювати кількість інтерференційних смуг можна також регулюванням величини широзміщення, тобто зміною чутливості інтерферометру.

Для інтерпретації та обробки даних, одержуваних методом широкографії, необхідно більш детально розглянути хід променів через інтерферометр.

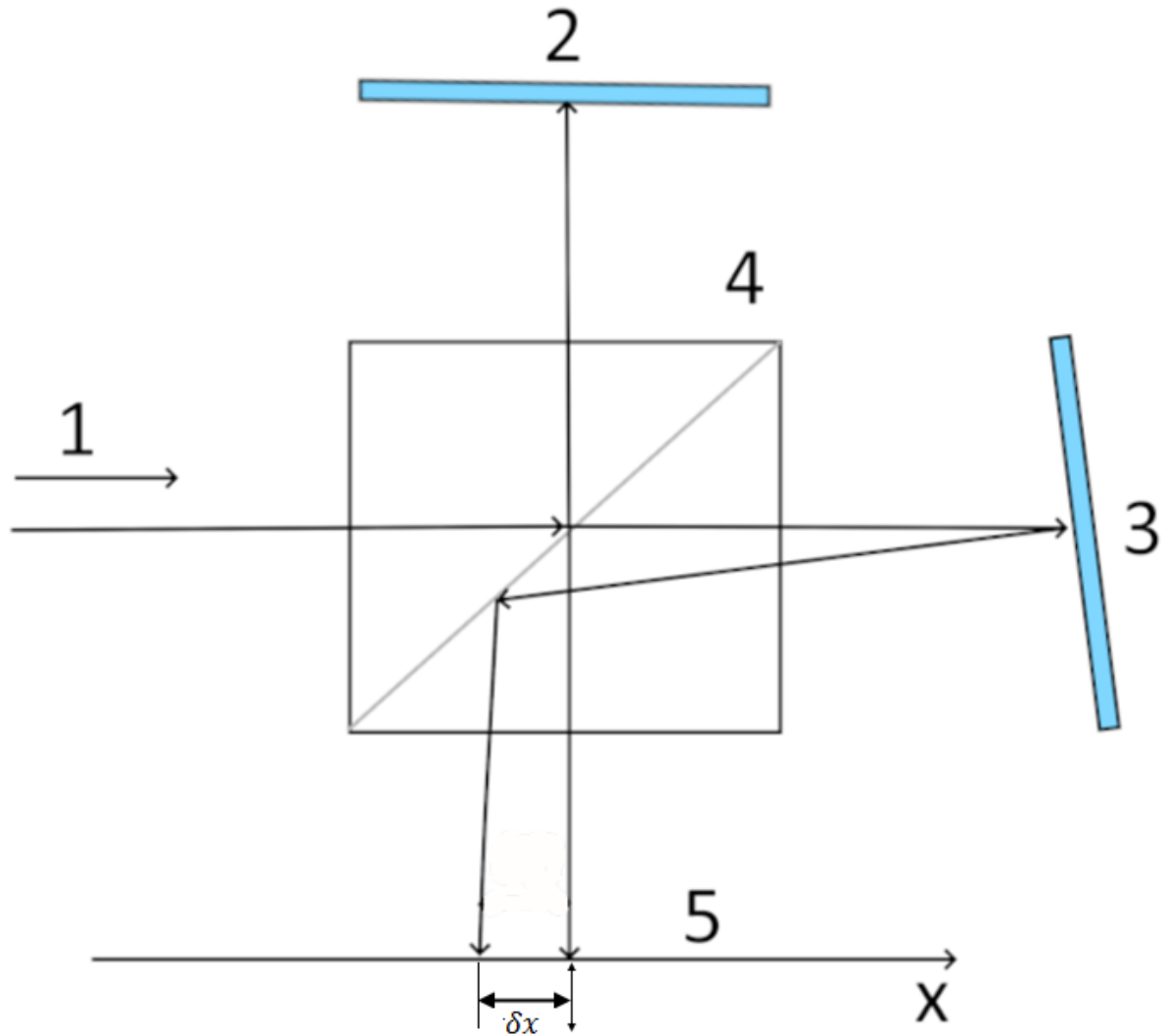


Рис. 2.6. Оптична схема модифікованого інтерферометру Майкельсона для вимірювання $\frac{\partial w}{\partial x}$ методом широкографії: 1 – лазерний промінь, 2,3 – дзеркала, 4 – ділительний кубик, 5 – матриця цифрової камери.

Якщо освітлення направлено перпендикулярно поверхні об'єкта, то тоді компоненти зсуву фаз записуються у вигляді[132]:

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi\delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (2.3)$$

$$\Delta\varphi_y = \frac{4\pi\delta y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (2.4)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання, δx , δy – широзсув у напрямку x та y відповідно, $\frac{\partial w}{\partial x}$, $\frac{\partial w}{\partial y}$ – значення похідної вздовж обраного напрямку.

Найбільш оптимальним методом автоматичного аналізу спекл-інтерферограм є метод фазових кроків, який полягає у записі кількох інтерферограм з відомим зсувом фази між ними [129].

За даними про відносний зсув фаз з формули і з рівнянь (2.3), (2.4) можна виразити необхідні для подальшого дослідження величини. Аналогічним чином визначаються і компоненти вектору переміщень при обробці даних, отриманих в ході спекл-інтерферометрії. Отримані дані мають дискретний характер і описують НДС в якійсь конкретній точці об'єкта.

Зазвичай метод широкографії використовують при дослідженнях поверхонь великої площі для неруйнівного контролю якості. Оскільки у роботі необхідне вимірювання деформацій у ділянці менше 0,5мм, то на основі теоретичних та експериментальних досліджень були змінені елементи 3, 5 що зображені на рис.2.4.

2.3 Імпульсне джерело струму високої щільності для локальної релаксації напружень.

Для локальної релаксації напружень у досліджуваних об'єктах використовувались створене в Інституті електродинаміки НАН України джерело імпульсного струму (ДІС) та електродна система ударно-імпульсної дії, яка розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

У джерела живлення є широкі можливості регулювання основних електричних параметрів системи, що забезпечують необхідну форму імпульсів струму. Електродна система ударно-імпульсної дії включає вольфрамовий електрод ϵ , диск D з алюмінієвого сплаву, який жорстко закріплений до електроду ϵ , котушку індуктивності L у діапазоні від 0,57 до 6,25 мкГн, конденсаторна батарея має ємність $C = 3100$ мкФ із зарядною напругою U у діапазоні від 50 до 200 В (рис. 2.7). Під час протікання струму через котушку індуктивності електродної системи виникають електромагнітні сили, які притискають електрод до об'єкту дослідження, забезпечуючи необхідний контакт. На силу притискання електроду впливає відстань t між котушкою індуктивності та диском D .

Ця електродна система дозволяє вводити струм високої щільності у досліджуваний матеріал. Введення струму призводить до виникнення переміщень в околі електрода, де значення переміщень залежать від напруженого стану у точці введення імпульсу, а також від таких параметрів електродної системи як: зарядна напруга на конденсаторному накопичувачі U , індуктивність L , відстань між диском і котушкою індуктивності t тощо.

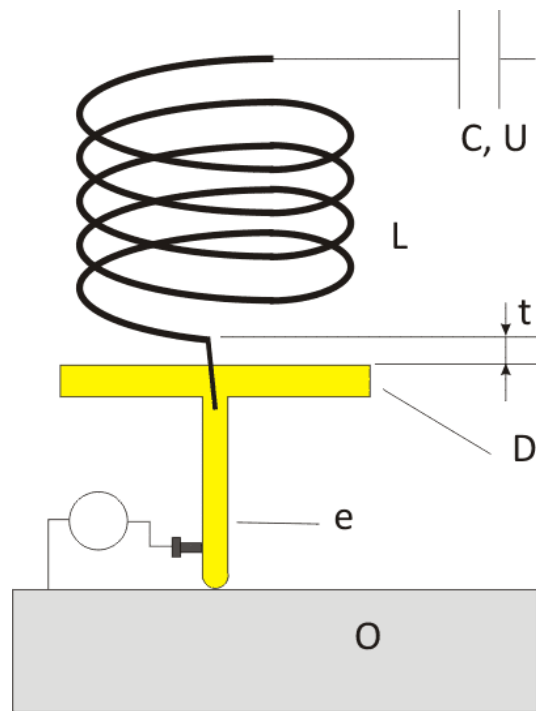


Рис. 2.7. Схема електродної системи ударно-імпульсного типу дії, де L – котушка індуктивності, C – конденсаторна батарея із зарядною напругою U, e – електрод, D – диск, O – об'єкт, в який вводиться імпульс струму, t – відстань між диском і котушкою індуктивності.

При розробці електродної системи потрібно прагнути до отримання локальної релаксації залишкових напружень за допомогою імпульсної дії струму на матеріал, за якої її ефективність буде такою ж, як під час висвердлювання отворів. Тому потрібно ввести критерій оцінки ефективності релаксації напружень при введенні імпульсу струму високої щільності.

Використання ударно-імпульсної електродної системи є доволі ефективним способом релаксації напружень, який поєднує стискаючу дію електроду шляхом його динамічного притискання на об'єкт при проходженні струму через котушку L та суттєвого зменшення механічного опору в цій ділянці внаслідок електропластичного ефекту. Для того, щоб виключити вплив механічної дії електрода, яка викликає додаткові переміщення, створена електродна система імпульсної дії. Це вимагає створення нового джерела імпульсного струму високої щільності та електродної системи (рис. 2.8).

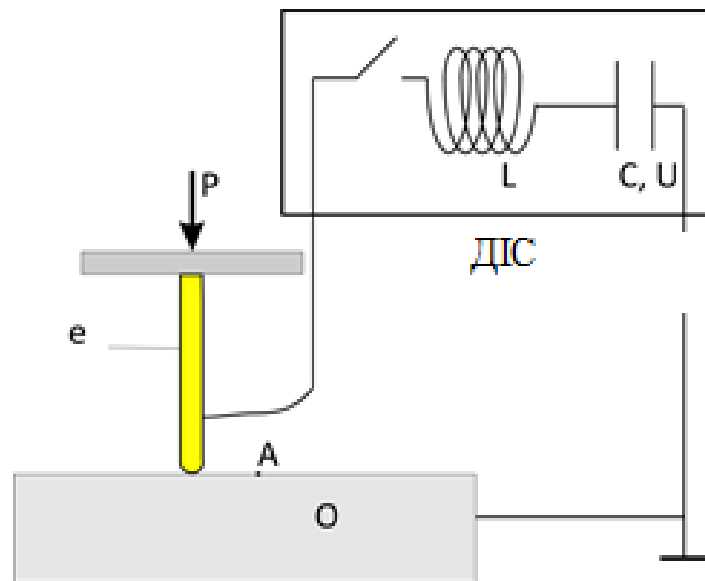
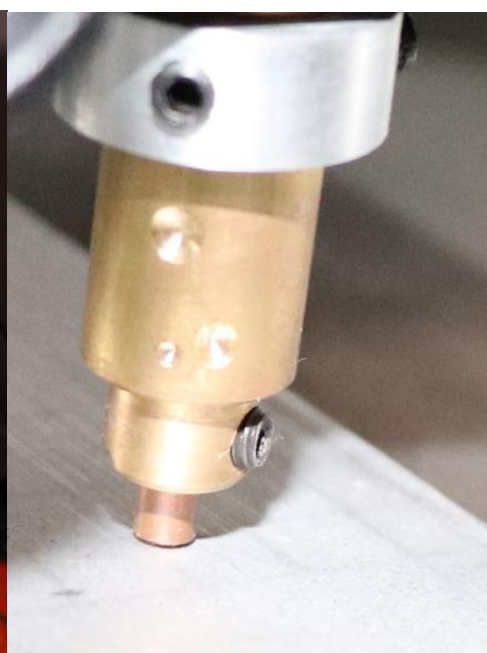


Рис. 2.8. Схема електродної системи імпульсного типу дії, де L – індуктивність ДІС, C – конденсаторна батарея із зарядною напругою U , e – електрод, D – диск, O – об'єкт, в який вводиться імпульс струму, ДІС – джерело імпульсного струму, P – вантаж для притискання електроду до об'єкту дослідження.

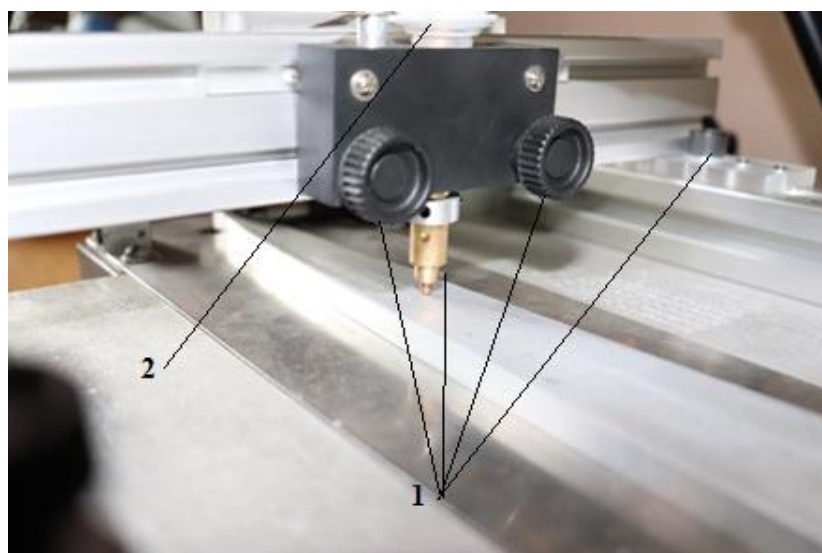
На відміну від системи ударно-імпульсного типу дії (рис. 2.7) в ній відсутній блок динамічного притискання електродів, проте суттєво підвищені вимоги до джерела імпульсного струму. За допомогою блоку живлення (рис. 2.9а) можна регулювати наступні параметри системи: частота розряду $f_p = 10\text{--}40$ Гц, тривалість імпульсу $t_i = 10\text{--}100$ мкс, зарядна напруга $U = 20\text{--}210$ В.



а)



б)



в)

Рис. 2.9. Система локальної релаксації напружень імпульсного типу дії: а) – джерело імпульсів струму високої щільності, де (1) – регулятор частоти розряду f_p , (2) – регулятор тривалості імпульсу t_i , (3) – регулятор зарядної напруги U , (4) – кнопка вимкнення імпульсної дії, (5) – кнопка увімкнення імпульсної дії; б) – зовнішній вигляд електроду для введення ІСВЩ у тестовий зразок; в) – оснащення для фіксації електроду, де (1) – гвинти для позиціонування електроду відносно досліджуваного зразка, (2) – пружина для повернення електроду в початкове положення після знімання вантажу P .

Введення імпульсу струму у досліджуваний об'єкт відбувається за допомогою вольфрамового електроду діаметром $d=1\text{ мм}$ зі сферичним торцем (рис. 2.9б). Для регулювання положення електроду відносно досліджуваних зразків було створене оснащення (рис. 2.9в), яке дозволяє налаштовувати положення електроду відносно зразка з точністю до $0,5\text{ мм}$. Оснащення складається з алюмінієвого профілю зі спеціальними пазами, в які вкручуються гвинти, за допомогою яких відбувається позиціонування електроду відносно досліджуваного зразка.

2.4 Розробка методології визначення напружень на тестових зразках

Вважається, що при введенні імпульсу струму (в області, позначеній жовтим кольором), відбувається релаксація напружень і в околі місця введення імпульсу виникають переміщення точок поверхні. При цьому цілісність контрольованої ділянки матеріалу не порушується. Оскільки розмір ділянки, в якій відбувається релаксація напружень, заздалегідь не відомий, і залежить від параметрів електродної системи, необхідно оцінити ефективність релаксації залишкових напружень при введенні імпульсу струму.

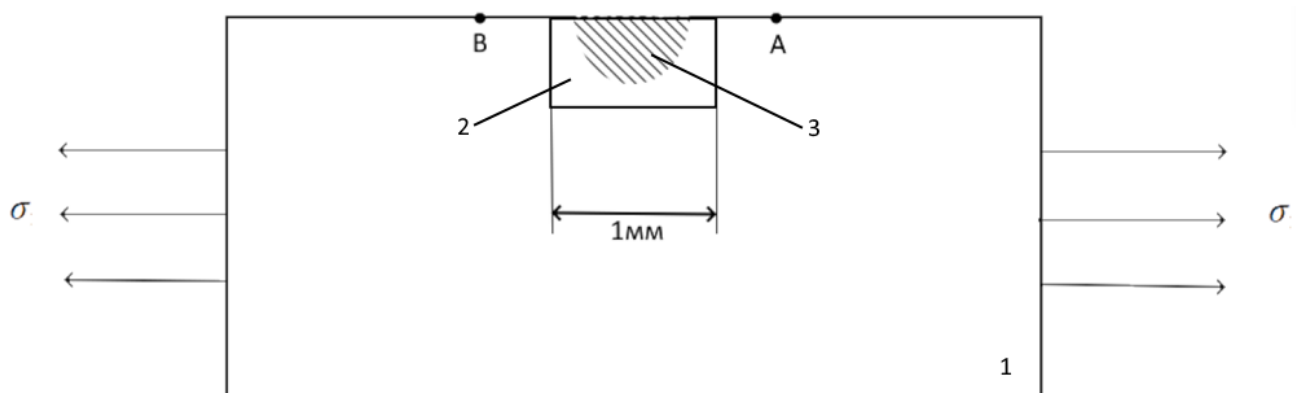


Рис. 2.10. Схема релаксації залишкових напружень: 1 – досліджуваний матеріал, 2 – некрізний отвір діаметром 1 мм, 3 – область впливу ІСВЩ

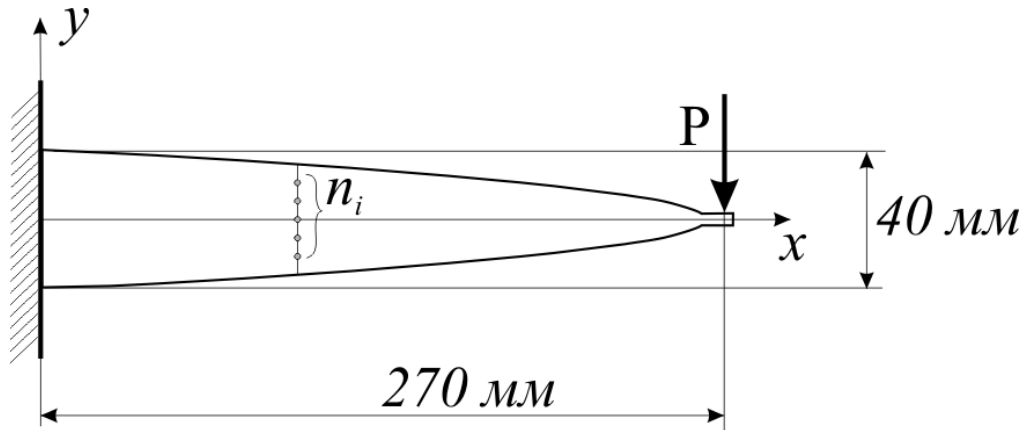
Для оцінки впливу напруженого стану на деформування поверхні досліджуваних об'єктів після введення в них струму високої щільності необхідно розробити пристрій, який дозволяє створення наперед заданих значень напружень.

Найбільш простим і поширеним способом створення напружень у матеріалі є пружний одновісний розтяг прямокутного зразка. У кожній точці такого зразка можна розрахувати значення напружень використовуючи дані про властивості матеріалу, геометричні параметри (ширина та товщина), а також значення сили, яка його навантажує. Варто зазначити, що в цьому випадку можна отримати однакові значення напружень майже на всій поверхні тестового зразка, що є зручним при порівнянні даних, які отримані у різних точках поверхні. Проте, суттєвим недоліком такого зразка є технічна складність завдання стискаючих напружень, оскільки у цьому випадку спостерігається вигин зразка через втрату рівноваги. Використання зразків типу прямокутна балка, одна сторона якої зафіксована, а до іншої прикладається навантаження, дає можливість завдавати як напруження розтягу, так і стиску. Головним недоліком використання такої балки для оцінки впливу імпульсу струму на напружений стан є доволі мала площа зразка у яких можна задати напруження близькі до межі текучості. Внаслідок цього, на одному зразку можна зробити невелику кількість експериментів, оскільки не можна в одній і тій самій ділянці об'єкта дослідження кілька разів здійснювати релаксацію напружень.

Вибір зразка типу балки рівного опору згину (рис. 2.11) дозволяє уникнути вищевказані недоліки, дає можливість отримати велику кількість експериментальних даних з різним рівнем завданих стискаючих та розтягуючих напружень, значення яких можна визначити за формулами (2.5 – 2.6).



а)



б)

Рис. 2.11. Зовнішній вигляд балки рівного опору згину виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6 (а) та його схема (б), n_i – точки в яких вводився імпульс струму.

$$h(x) = h_0 \sqrt{1 - \frac{x}{l}} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{xx}(x, y) = P \frac{12(l-x)y}{bh^3(x)} \quad (2.6)$$

де l – довжина балки, b – товщина балки, h_0 – максимальна ширина балки [92].

Для визначення впливу параметрів електродної системи на релаксацію напружень було розроблено та виготовлено механічний пристрій для навантаження тестових зразків (рис. 2.12). У якості тестового зразка використовується балка рівного опору згину, оскільки напруження у всіх поперечних перерізах не будуть перевищувати наперед задане. В результаті перерозподілу напружень, спричиненого введенням імпульсів струму, в околі

точки введення імпульсу струму виникають переміщення, які реєструються безконтактними методами лазерної інтерферометрії.

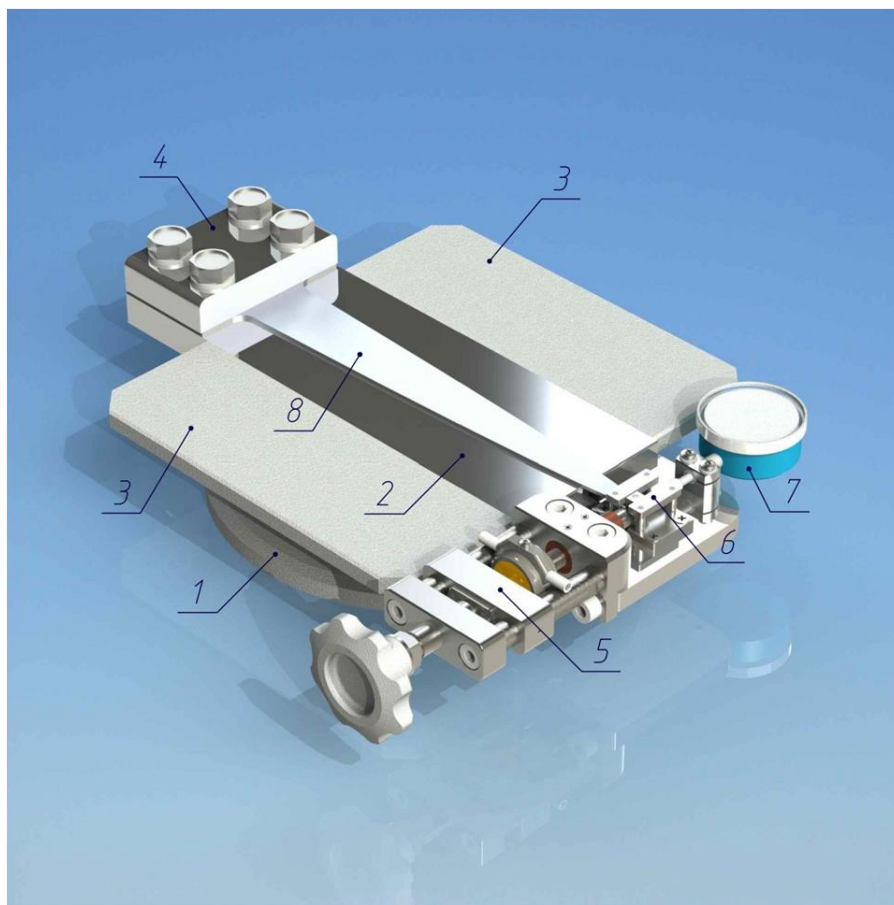


Рис. 2.12. Пристрій для навантаження тестових зразків: 1 – кругла пластина, на якій розміщена базова плита для позиціонування зразка на пристрої; 2 – полірована пластина, на якій розташований тестовий зразок; 3 – пластина для розміщення спекл-інтерферометра; 4 – притискний елемент для фіксації тестового зразка; 5, 6 – вузли навантаження тестового зразка; 7 – пристрій контролю переміщень балки (тестового зразка); 8 – балка рівного опору згину (тестовий зразок).

Розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України спекл-інтерферометричний прилад дозволяє реєструвати переміщення точок поверхні в діапазоні від 0,03 мкм до 3 мкм. На рис. 2.13 представлені картини інтерференційних смуг, які містять інформацію про переміщення u_x , отримані після введення локального імпульсу струму в тестовий зразок під

навантаженням (рис. 2.11). Інтерферограми показують, що зі збільшенням значень напружень σ_{xx} область збурень в околі точки введення імпульсу також збільшується.

В контрольовану ділянку тестового зразка в точках n_i з рівнем напружень σ_{xx} від -100 МПа до $+100$ МПа вводився імпульс струму (рис. 2.11). В результаті локальної релаксації напружень в околі точки введення імпульсу виникали переміщення, які реєструвалися безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії.

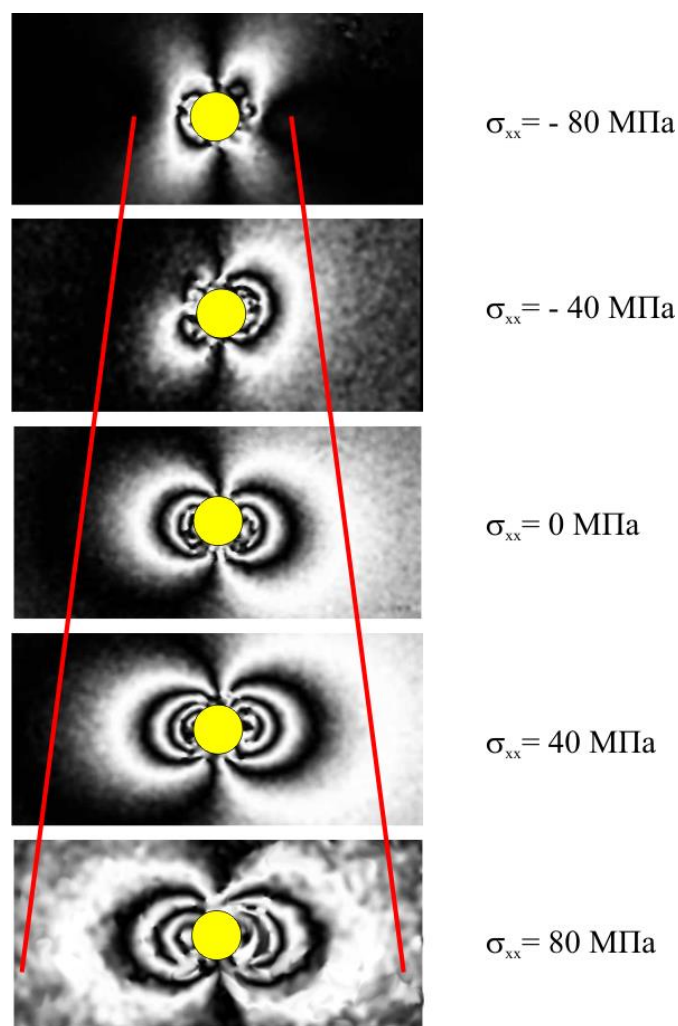


Рис. 2.13. Інтерферограми, одержані після введення імпульсу струму в ділянках з рівнем залишкових напружень. Параметри електродної системи: $L = 3.26$ мкГн, $U = 150$ В, $t = 0.5$ мм. Червоні лінії позначають збільшення зони впливу релаксації напружень на переміщення при збільшенні напруженого стану.

На рис. 2.14 наведено графік залежності переміщень u_x від заданих напружень σ_{xx} . Даний графік демонструє, що виміряні переміщення u_x у точках А, розташованих на відстані 1.25 мм від місця введення імпульсу струму (рис. 2.10), лінійно залежать від напруженого стану у місці вимірювань.

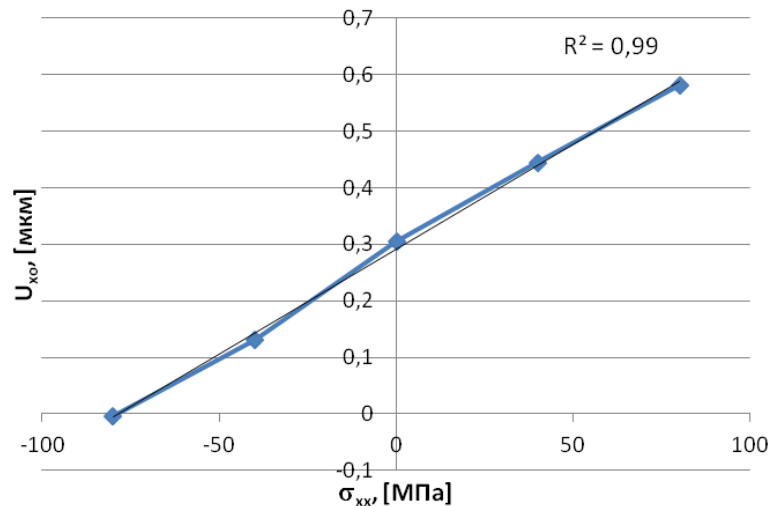


Рис. 2.14. Залежність переміщень u_{xo} , виміряних методом електронної спекл-інтерферометрії на відстані 1.25 мм від точки введення імпульсу струму високої щільності, від рівня заданих напружень σ_{xx} (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$) [135].

Однак використання даних про переміщення тільки в точці А є недостатнім для обчислення напружень σ_{xx} у реальних конструкціях, оскільки у цих точках виникатимуть переміщення також і внаслідок дії напружень σ_{yy} . Тому необхідно ввести новий параметр, який лінійно залежить від залишкових напружень і переміщень та не залежить від розташування головних осей координат і виду напруженого стану.

Припускаємо, що при введенні імпульсу струму відбувається релаксація напружень в області з віссю симетрії OZ, як при свердлінні отвору. В цьому випадку залежність переміщень u_r та u_θ , що виникають в результаті релаксації напружень σ від кута θ на деякій відстані від центру отвору r у полярних координатах виражається такими формулами[136]:

$$u_r(\theta) = A\sigma + B\sigma \cos 2\theta \quad (2.7)$$

$$u_\theta(\theta) = C\sigma \sin 2\theta \quad (2.8)$$

де коефіцієнти A , B та C залежать від граничних умов, розмірів області релаксації напружень, відстані до центру місця введення ІСВЩ.

У результаті попередніх досліджень встановлено, що з введенням імпульсу струму при використанні різних параметрів електродної системи, на об'єкті виникає відбиток електрода діаметром від 0,4 мм до 1.0 мм. Тому вибирається мінімальний радіус кола, у якому співвідношення "якість спекл-картини – значення переміщень" є оптимальним. Відомо, що при вимірюванні переміщень в околі висвердленого отвору методом електронної спекл-інтерферометрії оптимальним є використання відстані r , рівного 2,5 радіусу отворів r_0 . В роботі поле переміщень, що збуджується внаслідок використання струму високої щільності для релаксації напружень, порівнювались зі значеннями, які отримуються при свердлінні отворів діаметром 1 мм. Тому, у подальших дослідженнях використовувалися дані про переміщення у точках, які розташовані на колі з радіусом 1,25 мм.

Оскільки невідомий об'єм у якому відбувається релаксація напружень, то була запропонована методика визначення залишкових напружень шляхом порівняння з отворами діаметром 1 мм.

Вважаючи, що при введенні імпульсу струму не відбувається повної релаксації напружень, а також є початковий ефект (виникають переміщення після введення імпульсу струму в матеріалі без напружень), введемо наступні позначення:

$$\sigma_{xx}^{im} = b_{xx} + k_{xx} \cdot \sigma_{xx} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{yy}^{im} = b_{yy} + k_{yy} \cdot \sigma_{yy} \quad (2.10)$$

$$\tau_{xy}^{im} = k_{xy} \cdot \tau_{xy} \quad (2.11)$$

де b_{xx}, b_{yy} і k_{xx}, k_{yy}, k_{xy} – константи, що характеризують відповідно початковий ефект і ступінь релаксації напружень порівняно з висвердленим отвором діаметром і глибиною 1 мм.

Для плоского напруженого стану використовуючи принцип суперпозиції напружень та вісесиметричність задачі, після перетворення рівнянь (2.7) та (2.8), отримаємо:

$$u_r(r, \theta) = A(\sigma_{xx}^{im} + \sigma_{yy}^{im}) + B[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im})\cos 2\theta + 2\tau_{xy}^{im}\sin 2\theta] \quad (2.12)$$

$$u_\theta(r, \theta) = C[(\sigma_{xx}^{im} - \sigma_{yy}^{im})\sin 2\theta - 2\tau_{xy}^{im}\cos 2\theta] \quad (2.13)$$

Важливою перевагою методів лазерної інтерферометрії для реєстрації деформацій та переміщень є можливість одночасного вимірювання значень у великій кількості точок. Це дозволяє отримати дані про переміщення u_x у точках, розташованих по колу радіусом r із центром у місці введення імпульсу струму (рис. 2.15).

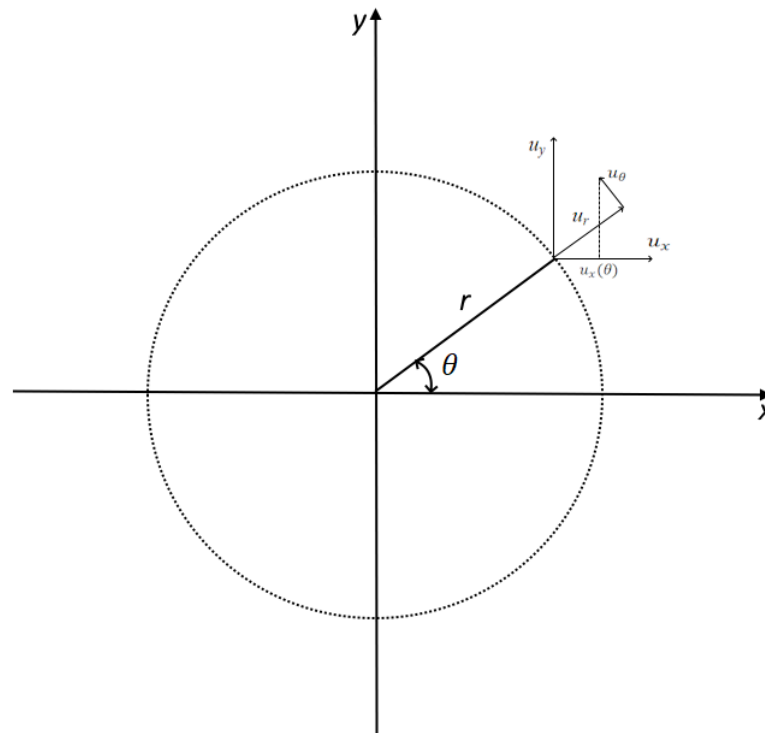


Рис. 2.15. Схема вимірювання переміщень в околі точки (місця) введення імпульсу струму високої щільності, де $r = 1.25$ мм.

Для спрощення обчислень, з рівнянь (2.10) і (2.11) виділимо компоненти-множники $F(\theta)$, $G(\theta)$ та $H(\theta)$ перед σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} , які залежать від кута θ та коефіцієнтів A , B та C , отримаємо наступну залежність:

$$u_x(r, \theta) = u_r(r, \theta) \cos \theta - u_\theta(r, \theta) \sin \theta \quad (2.14)$$

$$u_x(\theta)|_{r=1.25\text{мм}} = F(\theta)\sigma_{xx}^{im} + G(\theta)\sigma_{yy}^{im} + H(\theta)\tau_{xy}^{im} \quad (2.15)$$

Вимірювання переміщень u_x у точках кола (більше трьох точок) дозволяє обчислити значення σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} методом найменших квадратів, використовуючи систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} F(\theta_1) & G(\theta_1) & H(\theta_1) \\ F(\theta_2) & G(\theta_2) & H(\theta_2) \\ F(\theta_3) & G(\theta_3) & H(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^{im} \\ \sigma_{yy}^{im} \\ \tau_{xy}^{im} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x(\theta_1) \\ u_x(\theta_2) \\ u_x(\theta_3) \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

Для того, щоб оцінити можливість застосування запропонованого алгоритму та використання σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} при визначенні залишкових напружень, побудуємо на основі даних про переміщення u_x , графік залежності σ_{xx}^{im} від заданого напруженого стану σ_{xx} (рис. 2.16). Як і у випадку з даними про переміщення u_x (рис. 2.14), залежність між σ_{xx}^{im} та σ_{xx} має лінійний характер (величина вірогідності апроксимації $R^2 = 0,99$). Даний графік характеризується кутом нахилу щодо осі OX , а також значенням у точці з нульовими напруженнями. З графіка можна визначити значення k_{xx} і b_{xx} які відповідають даним параметрам електродної системи, і за формулою (2.9) обчислити значення залишкових напружень у точці введення імпульсу струму.

Таким чином, для визначення залишкових напружень в натурних об'єктах необхідне попереднє калібрування електродної системи на тестовому зразку з метою отримання залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} (2.9). Для цього на балці рівного опору згину задаються напруження σ_{xx} і вводиться імпульс струму в області спостереження спекл-інтерферометра. На основі даних, отриманих методом

спекл-інтерферометрії, про зміщення точок поверхні після введення імпульсу струму в метал, що знаходиться під впливом механічних напружень, із системи лінійних рівнянь (2.16) обчислюється значення σ_{xx}^{im} . За даними певних значень σ_{xx}^{im} у п'яти точках будується графік залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} , за яким визначаються значення k_{xx} і b_{xx} , відповідних параметрам даної електродної системи.

Отже, використовуючи значення σ_{xx}^{im} , обчислене на основі даних про переміщення зареєстровані методом електронної спекл-інтерферометрії, і визначені з графіка значення k_{xx} і b_{xx} за формулою (2.9) можна визначити напружений стан в точці введення імпульсу струму.

Застосування функцій σ_{xx}^{im} , σ_{yy}^{im} та τ_{xy}^{im} є кращим порівняно з даними про переміщення u_x в точках А і В (рис. 2.10), оскільки в цьому випадку використання інформації про переміщення u_x в точках по всій довжині кола знижує відносну похибку і підвищує достовірність визначення залишкових напружень.

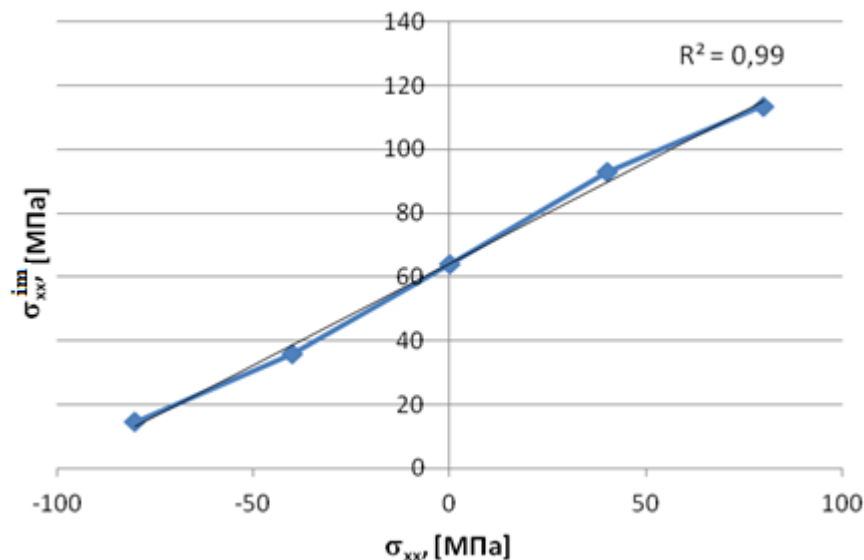


Рис. 2.16. Залежність σ_{xx}^{im} від напруженого стану при введенні імпульсу струму високої щільності через електродну систему ударно-імпульсної дії. Параметри електродної системи: $L = 3,26$ мкГн, $U = 150$ В, $t = 0,5$ мм.

Оскільки існує великий вибір можливих комбінацій таких параметрів електродної системи як напруга заряду конденсаторної батареї U , індуктивність котушки L , відстань t між диском D і котушкою індуктивності, треба розробити критерії вибору оптимальних параметрів електродної системи. Слід прагнути до того, аби розвантаження напружень в області введення імпульсу струму було аналогічним до висвердлювання отвору. У цьому разі крива залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} повинна проходити через початок системи координат ($b_{xx} = 0$ МПа), а кут нахилу k_{xx} дорівнював би одиниці (рис. 2.17 – синя лінія).

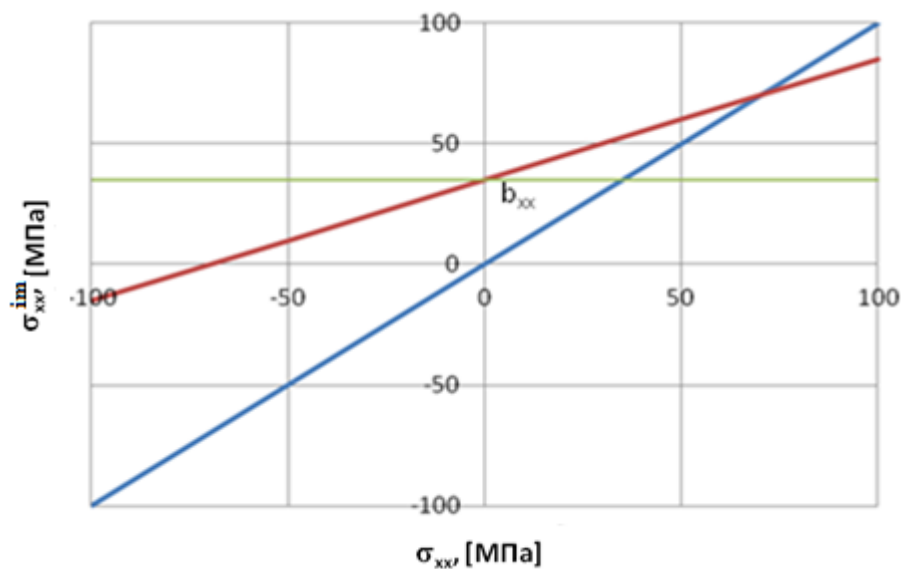


Рис. 2.17. Типова залежність σ_{xx}^{im} (червона лінія) та σ_{xx} (синя лінія) від заданих залишкових напружень, b_{xx} (зелена лінія) початковий ефект у матеріалі без напружень.

Зміна параметрів електродної системи, що використовується для локальної релаксації напружень, призводить до зміни коефіцієнтів b_{xx} та k_{xx} . Тому є потреба оптимізувати параметри електродної системи з метою збільшення значень коефіцієнтів k_{xx} та зменшення b_{xx} , але необхідно приймати до відома те, що на коефіцієнти накладаються обмеження тому, що σ_{xx}^{im} не може перевищувати границю текучості досліджуваного матеріалу.

В роботі досліджувались електродні системи, які різнились як за електричними параметрами, так і з механічної конструкції, а варіювали параметри електродної системи відповідно до таблиць 2.1 та 2.2. На базі отриманих даних для кожної комбінації параметрів U, L та t було побудовано графіки залежності $\sigma_{xx}^{im}(\sigma_{xx})$, завдяки яким було визначено коефіцієнти b_{xx} та k_{xx} .

Таблиця 2.1. Дослідження параметрів електродної системи № 1.

U, B	$L, \text{мкГн}$	$t, \text{мм}$	k_{xx}	$b_{xx}, \text{МПа}$	$b_{yy}, \text{МПа}$	b_{xx}/b_{yy}
160	0,57	0,75	0,850	103,0	105,000	0,981
150	0,57	0,75	0,875	81,0	83,000	0,976
140	0,57	0,75	0,525	56,0	52,000	0,929
130	0,57	0,75	0,525	41,0	40,000	0,976
110	0,57	0,75	0,285	15,0	16,000	0,938
160	5,39	0,75	0,650	54,0	52,000	0,963
150	5,39	0,75	0,475	33,0	34,000	0,971
140	5,39	0,75	0,350	22,0	23,000	0,957
130	5,39	0,75	0,275	16,0	18,000	0,889
110	5,39	0,75	0,150	3,0	6,000	0,500
160	0,57	0,50	1,300	138,0	141,000	0,979
150	0,57	0,50	1,125	112,0	114,000	0,982
140	0,57	0,50	0,975	86,0	88,000	0,977
130	0,57	0,50	0,675	65,0	65,000	1,000
110	0,57	0,50	0,350	25,0	27,000	0,926
160	5,39	0,50	0,850	78,0	74,000	0,949
150	5,39	0,50	0,725	58,0	54,000	0,931

140	5,39	0,50	0,675	48,0	44,000	0,917
130	5,39	0,50	0,450	32,5	30,000	0,923
110	5,39	0,50	0,220	12,0	14,000	0,857
160	5,39	0,25	0,515	30,5	32,500	0,938
150	5,39	0,25	0,433	19,7	21,300	0,925
140	5,39	0,25	0,225	6,3	5,800	0,921
130	5,39	0,25	0,198	3,2	1,900	0,594
110	5,39	0,25	0,090	-0,7	-1,500	0,467
160	0,57	0,25	0,813	70,0	67,000	0,957
150	0,57	0,25	0,640	50,0	48,000	0,960
140	0,57	0,25	0,500	32,0	31,000	0,969
130	0,57	0,25	0,333	20,0	19,000	0,950
110	0,57	0,25	0,188	4,4	2,200	0,500

Таблиця 2.2. Дослідження параметрів електродної системи № 2.

$U, В$	$L, мкГн$	$t, мм$	k_{xx}	$b_{xx}, МПа$	$b_{yy}, МПа$	b_{xx}/b_{yy}
140	1,58	0,5	0,52	48,6	44,9	0,92
150	1,58	0,5	0,64	63,8	57,7	0,90
110	3,26	0,5	0,16	4,8	9,0	0,53
120	3,26	0,5	0,22	15,7	18,0	0,87
130	3,26	0,5	0,30	25,0	30,0	0,83
140	3,26	0,5	0,40	41,0	50,0	0,82
150	3,26	0,5	0,50	57,0	62,0	0,92
160	3,26	0,5	0,73	81,0	86,0	0,94

140	3,86	0,5	0,39	34,7	27,7	0,80
150	3,86	0,5	0,51	51,8	44,9	0,87
140	6,26	0,5	0,38	23,8	22,7	0,95
150	6,26	0,5	0,44	36,0	28,0	0,78

В останній колонці наведено відношення коефіцієнтів b_{xx} та b_{yy} із рівнянь (2.9) та (2.10). Оскільки σ_{xx}^{im} не має бути залежним від напрямку осей координат, то потрібно, аби значення напружень, отриманих у ненапруженому матеріалі, були одними й тими ж незалежно від розташування модуля спекл-інтерферометра, тобто b_{xx} повинно дорівнювати b_{yy} . Параметри електродної системи, коли значення b_{xx}/b_{yy} менші аніж 0,9, не є оптимальними для створення неруйнівного методу визначення залишкових напружень.

2.5 Дослідження впливу напруги U та індуктивності L на коефіцієнти k_{xx} та b_{xx} функції σ_{xx}^{im} .

На рис. 2.18 подано графіки залежності коефіцієнтів b_{xx} та k_{xx} від напруги U на конденсаторній батареї. Вони доводять, що зі збільшенням напруги U збільшуються і значення b_{xx} та k_{xx} . Чим більшими є значення k_{xx} , тим вищою є чутливість методу визначення залишкових напружень при використанні цієї електродної системи. Однак, при використанні значень напруги електродної батареї більше за 150 В, йде порушення лінійності, тому оптимальними значеннями напруги U на конденсаторній батареї є 140-150 В.

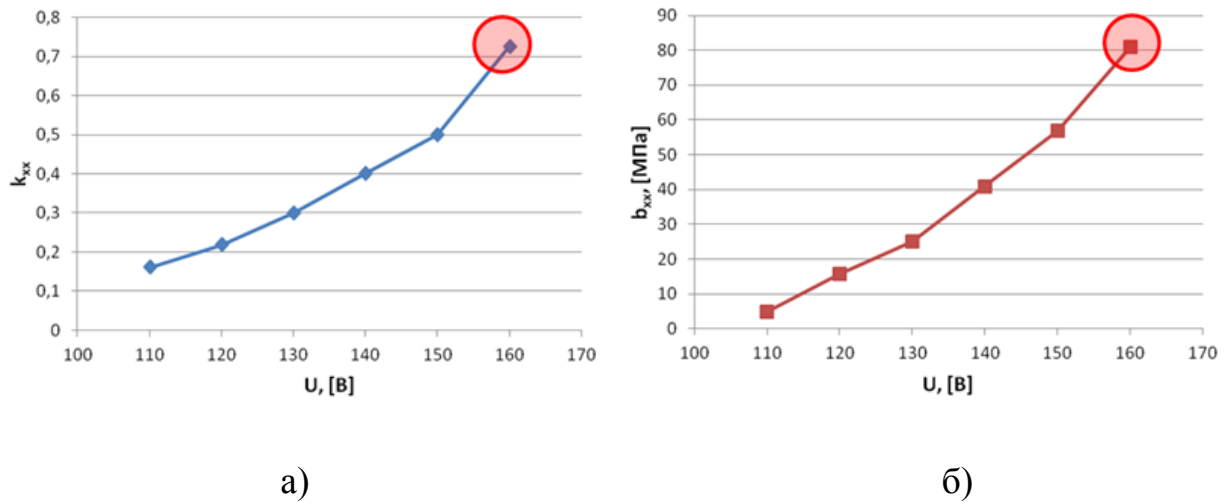


Рис. 2.18. Графіки залежності k_{xx} (а) та b_{xx} (б) від напруги U на конденсаторній батареї. Параметри електродної системи: $L = 3,26$ мкГн, $t = 0,5$ мм.

Як бачимо із таблиць 2.1 та 2.2 на коефіцієнти b_{xx} та k_{xx} впливає індуктивність котушки L електродної системи. Був проведений експеримент з визначення статичного розкидання значень σ_{xx}^{im} у ненапруженому матеріалі за різних значень індуктивності L . Початкові залишкові напруження визначались методом отворів у поєднанні із електронною спекл-інтерферометрією. Підготовлені відпалені зразки мали початкові залишкові напруження до 5 МПа. При кожному значенні індуктивності L у досліджуваний зразок вводили імпульс струму високої щільності, після чого методом електронної спекл-інтерферометрії реєстрували переміщення точок поверхні. Після обробки даних про переміщення обчислювали значення σ_{xx}^{im} , дані про які наведені на графіку (рис. 2.19). Після відкидання значень σ_{xx}^{im} з максимальним відхиленням від середньоарифметичних вимірів у п'яти точках і усереднення залишених чотирьох значень σ_{xx}^{im} отримуємо залежність σ_{xx}^{im} від індуктивності L (рис. 2.20). Графік доводить, що зі збільшенням індуктивності L значення σ_{xx}^{im} зменшуються лінійно. Слід зазначити, що статистичне розкидання отриманих даних не перевищує стандартну похибку з визначення залишкових напружень на базі використання методу отворів. Збільшення індуктивності веде до зменшення швидкості зростання струму і збільшенню часу впливу

електричного струму на матеріал, а це призводить до збурення від дії імпульсу струму.

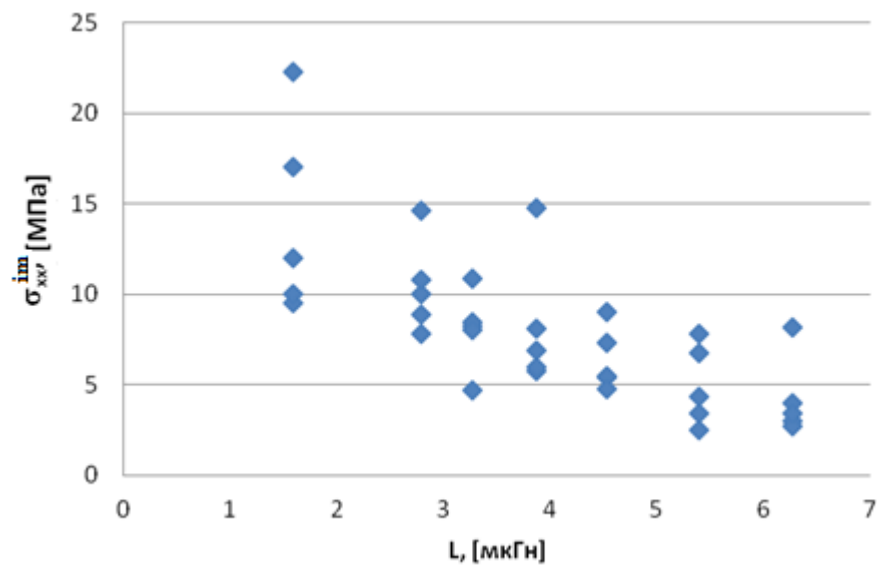


Рис. 2.19. Визначення залежності σ_{xx}^{im} від індуктивності L , $\sigma_{xx} = 0$ МПа.

Параметри електродної системи: $U = 140$ В, $t = 0,5$ мм.

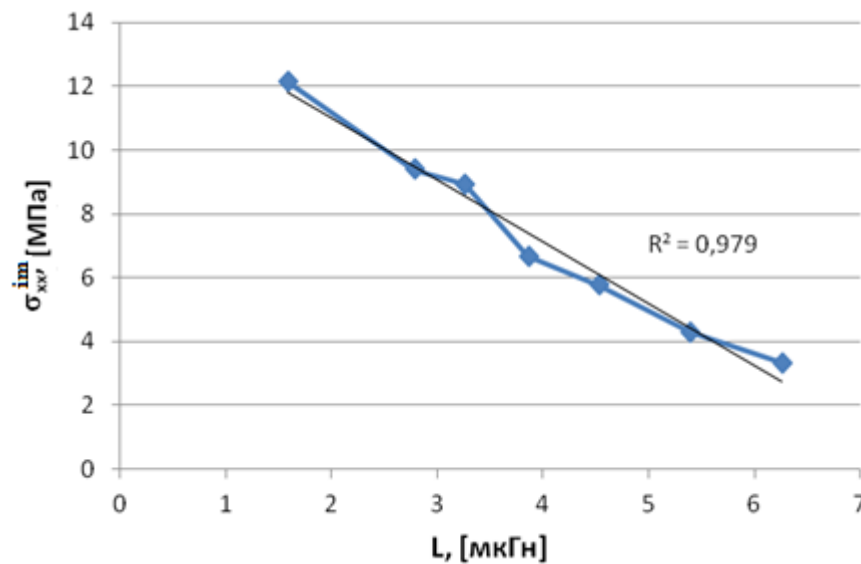
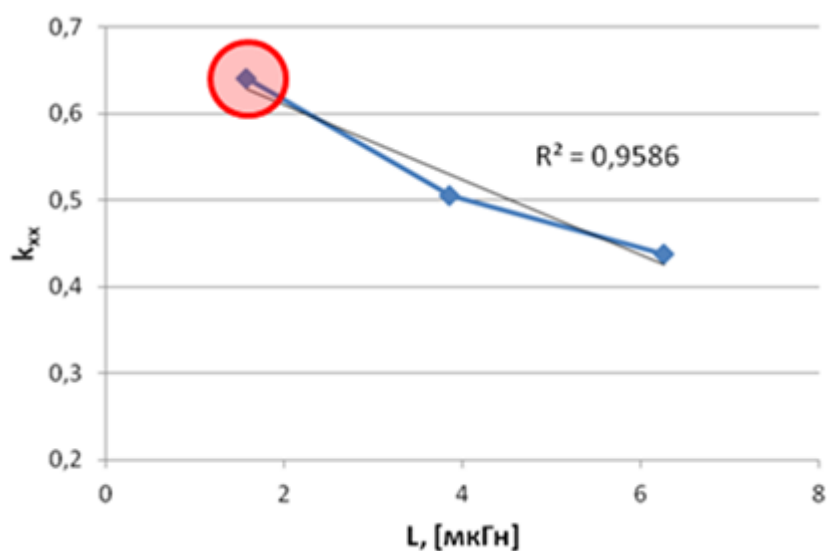


Рис. 2.20. Залежність усереднених значень σ_{xx}^{im} (рис.15) від індуктивності L .

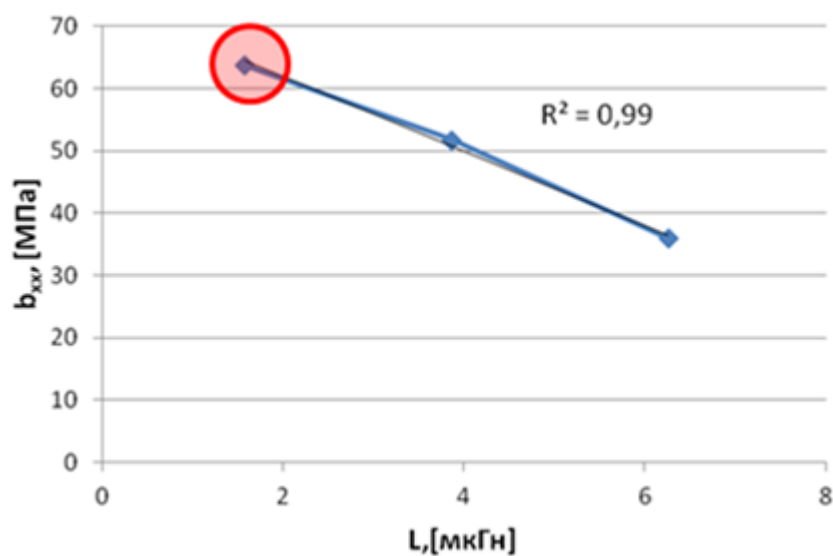
Параметри електродної системи: $U = 140$ В, $t = 0,5$ мм.

Проведено дослідження впливу індуктивності L на коефіцієнти b_{xx} та k_{xx} при введенні імпульсу струму високої щільності в поле механічних напружень

(рис. 2.21). Зменшення індуктивності призводить до підвищення k_{xx} , що є позитивним фактором. Але, при використанні значень індуктивності $L = 1,57$ мкГн йде порушення лінійності. Таким чином, експериментально встановлено, що оптимальним значенням індуктивності є $L = 3,26$ мкГн.



а)



б)

Рис. 2.21. Графік залежності k_{xx} (а) та b_{xx} (б) від індуктивності L . Параметри електродної системи: $U = 150$ В, $t = 0,5$ мм.

Важливим параметром електродної системи є відстань t між котушкою індуктивності та диском, до якого прикріплений електрод. Ця відстань впливає на силу притискання електрода до досліджуваного об'єкта.

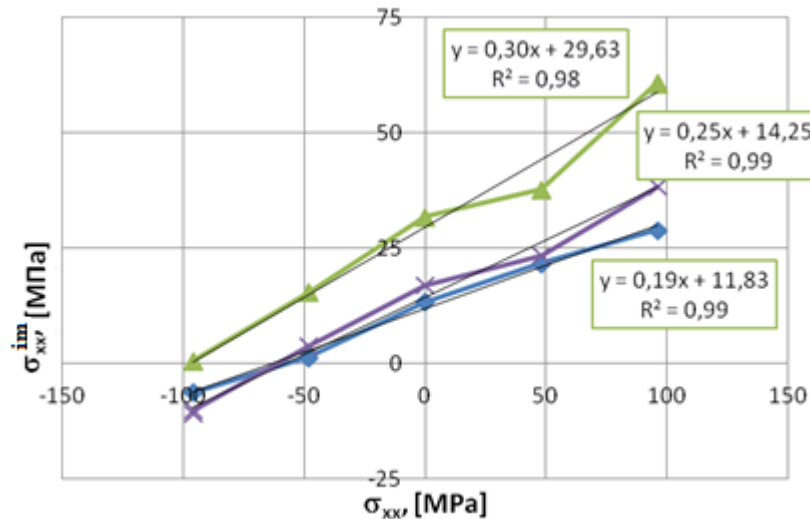


Рис. 2.22. Графіки залежності зміни σ_{xx}^{im} від напружень σ_{xx} при різних значеннях відстані $t = 0,25$ мм (зелена лінія), $t = 0,5$ мм (фіолетова лінія) та $t = 0,75$ мм (синя лінія). Параметри електродної системи: $U = 150$ В, $L = 3,26$ мкГн.

На рис. 2.22 зображено графіки залежності зміни σ_{xx}^{im} від напружень σ_{xx} при різних значеннях відстані t .

З графіка бачимо, що чим меншою є відстань t , тим більші значення переміщень фіксуються в околі точки введення імпульсу струму. Зі зменшенням t спостерігається лінійне збільшення кута нахилу кривої залежності σ_{xx}^{im} від σ_{xx} . Таким чином, зменшення t впливає позитивно на ефект локального розвантаження напружень, який використовується при визначенні залишкових напружень.

При зменшенні відстані t йде збільшення значень переміщень в околі точки введення імпульсу струму в матеріалі без механічних напружень, що є негативним фактором. Для визначення оптимальних значень відстані t передбачається використовувати залежність співвідношень k_{xx}/b_{xx} від відстані

t між котушкою індуктивності і диском, до якого прикріплений електрод (рис. 2.23). Співвідношення k_{xx}/b_{xx} є максимальним при використанні відстані $t = 0,5\text{мм}$.

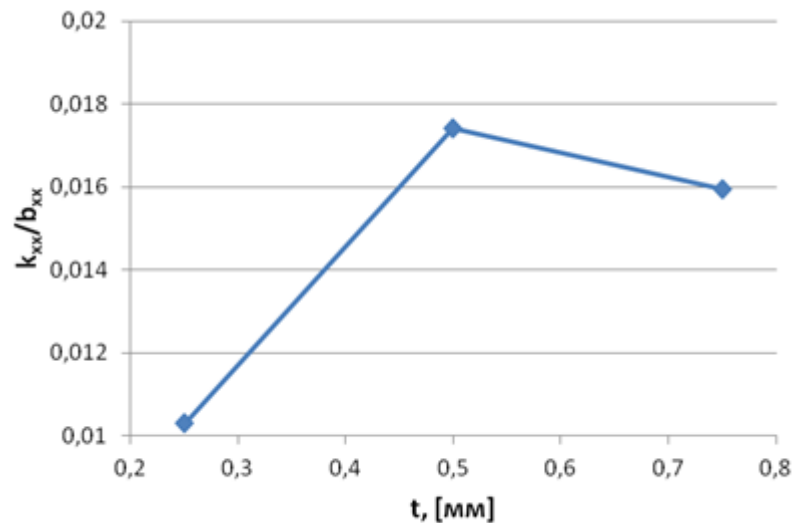


Рис. 2.23. Залежність відношення k_{xx}/b_{xx} від відстані t . Параметри електродної системи: $U = 150\text{ В}$, $L = 3,26\text{ мкГн}$.

Таким чином завдяки проведеним експериментам, отримано оптимальні значення параметрів електродної системи, що використовується для локальної релаксації напружень при визначенні ЗН методом електронної спекл-інтерферометрії.

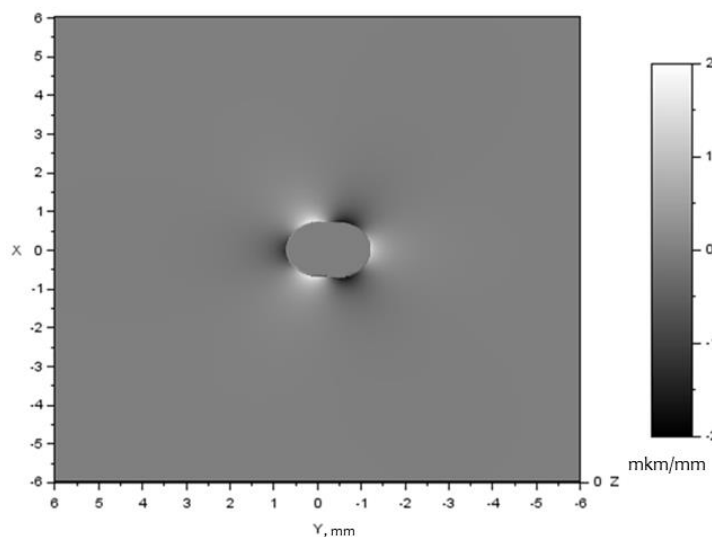
2.6 Застосування методу ширографії для оцінки залишкових напружень

Також для реєстрації деформування поверхні після введення ІСВЩ використовувався ширографічний інтерферометр. На відміну від спекл-інтерферометрії, ширографія є менш чутливою до вібрації, не потребує високо-когерентного джерела світла та ширографічний інтерферометр може бути закріпленим на штативі (рис. 2.24). Слід зазначити, що метод ширографії вимірює похідну від нормальних переміщень.

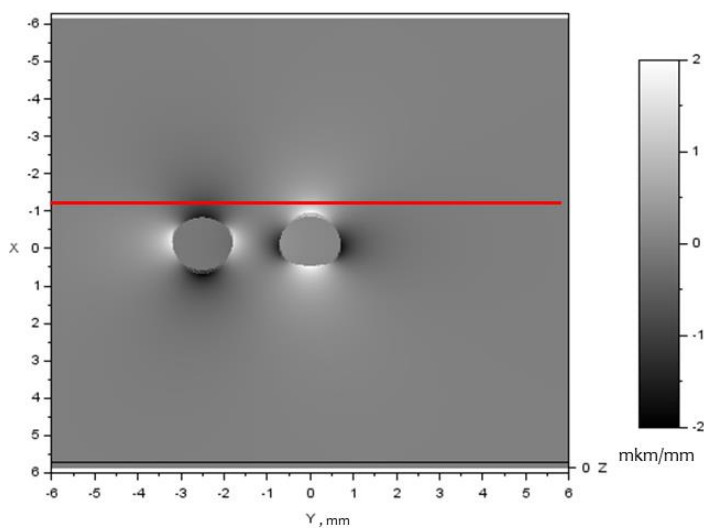


Рис. 2.24. Ширографічний модуль (1) для вимірювання деформування поверхні (2) встановлений на штативі (3).

Для вибору оптимальних налаштувань широкографічного модуля було проведено математичне моделювання впливу широзсуву на розподіл похідної в напруженому матеріалі після введення ІСВЩ. На рис. 2.25а представлено розподіл похідної $\partial w / \partial x$ отриманий чисельним способом при широзсуві, що дорівнює радіусу зони релаксації, на рис. 2.25б показано розподіл $\partial w / \partial x$ визначений чисельним способом при широзсуві три діаметри зони релаксації. Оптимальним широзсувом для проведення експериментальних досліджень вважається зсув більш, ніж півтора діаметра зони релаксації, оскільки при цьому не буде накладання ділянки релаксації саму на себе, що дасть нам в свою чергу вдвічі більше інформації про деформування в околі цієї точки.



а)



б)

Рис. 2.25. Чисельне моделювання впливу широзсуву на розподіл $\partial w/\partial x$ у напруженому матеріалі після введення ІСВЩ, при широзсуві, що дорівнює радіусу зони релаксації – а), та при широзсуві три діаметри зони релаксації – б).

Червона лінія – переріз з якого вибираються значення похідної $\partial w/\partial x$ для подальшого розрахунку залишкових напружень у місці введення імпульсу.

Після моделювання впливу широзсуву вздовж обраного перерізу будується графік розподілу похідної (рис. 2.26).

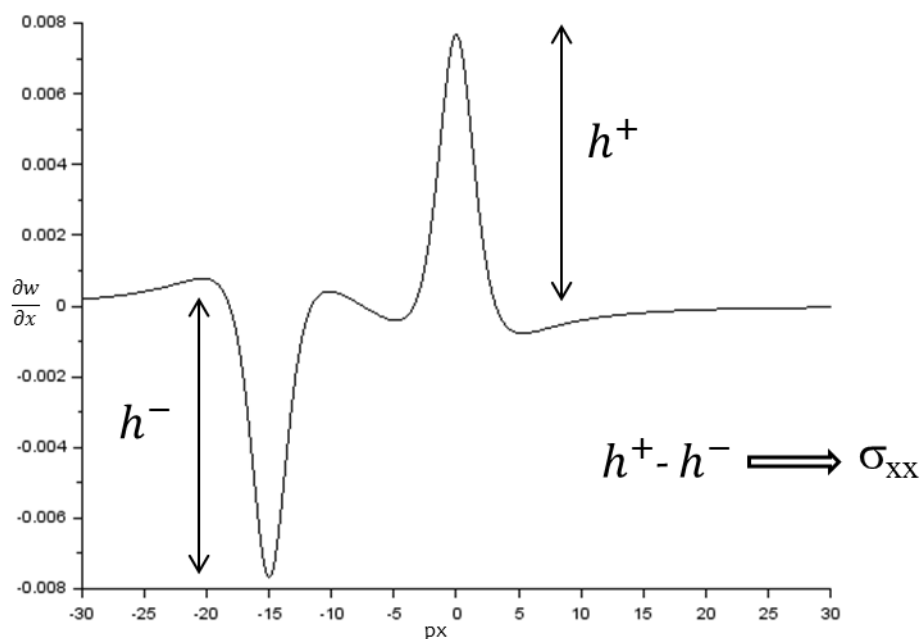


Рис. 2.26. Графік розподілу похідної вздовж обраного перерізу, отриманий розрахунковим шляхом

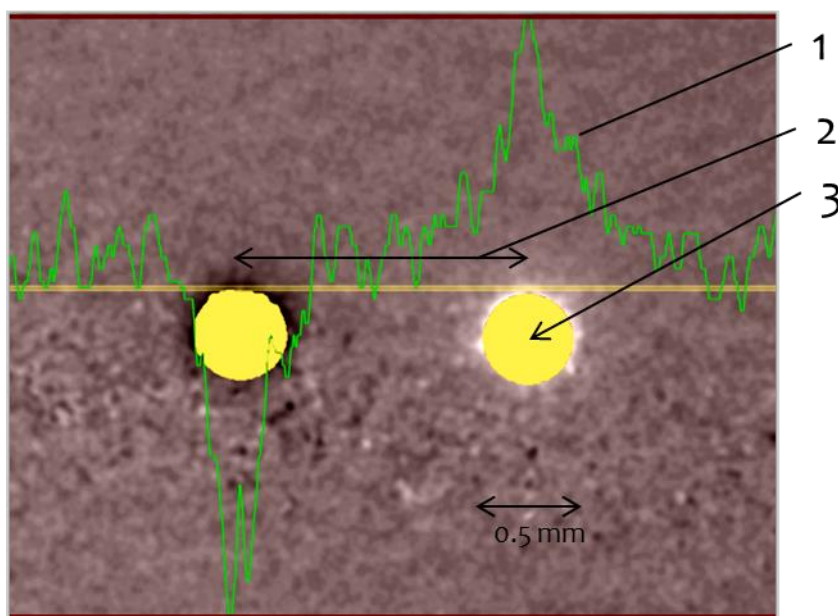


Рис. 2.27. Результати вимірювання $\partial w/\partial x$ методом ширографії після введення імпульсу струму, де 1 – графік розподілу похідної вздовж обраного перерізу, отриманий експериментальним шляхом, 2 – широзсув (2мм), 3 – місце введення ІСВЦ. Параметри електродної системи: $f_p = 10\text{Гц}$, $t_i = 30\text{мкс}$, $U = 170\text{В}$.

Після введення імпульсу струму в тестовий зразок ми отримуємо наступну широкографічну картину (рис. 2.27). Замість однієї точки ми отримуємо дві окремих зони, одна з яких матиме плюсові значення інша мінусові. Чим більші напруження в матеріалі тим більшою буде різниця між максимумом та мінімумом і на основі даних про різницю між піками ми оцінюємо значення напружень у матеріалі.

На основі отриманих результатів вимірювання $\partial w / \partial x$ вздовж поперечного перерізу балки будується графік залежності значень похідної від заданих напружень (рис. 2.28 – 2.29).

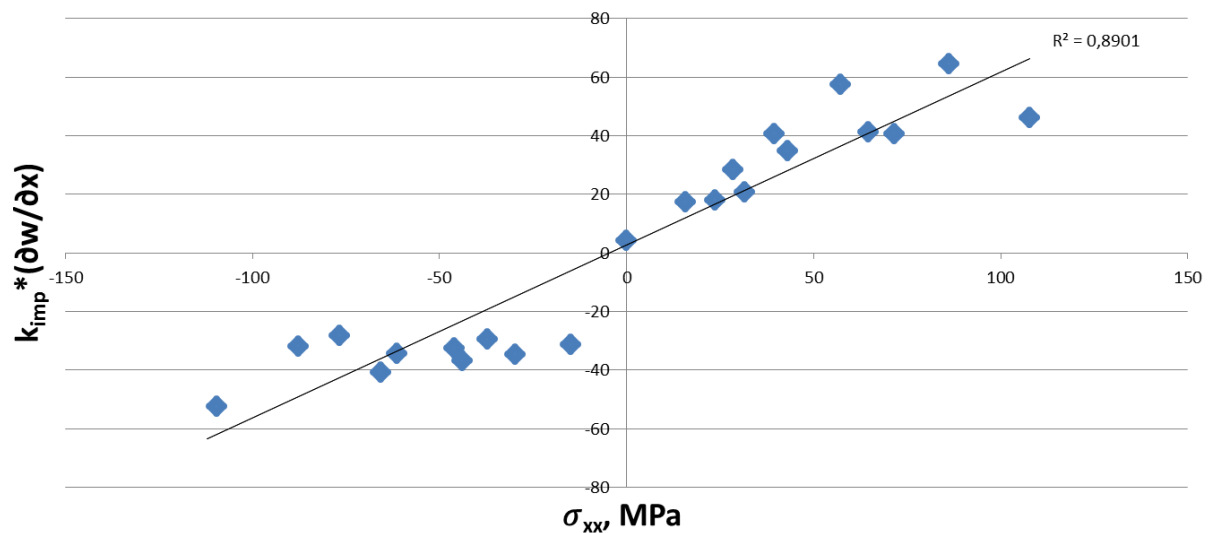


Рис. 2.28. Графік залежності значень похідної $\partial w / \partial x$ від заданих напружень σ_{xx} при широзсуві поперек балки, де k_{imp} – коефіцієнт переводу інтерференційної фази у похідну, який залежить від довжини хвилі, широзсуву та оптичного збільшення широкографічного інтерферометра.

$R^2 = 0,89$ – величина вірогідності апроксимації.

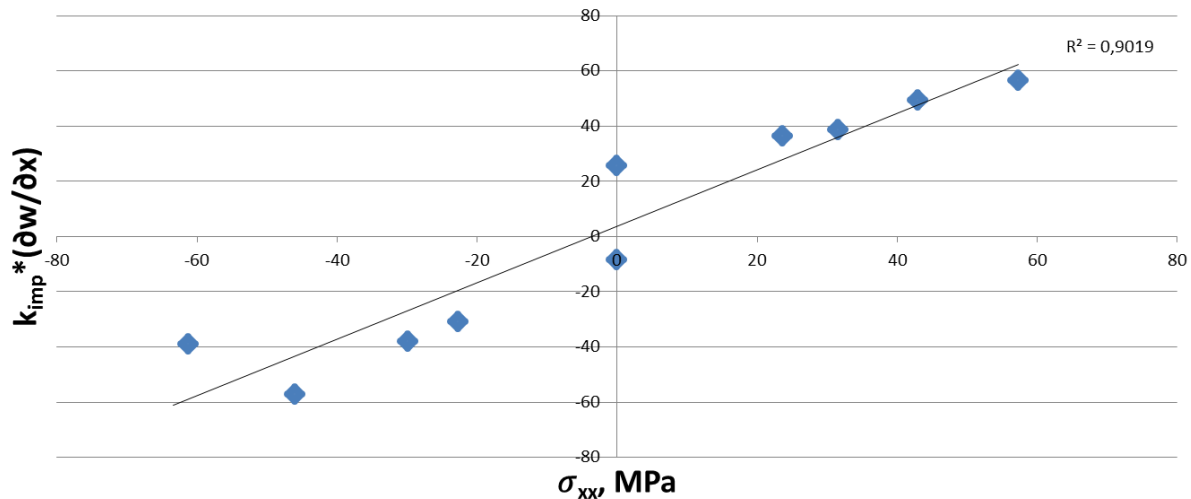


Рис. 2.29. Графік залежності значень похідної $\partial w / \partial x$ від заданих напружень σ_{xx} при широзсуві вздовж балки, де k_{imp} – коефіцієнт переводу інтерференційної фази у похідну, який залежить від довжини хвилі, широзсуву та оптичного збільшення широкографічного інтерферометра.
 $R^2 = 0,9$ – величина вірогідності апроксимації

На основі даних про деформацію обраховувалися значення похідної в точці А (рис. 2.10) в околі введення імпульсу. Графіки (рис. 2.28 – 2.29) показують лінійне зростання значень похідної відносно заданого напруженого стану, що демонструє можливість використання електродної системи імпульсної дії в поєднанні з методом широкографії для неруйнівного релаксаційного способу визначення залишкових напружень у матеріалах, що виготовлені з алюмінієвих сплавів. З графіків видно, що вони мають майже однакову величину вірогідності апроксимації, отже напрямок широзсуву не має суттєвого впливу на процес вимірювання ЗН.

В ході експериментальних досліджень було проведене тепловізійне вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею досліджуваного зразка. Заміри температурного поля проводились до введення ІСВІЩ (рис. 2.30), після шести секундної обробки ІСВІЩ (рис. 2.31), та через шість секунд після закінчення обробки (рис. 2.32).

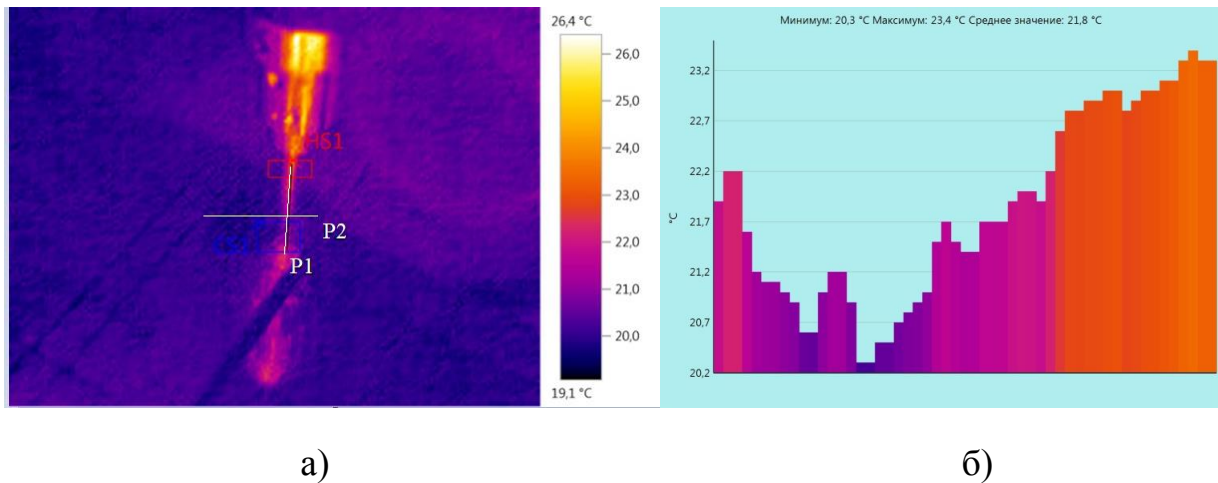


Рис. 2.30. Тепловізійне вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею до введення ІСВЩ, де а) – термограма зони введення ІСВЩ, б) – одномірне температурне поле вздовж лінії P1. Параметри електродної системи: $f_p = 10\text{Гц}$, $t_i = 30\text{мкс}$, $U = 170\text{В}$.

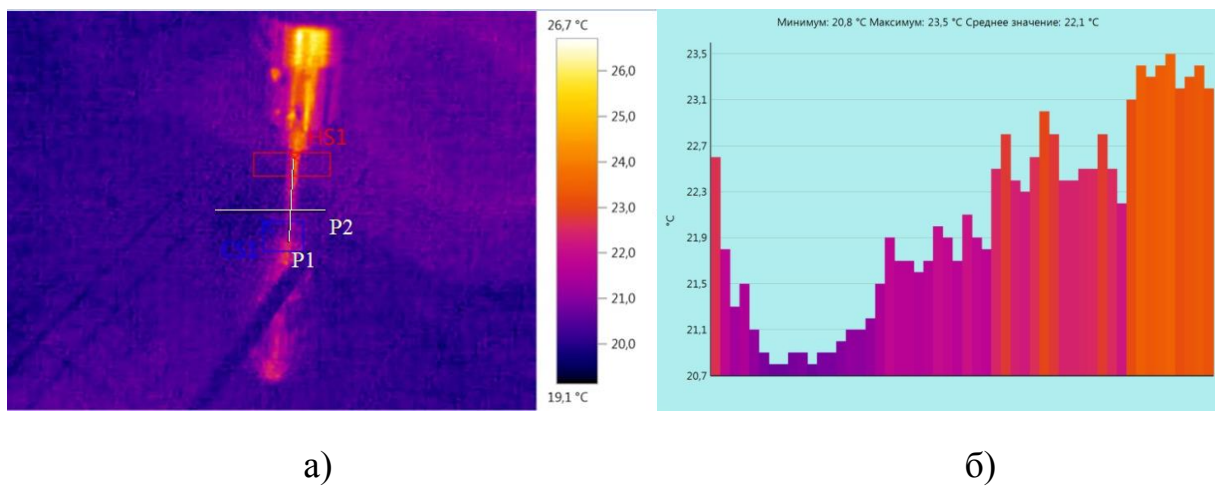


Рис. 2.31. Тепловізійне вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею після шести секундної обробки ІСВЩ, де а) – термограма зони введення ІСВЩ, б) – одномірне температурне поле вздовж лінії P1. Параметри електродної системи: $f_p = 10\text{Гц}$, $t_i = 30\text{мкс}$, $U = 170\text{В}$.

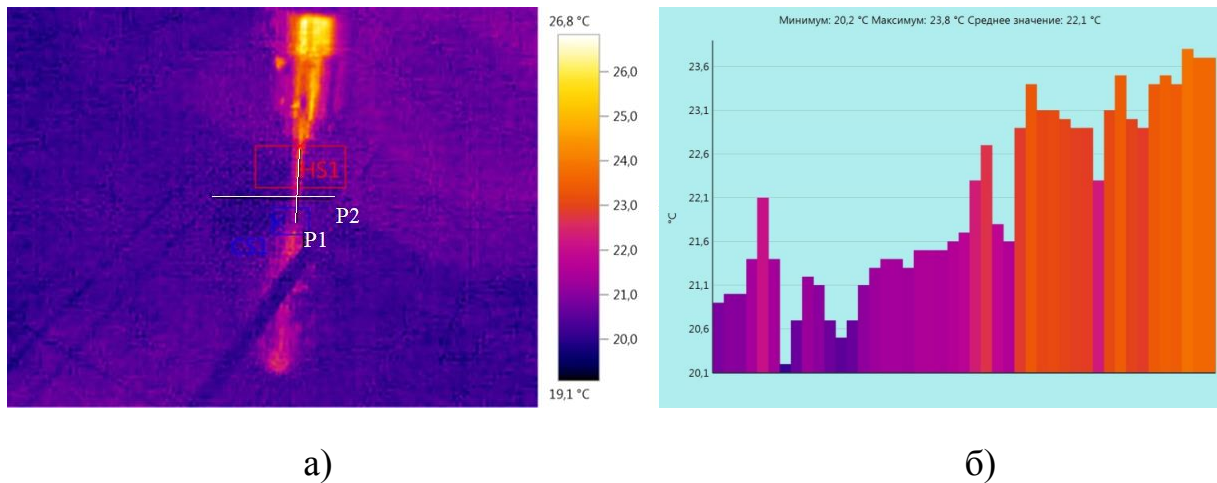
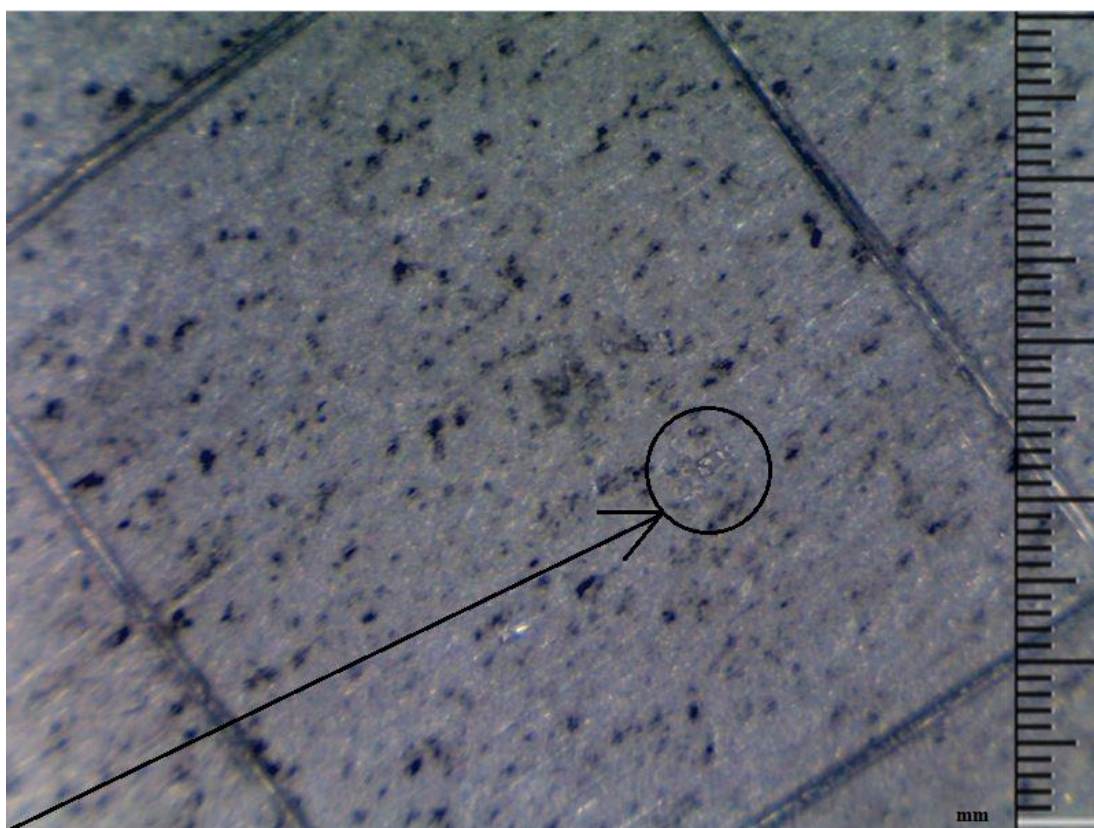


Рис. 2.32. Тепловізійне вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею через шість секунд після обробки ІСВЩ, де а) – термограма зони введення ІСВЩ, б) – одномірне температурне поле вздовж лінії P1. Параметри електродної системи: $f_p = 10\text{Гц}$, $t_i = 30\text{мкс}$, $U = 170\text{В}$.

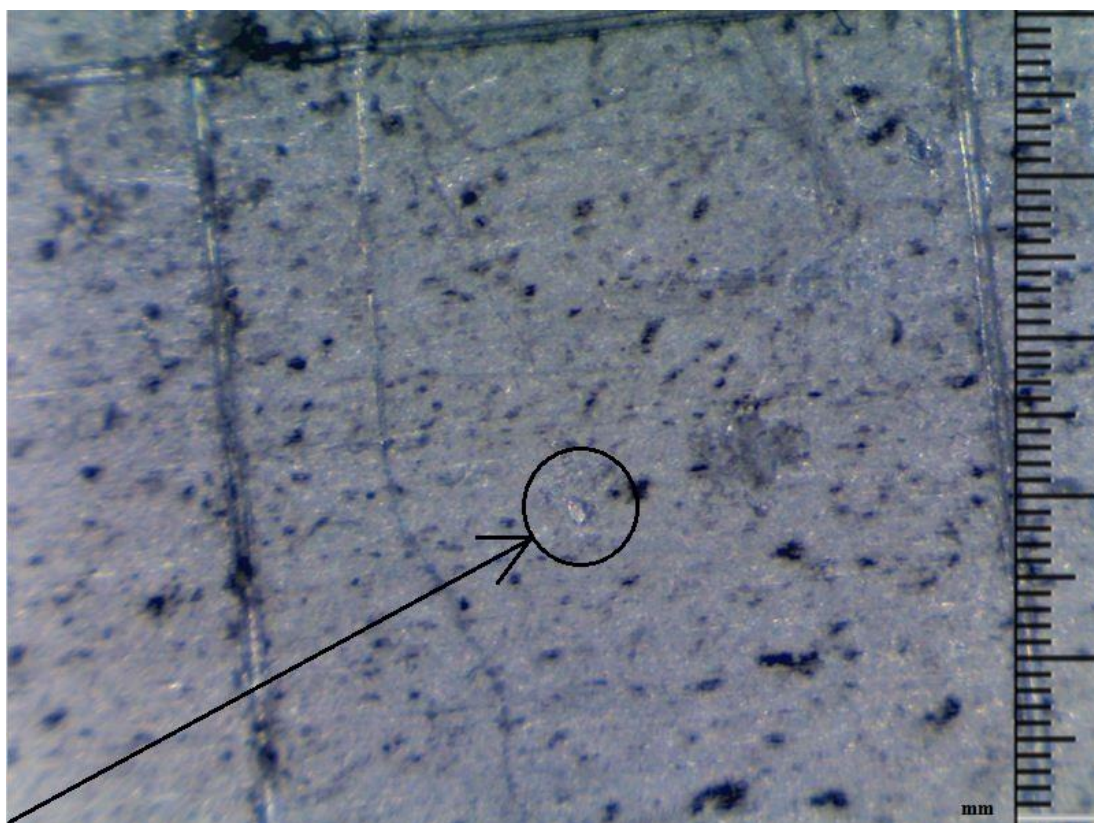
З графіків видно, що зміна температури в зоні контакту електроду з поверхнею за час проведення експерименту не перевищує $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати тепловізійного вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею підтверджують той факт, що зміна температури не спричиняє переміщення точок поверхні в околі введення ІСВЩ, а отже локальна релаксація напружень відбувається за рахунок ЕПЕ.

Таким чином в роботі представлено дві системи для неруйнівного визначення залишкових напружень на основі використання електропластичного ефекту для локальної релаксації напружень. Ці системи мають свої переваги та недоліки, які в майбутньому можливо усунути або зменшити їх вплив на точність вимірювання напружень та покращити ефективність застосування приладів для дослідження напружено-деформованого стану.

Головним чинником відмінності цих систем є різний об'єм металу, у якому відбуваються деформаційні процеси після введення імпульсів струму високої щільності. На рис. 2.33 представлені фотографії ділянок тестових зразків з використання імпульсної дії. На рис. 2.34 представлено фото ділянки тестового зразка після використання ударно-імпульсної дії.



a)



б)

Рис. 2.33. Відбитки від електроду на поверхні досліджуваних зразків після імпульсної обробки.

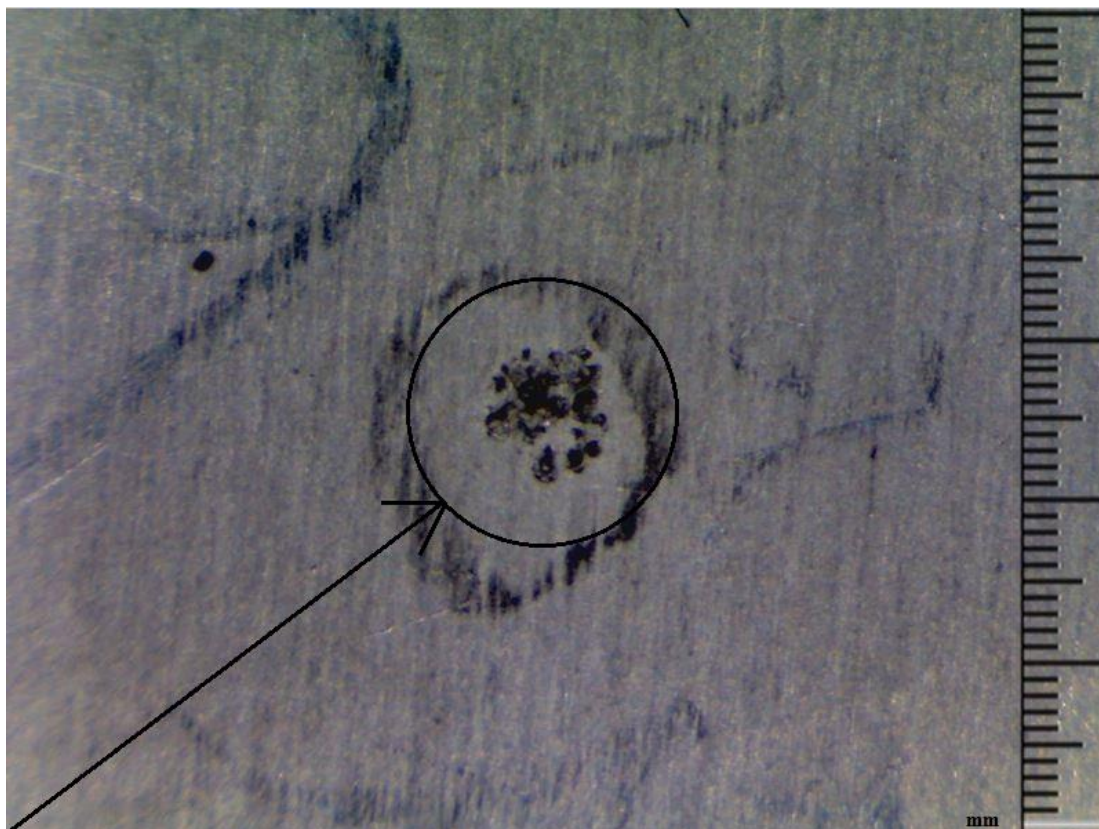


Рис. 2.34. Відбитки від електроду на поверхні досліджуваних зразків після ударно-імпульсної обробки.

Як візуально, так і під мікроскопом можна бачити відбитки на поверхні об'єктів, які залишаються після ударно-імпульсної обробки. Після введення імпульсів із використанням електродної системи імпульсного типу дії залишається суттєво менший відбиток, який іноді важко розгледіти. Таким чином можна зробити висновок, що електродна система імпульсної дії має менший вплив на матеріал, та дозволяє вважати даних спосіб релаксації напружень неруйнівним.

Висновки по розділу 2

1. Розглянуто фізико-математичні основи методів лазерної інтерферометрії, які використовуються при неруйнівному визначенні залишкових напружень.
2. На основі проведених експериментальних досліджень, встановлено оптимальні значення параметрів електродних систем, що використовуються для локальної релаксації напружень при визначенні ЗН методом електронної спекл-інтерферометрії та широкографії.
3. Встановлено, що застосування ударно-імпульсної електродної системи у поєднанні із спекл-інтерферометричними вимірюваннями дозволяє отримати кореляцію експериментальних та розрахункових значень напружень у тестових зразках $R^2 = 0.99$, а імпульсної електродної системи із широкографічними вимірюваннями деформацій – $R^2 = 0.9$. Таким чином, спекл-інтерферометричний метод визначення залишкових напружень має вищу точність у порівнянні із широкографічним.
4. Використання методу широкографії дає можливість вимірювати залишкові напруження в різних просторових положеннях, оскільки, через особливості широкографічних вимірювань, відсутня необхідність закріплювати інтерферометр безпосередньо до досліджуваного об'єкта.
5. Результати тепловізійного вимірювання температурного поля в місці контакту електроду з поверхнею підтверджують той факт, що зміна температури не спричиняє переміщення точок поверхні в околі введення ІСВІЩ, а отже локальна релаксація напружень відбувається за рахунок ЕПЕ.
6. Електродна система імпульсної дії має менший вплив на матеріал ніж ударно-імпульсна обробка, та дозволяє вважати даних спосіб релаксації напружень неруйнівним.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ АМг5 та АМг6 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДЛЯ ЇХ РЕЛАКСАЦІЇ ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

3.1 Програмне забезпечення для реєстрації та обробки деформацій і переміщень точок поверхні.

Для реєстрації деформацій точок поверхні досліджуваних об'єктів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було розроблене програмне забезпечення *Fringe Viewer* (рис. 3.1), що використовується для введення спекл-зображень з цифрової камери до комп'ютера, керування подачею напруги на п'єзоелемент, що розміщений в одному з плечей широкофічного інтерферометра, регулювати час експозиції, що дозволяє змінювати розміри спеклів.

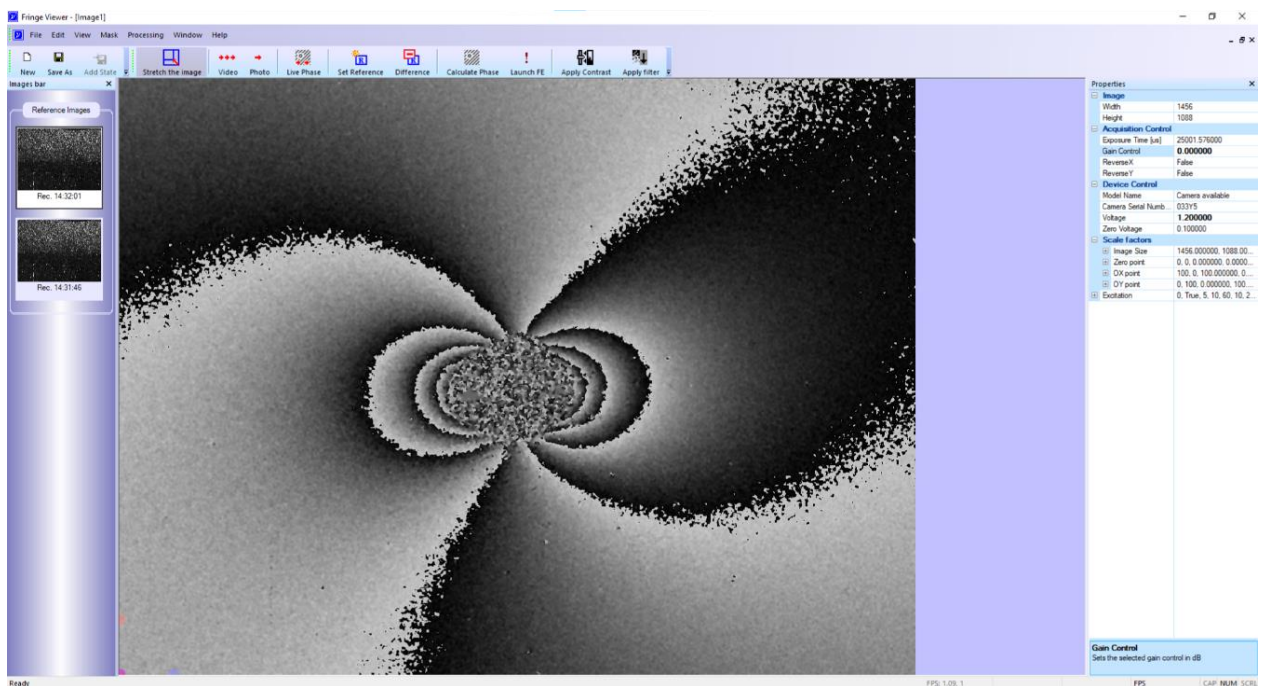


Рис. 3.1. Інтерфейс програми *Fringe Viewer* з типовою інтерференційною картиною навколо зони релаксації напружень.

Функція *Video* неперервно виводить відеозображення поточного стану об'єкта, функція *Photo* слугує для отримання одного знімку, при використанні

цієї функції робиться один знімок поточного стану, який виводиться на екран. Функція *Set Reference* записує початкове спекл-зображення і обраховує початковий фазовий розподіл вихідного стану об'єкта. Функція *Calculate Phase* записує кінцевий стан об'єкта. Ця функція слугує для отримання фазового поля, відповідного до деформацій поверхні об'єкта після навантаження. Функція *Launch FE* запускає програму *Fringe Editor for Shearography* (рис. 3.2) для фазової обробки зображень та розрахунку деформацій поверхні об'єкту внаслідок прикладеного навантаження.

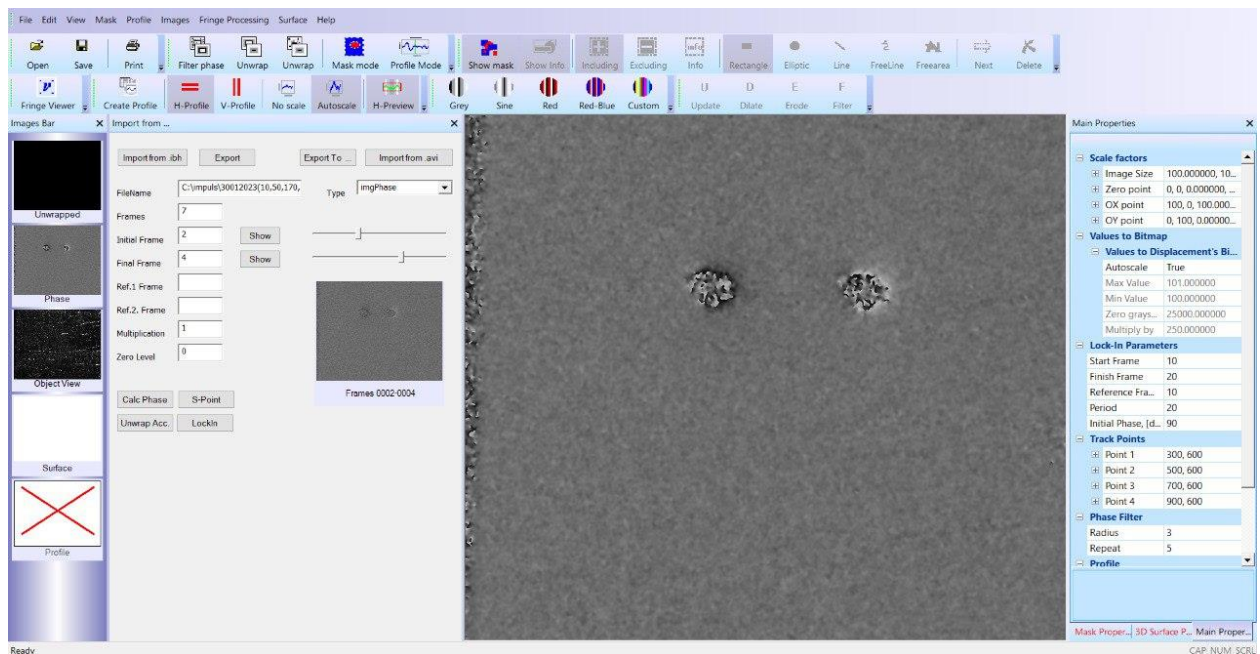


Рис. 3.2. Інтерфейс програми *Fringe Editor for Shearography* з типовою інтерференційною картиною навколо місця введення імпульсу струму високої щільності.

Розроблене в ІЕЗ програмне забезпечення *Fringe Editor for Shearography* дає можливість будувати поле розподілу фаз та тривимірне зображення поверхні деформування об'єкта, що контролюється, а також, записувати отримані результати у вигляді документів, опрацювання широкографічних спекл-зображень до обчислення та тривимірної візуалізації полів деформування

поверхні досліджуваних об'єктів, побудови графіків зміни похідних в заданому напрямку уздовж обраних перерізів, зберігання отриманих результатів у вигляді файла, виведення результатів широкографічного контролю на пристрій для друкування.

Програма *Fringe Viewer* має модуль калібрування п'єзоелектричного фазозсувного елемента з алгоритмом автоматичного визначення значення напруги, яке відповідає зсуву фази хвилі на величину 2π і призначена для управління п'єзоелектричним фазозсувним елементом: забезпечує зміщення дзеркала в оптичній схемі інтерферометра на величину $\lambda/2$, λ і $3\lambda/2$, де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання.

Ця програма в реальному масштабі часу вводить видиме відеокамерою зображення досліджуваної області в комп'ютер і виводить його на екран монітора, після чого налаштовуються необхідні параметри спекл-інтерферометра: інтенсивність лазерного випромінювання, фокусна відстань, діафрагма об'єктива. По команді оператора програма записує початкову спекл-картину поверхні об'єкта, тобто коли об'єкт знаходиться в початковому стані, а також додатково реєструє три спекл-картини зі зсувом фази та обчислює розподіл фази. Це здійснюється синхронізованим використанням функцій модуля управління рухом п'єзозеркала та модуля введення зображень. Після цього в реальному масштабі часу відбувається безперервне введення відеозображень в комп'ютер і порівняння спекл-картини, що вводиться, з початковою. При цьому внаслідок деформації досліджуваної поверхні на екрані монітора спостерігається інтерференційна картина. Після релаксації напружень реєструється другий (фінальний) стан: програма записує чотири спекл-картини з відомим зсувом фаз між ними відповідно до алгоритму, описаного вище. Отримане фазове поле, а також дві спекл-картини, що відповідають початковому та кінцевому стану поверхні можна зберегти на жорсткий диск комп'ютера або інший носій інформації у вигляді документа або передати для подальшої обробки до отримання чисельних результатів в програму *Fringe Editor for Residual Stresses* (рис. 3.3).

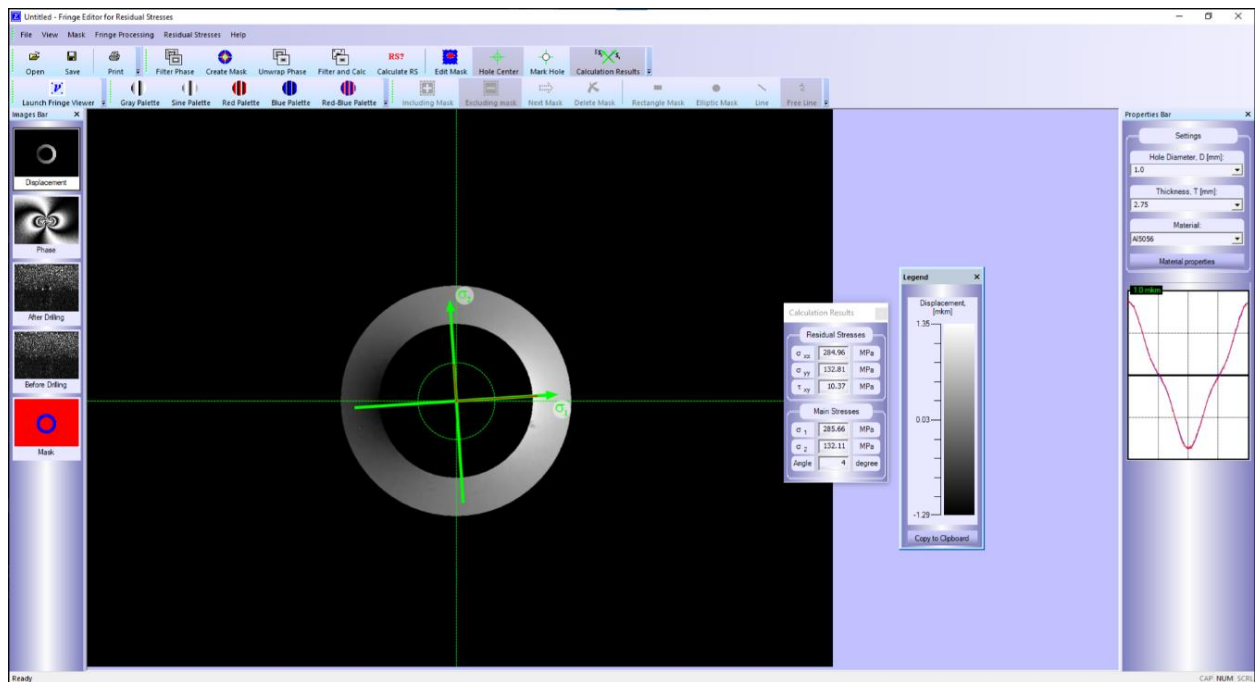


Рис. 3.3. Інтерфейс програми *Fringe Editor for Residual Stresses*, яка використовується для остаточної обробки спекл-інтерферограм та визначення залишкових напружень.

Програма *Fringe Editor for Residual Stresses* забезпечує доступ до функцій модулів обробки зображень та автоматичного аналізу фазових картин. У першому етапі виконується ітераційна фільтрація фазового поля. На другому етапі виконується виділення області в околі релаксації напружень, обчислення у цій області значень переміщень. Далі програма за даними про переміщення та механічні властивості досліджуваного матеріалу обчислює залишкові напруження.

Програмне забезпечення *Fringe Editor for Residual Stresses* також дає можливість збереження отриманих результатів у вигляді файлу, експортування зображень (фазове поле, поле переміщень, спекл-картини, що характеризують початковий та кінцевий стан) у вигляді графічних файлів з розширенням

".bmp"), зберігання механічних властивостей матеріалів у локальній базі даних, а також виведення результатів визначення залишкових напружень на принтер.

У рамках проведених теоретичних та експериментальних досліджень було сформовано вимоги до вдосконалення програмного забезпечення, для ефективної обробки спекл-картин та шифрограм, що дозволило зменшити час обробки експериментальних результатів.

3.2 Дослідження залишкових напружень у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів

За допомогою розробленої технології в стикових зварних з'єднаннях зі сплаву АМг5 товщиною 8мм визначалися залишкові напруження на основі використання імпульсів струму високої щільності. Результати вимірювання напружень, отриманих із застосуванням імпульсів струму, порівнювалися з даними, отриманими з використанням обладнання ІЕЗ на основі використання методу отворів у поєднанні зі спекл-інтерферометрією. Ефективність та точність вимірювання залишкових напружень цим приладом підтверджена результатами Raund Robin теста, який проводився Міжнародним інститутом зварювання [133, 134]. На рис. 3.4 представлено схему зварного зразка (аргоно-дугове зварювання) із зазначеними перерізами, уздовж яких проводилися вимірювання.

На рис. 3.5 наведені результати визначення залишкових напружень із використанням імпульсів струму високої щільності уздовж перерізу S3. В експерименті реєструвалися дані про переміщення після введення імпульсів струму в точках, розташованих на однаковій відстані від центру зварного шва. Графік показує, що існує розкид отриманих експериментальних даних, тому для підвищення точності визначення напружень пропонується використовувати значення напружень усереднені за трьома точками.

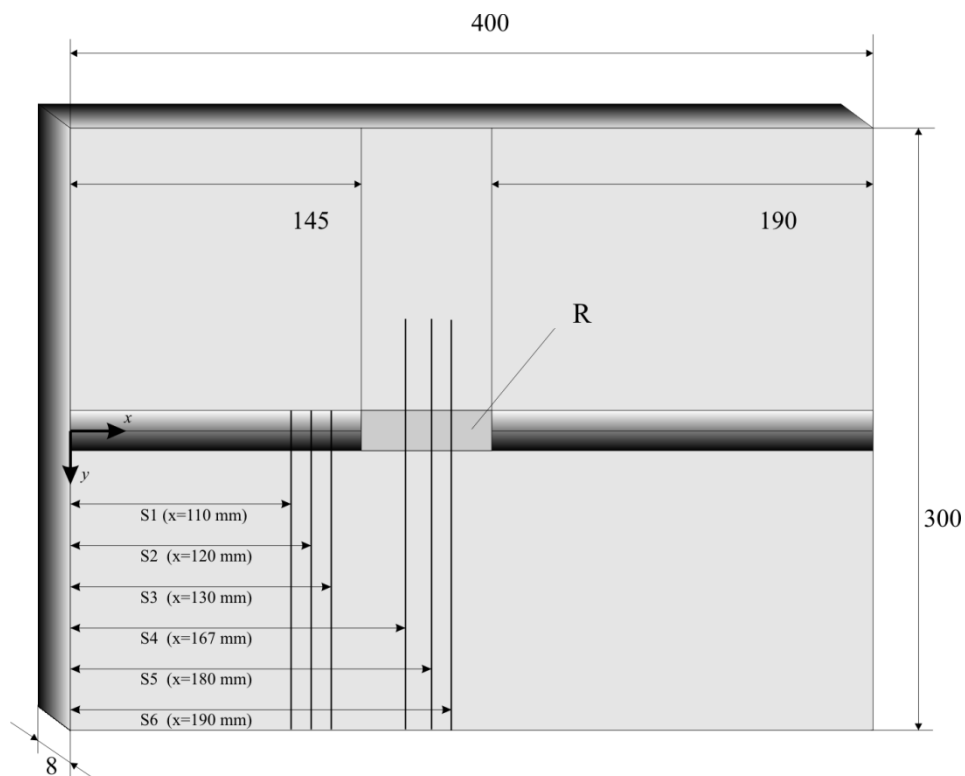


Рис. 3.4. Схема зварного зразка зі сплаву АМг5: S1-S6 - перерізи, в яких визначалися залишкові напруження, R - область, в якій видалено посилення зварного шва.

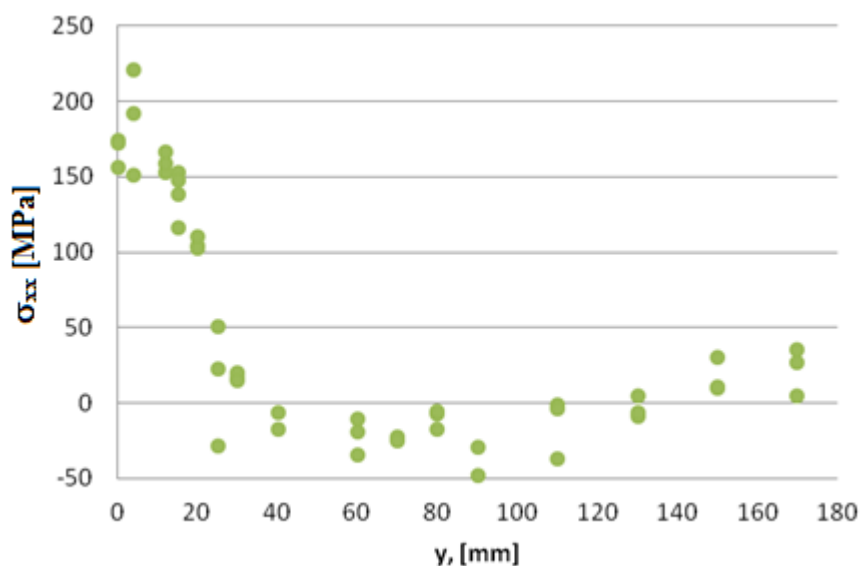


Рис. 3.5. Результати визначення залишкових напружень методом електронної спекл-інтерферометрії на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності.

Напруження визначалися двома методами в перерізах, що проходять як через посилення зварного шва (S1, S2 і S3), так і після його видалення (S4, S5 і S6) (рис. 3.4). Результати визначення залишкових напружень, отриманих на основі використання імпульсного методу (перерізи S3 та S4), порівнювалися з даними, отриманими методом висвердлювання отворів діаметром та глибиною відповідно 1,0 мм (перерізи S1 та S6) та 0,5 мм (перерізи S2 та S5) (рис. 3.6).

Важливим є те, що результати визначення напружень в області зварного шва та навколошовної зони з використанням створеного неруйнівного методу, істотно ближче до даних, отриманих методом отворів (висвердлювання отворів діаметром і глибиною 0,5 мм), і відрізняються від даних, отриманих при використанні отворів діаметром та глибиною 1.0 мм. Це свідчить про те, що у зварному зразку існує градієнт напружень за товщиною пластини.

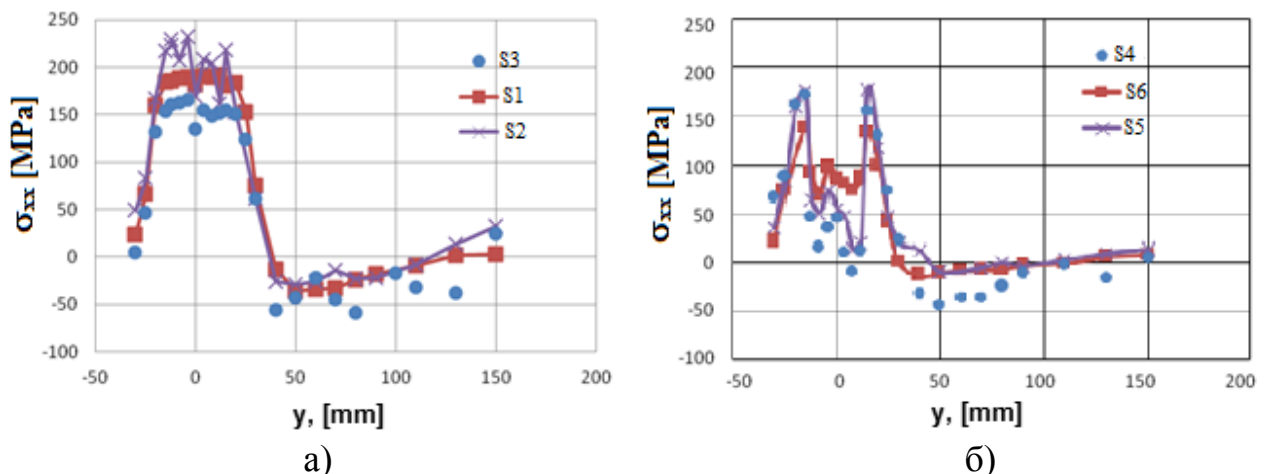


Рис. 3.6. Розподіл напружень σ_{xx} у поперечних до шва перерізах S1-S3 (а) та S4-S6 (б).

Криві напружень показують хороший збіг результатів визначення залишкових напружень, отриманих двома методами, що свідчить про те, що розроблений неруйнівний метод визначення залишкових напружень на основі використання для їх релаксації імпульсів струму високої щільності дозволяє отримати дані про розподіл напружень уздовж обраного перерізу, не порушуючи при цьому суцільність досліджуваного матеріалу.

Максимальне відхилення результатів визначення напружень неруйнівним методом порівняно з методом отворів (діаметром висвердлених отворів 0,5 мм) не перевищує 15% від межі плинності алюмінієвого сплаву АМг5.

Розроблений метод визначення залишкових напружень на основі використання для релаксації напружень імпульсів струму високої щільності використовувався для оцінки напруженого стану у зварній (аргоно-дугове зварювання) пластині товщиною 4 мм, виготовленій з алюмінієвого сплаву АМг6 (рис. *Рис. 3.7*).

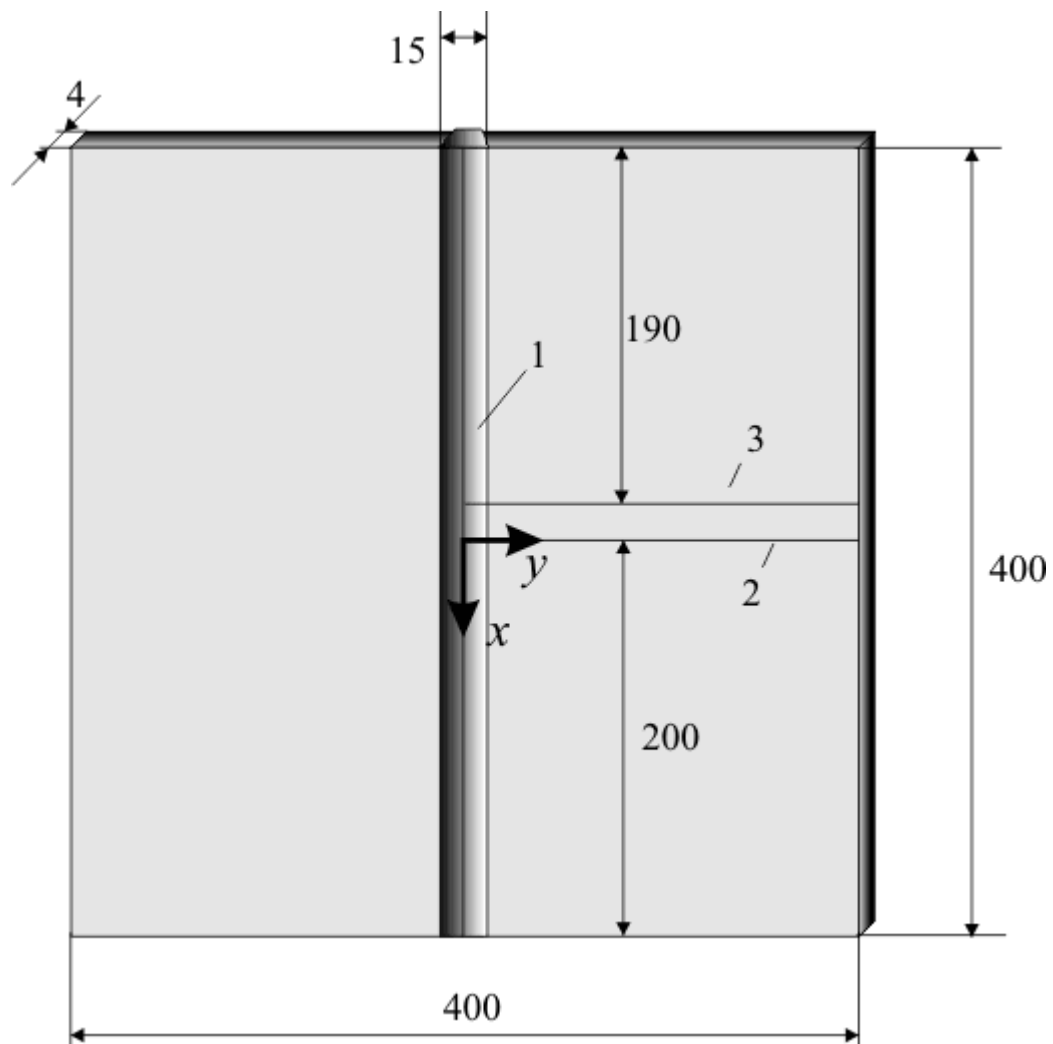


Рис. 3.7. Схема зварного зразка зі сплаву АМг6, в якому визначалися залишкові напруження: 1 – зварний шов; 2 – переріз, в якому залишкові напруження визначались з використанням методу отворів; 3 – переріз, в якому залишкові напруження визначались з використанням введення імпульсу струму високої щільності.

Визначення залишкових напружень у зварному з'єднанні проводилось у поперечних до шву перерізах (переріз 2 і 3 на рис. 3.7). При цьому допускалось, що метод електронної спекл-інтерферометрії у поєднанні з методом отворів дозволяє отримати найбільш достовірні дані про розподілення залишкових напружень у зварному з'єднанні. Точність визначення напружень на основі використання імпульсу струму високої щільності оцінювалась порівнянням отриманих даних з даними методу отворів. На рис. 3.8 видно задовільне співпадіння значень σ_{xx} , отриманих методом отворів, зі значеннями напружень, отриманих методом введення імпульсу струму високої щільності. На рис. 3.9 приведений графік порівняння результатів визначення кута α між віссю спекл-інтерферометра і віссю головних напружень σ_1 , який продемонстрував задовільну кореляцію даних, отриманих різними методами.

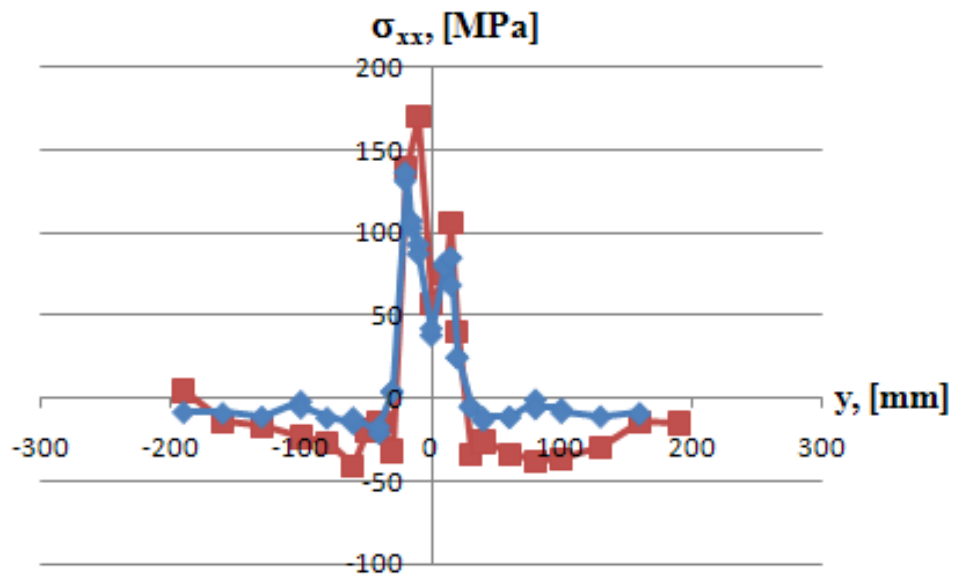


Рис. 3.8. Порівняння результатів визначення залишкових напружень σ_{xx} методами отворів (червоний колір) і введення імпульсу струму високої щільності (синій колір).

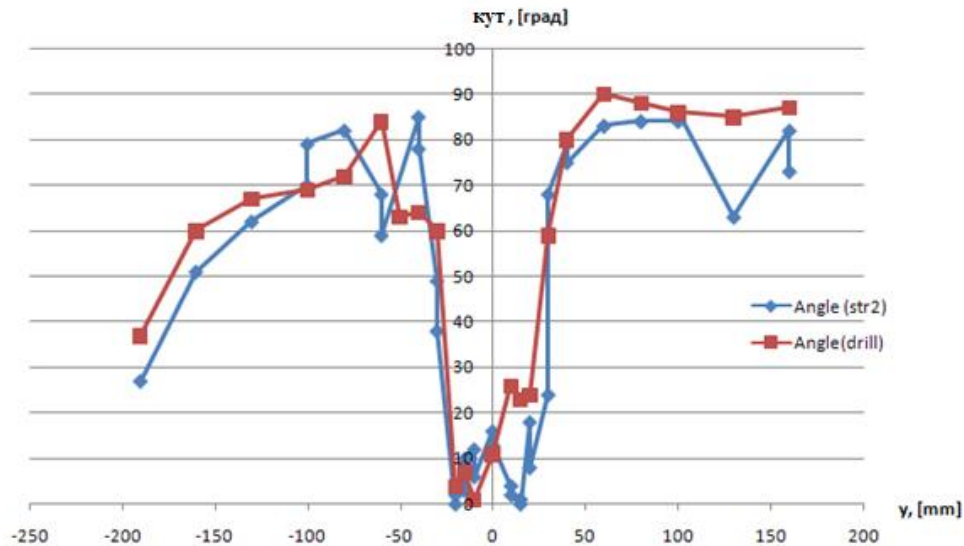


Рис. 3.9. Порівняння результатів визначення кута α між напрямком осі головних напружень σ_1 з віссю спекл-інтерферометра. Метод отворів (червоний колір) і введення імпульсу струму високої щільності (синій колір).

Експерименти, які проведені з метою порівняння результатів визначення напружень на реальному зварному з'єднанні, що отримані методами отворів і введення ІСВЩ, показали, що розроблена методика неруйнівного контролю визначення залишкових напружень дозволяє проводити дослідження напруженого стану у вузлах і елементах зварних конструкцій.

Висновки по розділу 3

1. Розроблене програмне забезпечення *Fringe Viewer* та *Fringe Editor for Shearography* дають можливість неперервно виводити відеозображення поточного стану об'єкта, будувати поле розподілу фаз та тривимірне зображення поверхні деформування об'єкта, що контролюється, а також, записувати отримані результати у вигляді документів, опрацювання широкографічних спекл-зображень до обчислення та тривимірної візуалізації полів деформування поверхні досліджуваних об'єктів, побудови графіків зміни похідних в заданому напрямку уздовж обраних перерізів, зберігання отриманих результатів у вигляді

файла, виведення результатів широкографічного контролю на пристрій для друкування. Програмне забезпечення та *Fringe Editor for Residual Stresses* дозволяє роботу з системою введення спекл-зображень з цифрової камери до комп'ютера, керування п'єзодзеркалом та попередньою обробкою спекл-інтерферограм, дає можливість збереження отриманих результатів у вигляді файлу, експортування зображень (фазове поле, поле переміщень, спекл-картини, що характеризують початковий та кінцевий стан) у вигляді графічних файлів, зберігання механічних властивостей матеріалів у локальній базі даних, а також виведення результатів визначення залишкових напружень на принтер.

2. Експерименти, які проведені з метою порівняння результатів визначення напружень на реальному зварному з'єднанні, що отримані методами отворів і введення ІСВЩ, показали, що розроблена методика неруйнівного контролю визначення залишкових напружень дозволяє проводити дослідження напруженого стану у вузлах і елементах зварних конструкцій.
3. Максимальне відхилення результатів визначення напружень неруйнівним методом порівняно з методом отворів (діаметром висвердлених отворів 0,5 мм) не перевищує 15% від межі плинності досліджуваного матеріалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено неруйнівний метод визначення залишкових напружень у конструкційних матеріалах на основі використання методів лазерної інтерферометрії та електропластичного ефекту.
2. Розроблено підхід для калібрування електродної та вимірювальної систем для визначення залишкових напружень в натурних об'єктах. Досліджено вплив параметрів електродних систем на локальну релаксацію напружень. Показано, на основі даних досліджень, що для алюмінієвих сплавів АМг5 та АМг6 оптимальними значеннями електродної системи ударно-імпульсного типу дії є: $U = 150\text{В}$, $L = 3,26\text{ мкГн}$, $t = 0.5\text{ мм}$, а для системи імпульсного типу дії: $f_p = 10\text{Гц}$, $t_i = 30\text{мкс}$, $U = 170\text{В}$.
3. Отримані графіки залежності значень площинних переміщень u , які вимірюються методом спекл-інтерферометрії, та похідної $\partial w / \partial x$, що визначаються методом ширографії, від напружень у матеріалах, які виготовлені з алюмінієвих сплавів. Вони підтверджують, що при введенні імпульсів струму високої щільності ($10^7 - 10^{11}\text{ А/м}^2$) відбувається локальна релаксація напружень внаслідок електропластичного ефекту.
4. На основі проведеного моделювання встановлено, що для визначення залишкових напружень широзсув повинен бути більшим ніж півтора діаметра зони релаксації (0.75 мм), що дозволяє отримати вдвічі більше інформації про деформування поверхні в зоні локальної релаксації напружень.
5. Після введення імпульсів із використанням електродної системи імпульсного типу дії залишається суттєво менший відбиток, та має менший вплив на поверхню матеріалу ніж після ударно-імпульсної дії. Розміри відбитків при цьому складають у діаметрі близько 0,2 мм після імпульсної дії та 1,1 мм після ударно-імпульсної дії.

6. Адаптовано спекл-інтерферометричний та широкографічний інтерферометри для вимірювання переміщень та деформації у ділянках діаметром до 5 мм.
7. Модернізовано програмне забезпечення для реєстрації переміщень та деформацій методами лазерної інтерферометрії після введення імпульсів струму високої щільності, що дозволяє у автоматизованому режимі проводити вимірювання та розраховувати значення напруженого стану у досліджуваних матеріалах.
8. Проведено експериментальну оцінку точності визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях розробленим неруйнівним методом на основі порівняння результатів вимірювання з методом отворів. Встановлено, що максимальна похибка результатів вимірювання напружень неруйнівним методом не перевищує 15% від межі плинності алюмінієвих сплавів АМг5 та АМг6.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Paton B.E., Modern trends toward increase in strength and life of welded structures // The Paton Welding Journal, 2000, №09-10. -P.2-7.
2. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения ./В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др.-К., Логос, 2000.-571с.
3. Mattheus K.-J., Alaluss K., Welding deformation and internal welding stress in PTA deposition shaped components. // Weld. And Metal Fabr., 2001.-69, №8, p.11-12, 14, 16.
4. Хизниченко Ю.Н., Квасницкий В.В., Применение метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния, вызванного локальным нагревом при исправлении дефектов литья деталей из жаропрочных никелевых сплавов. // Межд.конф. “Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства”, Николаев, 2003- с.47-48.
5. Лабараткава А.В., Исследование полей напряжений и деформаций в соединениях из разнородных материалов. // II Всеукр. наук.-техн. конф. “Зварювання та суміжні технології”, Ворзель, 2003- с.30.
6. W.E. Littmann, Measurement and significance of residual macrostress in steel. // SAE 793A, Proc. Of Automatic Eng. Cong. Detroit, 1964- p.13-17.
7. Махненко В.И., Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. 1976.-К., “Наук. думка”-320с.
8. Касаткин Б.С., Лобанов Л.М., Волков В.В., Пивторак В.А., Экспериментальное исследование сварочных напряжений и деформаций. 1976.-К., “Наук. думка”-152с.
9. Баранов А.В., Ильин Л.В., Леонов В.П., Совершенствование расчетных процедур оценки долговечности сварных соединений конструкций буровых платформ на основе моделирования процессов циклического разрушения. // Межд. конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.37-38.

10. Трощенко В.Т., Жабко Н.И., Исследование влияния остаточных напряжений на закономерности неупругого циклического деформирования. // Проблемы прочности, 1979.-№8, с.25-29.
11. Brodovoj V.A., Mikheev P.P. and Gushcha O.I., Some regularities in formation of residual stresses in zones of a stress raiser and fatigue crack at cyclic loading // The Paton Welding Journal, 2001, №2. -P.8-11.
12. Труфяков В.И., Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций. // Автомат.сварка., 2001.-№2.-с.9-12.
- 13.Кныш В.В., Моделирование процесса торможения усталостной трещины искусственно наведенными остаточными напряжениями. // Сб.трудов “Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах”., 2002.-с.155-160.
14. Kovalenko V.S., Laser technology at a new stage of development // The Paton Welding Journal, 2001, №12. -p.3-8.
15. Григорянц А.Г., и др., распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным СО2-лазером // Металловед. и терм. обработ. мет., 1987.- №9, с.45-49.
16. Brodovoj V.A., Gushcha O.I., Kuzmenko A.Z. and Mikheev P.P., Interaction of residual stresses in the zones of stress concentrators and fatigue cracks // The Paton Welding Journal, 2001, №9. -p.35-43.
17. Бурак Я., Зозуляк Ю., Ледяшов Ю., Новацький В., Санченко В., Теоретичні основи оптимізації залишкових напружень в технології зварювання тонкостінних елементів конструкції. // Межд. конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.40-41.
18. Лобанов Л.М., Павловский В.И., Пашин Н.А., Лысак В.В., Исследование влияния предварительного упругого растяжения сварной стрингерной оболочки из сплава АМгбНПП на ее напряженно-деформированное состояние. // Межд. конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.49-50.
19. Gedrovich A.I. and Zhidkov A.B., Forecasting residual deformations in welding with forced cooling // The Paton Welding Journal, 2001, №10. -p.9-11.

20. Гедрович А.И., Жидков А.Б., сварка тонколистовых конструкций с принудительным охлаждением. // Межд.конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.69-70.
21. Cullison Andrew, Stress relief basics. // Weld.J., 2001.- 80, №9, p.49.
22. Petushkov V.G. and Titov V.A. Parameters of shock-wave loading used to relieve residual welding stresses by explosion treatment // The Paton Welding Journal, 2001, №04. –p.56.
23. Petushkov V.G. and Titov V.A. Residual stresses in explosion treated welded joints treatment // The Paton Welding Journal, 2001, №03. –p.47-50.
24. Гришаенко А.И., Петушков В.Г., Остаточное напряженно-деформированное состояние металла после локального взрывного нагружения. // Автомат.сварка., 1996.- №9, -с.9-14.
25. Альтер И.М., Вовода Е.П., Насыров Г.Х., Применение виброобработки для снижения остаточных напряжений в конструкциях шахтных крепей. // Межд.конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.33-34.
26. Golodnov A.I. Allowing for residual stresses in the cross-sections of compressed l-shaped columns during their design // The Paton Welding Journal, 2001, №05. –p.7-9.
27. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Киянец И.В., Технология определения остаточных напряжений на основе применения метода спекл-интерферометрии и автоматизированной системы обработки интерферограмм. // Межд.конф. “Современные проблемы сварки и ресурса конструкций”, 24-27 ноября 2003г., Киев. с.115-116.
28. Байшев Ю.П., Дробышевский Н.И., Филипов А.С., Численное исследование остаточных напряжений и деформаций при ручной и автоматической сварке листовых конструкций доменного комплекса. // Межд. конф. “Сварные конструкции”, 2000.- с.34-35.
29. McDonach A., McKelvie J., MacKenzie P.M., Walker C.A., Improved moiré interferometry and applications in fracture mechanics, residual stress and damaged composites/ // Exp.Tech., 7(1983)- P.20-24.

30. Raniecki B., Bokota A., Iskierka S., Parkitny R., Problem of determination of transient and residual stresses in a cylinder under progressive introduction hardening. // Proc. of 3rd Int. Conf. on quenching and control of distortion, (Prague, 24-26 March, 1999).- p.473-484.
31. Makhnenko V.I., Velikoivanenko E.A., Makhnenko O.V., Rozynka G.F. and Pivtorak N.I. Investigation of effect of phase transformations on residual stresses in circumferential welding of pipes // The Paton Welding Journal, 2000, №05. –p.2-7.
32. Пекарска В., Математическое моделирование структуры металла ЗТВ при лазерной сварке. // Сб.трудов “Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах”. 2002.-с.114-117.
33. Wen S.W., Farrugia D.C., Finite element modeling of residual stress in pipe welds. // J.Strein, 2001. 37- №1, p.15-18.
34. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справоч.пособие., 1981.-Киев: Наук. думка-583с.
35. Ueda Y., Fukuda K., et al., A new measuring method of residual stresses with aid of finite element method and reliability of estimated value. // Transactions of the JWRI., 4 (2) 1975.- P.123-131.
36. Hill M.R., Nelson D.V., Determination residual stress through the thickness of a welded plate. // PVP v.327. ASME, 1996.- P. 29-36.
37. Шахматов М.В., Игнатьев А.Г., Михайлов В.И., Голографические измерения остаточных сварочных напряжений. // Автоматическая сварка., 1990.- №1.
38. Mathar, J., Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes. // Trans ., ASME 56, 1934.- № 4, P.249-254.
39. ASTM E837-20 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method // American Society for Testing and Materials, 2021.- 16p. DOI: 10.1520/E0837-20
40. A.S.Maxwell and A. Turnbull, Measurement of Residual Stress in Engineering Plastics using the Hole-drilling Technique. // Polymer Testing, 22 (2003).- P. 231-233.

41. Ismail I.C., Cohen J.B., Residual stress measurement by diffraction and interpretation, 1987.-Springer-Verlag, New York.
42. J.Lu and D.Restraint, A review of recent developments and applications in the field of X-ray diffraction for residual stress studies // J. Strain Analysis, Vol. 33(2), 1998.- P. 127-136.
43. I.C. Noyan, T.C. Huang and B.R. York, Residual stress/strain analysis in thin films byX-ray diffraction // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, vol. 20(2), 1995.- P. 125-177
44. Y. Han et al., Residual stresses in plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. // J. Mats.Sci. Letters, 18 (1999).- P. 1087-1089.
45. J. Matejcek, S. Sampath and J. Dubsy. X-ray residual stress measurement in metallicand ceramic plasma sprayed coatings // Journal of Spray Technology, Vol. 7(4), Dec 1998. - P. 489-496.
46. Francois M., Convert F., Branchu S., French round-robin test of X-ray stress determination on shot-peening steel // Exp. mechanics, Vol 40 (4), 2000- P.361-368.
47. R.A. Owen, P.J. Withers and P.J. Webster. Synchrotron stress measurements of laserformed aluminium alloy sheet // in ICRS-6 Conf. Proc., Oxford, 2000- vol. 1, P. 82-89.
48. A.M. Korsunsky, K. E. Wells and P. J. Withers. Mapping two-dimensional state of strain using synchrotron X-ray diffraction // Scripta Materialia, vol. 39(12), 1998.- P. 1705-1712.
49. R.V. Martins, S. Grigull, U. Lienert, L. Margulies and A. Pyzalla. Investigation of the residual strain state in highly plastically deformed AL-MMC torsion samples using high energy synchrotron radiation // ICRS-6 Conf. Proc., Oxford, United Kingdom, 2000.- vol. 1, P. 90-97.
50. Spooner S., David S.A., Root J.H., Holden T.M., Bourke V.F.V., Goldstone J.A., Residual stress and strain measurement in an austenitic Steel Plate Containing a multipass weld. // Proc. 3rd Int. Conf. on Trends in Welding Research. ASM International, 1993.- P. 139-143.

51. Wang X.-L., Hubbard C.R., Alexander K.B., Becher P.F., Fernandes-Baca J.A., Spooner S., Neutron Diffraction measurements of the residual stresses in Al₂O₃-ZrO₂ Ceramic Composites // J.Am.Ceram.Soc., 77 (6), 1994.- P. 1569-1575.
52. S. Gungor and C. Ruiz. Measurement of thermal residual stresses in continuous fibrecomposites // Key Eng. Mat., Vol. 127, 1997.- P. 851-859.
53. P.J. Webster, X.D. Wang, W.P. Kang and G. Mills. Experimental verification of residual stress models using neutron strain scanning // Proc. Conf. Modelling of Casting & Welding and Advanced Solidification Processes VII, Edited by M. Cross and J. Campbell, The Minerals, Metals & Materials Society, 1995.- P. 311-318.
54. Гуца О.И., Махорт Ф.Г., Акустический способ определения двухосных остаточных напряжений // , 1976.- №10. - с.32-36.
55. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И., Введение в акустоупругость., 1983.-Киев: Наукова Думка-172с.
56. D.E. Bray, N. Pathak and M.N. Srinivasan. Residual stress distributions in the rim of a steam turbine disk using the L(CR) ultrasonic technique // Mat. Sci. Forum, vol. 210, 1997.- P. 317-324.
57. E Tanala et al., Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods., Vol 28, 1995.-№2, P.83-88.
58. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G., Ostash O., Fomichov S. Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method // Journal of Mechanical Engineering, Vol.64, No11, pp.690-697.
59. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М., Напряжения и деформации при сварке., 1987.-К.:Вища шк. Головне изд-во-246с.
60. D.J. Buttle, W. Dalzell, M.T. Hutchings and A.J. Allen., Residual stress in a butt weldments of 50D steel measured by neutron diffraction and magnetic techniques // ICRS-6 Conf. Proc., Oxford, United Kingdom, 2000.- vol. 2, 923-931.
61. H.K. Tönshoff, T. Friemuth and H. Seegers., Stress determination by micromagnetic testing on tailored blanks // ICRS-6, Oxford, 2000.- Vol.2, P.932-938.

62. H. Hognestad and A. Honne., Determination of stress in ferromagnetic steel by potential drop measurements. // *Mats. Sci. & Tech.*, Nov 1998, Vol 14- P.1109 - 1114.
63. J. Gauthier, T.W. Krause and D.L. Atherton., Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique. // *NDT&E International*, 1998, Vol 31- №1, P.23-31.
64. Wang H.P., The alignment error of the hole-drilling method. // *Exp.Mech.*, 19 (1979).- P.23-27.
65. Недосека А.Я., Основы расчета и диагностики сварных конструкций., 1998-К., Издательство "ИНДПРОМ" - 640с.
66. Underwood J.H., Residual-stress measurement using displacement around an indentation. // *Exp.mech.*, 1973.- P. 373-380.
67. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Savitsky V.V., Tkachuk G.I. and Kiyanets I.V. Express control of quality and stressed state of welded structures using methods of electron shearography and speckle-interferometry // *The Paton Welding Journal*, 2005, №08. –p.35-40.
68. Антонов А.А., Бобрик А.И., Морозов В.К., Чернышев Г.Н., Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии. // *Изв.АН СССР. Механика твердого тела.*, 1982- №2. – С.182-189.
69. Bass J.D., Schmitt D., Ahrens T.J., Holographic in situ Stress Measurements. // *Geophys.J.R.Astr.Soc.*, 1986.- P. 13-41.
70. Nelson D.V., McCricked J.T., Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind hole drilling. // *Exp.Mech.*, 26(1986)- P.371-378.
71. Gabor D., Microscopy by reconstructed wavefronts. // *Proc.Roy.Soc.*, A197, 1949.- P. 454.
72. Gabor D., Microscopy by reconstructed wavefronts. II. // *Proc.Roy.Soc.*, 64, 1951.- P. 449.

73. Leith E., Upatnieks J., Wavefront reconstruction with continuous tone objects // Opt. Soc. Amer., Vol. 54, 1964.- P.1377-1381.
74. Leith E., Upatnieks J., Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects // J. Opt. Soc. Amer., Vol. 54, 1964.- P. 1295-1301.
75. Leith E., Upatnieks J., Reconstructed wavefronts and communication theory // J. Opt. Soc. Amer., Vol. 52, 1962.- P. 1123-1130.
76. Powell R.L., Stetson K.A., Interferometric analysis by wavefront reconstruction. // J. Opt. Soc. Am., Vol. 55, 1965.- P. 1593-1598.
77. Sollid J.E., Holographic interferometry applied to measurement of small static displacement of diffusely reflecting surfaces. // Appl.Opt., 8, (1969)- P. 1587.
78. Лобанов Л.М., Пивторак В.А. и др., Регулирование точности измерения перемещений метода 3-х голограмм при контроле размерной стабильности сварных изделий. // Автомат.сварка, 1987, №2.
79. Lobanov L.M., Pivtorak V.A. and Kuvshinsky N.G. Diagnostics of structures of metallic and composite materials using holography, electron speckle-interferometry and shearography // The Paton Welding Journal, 2000, №09-10. –p.72-78.
80. Furgiele F.M., Pagnotta L., Poggialini A., Measuring residual stresses by hole-drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration. // J.Eng.Mater.Technol., 113 (1991)- P.41-50.
81. Leendertz J.A., Interferometric displacement measurement on scattering utilizing speckle effect. // J.Phys. E: Scientific Instruments, Vol.3, 1970.- P. 214-218.
82. Butters J.N., Leendertz J.A., Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology // Journal of Measurement and Control, 4, 1971. – P.344-350.
83. Chen F., Griffen C., Allen T., Digital speckle interferometry: some developments and applications for vibration measurement in automotive industry. // Opt.Eng., 1998. #37 (5). – P.1390-1397.
84. Tyson J., Dynamic deformation analysis with pulsed ESPI. // SEM Proc., 1999.
85. Rastogi P.K., Inaudi D., Trends in optical non-destructive testing and inspection., 2000-Oxford: Elsivier Science B.V., - 633p.

86. Hedsen van Brug, Phase-step calibration for phase-stepped interferometry. // Appl.Opt. Vol 18, No 16, 1999.- P.3549-3555.
87. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Savitsky V.V. and Olejnik E.M. Automatic computer analysis of holographic interferograms in non-destructive quality control of materials and elements of structures // The Paton Welding Journal, 2002, №10. –p.6-12.
88. Hung Y.Y., Long K.W., Wang J.Q., Measurement of Residual Stress by Phase Shift Shearography. // Optics and Lasers in Engineering, Vol 27 (1997)- C.61-73.
89. Л.І. Муравський., Методи спекл-кореляції для дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів. // Київ. Наукова думка, 2010.
90. Okazaki K., Kagava M., Conrad H., Electroplastic effect in metals. // Src.met., 1979, vol. 13,- p.277-280.
91. Лобанов Л.М. Оптические методы исследования и средства регулирования сварочных напряжений и деформаций в конструкциях из металлических и полимерных материалов. // Дис. на соиск. уч. ст. докт.наук. Киев., 1983.
92. С.П. Тимошенко, Курс теории упругости.-Киев: Наукова думка, 1972. - 505с.
93. Венгринович В.Л., Цукерман В.Л., Данкевич Ю.Б., Новые возможности НК напряжений методом эффекта Боркзаузена. // В мире неразрушающего контроля, 2005, №1(27). - С.36-39.
94. Касаткин Б.С., Лобанов Л.М., Пивторак В.А. Исследование остаточных сварочных напряжений с применением голографической интерферометрии.-В кн.: Тр.Всесоюз.симп. по остаточ.напряж. и методам регулирования. Щербинка: НИИМАШ, 1982, С.230-233.
95. Kelsey R.A. Measuring non-uniform residual stresses by the hole-drilling method.- Proceedings of the Society for Experimental stress analysis, 1956, v.14, N1, P.181-194.
96. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б, Лобанов Л.М. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Наукова думка, 1981, - 584с.
97. Лобанов Л.М., Пивторак В.А. Развитие голографической интерферометрии для исследования напряженно-деформированного состояния и контроля качества

сварных конструкций. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – Київ: Наукова думка, 1998, С.620-636.

98. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В. Технология и аппаратура неразрушающего контроля качества и определения напряженного состояния в элементах конструкций аэрокосмической техники на основе применения методов лазерной интерферометрии. //Конф. "Неразрушающий контроль и техническая диагностика при производстве и эксплуатации авиационной и космической техники", 5-7 октярг.
99. Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразр. контроль – 2004. - №2. – С.25-28.
100. Hung Y. Y., Ho H. P. Shearography: an optical measurement technique and applications // Materials Sci. and Eng. – 2005. – R49. – P.61-87.
101. Диагностика композиционных элементов авиационных конструкций методом электронной ширографии / Л. М. Лобанов, В. А. Знова, В. А. Пивторак, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразр. контроль – 2016. - №2. – С.19-27.
102. Оперативный контроль качества и определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Г. И. Ткачук, В. В. Савицкий, И. В. Киянец // Автоматическая сварка – 2005. - №8. – С.39-44.
103. Zhao, Q.; Dan, X.; Sun, F.;Wang, Y.;Wu, S.; Yang, L. Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments. Appl. Sci. 2018, 8, 2662.
104. ASTM E2581-14 (2019), Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites and Sandwich Core Materials in Aerospace Applications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
105. Feng, H.J., Zhang, J., Liu, X.K. Studies on Digital Shearography for Testing of Aircraft Composite Structures and Honeycomb-Based Specimen. Applied Mechanics

- and Materials 121–126 121–126 (October 2011), P.1264–1268.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.1264>
106. Michael Schuth, Wassili Buerakov, Frank Vössing, Juri Saporoschski, and Erik Müller "Shearographic inspections by an interferoscope", Proc. SPIE 9302, International Conference on Experimental Mechanics 2014, 93020C (4 March 2015);
<https://doi.org/10.1117/12.2080807>
 107. O. Troitskii, V. Likhtman, The effect of the anisotropy of electron and γ radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state, *Kokl. Akad. Nauk. SSSR* 148 (1963) 332.
 108. J. T. Roth, I. Loker, D. Mauck, M. Warner, S. F. Golovashchenko, A. Krause, Enhanced formability of 5754 aluminum sheet metal using electric pulsing, in: Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 405–412, 2008.
 109. W. A. Salandro, A. Khalifa, J. T. Roth, Tensile formability enhancement of magnesium AZ31B-0 alloy using electrical pulsing, in: 37th Annual North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 37, 387–394, 2009. 20
 Page 20 of 22
 110. W. A. Salandro, J. J. Jones, T. A. McNeal, J. T. Roth, S.-T. Hong, M. T. Smith, Formability of Al 5xxx sheet metals using pulsed current for various heat treatments, *Journal of manufacturing science and engineering* 132 (5) (2010) 051016.
 111. A. Sprecher, S. Mannan, H. Conrad, Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals, *Acta Metallurgica* 34 (7) (1986) 1145–1162.
 112. H. Conrad, A. F. Sprecher, W. D. Cao, X. P. Lu, Electroplasticity—the effect of electricity on the mechanical properties of metals, *JOM* 42 (9) (1990) 28–33.
 113. H. Conrad, Thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field or current, *Materials Science and Engineering: A* 322 (1-2) (2002) 100–107.
 114. P. Goldman, L. Motowidlo, J. Galligan, The absence of an electroplastic effect in lead at 4.2 K, *Scripta Metallurgica* 15 (4) (1981) 353–356.

115. J. Magargee, F. Morestin, J. Cao, Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically assisted deformation, *Journal of Engineering Materials and Technology* 135 (4) (2013) 041003
116. M. Molotskii, V. Fleurov, Magnetic effects in electroplasticity of metals, *Physical review B* 52 (22) (1995) 15829.
117. M. I. Molotskii, Theoretical basis for electro-and magnetoplasticity, *Materials Science and Engineering: A* 287 (2) (2000) 248–258
118. Применение электроимпульсной обработки элементов конструкций с целью повышения их ресурса (Обзор) / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, Ю. В. Логинова // *Автоматическая сварка*. — 2005. — № 11. — С. 26–30.
119. Влияние электродинамической обработки на особенности микромеханизма разрушения сварных соединений сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // *Автоматическая сварка*. — 2007. — № 2. — С. 3–8.
120. Изменение напряженно-деформированного состояния после электродинамической обработки сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко // *Автоматическая сварка*. — 2007. — № 6. — С. 11–19.
121. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко // *Автоматическая сварка*. — 2007. — № 7. — С. 10–12.
122. Влияние импульсного электрического тока на тонкую структуру алюминиевого сплава АМг6 при электродинамической обработке / Л. И. Маркашова, Н. А. Пашин, Е. Н. Бердникова и др. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2018. — № 1. — С. 83–87.
123. Вплив ударної дії електрода — індентора на напружено-деформований стан сплаву АМг6 при електродинамічній обробці / Л. М. Лобанов, М. О. Пашин, О. Л. Миходуй, Ю. М. Сидоренко // *Проблемы прочности*. — 2017. — № 3. — С. 30–42.

124. Особенности структурообразования алюминиевых сплавов АМг5 и АМг6 под воздействием импульсного электрического тока / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, О. Л. Миходуй // Вісник українського матеріалознавчого товариства. — 2010. — № 3. — С.33–42.
125. Особенности формирования полос текучести и структурные изменения малоуглеродистых сталей при электродинамической обработке / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй, Т. Г. Соломийчук // Вісник українського матеріалознавчого товариства. — 2011. — № 4. — С. 56–69.
126. Влияние электродинамической обработки на особенности микромеханизма разрушения алюминиевого сплава АМг6 при циклическом нагружении / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, Е. Н. Бердникова и др. // Вісник українського матеріалознавчого товариства. — 2015. — № 8. — С. 27–37.
127. Изменения структуры алюминиевого сплава АМг6 в зоне электродинамических воздействий / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, Т. Г. Соломийчук и др. // Вісник українського матеріалознавчого товариства. — 2012. — № 5. — С. 30–42.
128. Yimin Gan, Wolfgang Steinchen Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Speckle Methods 2008, pp 655 – 674.
129. Савицкий В. В. Определение остаточных напряжений методом спекл-интерферометрии: Диссертация к. т. наук. – Киев, 2007. -144 с.
130. L. Lobanov, F.A.P. Fernandes, V. Savitsky, ‘A Procedure for Plasticity Error Correction for Determination of Residual Stresses by the ESPI-HD Method’, Materials Research Proceedings, Vol. 6, pp 83-88, 2018 DOI: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291890-14>.
131. Gan, Y., Steinchen, W. (2008). Speckle Methods. In: Sharpe, W. (eds) Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics. Springer Handbooks. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7_23

132. Олійник Олена Михайлівна. Неруйнівний контроль машинобудівних конструкцій методом електронної ширографії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4048>
133. Wohlfahrt H. and Dilger K., "New results of the IIW Round Robin residual stress measurements," Report on the experimental Round Robin Tests on residual stresses 2008, IIW Doc. XIII-2241-08/XV-1283-08, 2008.
134. Wohlfahrt H., Nitschke-Pagel T., Dilger K., Siegele D., Brand M., Sakkiettibutra J. and Loose T., "Residual stress calculations and measurements – review and assessment of the IIW round robin results," Weld World, Vol. 56, No. 09/10, 2012, pp. 120–140.
135. Определение и регулирование остаточных напряжений с применением локального импульса тока высокой плотности / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, В.В. Савицкий, Н.А. Пашин // Опір матеріалів і теорія споруд. 2015. № 94. ISSN 2410-2547.
136. Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole Drilling--Part I:Theory / A. Makino and D. Nelson // Stanford University, Mechanical Engineering Department, M/C 4021, Stanford, CA 94305-4021. 1994.