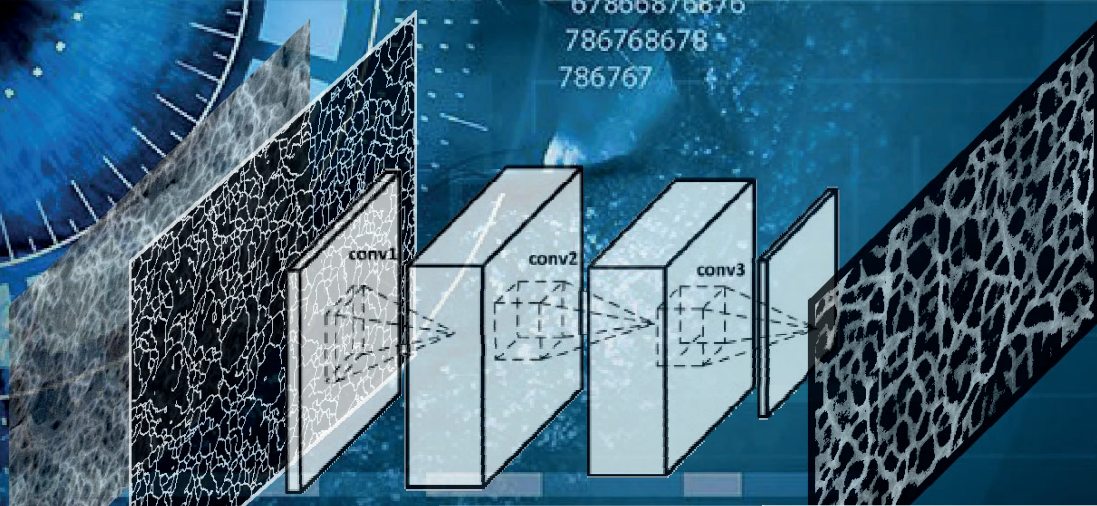


І.В. Коноваленко, П.О. Марущак

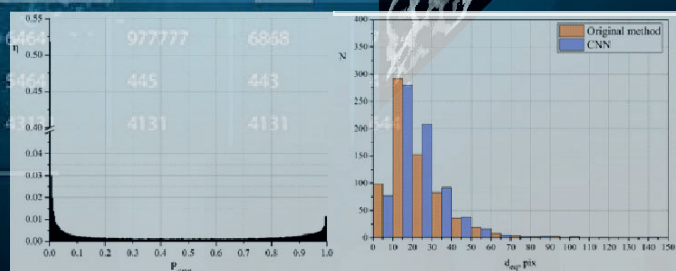
НОВІ ОПТИКО-ЦИФРОВІ МЕТОДИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ



23423435345464
5446565464656646
657656567.
786768
67866876876
786768678
786767



2564	6464	645	8787
54634	4646467	4544646	644
45465	4432113	4313	43131



Тернопіль, 2018

І.В. Коноваленко, П.О. Марущак

**НОВІ ОПТИКО-ЦИФРОВІ МЕТОДИ
ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ
МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

Монографія

Тернопіль
2018

УДК 539.3+620.172/178.2
К64

*Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 7 від 4 вересня 2018 р.*

Рецензенти:

чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор *О.Є. Андрейків,*
(*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України*)
д-р техн. наук, професор *Ю.А. Рудяк,*
(*Тернопільський державний медичний університет ім. Я. Горбачевського*)
д-р техн. наук, професор *О.В. Шарко*
(*Херсонська державна морська академія*)

К64 Коноваленко І.В. Нові оптико-цифрові методи технічного
діагностування матеріалів і конструкцій: монографія / І.В. Коноваленко,
П.О. Марущак. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2018. – 204 с.

ISBN 978-966-305-094-2

У монографії викладено результати теоретико-експериментальних розробок методології оптико-цифрового діагностування технічного стану матеріалів і конструкцій, які використовують у різних галузях промисловості. На основі проведених досліджень розроблено комплекс нових ефективних алгоритмів і засобів для дослідження та діагностування за статичного, циклічного та динамічного навантажування. Наведено приклади їх застосування для вирішення ряду проблемних завдань механіки руйнування, фрактодіагностування матеріалів металургійного та енергетичного обладнання.

Для наукових працівників та інженерів, які працюють у сфері проектування та експлуатації сучасних технічних засобів різних галузей промисловості, а також для студентів, аспірантів і викладачів вищих навчальних закладів відповідних спеціальностей.

УДК 539.3+620.172/178.2

© Коноваленко І.В., Марущак П.О., 2018
© Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2018

ISBN 978-966-305-094-2

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. САМООРГАНІЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ, СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇХ ДІАГНОСТУВАННЯ	7
1.1. Природа множинних тріщин, методи їх виявлення	7
1.2. Аналіз самоорганізованих поверхневих структур, отриманих лазерною ударно-хвильовою обробкою.....	15
1.3. Конструктивне виконання та автоматизований аналіз сенсорів втоми.....	24
1.4. Автоматизований аналіз морфології поверхні руйнування	33
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ МАРІАЛІВ.....	42
2.1. Зразки для деформування матеріалу з множинними дефектами.....	43
2.2. Дослідження рельєфоутворення на поверхні теплостійкої сталі після лазерного ударно-імпульсного оброблення.....	47
2.3. Методика побудови повних діаграм статичного деформування	51
2.4. Динамічний нерівноважний процес.....	56
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРІЩИН ТА ОБЧИСЛЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ	59
3.1. Цифрова дефектометрія в технічній діагностиці тріщин	59
3.2. Виявлення тріщин на зображеннях.....	60
3.3. Розрахунок геометричних параметрів тріщин.....	66
3.4. Дослідження поверхні ролика машини безперебійного лиття заготовок.....	68
3.5. Вплив параметрів алгоритму на результат виявлення тріщин.....	70
3.6. Дослідження деформаційної поведінки матеріалу, пошкодженого сіткою тріщин термовтоми.....	75
3.7. Використання нечітких множин для оцінювання геометричних параметрів пошкоджень поверхні	80
3.8. Автоматизований аналіз стану поверхні, пошкодженої мережею тріщин термовтоми.....	87
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ НАНОПОКРИТТІВ ТА СЕНСОРІВ ВТОМИ	94
4.1. Автоматизований аналіз множинного розтріскування нанопокриття .	95

4.2. Оптико-цифровий аналіз морфології рельєфу поверхні після імпульсного оброблення лазером	108
4.3. Автоматизоване діагностування пошкодженості алюмінієвого сплаву за умов статичного розтягу	115
4.4. Автоматизоване діагностування пошкодженості алюмінієвого сплаву за умов багатоциклової втоми	118
4.5. Оцінювання кінетики втомної пошкодженості матеріалу за параметрами поверхневого деформаційного рельєфу.....	122
РОЗДІЛ 5. Автоматизовані методи фрактодіагностування	131
5.1. Автоматизований аналіз зламів методами оптичної псевдостереоскопії	132
5.2. Автоматизоване оцінювання пошкодженості поверхні корозійними пітингами.....	143
5.3. Автоматизований аналіз ямок в'язкого відриву	152
5.4. Автоматизований метод дослідження форми та розмірів ямок на поверхні руйнування високоміцного титану на основі аналізу їх топологічних особливостей.....	162
5.5. Дослідження поверхні руйнування титанового сплаву за допомогою згорткових нейронних мереж.....	171
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	182
До розділу 1	182
До розділу 2	187
До розділу 3	190
До розділу 4	192
До розділу 5	197

Значну частину сучасних конструкцій експлуатують протягом тривалого часу. До них належать елементи й вузли металургійного устаткування, магістральні газопроводи, реактори АЕС, авіаційна техніка тощо. Для забезпечення безперебійної експлуатації такого обладнання важливим є досягнення їх високої надійності. Це у свою чергу зумовлює необхідність системного моніторингу технічного стану деталей та вузлів.

При цьому важливо, щоб методи, технології, параметри та критерії технічного діагностування були чутливими до пошкоджень і враховували фізико-механічну природу їх виникнення. Саме тому в сучасній технічній діагностиці широко застосовують підходи різних технічних напрямків: механіки руйнування, матеріалознавства, фізики твердого тіла, цифрової обробки сигналів, аналіз зображень тощо. Технічна діагностика розвивається на основі теоретичних та експериментальних підходів, які дозволяють автоматизовано отримувати, зберігати та обробляти значні масиви експериментальних даних.

Дана монографія є узагальненням ряду сучасних підходів до розв'язання проблеми аналізу пошкодженості машин та відповідальних конструкцій за допомогою оптико-цифрового діагностування. У ній обґрунтовано та апробовано застосування нових теоретико-експериментальних підходів, одержаних авторами впродовж тривалих наукових досліджень.

У книзі систематизовано результати досліджень, проведених у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, обґрунтовано комплексний підхід до вирішення проблеми технічного діагностування. Для цього використано сучасну теоретичну й методологічну базу аналізу цифрових зображень на основі сучасних алгоритмічних підходів. Наведено результати розроблення та дослідження алгоритмів аналізу зображень поверхні матеріалів, які експлуатуються під навантаженням. Досліджено алгоритми для кількісного оцінювання стану пошкодженості поверхонь різних видів через розрахунок різних інформативних параметрів, отриманих шляхом аналізу зображення цих поверхонь.

Використання методів комп'ютерного аналізу для вирішення фрактодіагностичних завдань дозволило отримати принципово нову інформацію та уточнити фізичні закономірності деформування й руйнування матеріалів, зокрема встановити мікромеханічні параметри пор, утворених під час статичного та динамічного деформування, які важко виявити іншими методами.

Монографія складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Великий перелік опрацьованої авторами літератури допоможе читачеві глибше осягнути викладений матеріал, забезпечить розуміння фізико-механічних передумов пропонованих методів, полегшить інтерпретацію одержаних результатів.

У першому розділі проведено огляд відомих методів для дослідження особливостей ряду поверхневих утворень для різних матеріалів шляхом аналізу їх зображень. Розглянуто природу множинних тріщин, а також підходи для їх виявлення та аналізу за допомогою цифрових зображень. Проаналізовано особливості утворення самоорганізованих поверхневих структур, отриманих

лазерною ударно-хвильовою обробкою. Описано класи поверхонь руйнування, механізми їх виникнення, вказано взаємозалежність між властивостями матеріалу та особливостями форми ямок в'язкого відриву на поверхні руйнування.

У другому розділі описано методи, використані для вивчення деформування, руйнування матеріалів, узагальнено матеріалознавчі та фізико-механічні аспекти випробувань.

У третьому розділі розглянуто особливості дослідження тріщиноподібних утворів на поверхнях за допомогою аналізу їх цифрових зображень. Описано базові підходи обробки зображень, які в подальшому використано для аналізу різноманітних рельєфних особливостей поверхонь. Наведено алгоритм для виявлення на цифровому зображенні тріщин та розрахунку їх основних геометричних параметрів. За допомогою запропонованого алгоритму досліджено поверхню ролика машини безперебійного лиття. Досліджено вплив значень важливих параметрів алгоритму на результат його роботи. Запропоновано спосіб оцінювання варіативності результатів роботи алгоритму, при якому отримані результати подають у вигляді нечіткої множини.

У четвертому розділі на основі попередньо розроблених методик досліджено пошкодження на поверхні нанопокриття та особливості поверхневих утворів сенсорів втоми. Виявлено ряд кількісних параметрів, які виступають у ролі інформативних ознак, що характеризують пошкоджену (чи деформовану) поверхню. Досліджено деформаційний рельєф на поверхні плакуючого шару алюмінієвих сплавів при напруженнях, які відповідають умовам навантажування під час експлуатації. Для кількісного оцінювання елементів деформаційного рельєфу запропоновано ряд параметрів, обчислення яких базується на попередньо розробленому підході до аналізу зображення.

У п'ятому розділі розглянуто методи аналізу фрактограм поверхонь руйнування. Розглянуто методику автоматизованого аналізу форми поверхні за допомогою псевдостереоскопії. Методика полягає в отриманні двох фрактограм під певним заздалегідь визначеним кутом. Запропоновано алгоритм для розрахунку кількісних характеристик ямок в'язкого відриву. За допомогою запропонованого методу досліджено поверхні зламу сталі й титанового сплаву. Запропоновано згорткову нейронну мережу для виявлення ямок в'язкого відриву на фрактограмі. Встановлено морфологічні закономірності та особливості руйнування високоміцних титанових сплавів.

Автори висловлюють глибоку подяку П.В. Яснію, А.П. Сорочаку, Б.П. Русину, О.А. Пастуху, С.В. Паніну, М.Г. Чаусову, А.П. Пилипенку, С.Р. Ігнатовичу, М.В. Карускевичу за активну участь в обговоренні поданих у монографії результатів і різноманітних аспектів проблематики оптико-цифрового контролю.

РОЗДІЛ 1. САМООРГАНІЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ У ТВЕРДИХ ТІЛАХ, СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇХ ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1. Природа множинних тріщин, методи їх виявлення

1.1.1. Зародження та коалесценція множинних дефектів

Теплостійкі сталі є основними конструкційними матеріалами для виготовлення роликів машин безперервного лиття заготовок [1]. Під час експлуатації вони піддаються складним видам навантаження, зокрема термовтоми. Тому завдання забезпечення довговічності роликів МБЛЗ шляхом їх своєчасного вилучення з експлуатації, обточування на новий ремонтний розмір та наплавлення є актуальним.

Технологія виконання таких ремонтно-відновлювальних робіт на сьогодні надійно відпрацьована. Тому для підвищення втомної довговічності сплавів залишаються напрямки, які пов'язані з впровадженням нових технологічних методів експрес-оцінювання пошкодженості ділянок ролика МБЛЗ множинними тріщиноподібними дефектами.

У дослідженнях Яснія П.В. та ін. [2-4] вперше показано, що в умовах коалесценції (об'єднання) множинних тріщин термовтоми на поверхні ролика відбувається процес самоорганізації структури дефектів, за якого проявляються нові деформаційні властивості поверхні за значного відхилення від рівноваги.

Один із важливих аспектів пов'язаний з релаксаційними процесами в системах множинних тріщин, які виникають за силового впливу [5]. В даному випадку суттєва зміна механічних властивостей відбувається не на локальних ділянках в околі вершин тріщин, а поширюється на значні ділянки поверхні конструкції. Це пов'язано з тим, що системи тріщин мають різні стадії підростання та об'єднання і за умови відсутності магістрального макродефекту можуть суттєво змінювати напружено-деформований стан конструкції, зокрема підвищувати її довговічність.

В останні два десятиліття зарубіжні та вітчизняні вчені інтенсивно проводять дослідження з впливу множинних дефектів, які виникають за циклічного та термомеханічного навантажування матеріалів, на зміну механічних властивостей конструкційних матеріалів. Проте урахування структури, розмірів та орієнтації дефектів залишається актуальним науковим завданням.

Отже, множинні дефекти змінюють деформаційну поведінку матеріалів. При цьому слід враховувати, що їх взаємовплив може або посилювати пружні властивості матеріалу (якщо переважають відокремлені дефекти, які не взаємодіють), або знижувати, у разі переважання взаємодіючих тріщин, рис. 1.1. Ці та інші випадки систематизовано у праці [6].

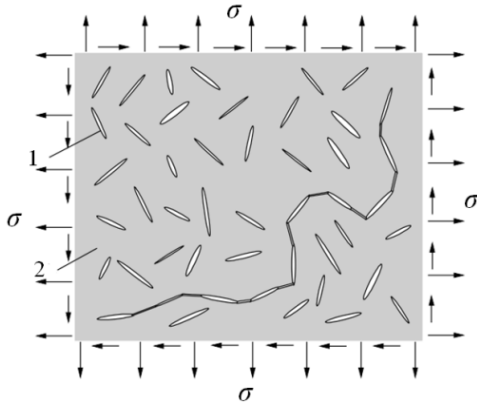


Рис. 1.1. Схема випадково орієнтованих множинних тріщин та їх коалесценції [6]

Коалесценцію тріщин визначали у цьому випадку за енергетичним критерієм [2]:

$$R = \frac{\Delta\Pi}{2c\gamma_s}, \quad (1.1)$$

де $\Delta\Pi$ – енергія, вивільнена внаслідок об'єднання двох суміжних мікротріщин; c – розмір зв'язку (з'єднання); γ_s – поверхнева енергія площі крихкої матриці.

Відоме рівняння опису скалярної щільності тріщин [6]

$$\rho = \frac{1}{V} \sum_i a^{(i)3}, \quad (1.2)$$

а для двовимірного випадку

$$\rho = \frac{1}{V} \sum_i a^{(i)2}, \quad (1.3)$$

де $a^{(i)}$ – довжина тріщини; V – аналізований об'єм матеріалу.

У працях М. Качанова [7-10] запропоновано рівняння опису щільності неорієнтованих тріщин у об'ємі матеріалу:

$$\alpha = \frac{1}{V} \sum_i (a^3 nn)^i, \quad (1.4)$$

де nn – діадний добуток – тензор з компонентами $n_k n_l$.

Це дозволило запропонувати метод розрахунку напружень у пружних тілах з множинними дефектами, а також сформулювати поняття кластера тріщин, під яким мали на увазі систему близько розташованих дефектів, що впливають на напружено-деформований стан одна одної, рис. 1.2.

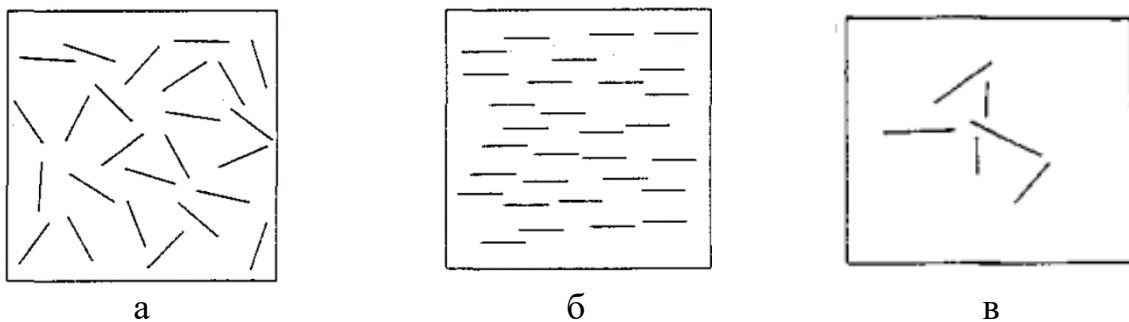


Рис. 1.2. Множинні тріщини: розорієнтовані – а, одноорієнтовані – б, кластер тріщин – в [7]

Також у працях М. Качанова побудовано наближене поле напружень матеріалів з множинними дефектами, рис. 1.3. Враховано взаємовплив великих і малих тріщин та вирішено проблему ефективних пружних властивостей твердих тіл з дефектами. Він заснований на техніці суперпозиції й підході самоузгодження для дво- і тривимірного масиву тріщин довільної геометрії. Це дозволило запропонувати наближений аналітичний розв'язок для коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) [8].

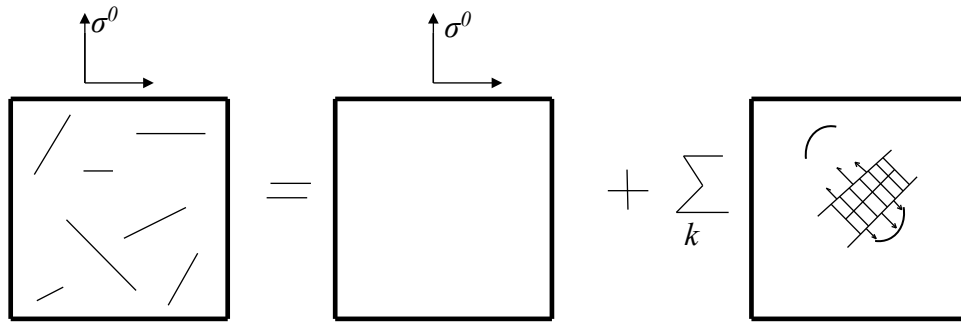


Рис. 1.3. Суперпозиція напружень: зведення задачі з N тріщинами до N підзадач з однією тріщиною

Проаналізовано [10] окремі задачі механіки пружних твердих тіл з множинними дефектами. Описано фізико-механічні ефекти, зумовлені взаємодією тріщин.

Запропоновані у працях [7-10] підходи дозволили оцінити вплив взаємодії дефектів на окремі тріщини і на їх коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН). Взаємодія тріщин може спричинити різні явища, зокрема перерозподіл напружень, рис. 1.4.

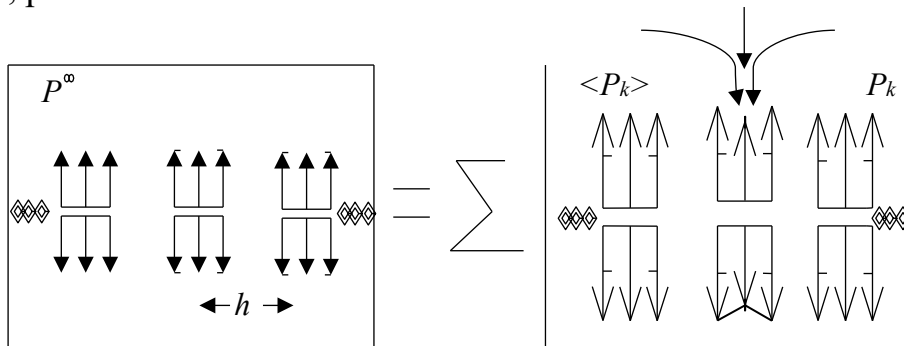


Рис. 1.4. Взаємовплив періодичних тріщин

Це дозволило пояснити ефективні пружні властивості твердих тіл з великою кількістю тріщин. Підхід має застосування у матеріалознавстві, будівельній механіці, геофізиці для неруйнівного контролю властивостей матеріалів. Відомі праці, в яких оцінено вплив типів розподілів тріщин та їх розмірів на ефективні властивості дефектного матеріалу. В праці [11] встановлено, що ефективний модуль дефектного матеріалу стрибкоподібно знижується до нуля в околі тріщини максимальної довжини, рис. 1.5.

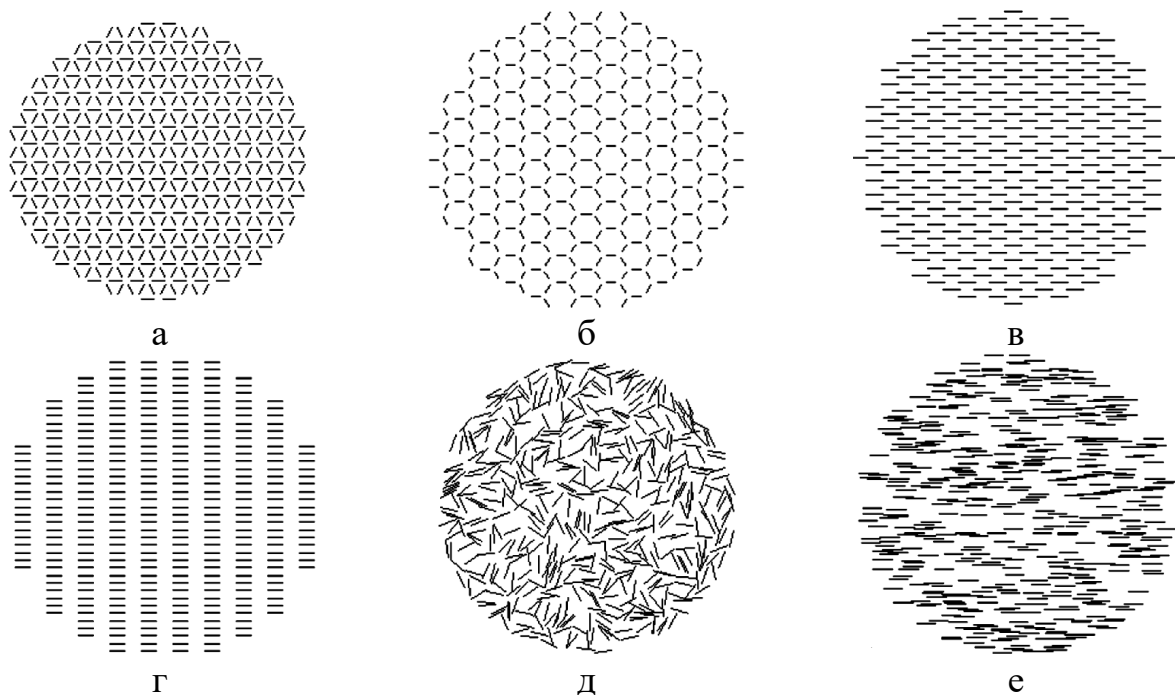


Рис. 1.5. Шість основних схем тріщин: рівнобічна трикутна – а; рівнобічна гексагональна – б; алмазна – в; прямокутна – г; випадкова – д; паралельна – е [11].

Систематизовано вплив типів тріщин на ефективні властивості матеріалів та запропоновано методи стабілізації їх механічних властивостей, які ґрунтуються на припущенні, що за наявності достатньо великої кількості тріщин співмірної довжини модуль пружності матеріалу стабілізується.

1.1.2. Методи автоматизованого аналізу множинних тріщин

Тріщини на поверхні матеріалу – одна з перших ознак деградації конструкції, що має вирішальне значення для експлуатації. Ручна перевірка є визнаним методом для виявлення тріщин [12]. Оскільки ручний підхід повністю залежить від знань і досвіду фахівця-дефектоскопіста, йому бракує об'єктивності. Крім цього, часто його неможливо використати для кількісного порівняння. Тому все частіше використовують автоматичне виявлення тріщин на основі аналізу зображень.

Інженерні конструкції часто піддаються циклічному навантажуванню, що призводить до виникнення тріщин, які зазвичай зароджуються на мікрорівні, на їх поверхні. Тріщини зменшують локальну жорсткість і викликають концентрацію напружень та локалізацію деформацій. Раннє виявлення дозволяє вживати запобіжні заходи, аби запобігти пошкодженню та можливим несправностям [13].

Для автоматизованого виявлення тріщин на поверхні матеріалу використовують підходи, засновані на аналізі зображення поверхні. При цьому вирішують два основних завдання:

- локалізацію тріщин на зображенні (виявлення пошкоджених ділянок);
- обчислення кількісних параметрів, які характеризують тріщини.

Слід зауважити, що за структурою свого двовимірного зображення тріщиноподібні об'єкти на поверхні металів схожі на витягнуті лінійні об'єкти, які за формою подібні до дефектів, аналізованих в інших галузях: тріщин на поверхні дорожніх покриттів; судин та ланцюжків нейронів у біологічних істот; ниткоподібних волокон у текстильній промисловості; тріщин в геологічних породах; деяких об'єктів аерофотозйомки поверхні Землі та інших космічних об'єктів; провідників на електронних друкованих платах тощо. Це зумовлює схожість підходів і технік, використаних для виявлення цих об'єктів на зображеннях.

Один із підходів [14], що дозволяє виявити пошкоджені ділянки, передбачає застосування локальних бінарних шаблонів (local binary pattern, LBP) та наступного розрахунку однорідності. Оператори для локальних бінарних шаблонів, описані авторами [15], успішно використовують для класифікації текстур та виявлення експлуатаційних дефектів. Відповідно до визначення, LBP-оператор розраховують на основі інтенсивності пікселів певної ділянки, порівнюючи їх з інтенсивністю центрального пікселя

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c) \cdot 2^p \quad (1.5)$$

де g_c, g_p – відповідно інтенсивність центрального пікселя шаблону та інтенсивність сусіднього пікселя; $s(x)$ – функція, яка дорівнює 1 для ненульових аргументів і 0 для всіх інших.

Однорідність обчислюють як кількість просторових переходів між двома сусідніми ділянками, обробленими LBP-оператором. Описаний метод використовують для виявлення тріщин на фотозображеннях поверхонь, зокрема з неоднорідним освітленням та фоновими текстурами. Підхід потребує підбору локальних бінарних шаблонів для різних видів зображень, що дещо обмежує його використання.

Автори [16] запропонували алгоритм виявлення тріщини на основі технології обробки цифрових зображень. За допомогою попереднього оброблення, сегментації зображення та виділення ознак вони отримують інформацію про тріщини на склі. Для сегментації використали порогування після згладжування вхідного зображення. Як кількісні параметри оцінювання використано площу, периметр та індекс округлення.

Відомі методи пошуку на зображенні тріщин нейроноподібної розгалуженої структури [17-19]. Пропонований алгоритм сегментації потребує вибору певної початкової точки (точок), з якої починається відслідковування тріщин. При цьому початкову точку задають вручну [18] або автоматично [19]. Використаний авторами [18, 19] підхід відслідковування напрямку поширення тріщиноподібних утворень показав добрі результати на високоякісних зображеннях з доброю роздільною здатністю, але для достовірної сегментації потребує неперервності у поширенні віток об'єкта. Крім цього, на результат значно впливав неоптимальний вибір початкової точки. Автори [17] використовують метод сегментації, який дозволяє згладити вказані недоліки. З цією метою застосовано рухому індикаторну функцію, яка оцінює присутність

тріщини на кожній елементарній ділянці зображення. Математично процес відслідковування напрямку поширення тріщини описано рівнянням:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha_1 \langle V_1, N \rangle^2 N + \alpha_2 \langle V_2, N \rangle^2 N \quad (1.6)$$

де $C(x, y)$ – функція, що описує контур тріщини; V_1, V_2 – вектори осьової і нормальної компоненти трубчастого поля потоку, яке описує орієнтацію тріщини (рис. 1.6); N – нормальний вектор кожної позиції контура $C(x, y)$; α_1, α_2 – додатні коефіцієнти.

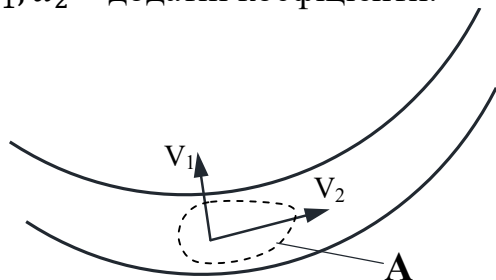


Рис. 1.6. Ілюстрація трубчастого векторного поля потоку (А – оброблюваний контур)

Більшість методів пошуку пошкоджень шляхом аналізу зображень на основі комерційних камер здійснюють лише попередню обробку з метою виявлення тріщини. Але є й методики зосереджені на кількісному оцінюванні виявлених пошкоджень. Їх використовують після того, як пошкодження вже виявлено. Автори [20] розробили модель, що чисельно описує дефекти. Вона містить кількісне оцінювання та виявлення тріщин, нейронну мережу та моделі 3-D візуалізації. Для видалення сегментів тріщини застосовано алгоритм скелетизації. У запропонованій моделі використано довжину тріщини для прогнозування її глибини та 3D-візуалізації.

В університеті Південної Флориди розроблено автоматизовану вимірювальну систему для виявлення тріщин на дорожніх бетонних покриттях [21]. Аналізуючи, зображення розбивали на комірки розміром 8×8 пікселів. Інформацію про наявність у відповідній ділянці тріщини отримували з кожної такої ділянки. Для кожної з них знаходили мінімальну яскравість, середню яскравість та наявність темних смуг. Знайдені параметри порівнювали з попередньо заданими пороговими значеннями й робили висновок про належність аналізованої ділянки до категорії тріщини, або фону.

Для моніторингу тріщин у трубах автори [22] використали спеціального робота, який досліджує внутрішню поверхню труб за допомогою камери та аналізує її для пошуку пошкоджень. Виявлення на зображенні тріщин здійснювали шляхом застосування алгоритму виділення країв Кенні [23]. Алгоритм Кенні є багатоступінчастим і охоплює операції виявлення країв, згладжування, пошук градієнтів, подвійне порогоування та відслідковування країв. Використаний підхід орієнтований на виявлення одиничних пошкоджень поверхні. Приклад аналізованого зображення з тріщиною наведено на рис. 1.7,а.

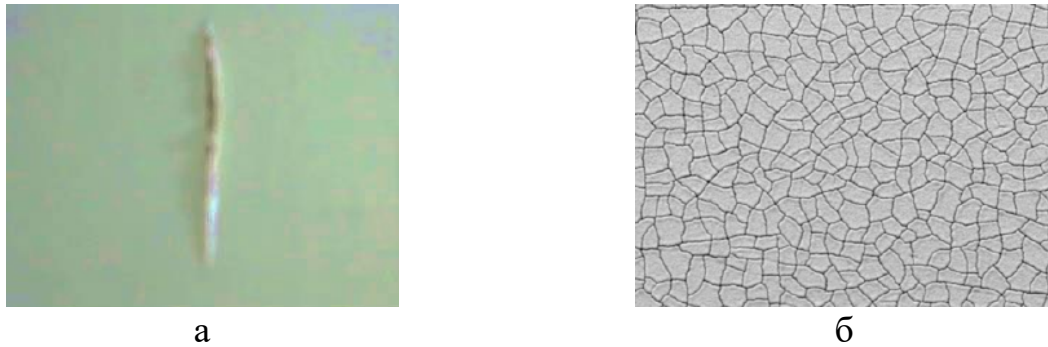


Рис. 1.7. Приклади поверхонь з пошкодженнями: а – внутрішня поверхня труби з окремою тріщиною [22], б – сітка тріщин термовтоми на поверхні інструментальної сталі [25]

Автори [24] запропонували техніку виявлення тріщин шляхом поєднання кореляції її цифрового зображення та аналізу акустичного сигналу. Аналіз зображення дозволив виявляти зміщення поверхні та забезпечив пошук тріщин. Щоб доповнити цей метод і дослідити механізми пошкодження, аналізували акустичне випромінювання від внутрішніх дефектів. Для ідентифікації різних класів енергії акустичного випромінювання використано метод ручного групування (подібний методу *K*-середніх). У своїй методології автори використовували три різні пропорції променя для отримання кращого результату.

Для аналізу мікроскопічної сітки тріщин на високотемпературних інструментальних сталях (рис. 1.7,б) запропоновано алгоритм [25]. Якщо контраст між ділянками мікротріщин та фоном був достатньо високим, виконували автоматичний картографічний аналіз. Зображення обробляли за кілька кроків: медіанне фільтрування, покращення контрастності, порогоування, сегментацію методом водорозділу та скелетизацію. Результатом роботи алгоритму є скелетне подання сітки тріщин термовтоми. Для кожної знайденої комірки сітки розраховують геометричні параметри: площу, периметр Крофтона, довжину та ширину. Розподіл цих параметрів інтегрально описує картину розтріскування. За умови, якщо мікротріщини мали недостатнє розкриття, автори [25] запропонували ручне перенесення сітки тріщин на прозорий папір, сканування і наступний аналіз за попереднім алгоритмом.

Мікроструктуру сітки тріщин згадані автори досліджували також у роботі [26]. При цьому виявлену на зображенні сітку термотріщин розглядали як сукупність комірок-багатокутників, розраховуючи для них ряд кількісних характеристик: кількість сторін, площу, густину тощо.

Автори [27] запропонували алгоритм контролю поверхні заготовок. Особливістю підходу є застосування фільтра Габора, за функцією

$$g(x, y) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x'}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y'}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \cos(2\pi f x'), \quad (1.7)$$

де $x' = x \cos \theta + y \sin \theta$, $y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$; θ – кут повороту ядра фільтра; f – радіальна частота; σ_x , σ_y – константи, які визначають просторовий гаусіан уздовж осей x та y .

Алгоритм містив послідовні операції фільтрування, порогоування, бінаризації і морфологічних перетворень, внаслідок чого отримано два кластери

пікселів: об'єктів-тріщин та фону. Підбір параметрів фільтра Габора дозволив застосовувати його до дефектів різних форм.

У роботі [28] запропоновано метод кількісного оцінювання тріщин на основі аналізу 2D-зображень. Методику застосовують до напівтонових зображень, отриманих за допомогою електронного скануючого мікроскопа. Зображення сегментують та обробляють за допомогою функцій бібліотеки Fijі, після чого застосовують розроблений авторами сценарій Matlab, який реалізує алгоритми поділу, фільтрування та кількісного оцінювання знайдених об'єктів. За сценарієм обчислено геометричні параметри – ширину, довжину, площу, співвідношення сторін та орієнтацію. Для фільтрування використано задані користувачем змінні параметри. Після виявлення тріщин проводили статистичний аналіз їх параметрів. Автори довели ефективність запропонованого підходу на прикладі мікрофотографій тріщин на каменях (рис. 1.8).

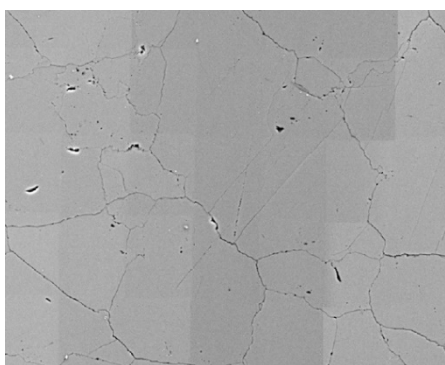


Рис. 1.8. Напівтонове зображення кам'яної поверхні з тріщинами [28]

Для пошуку надтонких тріщин елементів бетонних конструкцій розроблено алгоритм каскадного аналізу зображень [29], спрямований на раннє виявлення тріщини шириною менше пікселя. Основна ідея підходу полягає у виявленні розривів у векторних полях деформації поверхні. Векторні поля деформації розраховували між послідовними парами стереозображень. Тріщини виявляли за методами виділення країв (оператор Собела). Індикатором тріщини є лінійні розриви у векторному полі деформації. В результаті застосування детектора краю до зображення отримано зображення, де кожен піксель має значення, яке вказує на розбіжність між сусідніми векторними зміщеннями. Це зображення можна вважати зображенням ширини тріщини. На практиці вдавалося виявити тріщини шириною 1-20 пікселів, а їх ширину визначали з точністю 1-50 пікселів.

Автори [30] розробили метод, який дозволяє виявляти тріщини дорожнього покриття та класифікувати їх. Спочатку до зображень застосовували етап попередньої обробки. Потім для виявлення дефектів обчислювали анізотропну міру [31]. Для класифікації зображень використали нейронну мережу (багатошаровий перцептрон) зі зворотним поширенням похибки. Зображення тріщини класифікували за чотирма класами: без дефектів, звичайна тріщина, тріщина - "вузол" і тріщина - "міст".

Відома концепція [32] системи машинного бачення, мета якої – автоматизувати процес вимірювання тріщини. Для виявлення тріщин використано алгоритм моделювання тріщин, який отримує зображення, обробляє його і виводить нове зображення з червоними частинками вздовж виявленої тріщини. Позиції пікселів частинок зберігали у векторі та передавали

до алгоритму кількісного оцінювання тріщини. За допомогою отриманих даних алгоритм оцінював кількість пікселів у поперечному перерізі та виводив розміри тріщини.

Автори [33] запропонували систему виявлення крупних тріщин дорожніх покриттів з високою просторовою роздільною здатністю за допомогою лазерного сканування. Алгоритм роботи контрольно-вимірювального комплексу містить три кроки: корекцію затінення, виявлення тріщин та відображення тріщин. Спочатку тріщину виявляли у піксельній системі координат зображення. Після цього проводили зворотне проектування, щоб відтворити тріщину у просторовій системі координат. Це було досягнуто за допомогою гібридної концепції точкових хмар наземного лазерного сканера та відповідного зображення камери, що дозволило перетворити дані з піксельної системи координат у глобальну.

Автори [34] розробили систему виявлення тріщин на зображенні, отриманому за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Спочатку зображення фільтрували для усунення шуму та підсилення потрібних областей. Далі зображення бінаризували, розраховуючи підходящий поріг за допомогою гістограми зображення. Метою роботи було виокремлення на зображенні тріщин від фону (решти зображення). Запропонований спосіб використовує другу похідну гістограми, отриманої за допомогою лапласіана з гаусіана, разом з детектором вертикального краю Превітт для кількісного оцінювання тріщини. Кількісне оцінювання здійснювали на основі аналізу сегментованих пікселів.

Пошкодження поверхонь оцінювали шляхом аналізу зображень, орієнтованим на обчислення інтегральних показників. У роботі [35] запропоновано метод, заснований на обробці зображення поверхні. Розраховували такі характеристики зображення, як вертикальна та горизонтальна гістограми V_h та H_h , вертикальна та горизонтальна схожість Ω_h та Ω_v . Використовуючи ці параметри, на зображенні виділяли тріщини таких типів: поздовжню, поперечну, блокову та "алігаторну". У деяких випадках різні види тріщин мають близькі властивості, тому для їх класифікації використано алгоритм нечіткої логіки. Основна перевага нечіткого алгоритму полягає в урахуванні невизначеності параметрів тріщини.

1.2. Аналіз самоорганізованих поверхневих структур, отриманих лазерною ударно-хвильовою обробкою

Лазерна ударно-хвильова обробка (ЛУХ) є сучасним методом модифікування матеріалів, який створює у приповерхневих шарах матеріалу значні стискаючі напруження. Це істотно підвищує їх міцнісні, трибологічні та експлуатаційні характеристики [36, 37].

За ЛУХ оброблювальну поверхню покривають непрозорим для лазерного випромінювання шаром з низькою температурою випаровування: чорною фарбою, металеву фольгою тощо. Зверху розташовують прозорий шар, найчастіше воду. Енергія лазерного імпульсу поглинається непрозорим шаром, що спричиняє його нагрівання, випаровування та формування

високотемпературної плазми. Плазму з одного боку обмежено поверхнею дослідженого матеріалу, а з іншого – прозорим шаром, що стримує її поширення. Обмеженість об'єму спричиняє зростання тиску до високих значень (більше 2 ГПа) та поширення в матеріал ударної хвилі, яка зумовлює виникнення стискаючих напружень [36-38].

Непрозорий шар є захистом від прямого контакту поверхні досліджуваного матеріалу з лазерно-індукованою плазмою. Наслідком взаємодії поверхні з плазмою є утворення розплаву на його поверхні.

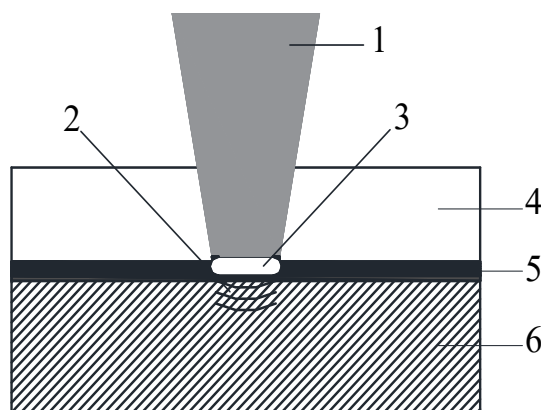


Рис. 1.9. Принципова схема ЛУХ обробки матеріалів: 1 – потік випромінювання, 2 – ударна хвиля; 3 – плазма; 4 – прозоре конденсоване середовище; 5 – абсорбент; 6 – металевий зразок

Слід зазначити, що за ЛУХ у матеріалі відбуваються морфологічні зміни, які, як правило важко досягнути звичайною термообробкою матеріалу. Так, у праці [39, 40] в сталі AISI 304 було виявлено поверхневу нанокристалізацію матеріалу та утворення деформаційного мартенситу після кількох лазерних ударно-хвильових імпульсів. Після серії імпульсів поверхня являла собою ізометричні кристали розміром 50 x 300 нм.

Механізм нанокристалізації поверхні сталі за багаторазового ЛУХ обробленням узагальнено у вигляді схеми, рис. 1.10. Всі етапи узагальнено на основі експериментальних даних та підтверджено прикладами.

- I. Ударна хвиля, внаслідок її поширення, відбивання та заломлення, спричиняє формування високої щільності дислокацій у матеріалі.
- II. За певного рівня напружень, в зоні опромінення, формуються деформаційні смуги в тілі зерен, які поділяють початкові зерна на тонку матрицю.
- III. Оскільки тиск хвилі ще зростає, то структурні спотворення накопичуються. Це спричиняє зміну просторової орієнтації розташованих поряд смуг. Разом з цим відбувається мартенситне перетворення, а розміри рейок мартенситу залежать від розмірів перехресних деформаційних смуг.
- IV. За багаторазового ЛУХ навантажування великі початкові зерна діляться на дрібніші, поки не досягнуть певного граничного розміру.

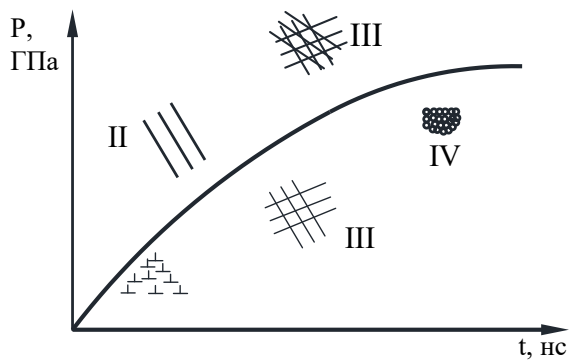


Рис. 1.10. Схема змін мікроструктури сталі AISI 304SS за лазерної ударно-хвильової обробки

Після оброблення полірованої поверхні лазером, її шорсткість, як правило, зростає. Кінцева шорсткість поверхні залежить від параметрів опромінення та властивостей матеріалу поверхні. На рис. 1.11 зображено принципову схему утворення поверхневого рельєфу. Показано, що під час оброблення, лазерна ударна хвиля поширюється в повітрі між алюмінієвою фольгою, що дещо послаблює її. Це, у свою чергу, зумовлює градієнт інтенсивності лазерної ударної хвилі на різних ділянках поверхні сплаву. Ця неоднорідність спричиняє зростання шорсткості поверхні.

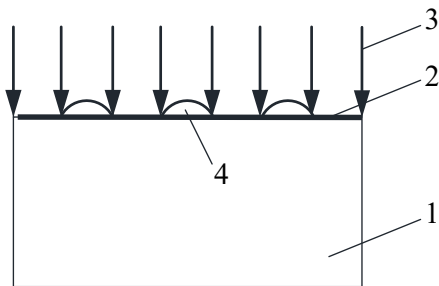


Рис. 1.11. Принципова схема збільшення шорсткості поверхні, обробленої лазерним ударним впливом: 1 – зразок; 2 – захисний шар; 3 – лазерна ударна хвиля; 4 – повітря

Відома низка результатів [41], отриманих для мартенсито-старіючої сталі X2NiCoMo18-9-5 (DIN 1.6358). Обробку сталі проводили у воді. Закономірності зростання шорсткості за параметрами R_a та R_z показано на рис. 1.12. Помітно, що після обробки лазером шорсткість поверхні зросла в 4,1...6,6 рази.

Вказані закономірності спостерігали також і на інших матеріалах, зокрема титанових сплавах, які широко використовують у медицині [42]. Відомо, що остеоінтеграція між кістковою тканиною і титановими сплавами, обробленими твердотільним лазером, зростає порівняно з необробленим матеріалом імпланта. Як активне середовище використали алюмо-іттрієвий гранат ("YAG", $Y_3Al_5O_{12}$), легований іонами неодиму (Nd). Було виявлено більшу кількість кісткової тканини в околі оброблених імплантів. Виявлено, що зусилля викручування оброблених імплантів було в 2,5 раза вищим, ніж у контрольних імплантів.

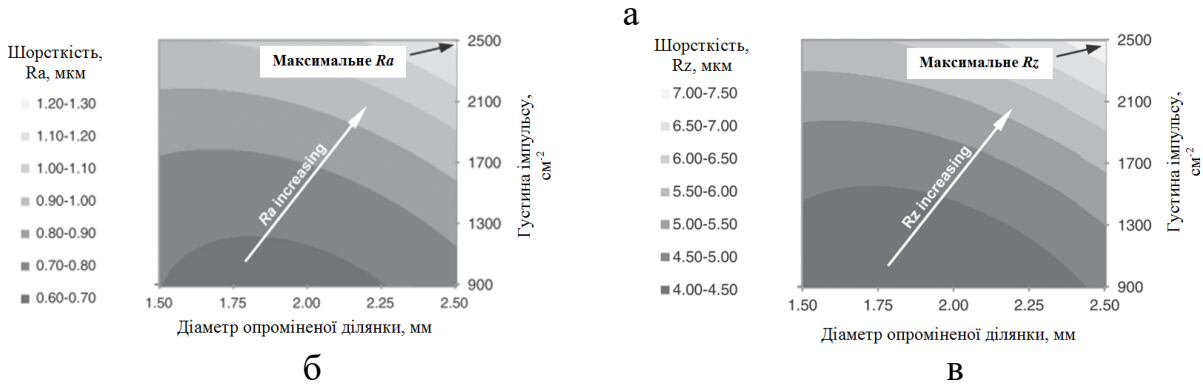
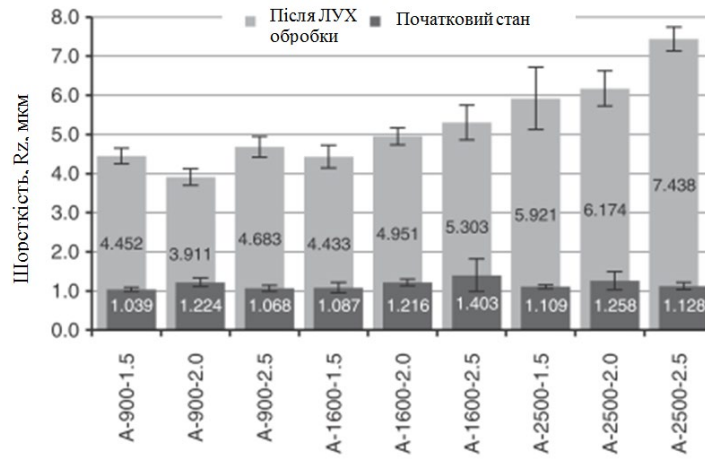


Рис. 1.12. Шорсткість поверхні сталі за (R_z) – а, в та (R_a) – б до та після обробки лазером [41]

Жорсткість імпланта відрізняється від жорсткості кістки, тому для зниження концентрації напружень застосовують самоорганізовані або виготовлені машинним способом поверхні. В роботі [43] отримано поверхні зі стільниковою газометрією, що забезпечує кращу змочуваність поверхні та збільшення її адгезії.

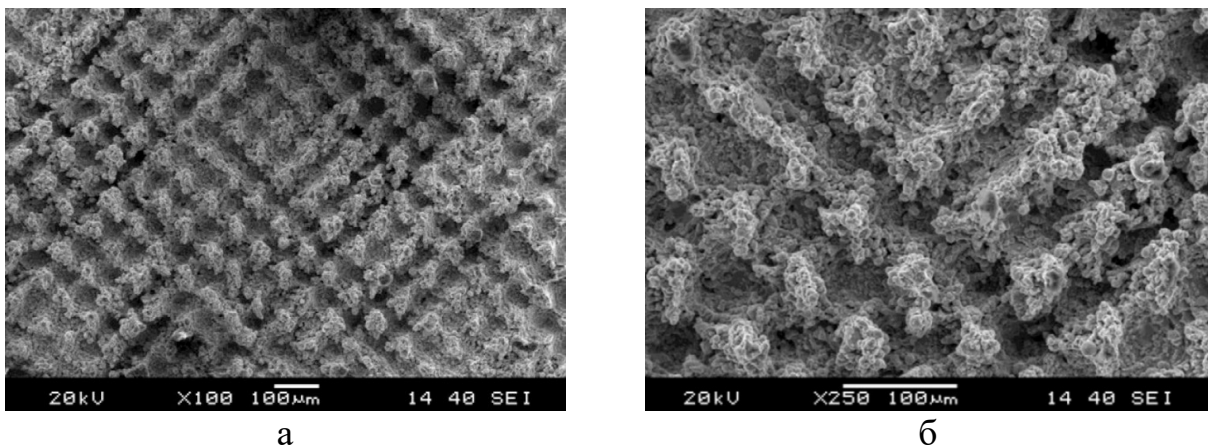


Рис. 1.13. Зображення поверхні з регулярним рельєфом (після лазерної обробки), отримане методом скануючої мікроскопії [43]

Також встановлено, що така поверхня сприяє перерозподілу напружень та забезпечує підвищення жорсткості встановлення імплантів. На думку авторів, стільникова геометрія є перспективною для створення мікрошаблонів.

Для виявлення та аналізу регулярних та псевдoreгулярних рельєфних структур за допомогою зображень використовують ряд технік, які є спільними

для різних видів поверхонь: самоорганізованих поверхонь, поверхонь зношування, корозійних поверхонь, поверхонь, утворених обробкою різальним інструментом.

Поверхню розглядають як двовимірний випадковий сигнал. Для характеристики її випадкового характеру розраховують традиційні статистичні параметри, зокрема шорсткість, функцію розподілу висоти, функцію автокореляції, спектр потужності, асиметрію, ексцес тощо [44]. Ці параметри обчислюють різними способами, серед яких широко застосовують оптичні методи, які мають ряд переваг: безконтактність, швидкість, точність. Так, Люк зі співавторами [45] використали систему машинного зору для вимірювання шорсткості поверхні інструментальної сталі у виробничому середовищі. Юніс [46] запропонував метод реального часу для вимірювання шорсткості за допомогою засобів обробки зображень. Автори [47] розробили методику вимірювання шорсткості рухомих поверхонь із використанням комбінованих ефектів інтерференції та світлового розсіювання.

Часто поверхні характеризуються різними текстурами. Протягом останніх десятиліть для аналізу текстури поверхні були представлені різні підходи. Тучерян і Джайн [48] поділили підходи до сегментації текстур на п'ять категорій: статистичну, геометричну, структурну, модельну та обробку сигналів. Найпоширенішими методами є статистичний, модельний та метод обробки сигналів [49]. У більшості підходів, заснованих на методах обробки сигналів, текстуроване зображення пропускають через лінійне перетворення, фільтр або банк фільтрів, а потім обчислюють його енергетичні показники. Текстури описують статистичними величинами. Одним із загальноприйнятих є метод на основі матриці співпадання, описаний у [50].

У роботі [51] запропоновано теоретичну модель розпізнавання образів для класифікації поверхневих текстур. Як вихідні дані використано зображення, отримані за допомогою атомно-силової мікроскопії. Текстуру характеризували матрицею співпадання контрасту зображення

$$M = \|m(c, d)\|, \quad (1.8)$$

де m – кількість пар елементів зображення з контрастом c , які розміщені на відстані d один від одного. Значення контрасту обчислювали так

$$c = \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2}, \quad (1.9)$$

де h_1, h_2 – висота поверхні у відповідних точках.

Далі матрицю трансформували у вектор за допомогою перетворення Кархунена-Лоєва. Вектор ознак вважали координатами точки в багатовимірному просторі ознак. Розташування точки залежали від особливостей текстури поверхні. Набір точок утворив кластери, які відповідали різним класам текстур. Спільне розташування точок та структури кластерів було проаналізовано методом багатовимірного масштабування. Встановлено, що існує принаймні чотири класи поверхневих рельєфів. Перші три з них пов'язані з властивостями поверхневого матеріалу, останній - із процесом росту та кристалізації на поверхні стику різних матеріалів.

У роботі [53] автори розглянули проблему автоматичної класифікації трибохімічного пошкодження металевих поверхонь на основі обробки цифрових зображень. При цьому використано матрицю співпадання контрасту M . Досліджено п'ять видів трибохімічного зношування, включаючи стирання, пошкодження розмивом, поєднання окиснення та ерозійного зношування, а також зношування в корозійних середовищах. Початкові зображення характеризували множиною текстурних ознак. Показано ефективність використання розробленого методу для автоматичної ідентифікації трибохімічних типів поверхні. На рис. 1.14 наведено зразки аналізованих поверхонь (а) та результат розпізнавання зон зношування (б).

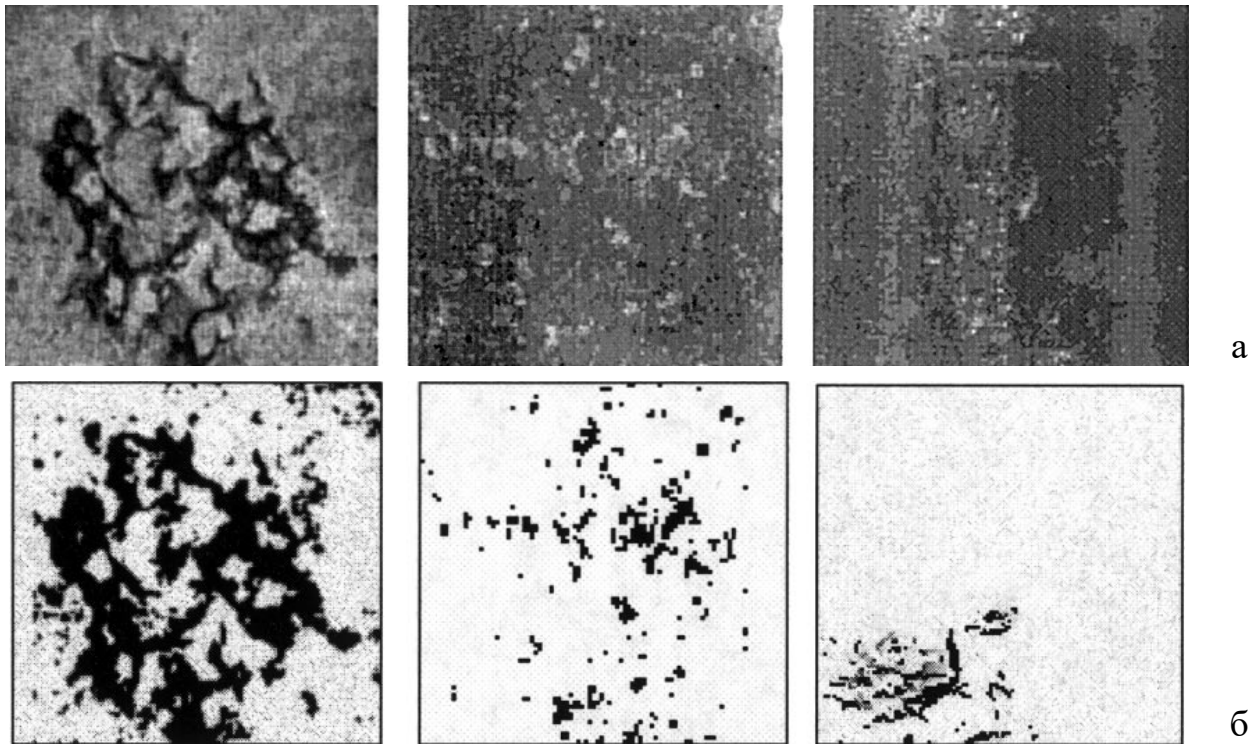


Рис. 1.14. Зразки текстур трибомеханічного пошкодження поверхні (а) і результат виявлення зон пошкодження (б) [17]

Жанг у своїй роботі [53] розробив систему онлайн-моніторингу поверхонь зношування, засновану на аналізі зображень. Вона складається з камери, плати для захоплення зображення та комп'ютера для аналізу та візуалізації отриманих даних. Зображення оброблялися за допомогою віртуальних інструментів пакетів LabVIEW та засобів Matlab. Система забезпечувала зберігання та опрацювання зображень, отриманих в різні моменти часу, що дозволило оцінювати швидкість зношення. Для кількісного оцінювання зображення розраховували крос-кореляцію [54] та інші статистичні параметри. Зношені зони виявляли за допомогою фільтрів двох видів: фільтра Габора та оптимізованого фільтра. При цьому використано банк фільтрів, що забезпечило виявлення зони зношування з різною формою текстури (рис. 1.15).

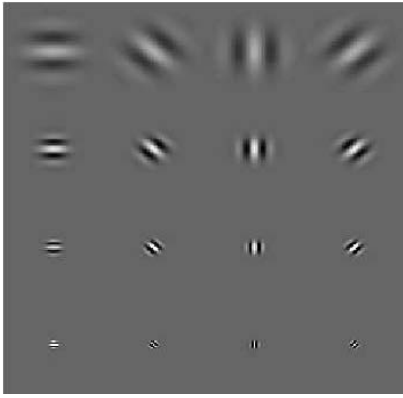


Рис. 1.15. Банк фільтрів Габора для виявлення поверхонь зношування [51]

Карти ознак, отримані кожним фільтром, додавали, отримуючи комплексну карту ознак. Після цього зображення сегментували за допомогою порогування, відділяючи пікселі, які належать зонам зношування. На рис. 1.16 наведено приклад зображень з ознаками зношування (а-в) та результат їх аналізу (г-е). Крім фільтра Габора, також використано оптимізований фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою [51], в якого більше вільних параметрів, що забезпечило гнучкість його налаштування. Порівняння результатів їх застосування показало, що кожен з них має свої переваги.

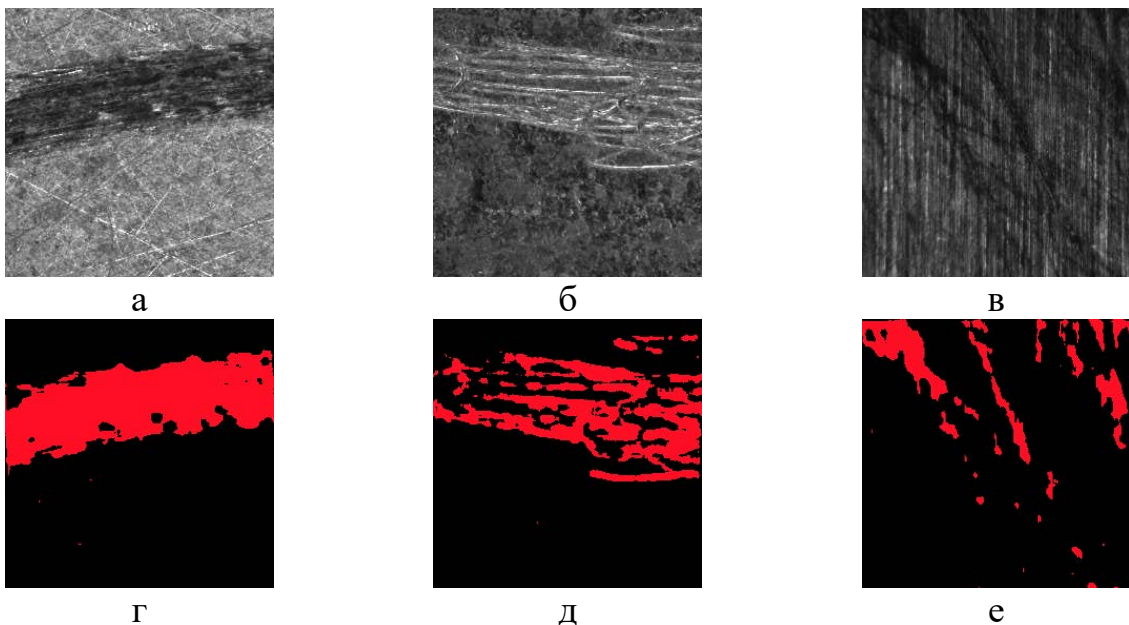


Рис. 1.16. Зображення поверхонь зі зношеними ділянками (а-в) та результат їх розпізнавання (г-е) [51]

Автори [55] представили систему моніторингу зношування інструментів. Область зношування інструменту поділяли на ділянки шляхом застосування алгоритму водорозділу, після чого виконували автофокусування та сегментацію. Потім значення інтенсивності окремих пікселів кожного регіону замінювали середнім для регіону значенням. Для пошуку топологічних вершин використали алгоритм на основі модифікованої функції Лапласа. Далі застосували адаптивний алгоритм Марковського поля для сегментації кожної області зносу інструменту. Вважали, що автоматичне фокусування та сегментація області зносу інструменту за регіонами (в області зносу інструменту) підвищує точність

та надійність і забезпечує швидкодію режиму реального часу. Впроваджено також додаткову процедуру оцінювання зношування інструменту та обчислення параметрів текстури поверхні. Оптимальне вікно аналізу текстури визначено метрикою ентропії – функцією текстури, яку створено за допомогою матриці співпадання сірих рівнів. Показано, що в областях зношування ентропія є незмінною, оскільки зростає зношення інструменту. Ентропію розраховували на основі формули Шеннона

$$Ent = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} C(i, j) \ln(C(i, j)), \quad (1.10)$$

де $C(i, j)$ – описує інтенсивність пікселя; L – кількість рівнів інтенсивності.

Результат розпізнавання області зношування на різальному інструменті наведено на рис. 1.17.



Рис. 1.17. Початкове зображення ріжучого інструменту з областю зношення - а та результат її виявлення за алгоритмом [55] - б

Феліціано та співавтори [56] для аналізу текстур поверхні, утвореної внаслідок корозії, також використали метод неруйнівного контролю, заснований на обробці зображення. Досліджено атмосферну корозію сталі ASTM A36. Зразок піддавали корозії протягом 44 днів, щоб отримати фотопослідовність розвитку корозії. Для зображень розраховували текстурні характеристики (ентропію, коефіцієнт Херста, контраст, кореляцію, енергію, гомогенність). Виявлено також часові особливості зміни цих характеристик (рис. 1.18).

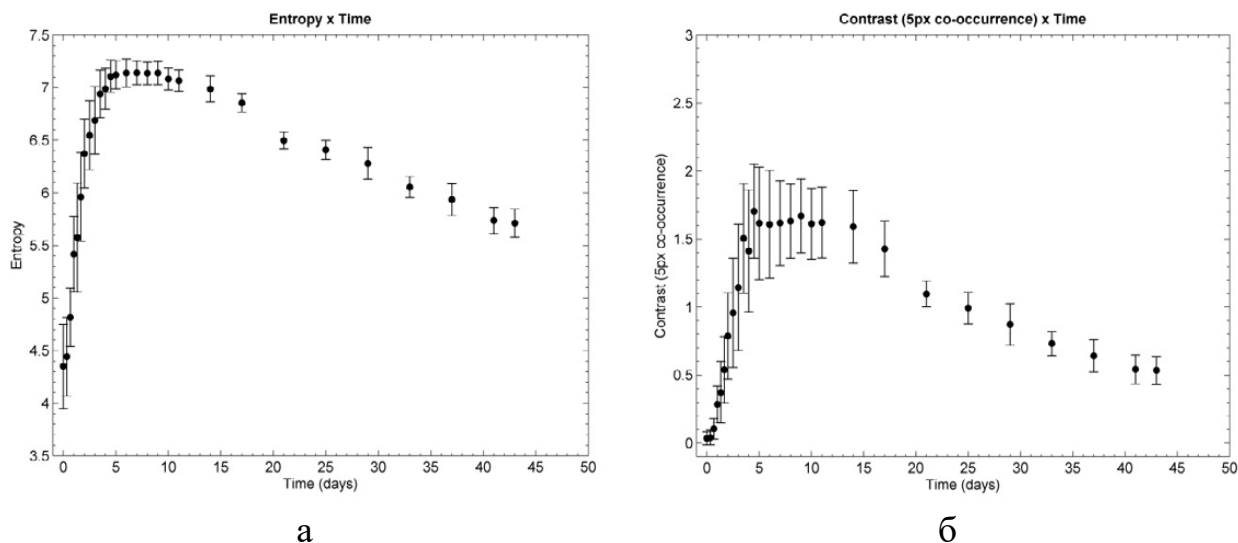


Рис. 1.18. Зміна у часі параметра ентропії та контрасту для зразка, що піддавався корозії протягом 44 днів [56]

Автори [57] запропонували метод для оцінювання кінетики зношування сталених поверхонь кочення. Метод ґрунтується на аналізі двійкових зображень та виявленні зв'язаних пікселів, які належать елементам сітки зношування. При цьому сканували зображення, виявляли всі елементи, що належали пошкодженню, створювали докладний звіт про кожен з них. Розраховували значення кількох параметрів, зокрема: кількість пікселів, їх площу, координати центру ваги, а також орієнтацію. Використовували алгоритм вибіркової фільтрації елементів з метою усунення тих з них, які є нецікавими, виходячи з їх просторових характеристик. У результаті зберігали лише потрібні для подальшого аналізу елементи. Далі автори вивчали зміни характеристик елементів під час випробувань з метою співставлення їх з кінетикою процесу пошкодження.

Останні роки для аналізу зображень застосовують нейронні мережі. Миколайчик зі співавторами [58] розробили систему оцінювання зношення інструменту на основі штучної нейронної мережі. Нейромережа реалізувала класифікатор на основі однієї категорії. Представлено також метод визначення швидкості зношування інструменту на основі аналізу зображень. Для програмної реалізації запропонованого підходу використано Visual Basic. Результатом аналізу є кількість пікселів, що належать до зношеної області. Метод досліджено на прикладі зображень зношування краю різального інструменту (рис. 1.19) для різних робочих годин.

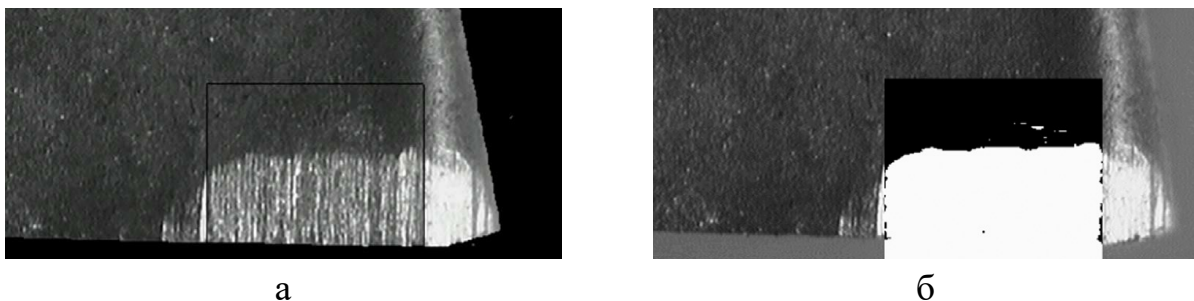


Рис. 1.19. Фотографія кромки різального інструменту - а та результат виявлення зони зношування - б

Ферейра та Гіралді [59] розробили згорткову нейронну мережу для класифікації гранітної плитки. За основу прийнято архітектуру нейромережі, навченої на базі CIFAR та MNIST. Для навчання використано базу зображень [60], яка містить 1000 повноколірних RGB-зображень розміром 1500×1500 пікселів, поділену на 25 класів по 40 зображень у класі. Перші 100 зображень отримано скануванням поверхні плиток, решту 900 – поворотом початкових зображень на різні кути. Автори наголошують на ефективності застосування свого підходу для аналізу зображень з високою роздільною здатністю.

1.3. Конструктивне виконання та автоматизований аналіз сенсорів втоми

1.3.1. Нанокристалічні плівки та монокристали для сенсорів втоми

Одним із підходів, що дозволяє достатньо точно діагностувати технічний стан конструкцій тривалої експлуатації, є застосування пасивних давачів. До них відносять давачі деформацій інтегрального типу (ДДІТ) та сенсори втоми [61-63]. Ці поняття у даній книзі вжито як синоніми. Давачі деформації інтегрального типу є дешевими та на відміну від інших типів давачів простими у використанні. Згідно із дослідженнями виконаними В.М. Сизранцевим, Д.А. Троценком, А.Ю. Розенбергом, А.Ю. Удовікіним, С.Л. Голофастом, А.І. Маленковим, А.П. Котельниковим та ін. встановлено основні переваги ДДІТ, зокрема [64-68]:

- інформативність та можливість оцінювати реакцію давачів за різними критеріями та алгоритмами;
- можливість визначення виду навантажування конструкції за орієнтацією "темних плям" на поверхні давача або за орієнтацією зміненої (пошкодженої) структури металу давача;
- можливість встановлення давачів на ділянки зі складною геометричною формою (западини зубчатих коліс, галтелі осей та ін.) і наступного зняття давачів для аналізу в лабораторних умовах;
- відсутність комутуючих пристроїв;
- можливість використання давачів з керованою чутливістю до амплітуди циклічних деформацій.

Фізико-механічним підґрунтям створення цих давачів є концепція про "шаховий" розподіл нормальних і дотичних напружень на межі розділу різнорідних середовищ, підданих зовнішньому силовому впливу. Ця концепція сформувалася в рамках багаторівневого підходу [69]. "Шаховий" ефект виникає при сполученні різних матеріалів, зокрема й металів (рис. 1.20).

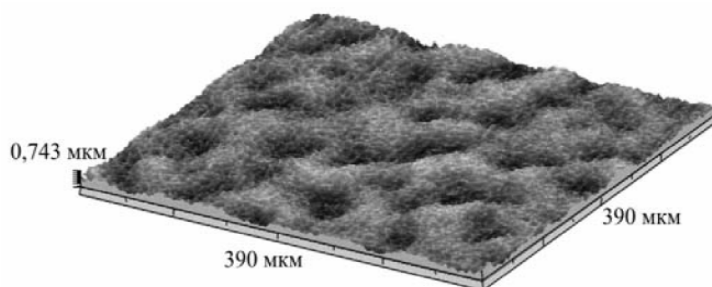


Рис. 1.20. "Шахова" структура наноструктурованого поверхневого шару сплаву Zr-2,5%Nb за деформації стиску $\varepsilon = 5\%$ [69]

У праці [70] методами атомно-силової мікроскопії та оптичної інтерференційної профілометрії встановлено основні закономірності гофрування системи "тонка наноструктурна плівка (наклеєна фольга) – підкладка" за термічного впливу. Розглянуто модельну композицію, що містила плівку Al, підшар полістиролу (PS) і підкладку з Si. Проаналізовано процес гофрування та виникнення періодичної системи розподілу напружень і деформацій у сформованих рельєфних утвореннях, введено його стадійність. Виявлені закономірності використано для створення сенсора стану поверхні.

Відомо дослідження параметрів двошарової системи "фольга-зразок" та умов її навантажування на кількісні характеристики утворених поверхневих структур, що виникають на початкових етапах рельєфоутворення та фольгах монокристалу алюмінію за циклічного розтягу (рис. 1.21). Встановлено, що збільшення товщини фольги спричиняє лінійне зростання періоду макроскопічних смуг та зменшення періоду твідової структури, утвореної на поверхні сенсора.

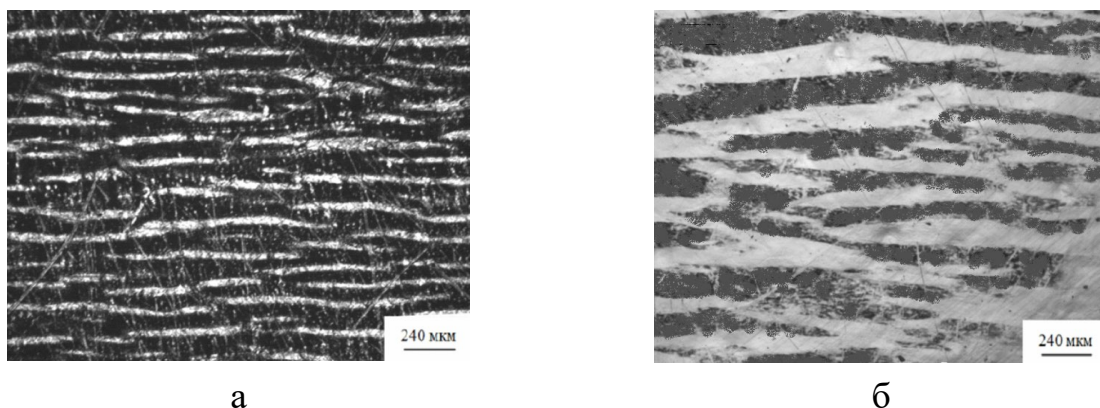


Рис. 1.21. Макроскопічні смуги на фольгах монокристалу алюмінію товщиною: 120 мкм – а та 330 мкм – б, після $N \sim 6 \cdot 10^3$ циклів [70, 71]

Зростання ширини смуг та їх періоду пояснюють у рамках моделі Черепанова [72], яка дозволяє оцінити гармонійний розподіл нормальних і дотичних напружень зі зсувом на $\pi/2$ на інтерфейсі середовищ з різними фізико-механічними властивостями та лінійну залежність їх величини від товщини плівки:

$$\sigma = \sigma_s \sin \frac{r_H - r}{t\sqrt{6}}, \quad \tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{6}} \cos \frac{r_H - r}{t\sqrt{6}} \quad (1.11)$$

де t – товщина плівки; σ_s – межа текучості за одновісного розтягу-стиску; r_H – визначає зону, за межами якої напруження дорівнюють 0; r – радіус кривизни плівки в зоні опуклості.

За умов заневоленого (несвобідного) циклічного розтягу, прикладом якого є фольга, наклеєна на діагностовану поверхню, в монокристалі алюмінію кубічної орієнтації за напружень вище умовної межі текучості зростає роль вільної поверхні фольги. Це сприяє релаксації пружної енергії – нестабільності Грінфельда [73]. Вона має пружне походження й полягає в наступному: матеріал має поверхню, на яку він може перерозподілитися за певним механізмом, тому тверде тіло може знизити свою пружну енергію шляхом виникнення поверхневих модуляцій (рис. 1.22).

Слід зазначити, що довжина хвилі нестабільності (λ) зумовлена балансом між пружною енергією, яка активує рельєфоутворення, і поверхневим натягом, який "розгладжує" її, та за лінійним наближенням може бути визначена [73]:

$$\lambda > \lambda_c = \frac{\pi\gamma E}{\sigma^2}, \quad (1.12)$$

де γ , E та σ – відповідно поверхневий натяг, модуль Юнга та напруження.

Між повздовжніми макроскопічними смугами виявили твідову структуру [70, 71].

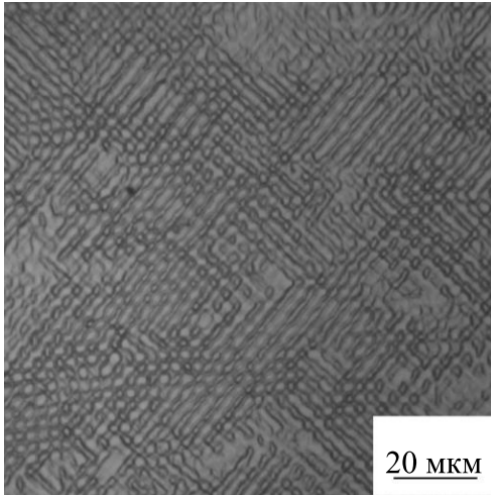


Рис. 1.22. Твідова структура монокристалів алюмінію $\{001\}\langle 100\rangle$, після $N \sim 6 \cdot 10^3$ циклів навантажування [70, 71]

1.3.2. Полікристалічні давачі деформацій інтегрального типу

Базові підходи застосування ДДІТ розвинуто у працях В.М. Сизранцева та його учнів. У працях [61, 62, 74-76] запропоновано спосіб виготовлення та застосування полікристалічних давачів для контролю циклічних деформацій. Давачі виготовляли шляхом гальванічного осадження: на металеву пластину – катод – 1, наносили гальванічне покриття – 2, яке після завершення цієї операції знімали з катода. Після цього з поверхні покриття 2, яка контактувала з катодом 1, знімали шляхом зтравлювання гальванічний осад товщиною не менше 2 мкм. Вирізані з матеріалу давачі мали однорідну у всьому об'ємі структуру, що забезпечувала підвищення їх точності, рис. 1.23.

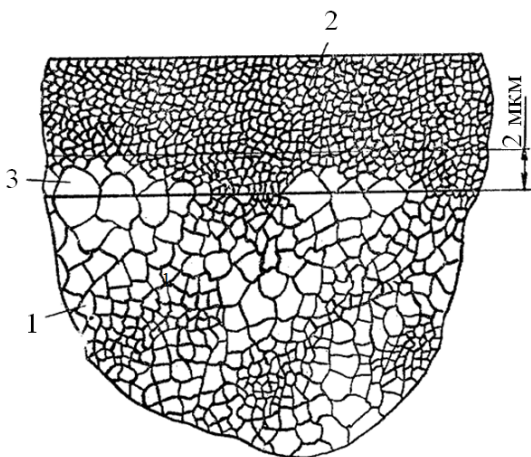


Рис. 1.23. Схема одержання однорідного полікристалічного сенсора методом гальванічного осадження; 1 – катод; 2 – гальванічне покриття; 3 – гальванічно осаджений шар

Давачі, за цим методом, вирізали у вигляді смуги шириною 4 мм, довжиною 45 мм, товщиною 5...30 мкм. Їх виготовляли не лише з міді, але й з алюмінію, нікелю, срібла, золота.

З допомогою клею "Циакрин-ЭО" їх фіксували на ділянці діагностичного контролю. Під дією циклічних деформацій структура матеріалів змінювалась і на їх поверхні утворювались "темні плями". Момент появи "темних плям" та змін у структурі матеріалу давача корелював з кількістю циклів та амплітудою циклічного деформування.

У працях Голофаства С.Л. [66] використано мікротвердість як додатковий параметр оцінювання пошкодженості давачів. Цей метод дозволив одержувати інформативні ознаки пошкодженості давача ще до появи на його поверхні "темних плям", проте потребував значних обсягів його індентування.

У працях Богомолова О.В. [67] узагальнено тарування ДДІТ різної чутливості за умов їх циклічного закручування й визначено тарувальні криві з межами довірчих інтервалів. Це дозволило запропонувати залежність втомної довговічності при крученні від пошкодженості поверхні давачів різної чутливості з урахуванням амплітуди циклічних деформацій. Запропоновано рівняння, що враховує нелінійність процесу накопичення втомних пошкоджень та дозволяє використати ДДІТ для оцінювання максимального дотичного напруження при циклічному закручуванні зразка за блочного навантажування.

У працях Котельникова А.П. [65] запропоновано метод виготовлення давачів зі змінною чутливістю поверхні та запропоновано тарувальні залежності для інтерпретації їх показів. Запропоновано та апробовано методи оцінювання даних ДДІТ за відносною площею "темних плям", визначених за даними оптико-цифрового контролю.

У працях Змизгової Т.Р. [68] запропоновано методи вибору порогових параметрів фільтрування зображень поверхні ДДІТ з метою усунення (мінімізації) шумових компонент. Виконано класифікацію зображень реакції ДДІТ та запропоновано підходи до їх калібрування за величиною накопичених на поверхні давача пошкоджень.

Москвін П.В. [69] встановив, що ДДІТ змінної чутливості можуть бути ефективно застосовані для оцінювання пошкодженості зварних з'єднань. Він запропонував критерії граничного стану кранових металоконструкцій за даними ДДІТ.

У працях Слесарева Е.М. [80] запропоновано новий спосіб реєстрації реакції ДДІТ за відбитим з його поверхні сигналом, зафіксованим за допомогою оптоелектронного світловодного перетворювача протягом втомних випробувань. Побудовано тарувальні криві залежності для ДДІТ та виконано їх математичний опис. Аби врахувати розкид показів приладів, для кожного перерізу виконували не менше десяти вимірювань і статистично обробляли їх результати, а відповідну тарувальну криву будували за математичним сподіванням показів приладів. Отримали залежність у вигляді тарувальної кривої [80]

$$\Delta U = 5,6 \cdot 10^{-6} \exp(0,070\sigma - 14,0)(\lg N)^{-0,0269\sigma + 13,06}, \quad (1.13)$$

де ΔU – покази приладу оцінювання реакції ДДІТ; σ – рівень діючих напружень; N – кількість циклів навантаження.

Тарування давачів за відбитим з їх поверхні сигналом здійснювали за відомої кількості циклів деформування та напружень для кожного перерізу.

С.В. Панін та ін. [81] обґрунтували умови оптимального освітлення ДДІТ: галогенний студійний освітлювач і точкову світлодіодну лампу (рис. 1.24). Перший розташовували в площині XZ під кутом 45° до осі X для формування загального фону зображення.

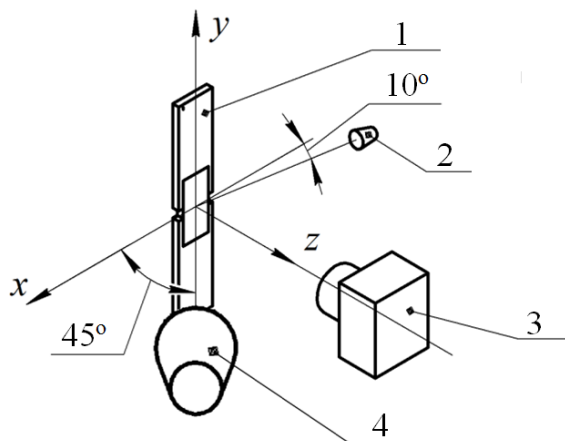


Рис. 1.24. Схема освітлення і зйомки зразка з ДДІТ: 1 – зразок; 2 – точкове освітлення; 3 – камера; 4 – галогенна лампа [81]

Точкове світлодіодне джерело, яке збільшувало контраст сформованих деформаційних утворень, розташовували у площині XZ під кутом $\sim 10^\circ$ до "від'ємної" осі X . Така схема освітлення дзеркальної фольги дозволяє отримати на початкових етапах темне зображення, оскільки відбите світло не потрапляє в об'єктив мікроскопа. Далі з напрацюванням та рельєфоутворенням ділянки поверхні світлішають.

Пошкодженість сенсора оцінювали як середньоквадратичну похибку (MSE) між двома зображеннями [81]

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2, \quad (1.14)$$

де n – загальна кількість пікселів у зображенні, I_1 , I_2 – яскравість пікселів спотвореного (наприклад, зашумленого або деформованого – за різних термінів напрацювання) й оригінального (без зашумлення або знятого до початку циклічного деформування зразка) зображення відповідно.

Як додатковий параметр використано ентропію. Для цього на початку вихідного зображення побудували гістограму у вигляді залежності кількості пікселів p кожного рівня яскравості i . Інформаційну ентропію H обчислювали за формулою [81]

$$H(I) = \sum_{i=1}^{I_{\max}} p(i) \log_2(p(i)), \quad (1.15)$$

де i – можливе поєднання яскравості пікселя зображення; I_{\max} – максимальне значення яскравості.

Відомі праці зі створення авіаційних сенсорів в томи С.Р. Ігнатовича та М.В. Карускевича [63], (рис. 1.25). Сенсор виготовляли з технічного алюмінію АД-1. Товщина фольги до оброблення становила 0,2 мм. Розмір сенсора після підготовки поверхні до оптичного контролю $20,0 \times 10,0 \times 0,15$ мм. Товщину сенсора зменшували з 0,2 мм у заготовці до 0,15 мм у готовому давачі шляхом полірування. В якості діагностичного параметру вибрано фрактальну розмірність.

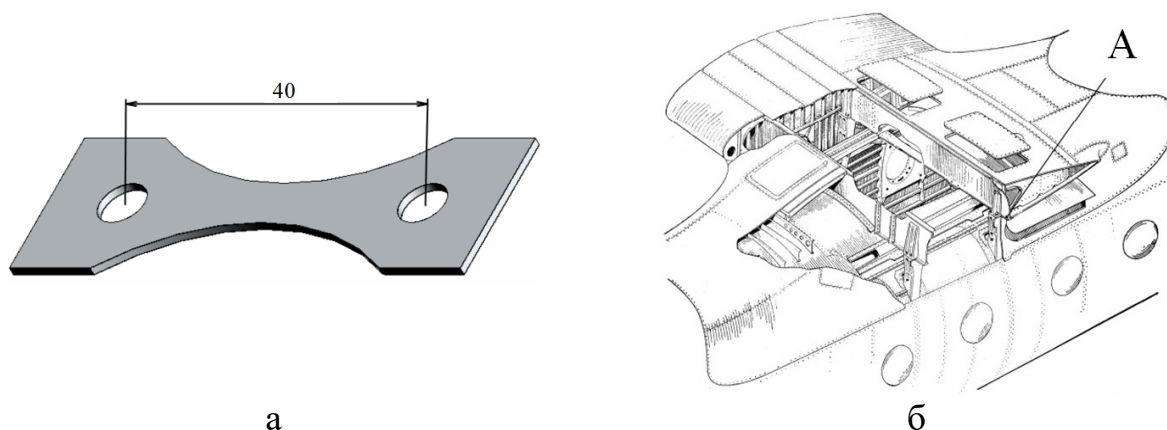


Рис. 1.25. Сенсор в томи з ефектом підсилення напружень у робочій частині – а та місце встановлення сенсора в конструкції регіонального літака – б; А – місце встановлення сенсора [63]

Необхідну для оптичного аналізу деформаційного рельєфу якість поверхні сенсора забезпечили послідовним застосуванням попереднього механічного полірування й електролітичного полірування.

Еволюцію кількості та геометричних параметрів смуг ковзання оцінювали за параметром фрактальної розмірності D , який визначали як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі поверхні контрольованої ділянки.

Подібний підхід описано також у працях В.П. Кузнєцова [82], який за структурною функцією контролював зміну фрактальної розмірності аналізованих ділянок сенсора з напрацюванням. Вихідною інформацією слугували оптичні зображення та лазерні профілограми деформованих фольг. В першому випадку використовували фрактальну модель нахилу, а дані аналізували за зміною яскравості поверхні, яка є функцією шорсткості та рельєфу.

Обчислювали структурну функцію $S(\Delta r)$

$$S(\Delta r) = \frac{1}{A} \frac{\sum_i^N \sum_j^N |I(r_{i,j}) - I(r_{i,j} + \Delta r)|^n}{N^2(\Delta r)} \sim \Delta r^H, \quad (1.16)$$

де A – нормувальна стала; $i, j = 1, 2, 3 \dots N$ – номер стрічки та номер пікселя в стрічці, відповідно; $I(r_{i,j})$ – яскравість (висота) в точці $r_{i,j}$; $I(r_{i,j} + \Delta r)$ – яскравість (висота) в точці $r_{i,j} + \Delta r$; n – порядок структурної функції, в нашому випадку $n = 1$; $N(\Delta r)$ – кількість пар точок; Δr – відстань між парами точок; H – показник Гельдера.

Існує кореляція між точками зображення у вигляді лінійної частини залежності в подвійних логарифмічних координатах [82]

$$\lg(|I - I'|) = f(\lg(\Delta r)). \quad (1.17)$$

Нахил залежності (1.17) відносно осей дозволяє визначити показник Гельдера H та усереднену фрактальну розмірність зображення $D_f = 2 - H$, а проекція лінійної ділянки на вісь масштабів – відповідну межу інтервалу довжини, яку описано цією фрактальною розмірністю.

Для сталоамплітудного навантажування відома залежність між шорсткістю поверхні (R_a), амплітудою навантажування ($\Delta\sigma$) та кількістю циклів (N), яку можна записати так [83]:

$$R_a = \frac{1}{k_0} \sigma^{\alpha/2} N^{1/2} + m, \quad (1.18)$$

де k_0 , α та m – сталі матеріалу, в даному випадку – алюмінієвої фольги.

Зміну амплітуди навантажування враховували з використанням "еквівалентного" напруження [83]:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{\sum \sigma_i^\alpha N_i}{\sum N_i} \right). \quad (1.19)$$

Тоді формула зв'язку шорсткості з еквівалентним напруженням (без урахування історії навантажування) набула вигляду

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{(R_{an} - m)^2 k_0^2}{\sum N_i} \right)^{1/\alpha}, \quad (1.20)$$

де R_{an} – шорсткість поверхні одержана після $\sum N_i$ циклів навантажування.

Відомі давачі, принцип дії яких ґрунтується на зміні кольору поверхні протягом напрацювання, зокрема коефіцієнта відбиття світла, рис. 1.26. Зміна кольору є наслідком морфологічних перетворень та зміни фазового складу матеріалів [84].

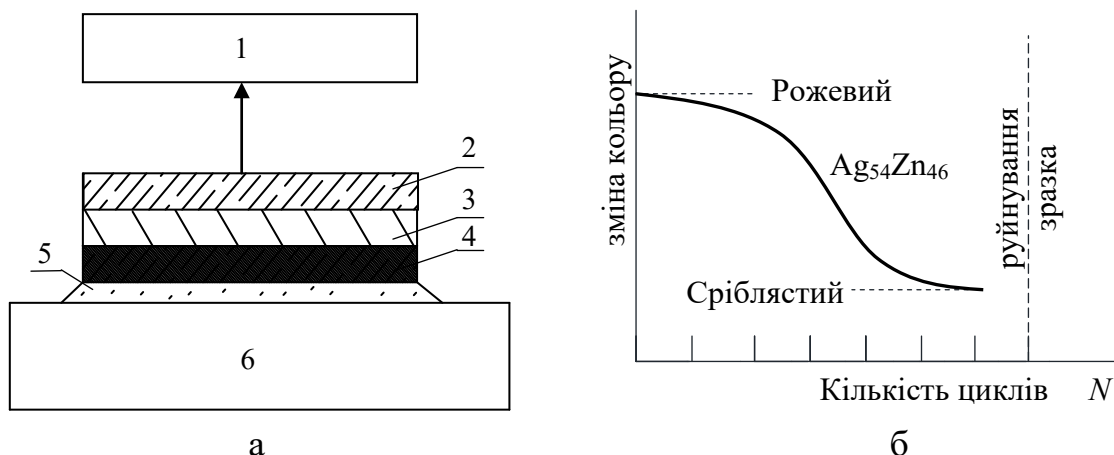


Рис. 1.26. Схема встановлення сенсора поверхневої пошкодженості – а та крива зміни його кольору протягом напрацювання – б [84]: 1 – рефлектометр; 2 – захисне покриття (епоксидна смола); 3 – плівка "срібло+цинк"; 4 – гнучка основа; 5 – шар клею; 6 – зразок

Відомий також метод оцінювання залишкового ресурсу, запропонований корпорацією Tensiodyne [85]. Метод передбачав закріплення на конструкціях, які піддаються навантаженню, смуг з того ж самого матеріалу (рис. 1.27).

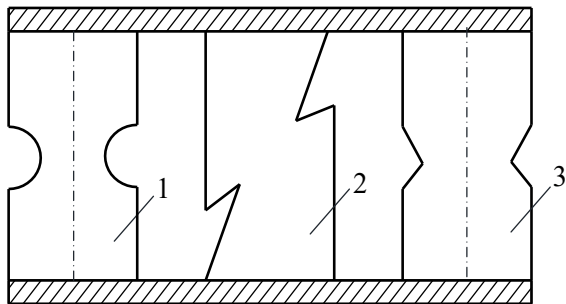


Рис. 1.27. Сенсори пошкодженості "Tensiodyne" у вигляді смуг з концентраторами напружень різної форми [85]

Протягом напрацювання ці сенсори руйнувались за різної кількості циклів навантажування, залежно від концентрації напружень.

Для сенсорів втоми широко використовують мідні фольги, оскільки із циклічним напрацюванням змінюється морфологія їх зерен. Якщо пов'язати параметр зерна, амплітуду навантажування та напруження можна прогнозувати ресурс конструкцій.

Для вимірювання двовісних деформацій використовували мідну фольгу з круглими отворами, товщиною 30 мкм (рис 1.28). Отвори діаметром 1 та 5 мм отримано свердлінням (рис. 1.28).

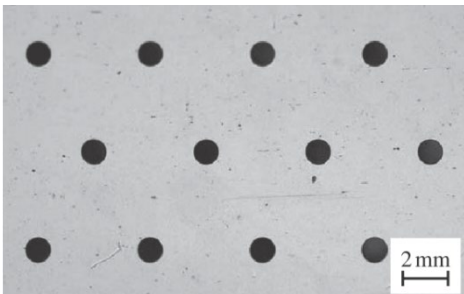


Рис. 1.28. Сенсор пошкодженості з концентраторами у вигляді множинних отворів [86-88]

Оцінювали головні напруження на ділянці матеріалу 15x15 мм. Даний метод дозволив оцінити головні напруження. Виявлено мінімальну кількість отворів для функціонування методу.

Ця формула пов'язує ріст зерен із кількістю циклів навантажування (N) та показує, що швидкість підростання зерен dS/dN є пропорційною площі зерен S [88]

$$\frac{dS}{dN} = AB \exp(BN) = BS, \quad (1.21)$$

де A , B – сталі матеріалу.

В роботі [89] запропоновано систему аналізу отриманих зображень, яка дозволила зменшити трудомісткість оброблення зображень поверхні сенсора (рис. 1.29).

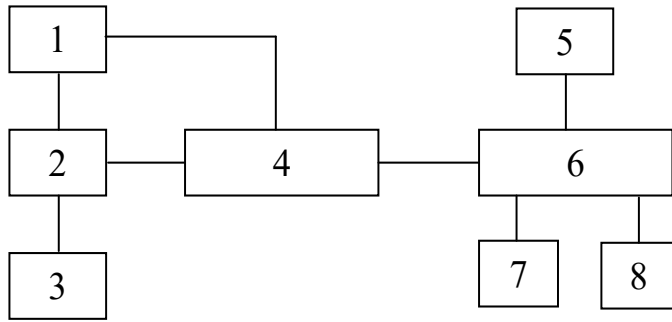


Рис. 1.29. Система обробки зображень поверхні сенсора пошкодженості [89]: 1 – монітор; 2 – камера; 3 – мікроскоп; 4 – пам'ять (накопичення зображень); 5 – дисплей; 6 – ПК; 7 – зовнішній диск; 8 – принтер

Недоліком вказаної схеми вимірювання є неможливість використання для реальних конструкцій внаслідок невеликої аналізованої площі зерен. Крім того, на нашу думку, надмірна локалізація деформацій може спричиняти певну дисперсію значень аналізованого параметра.

Відома досконаліша схема аналізу поверхні сенсорів втомі [90-92] (рис. 1.30).

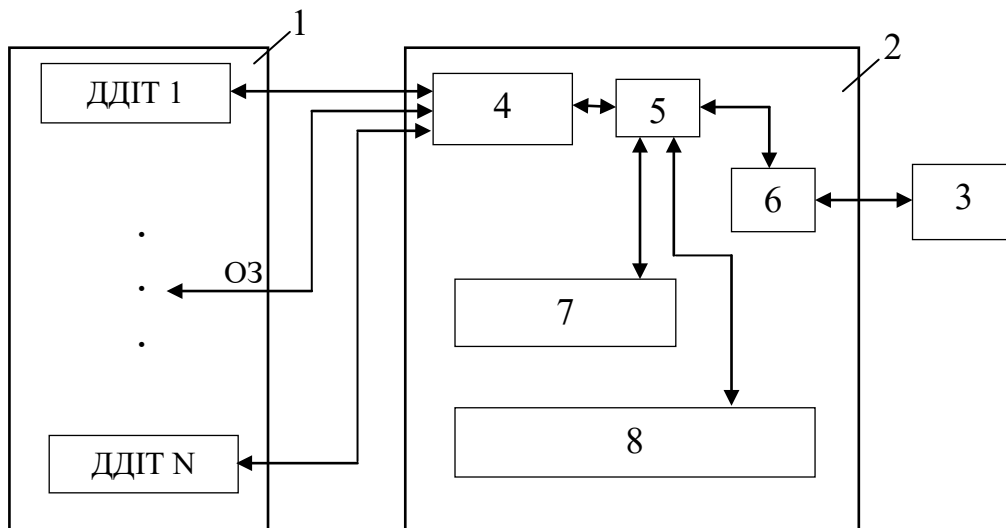


Рис. 1.30. Автономний комплекс досліджень пошкодженості конструкцій: 1 – досліджувана конструкція; 2 – пристрій зняття даних; 3 – ПК; 4 – сенсорний блок; 5 – мікропроцесорний модуль; 6,7,8 – модулі зв'язку, пам'яті, візуалізації

Пропонований автономний комплекс дослідження довговічності конструкцій 1 містить переносний пристрій для зняття даних 2, що має оптичний зв'язок з ДДІТ. Він передає інформацію на ПК – 3. Переносний пристрій зняття даних містить сенсорний блок 4, в якості якого може бути використана, наприклад матриця цифрового фотоапарата, а також блок керування 5 (мікропроцесорний модуль), модулі зв'язку, пам'яті, візуалізації 6, 7, 8 відповідно.

Слід зазначити, що модуль зв'язку може бути як провідним, так і безпроводним (наприклад Wi-Fi приймач-передавач). Модуль 8 може бути виконаний у вигляді рідкокристалічного дисплею.

Розглянута система дозволяє забезпечити зчитування даних з ДДІТ та можливість візуального контролю одержаних результатів. Підвищення точності роботи системи досягнуто внаслідок забезпечення необхідної інтенсивності й рівномірності освітлення поверхні.

1.4. Автоматизований аналіз морфології поверхні руйнування

У працях Ель Содані запропоновано класифікацію поверхонь руйнування [93]. Він сформулював концепцію утворення зламу як формування верхньої та нижньої поверхонь руйнування, впадини яких з одного боку відповідають виступам з іншого. Таке визначення дозволило запропонувати класифікацію можливих механізмів руйнування:

- ідеально плоска поверхня руйнування – передбачає контакт у всіх точках дотику за умови співставлення частин зруйнованого зразка;
- номінально плоска – поверхні руйнування є плоскими одна відносно одної на окремих ділянках зразка;
- поверхня руйнування випадкової кривизни, коли поверхня руйнування сформована у довільному напрямку;
- сходоподібна поверхня руйнування є типовою для крихкого руйнування;
- зигзагоподібна поверхня руйнування, притаманна випадкам, коли тріщина поширюється в матеріалі за складного напруженого стану в різних напрямках;
- комбінована поверхня руйнування, яка є поєднанням описаних вище типів.

Відомі праці [94, 95], в яких співставляли кількість включень в матеріалах із параметрами ямок в'язкого відриву. Досліджували тонкі фольги та репліки поверхонь руйнування з вибіркою не менше 100 включень та ямок. Середній розмір ямки відриву визначали як

$$\bar{d} = \left(\frac{A}{N} \right)^{1/2}, \quad (1.22)$$

де A – площа зображення; N – кількість ямок відриву.

Слід зауважити, що обчислена за поданим вище підходом відстань між включеннями для плоскої поверхні (фольги) може дещо відрізнятись від їх дійсної відстані в об'ємі. Зрозуміло, що хоча руйнування не відбувається в одній площині в одному шарі включень, проте цей параметр буде коректним для малих площ аналізу зображень.

В літературі описано, що під час статичного розтягу відбувається подовження пор. Проте можливе підростання пор перпендикулярно до напрямку прикладання сили, зумовлене їх взаємодією. Запропоновано класифікацію підростання пор та її взаємозв'язок з формою ямок відриву:

- профіль пори вказує на невелике відношення параметрів "глибина – ширина", яке становить $1/3 \dots 1/5$. Це співвідношення визначається значенням s/d . Воно вказує на механізм руйнування – внаслідок коалесценції або квазістатичний розрив матеріалу між порами;
- якщо пори підростають переважно у напрямку розтягу, то включення є непомітними на дні ямок, оскільки початкова форма пор буде дуже спотвореною й помітити включення вкрай важко. Якщо навпаки, то включення будуть майже в кожній ямці;
- іноді на краях твердих включень спостерігали початкові пори. Вони можуть зростати в напрямку прикладання сили до початку коалесценції. За таких обставин ямки мають додаткові поверхні.

Відома низка співвідношень між металографічними та фрактографічними параметрами. Зокрема, можна визначити "мікрорельєф" поверхні руйнування на основі урахування параметрів ямок в'язкого руйнування. При цьому припускають, що злам утворено внаслідок коалесценції мікропор (рис. 1.31), форма яких визначається співвідношенням [96, 97]

$$M \equiv h/W, \quad (1.23)$$

де h , W – геометричні параметри ямок.

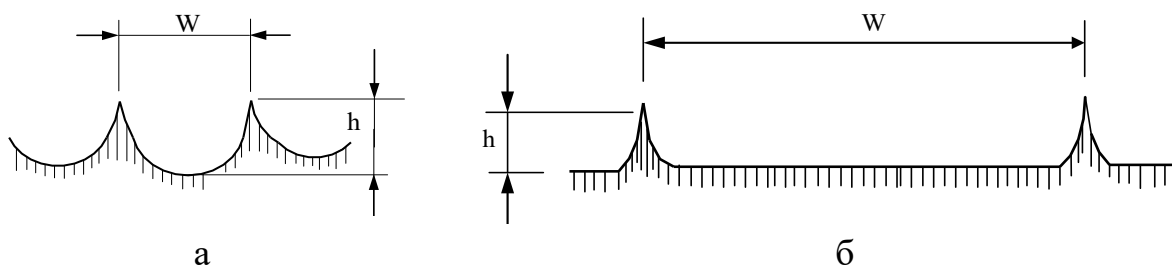


Рис. 1.31. Схема ямкового рельєфу поверхні в'язкого руйнування – а та крихкого руйнування – б

При цьому ямки характеризують співвідношенням [98]

$$h/d = \left(\frac{M^2}{3f} \right)^{1/3}, \quad (1.24)$$

де h – глибина ямки; M – стереоскопічний параметр; f – аналізований об'єм.

За умов, коли пори в матеріалі подовжуються, визначається локальна пластичність

$$\varepsilon_f \cong \ln \left(\frac{h}{d} \right) \cong \frac{1}{3} \ln \left(\frac{M^2}{3f} \right). \quad (1.25)$$

Зниження значень параметра M до 0 свідчить про зниження висоти стінок між ямками та наближенням поверхні до площини. Коли M наближається до 1, це вказує на розвинені межі між ямками (рис. 1.32).

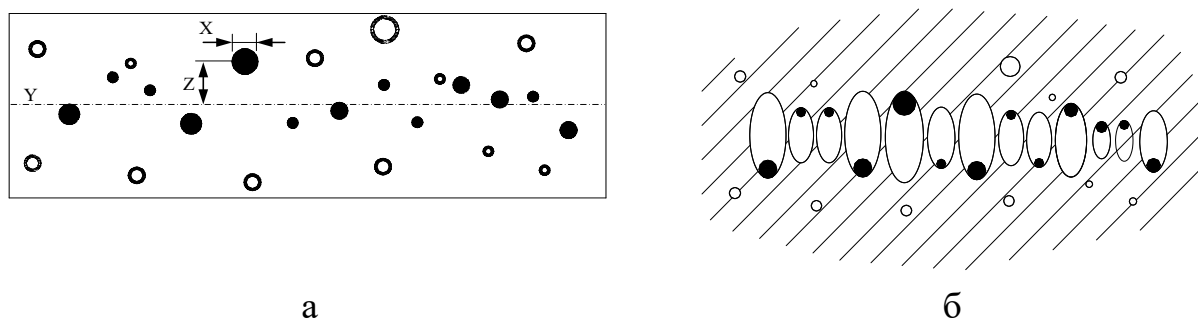


Рис. 1.32. Формування ямок як випадковий процес – а, та участь включень у формуванні ямок – б

На рис. 1.33 зображено схему визначення усередненої глибини ямок відриву, за умови, коли дрібні ямки декорують стінки великих ямок [99]

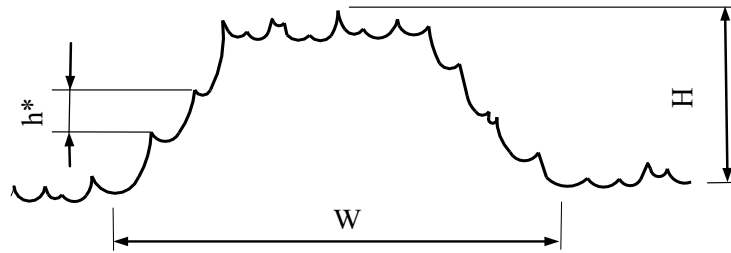


Рис. 1.33. Схема обчислення усередненої глибини ямок в'язкого відриву

Середній розмір ямки можна обчислити за формулою

$$\bar{h} = \frac{1}{2n} \sum_{j=0}^m h^*, \quad (1.26)$$

де h^* – розмір окремої ямки з аналізованої вибірки.

За даними експериментальних досліджень та моделювання молекулярної динаміки в алюмінієвому сплаві було запропоновано нову концепцію пластичного деформування за допомогою синхронізованого обертання наношарів. Перед початком виникнення поворотів на вищому масштабному рівні, деформація виникає в локальній області, а потім поширюється вздовж площини ковзання [100]. Відомо, що існує кореляція між розміром та глибиною ямки в'язкого відриву. Відомий підхід опису форми ямок як половинки еліпсоїда (рис. 1.34).

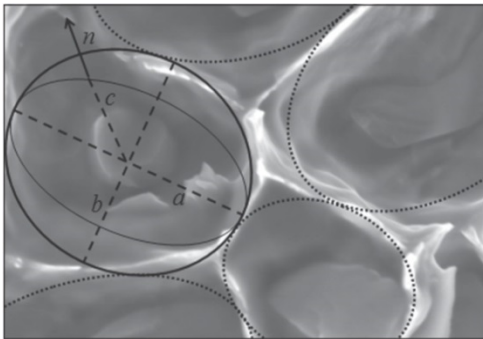


Рис. 1.34. Схематичний опис еліпсоїдами елементів поверхні руйнування Al-Si сплаву, де a , b , c – головні осі, n – вектор нормалі до поверхні [101]

При цьому площу такої ямки можна визначити за формулою [101]

$$S_i = \frac{1}{2} 2\pi a c \left(\frac{a}{c} - \frac{c}{\sqrt{a^2 - c^2}} \ln \frac{a - \sqrt{a^2 - c^2}}{c} \right), \quad c < a, \quad (1.27)$$

де a , c – геометричні параметри ямки (рис. 1.34).

Поверхню руйнування зразка обчислювали як суму поверхонь кожної елементарної ямки

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (1.28)$$

Проте слід зазначити, що ямки не завжди мають еліптичну форму, тому метод добре працює для сплавів з округлими включеннями. Перевірити, чи дане

припущення виконано для аналізованого зображення можна за параметром шорсткості поверхні R_S , обчисленим як відношення дійсної площі поверхні S_t до площі проекції.

Подібний підхід можливий також за стереологічним аналізом [102]

$$R_S = \left(\frac{4}{\pi}\right) R_L \quad (1.29)$$

де R_L – параметр нерівності, який є відношенням довжини дійсного профілю поверхні L_t до довжини його проекції L' .

Відомі праці, в яких розмір ямки визначався величиною K_{IC} [102]. Припускаючи, що ямки мають еліпсоїдну форму, їх об'єм можна записати як

$$V = \frac{4}{3} \pi b^2 a, \quad (1.30)$$

де a – більша вісь; b – менша вісь.

Тоді площу еліпсоїда S можна визначити за формулою

$$S = 2\pi b^2 + 2\pi \frac{ab}{e} \sin^{-1} e, \quad (1.31)$$

де $e = (1 - (b/a)^2)^{1/2}$ – ексцентриситет.

У кількісній фрактографії середню довжину перетину тривимірних тіл називають середньою просторовою хордою L_3 . Оскільки вона пов'язана з площею та об'ємом поверхні тіла, для її обчислення використовують рівняння

$$\bar{L}_3 = 4 \frac{V}{S}, \quad (1.32)$$

де \bar{L}_3 – середнє значення L_3 , або середнє значення розміру ямки.

Відомі формули, які пов'язують розмір ямки з статичною в'язкістю руйнування матеріалу, зокрема:

$$K_{IC} = En(2\pi\bar{L}_3)^{1/2}, \quad (1.33)$$

де E – модуль пружності; n – коефіцієнт деформаційного зміцнення.

Фізичний зміст цієї формули полягає в тому, що матеріал руйнується за умови досягнення критичної деформації, більшої за структурний елемент матеріалу. В записаному вище випадку $\bar{L}_3 \sim s$ – розміру зони процесу.

Крім того, відоме співвідношення Schwalbe та Backfisch [103, 104]

$$K_{IC} = \frac{\sigma_{0.2}}{1 - 2\nu} \left[\pi(1 + n)\bar{L}_3 \left(\frac{E\varepsilon_f}{\sigma_{0.2}} \right)^{1+n} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.34)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Ці два рівняння були використані для обчислення K_{IC} як функції властивостей матеріалу за статичного розтягу та мікроструктурного параметра L_3 . Цей параметр у моделі Крафта спочатку був введений як розмір робочої зони dt , проте її розмір не завжди відповідав розміру ямки відриву.

У дослідженні [105] запропоновано підхід до моделювання системи ямок на поверхні розриву сплавів Al-Si з використанням зваженої мозаїки Вороного.

Модель застосовують до металографічних зображень евтектичної фази для симуляції зовнішнього вигляду поверхні. Запропонований підхід дозволяє визначити геометричні особливості змодельованої поверхні, такі як густина ямок, розподіл площі та еквівалентного діаметра, а також топографічні ознаки, такі як глибина ямок, площа поверхні та її нерівність, за допомогою геометричних наближень, емпіричних і аналітичних залежностей. Автори демонструють застосування свого підходу на різних сплавах Al-Si, використовуючи мозаїчні методи. Програма для створення вагової діаграми Вороного реалізована як Java-плагін для інтерфейсу Fiji. Для виділення країв ямок використали порогування початкового зображення, отриманого з електронного скануючого мікроскопу (рис. 1.35,а). Після цього застосовували морфологічне перетворення дилації, яке дозволило отримати мережу замкнутих країв, що формують окремі комірки-ямки. Потім для системи країв обчислили евклідові відстані. На основі отриманої карти відстаней через застосування алгоритму водорозділу отримали кінцеве розбиття зображення на окремі ямки (рис. 1.35,б).

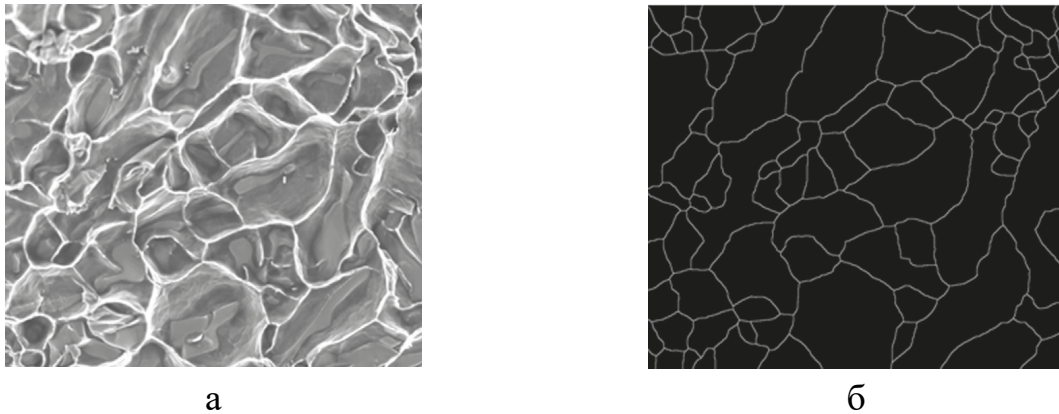


Рис. 1.35. Фрактографічне зображення сплаву AlSi12 (а) та результат виявлення країв ямок (б)

У роботі [106] досліджено вплив структури зерна та механізму деформації на поведінку руйнування нанозернистої аустенітної сталі. Для аналізу використано зображення, отримане за допомогою електронного скануючого мікроскопа (рис. 1.36,а,в). Зображення обробляли за допомогою комерційного програмного пакета. Розраховували частоту ямок, їх густину, середній розмір та інші параметри.

Автори [107] досліджували поверхні руйнування порошкових матеріалів. Поверхні зламу, що утворилися за руйнування порошкових матеріалів, відрізняються від поверхонь деталей, виготовлених іншими методами обробки металів. Хоча характеристики областей розриву однакові, ямки в'язкого відриву, краї їх розділу та інші особливості внутрішньої поверхні ускладнюють фрактографічний аналіз. Приклад такої поверхні наведено на рис. 1.37. Вимірювали параметри профілів відриву та визначали кутові розподіли профільних сегментів. На їх основі розраховували площу вузької поверхні тріщин.

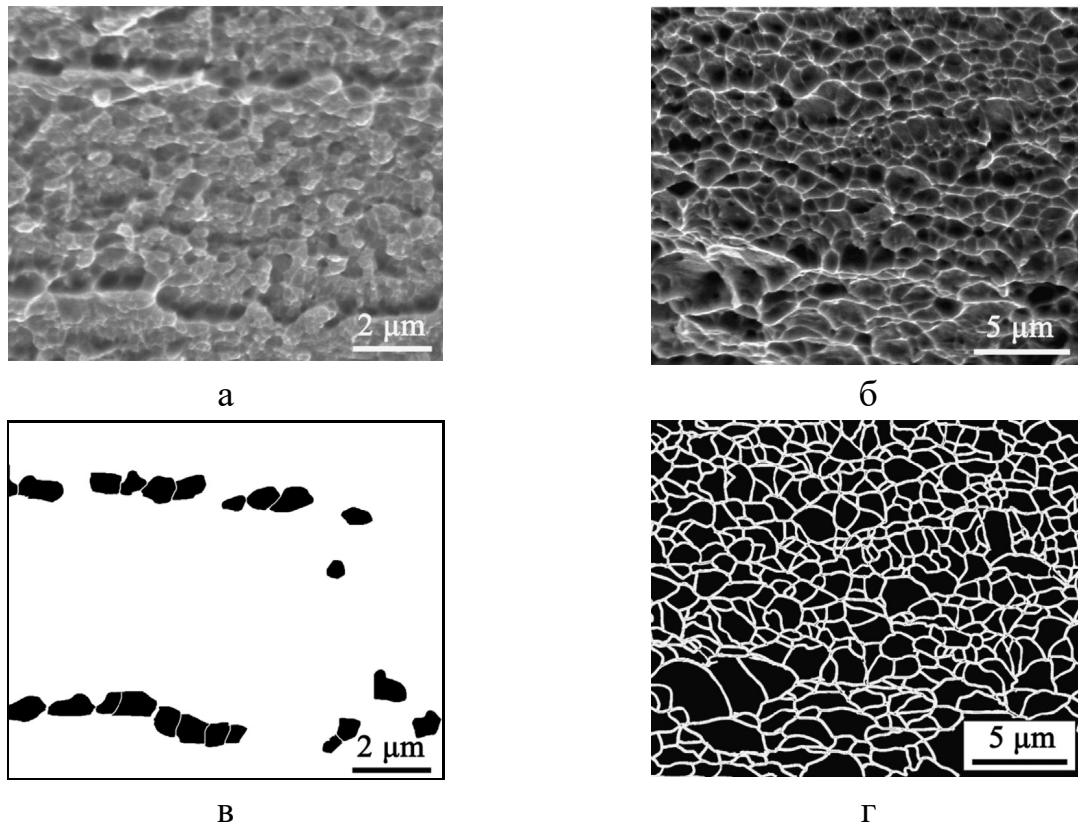


Рис. 1.36. Фрактограми, що ілюструють поверхню руйнування зразків сталі FG (а) та CG (б) зруйнованих за статичного навантажування, і результат сегментації зображень, який використано для аналізу (в,г)

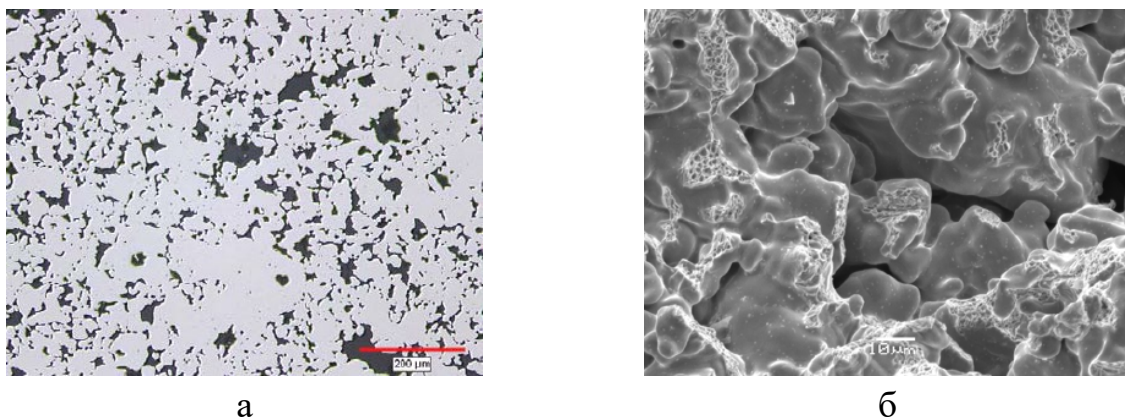


Рис. 1.37. Зображення поверхні зразка FC-0205 TRS з оптичного (а) та електронного (б) мікроскопа

Чавла зі співавторами [108] продовжили дослідження пористості сталей, сформованих методом порошкової металургії (МПМ). Основна увага авторів зосереджена на тривимірній візуалізації пористості, що важливо для кращого розуміння мікроструктури та властивостей МПМ - сталей. Один з методів використаного 3D - моделювання полягав у послідовному зішліфовуванні досліджуваної поверхні, її фотографуванні та наступному об'ємному моделюванні за допомогою методу скінченних елементів.

Коменда та інші [109] розробили інформаційно-вимірювальну систему – класифікатор зображень, призначений для аналізу зображень поверхонь

руйнування. У роботі класифікатора використано засоби машинного навчання за допомогою вчителя. Процедура навчання передбачає ручне позначення частини зображення та присвоєння їй певному класу об'єкта. Різні фази в металографічній структурі можуть бути позначені як різні класи. Одночасно можна розглянути до шістнадцяти класів різних морфологій. Важливо, що оператор повинен спочатку правильно визначити й позначити регіони різних класів об'єктів. Для процедури навчання використано лише одне зображення. Потім система статистично аналізує виділені регіони, щоб отримати класифікаційні критерії для кожного класу. Ці критерії застосовують для всіх аналізованих зразків. При цьому обидва зображення – навчальне та досліджуване, повинні бути отримані з однаковою роздільною здатністю, збільшенням та освітленням. Кожне початкове зображення доповнюють принаймні одним додатковим зображенням того самого поля зору, яке містить іншу інформацію: наприклад, частоту або місцеву орієнтацію кожного пікселя. Це дозволяє системі створювати статистичну інформацію, унікальну для кожного класу. Класифікатор зображення використали для аналізу поверхонь агломераційних сталей та зразків низьколегованих сталей (рис. 1.38).

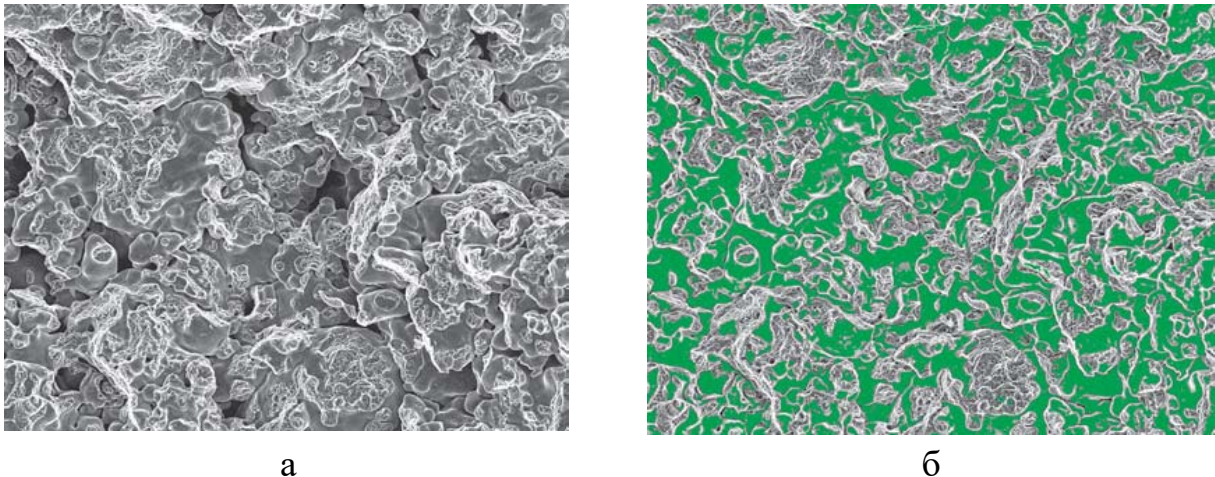


Рис. 1.38. Фрактограма сплаву Astaloy Mo7.1 (а) та результат автоматичного розпізнавання неспечених ділянок

Коледник та інші [110] аналізували зображення, отримані за допомогою електронного скануючого мікроскопа, з метою кількісного оцінювання шорсткості поверхні. Для автоматичного аналізу використали парні стереозображення, отримані при повороті зразка на 10° . Ключовою частиною системи є відповідний алгоритм, який знаходить гомологічні точки на двох зображеннях. Система генерує цифрову модель висот зображеної області, а також оцінює параметри профілю та шорсткості поверхні, розраховує її фрактальну розмірність. Пропонований метод апробовано на алюмінієвому сплаві 6061. Виявлено додаткові можливості автоматичної системи аналізу поверхні зламу, зокрема визначення локальних параметрів в'язкого руйнування, таких, як критичне відхилення вершини тріщини та кут відкриття тріщини. Таким чином, параметри в'язкого руйнування можна визначити локально, що важливо для вивчення властивостей зламів неоднорідних матеріалів та для аналізу граничних умов однорідних матеріалів.

Для фрактографічної класифікації металічних поверхонь руйнування автори [111] використовують вимірювальну систему на основі технології штучного зору. Аналіз зображень (рис. 1.39,а) виконано, застосовуючи дескриптори виявлення ознак Хараліка, енергетичні маски та фрактальну розмірність. Порівняно результати застосування класифікаторів штучних нейронних мереж та методу опорних векторів та виявлено, що кращі результати забезпечують нейромережі. Як функцію активації нейрона використано сигмоїдну функцію. Для характеристики текстури поверхні зразка розраховували низку параметрів: другий кутовий момент, контраст, кореляцію та ентропію. Розроблене авторами програмне забезпечення використовує бібліотеку OpenCV. У роботі [112] автори крім вже вказаної обробки зображення проводять також тривимірний аналіз поверхні. Для цього за допомогою лазерного скануючого мікроскопа отримано стереопару і на її основі сформовано тривимірну модель (рис. 1.39,б).

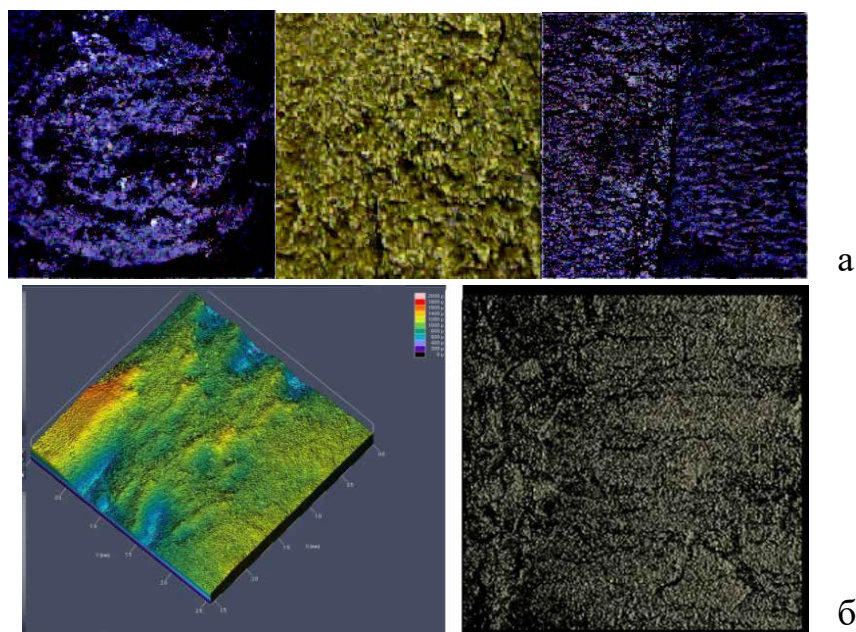


Рис. 1.39. Види зламів, проаналізованих у роботі [111] (а) та тривимірна реконструкція поверхні (б)

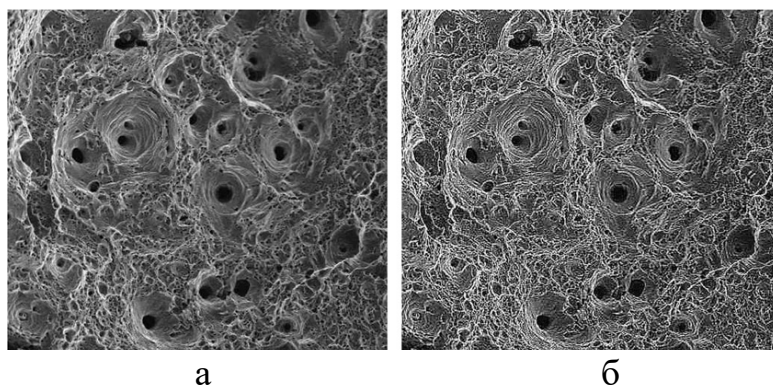


Рис. 1.40. Фрактограма сталі AISI 304LN, отримана з мікроскопа (а) та після попередньої обробки (б)

Методи аналізу текстури, що містять тривимірний фрактальний аналіз з використанням матриці суміжності сірих рівнів (grey level co-occurrence matrix, GLCM), були застосовані до фрактограм розтягу аустенітної нержавіючої сталі

AISI 304LN для автоматичної характеристики поверхонь зламів [113]. До початкового зображення застосовували пом'якшуючий фільтр та підсилення країв ямок (рис. 1.40).

Після цього розраховано матрицю суміжності сірих рівнів $GLCM$, кожен елемент якої дорівнював

$$GLCM(i, j)_{s, \theta} = |\{(a, b), (c, d) | I(a, b) = i, I(c, d) = j\}|, \quad (1.35)$$

де $(a, b), (c, d) \in M \times N$; (a, b) і (c, d) представляють позиції двох пікселів зображення; $M \times N$ – розмір зображення; $I(a, b)$ та $I(c, d)$ – інтенсивність цих двох пікселів. Використавши матрицю (1.35), розраховано дескриптори текстури, її контраст і гомогенність.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

У цьому розділі описано методи, використані для вивчення механізмів деформування та руйнування матеріалів, які аналізували у наступних розділах даної монографії. Виконання даної роботи передбачало проведення експериментальних досліджень і отримання великого масиву даних стосовно параметрів навантаження, деформаційних та силових характеристик досліджуваних матеріалів під час проведення експерименту. Для цього потрібно було використати відповідні методики досліджень, які б забезпечували автоматичну реєстрацію вимірювальних величин із подальшою їх обробкою.

Дефектометрія параметрів мережі тріщин є першим кроком до розуміння стану матеріалу з такими пошкодженнями [1,2]. Для комплексного аналізу місця методів цифрової діагностики доцільно розглянути відомі [3, 4] підходи в єдиній узагальненій системі діагностування технічного стану металургійного обладнання, які подані у вигляді структурної схеми (рис. 2.1). На ній зазначено та узагальнено основні напрямки розвитку технічного діагностування металургійного обладнання й уточнено зміст окремих понять стосовно аналізованої проблеми.

Технічне діагностування спрямоване на вивчення закономірностей деградації матеріалів, проявів пошкоджень конструкції, а також принципів та методів їх виявлення для розроблення науково обґрунтованих підходів до оцінювання їх технічного стану впродовж експлуатаційного періоду та прогнозування залишкового ресурсу.

Оцінювання деградації матеріалу (ОДМ) – виявлення структурних змін на мікро- (дислокаційна структура, розтріскування включень, субзерна, зерна), мезо- (конгломерати зерен, зернограничне проковзування, гофрування поверхні) та макро- (зміна механічних властивостей) рівнях.

Оцінювання технічного стану конструкцій (ОТСК) – виявлення фізико-механічних пошкоджень, дефектів та відхилень технічних параметрів конструкції від початкового стану та чисельне порівняння із граничними (критичними) значеннями цих пошкоджень (відхилень), розробка рекомендацій для підвищення тримкості та довговічності конструкції.

Моделювання і прогнозування напрацювання та граничного стану конструкції (МПНГС) – визначення із використанням методів математичної статистики ризику непрогнозованого руйнування конструкції з урахуванням пошкоджень та деградації структури, а також можливості та тривалості подальшої експлуатації.

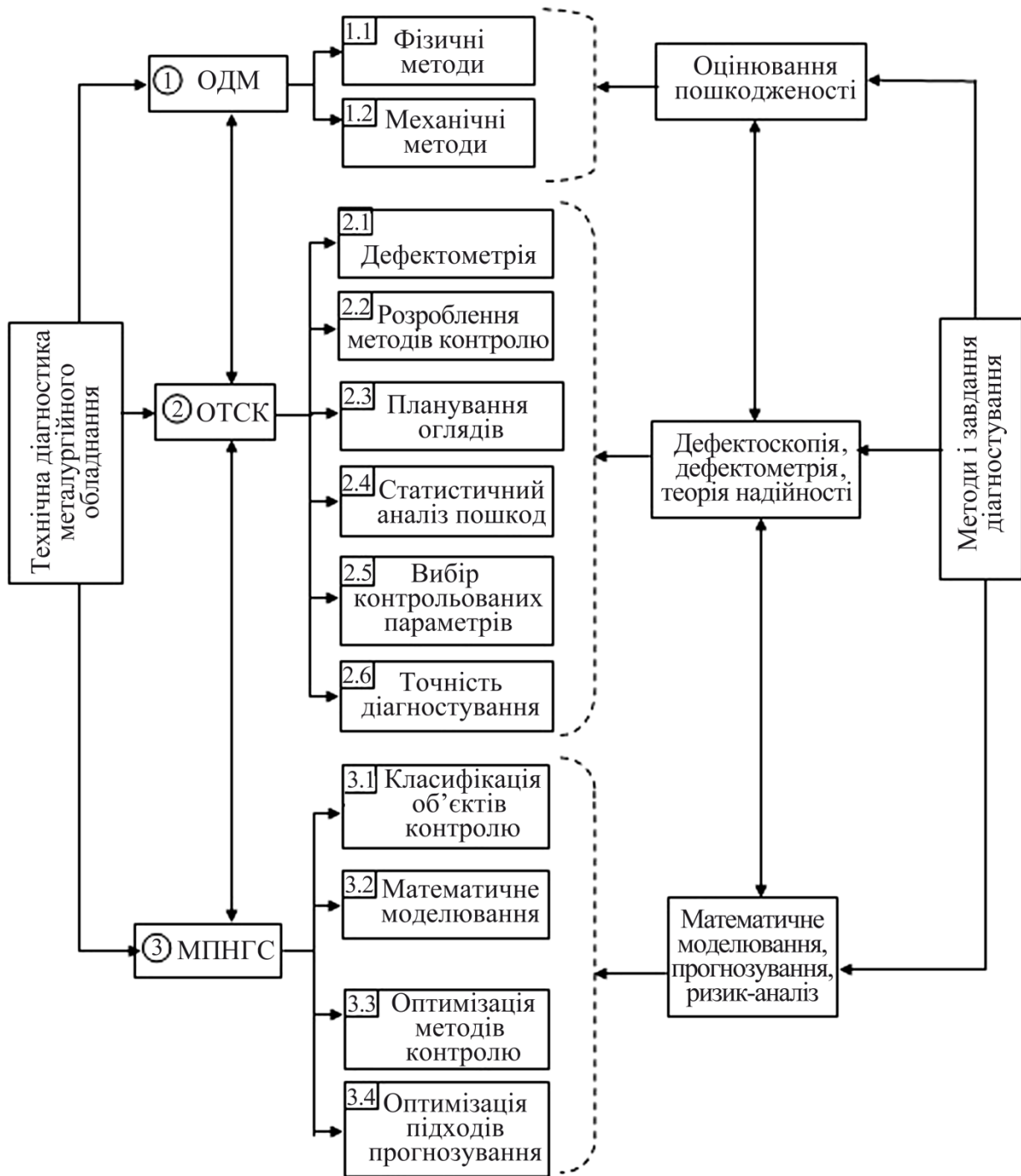


Рис. 2.1. Структурна схема діагностування технічного стану обладнання із зазначенням використаних наукових підходів

2.1. Зразки для деформування матеріалу з множинними дефектами

Зішліфовування та аналіз тріщин. Методи цифрового діагностування дозволяють визначати кількісні ознаки даних процесів залежно від інтенсивності деформування, формування розломів і їх зміщення [5]. Деформаційна взаємодія зон розорієнтованих розломів, сформованих в результаті коалесценції тріщиноподібних дефектів, зумовлює їх ротаційне зміщення. Інтенсифікація деформаційних зміщень є додатковою діагностичною ознакою локалізації

структури множинних дефектів і переходу процесу руйнування на вищий масштабний рівень [6,7].

Досліджували поверхню суцільнокованого ролика МБЛЗ діаметром 320 мм, знятого з експлуатації на МК ім. Ілліча після 4500 плавок через розтріскування робочої поверхні. Аналізували орієнтацію та форму мережі тріщин "в плані", тобто форму поверхневих тріщин та їх комплексів, що утворюються на поверхні ролика. Для виявлення основних закономірностей множинного розтріскування поверхні ролика МБЛЗ використовували автоматизований аналіз цифрових фотозображень [8].

Поверхню ролика досліджували після кожного пошарового зашліфування темплету з кроком 0,4 мм, (рис. 2.2). Зовнішній вигляд мережі тріщин розпалу фіксували фотографуванням досліджуваної поверхні після попереднього полірування.

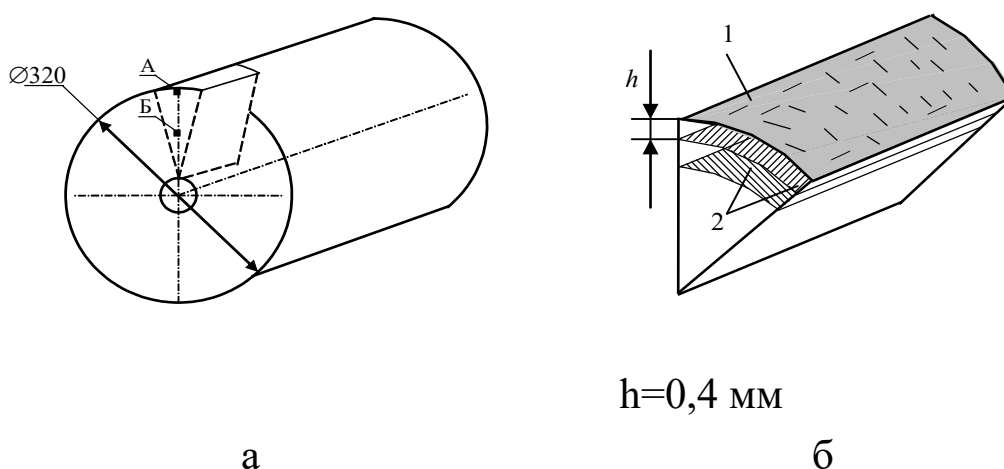


Рис. 2.2. Схема вирізання темплету з фрагменту ролика МБЛЗ – (а) та пошарове зішліфування шарів матеріалу (б). Тут А – приповерхнева зона; Б – зона непошкодженого матеріалу

Багатоградацийні зображення мережі тріщин, виявлені на поверхні ролика МБЛЗ, аналізували згідно з розробленим алгоритмом [9]. Такий підхід дозволив достовірно ідентифікувати структурні параметри (кількість і орієнтацію тріщин, відносну частку поверхневого розтріскування), чутливі до умов термомеханічного навантажування та напружено-деформованого стану тіла ролика. Одержані результати задовільно узгоджуються з даними макроаналізу поверхні ролика [10].

Деформування матеріалу з множинними тріщинами термовтоми. Залишається проблемою необхідність урахування взаємодії між собою зварних швів та множинних дефектів, а також інтерпретація нелінійних деформаційних явищ. Комплексний аналіз всіх цих результатів дозволяє відтворити цілісну картину деформаційної поведінки матеріалу і забезпечити їх коректний аналіз і опис закономірностей руйнування [11] в рамках ієрархічного підходу.

Для поглиблення розуміння будови і активації розломної кінетики тіла з множинними дефектами розглянуто три основних чинника:

- геометрію і просторове розташування зварних швів;
- процес розкриття-закриття множинних дефектів;
- поворот фрагментів неушкодженого матеріалу навколо своєї осі.

Використання такого підходу дозволяє пояснити наявність деформацій зсуву та розтягу і їх активацію в околі перетину кількох дефектів.

Система тріщиноподібних дефектів визначає деформаційні властивості матеріалу. При цьому важливими є довжина і форма тріщин, а також їх взаємна орієнтація. Наявність зварних швів перерозподіляє навантаження по поверхні зразка, знижуючи інтенсивність деформування прилеглих тріщин.

Характерною особливістю такого матеріалу є виникнення локальних ділянок, навантажених стиском або за схемою «стиск + зсув». Така нетипова поведінка є результатом геометричних особливостей блоків матеріалу і їх орієнтацією до осі навантажування. Система "матеріал – множинні дефекти" є зручним засобом встановлення основних закономірностей поведінки механічних дисипативних структур. Її вивчення забезпечує опис еволюції структури тріщин, їх множинного розкриття та морфологічних переходів (точок біфуркації) між ними. Всі ці процеси відображаються на оптико-цифровому зображенні і можуть бути ідентифіковані за відповідними параметрами оцінювання.

Використовували призматичні фрагменти роликів зі сталі 25Х1М1Ф, зняті з експлуатації на Маріупольському металургійному комбінаті ім. Ілліча та металургійному комбінаті "Азовсталь", вирізані в поздовжньому до осі ролика напрямку (рис. 2.2, 2.3). Використовували призматичні зразки шириною $b = 40$ мм і товщиною $t = 10$ мм; висота темплету становила $L = 50$ мм. Випробування проводили при одновісному розтязі на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100. Для вимірювання осьової деформації зразків використовували метод тензометрії з точністю вимірювання деформацій до 0,001 мм. Також проводили цифрову фотозйомку поверхні навантаженого зразка і автоматичний аналіз геометрії розтріскування. Вплив розтріскування на процеси деформування оцінювали за зміною відносної площі магістральної тріщини і множинних дефектів протягом навантажування. Визначали відносну площу розтріскування як відношення суми площ тріщин до площі досліджуваної ділянки [12]:

$$a_r = \frac{\sum_{i=0}^n f_i}{S_{surf}}, \quad (2.1)$$

де $\sum_{i=0}^n f_i$ – сума площ тріщин термовтоми, ідентифікованих на аналізованому зображенні, мм²; S_{surf} – площа досліджуваної ділянки.

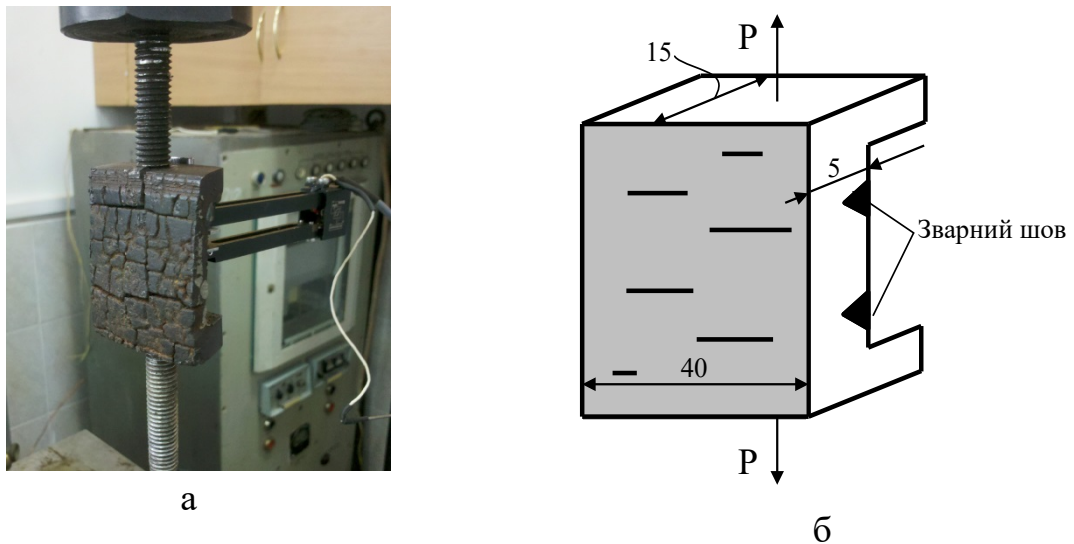


Рис. 2.3. Схема дослідження зразка з сіткою тріщин термовтоми

Для поглиблення розуміння будови й активації розломної кінетики тіла з множинними дефектами розглянуто три основних чинники:

- геометрію і просторове розташування зварних швів;
- процес розкриття-закриття множинних дефектів;
- поворот фрагментів неушкодженого матеріалу навколо своєї осі.

На рис. 2.4 показано діаграму деформування матеріалу при збільшенні зусилля навантажування. Слід відзначити значну довжину лінійної ділянки. Це свідчить, що матеріал деформується практично як суцільне середовище, а вплив розпоршених пошкоджень проявляється лише у збільшенні піддатливості зразка. Перехід процесу деформування на вищий рівень супроводжується активацією та сумісним розкриттям кількох дефектів, подальше розкриття групи дефектів спричиняє порушення суцільності (руйнування) матеріалу.

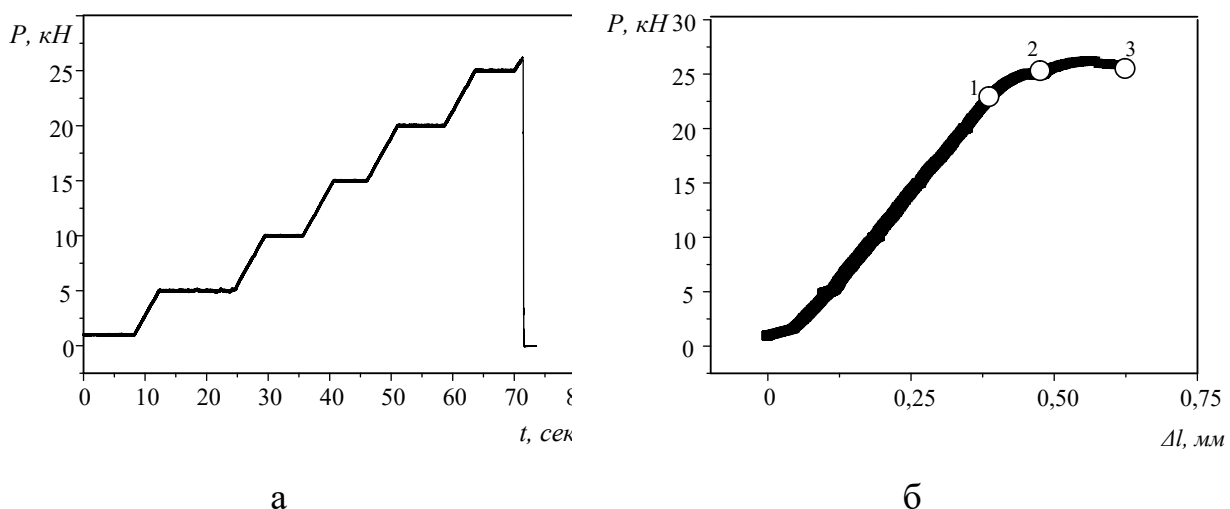


Рис. 2.4. Криві навантажування (а) та деформування матеріалу із множинними дефектами (б)

Аналіз фотозображень поверхні темплету під час навантажування дозволив встановити узагальнену картину розвитку деформаційного процесу. Показано, що матеріал хоча й має низку "великих" та малих дефектів, проте поводить себе

як суцільне середовище. Це може бути викликано наявністю двох зварних швів, які є макроконцентраторами і знижують деформаційний потенціал матеріалу. Отже "оточення" ділянки матеріалу з дефектами – зварними швами, спричиняє "усереднення" деформацій.

Як критерії структурної перебудови матеріалу використано поздовжню ε_{xx} , поперечну ε_{yy} , зсувну ε_{xy} та поворотну компоненти тензора дисторсії $\beta_{ij} = \nabla r(x, y)$, та інтенсивність деформації зсуву. Їх визначали методом чисельного диференціювання векторів зміщень $r(x, y)$ за координатами x та y в межах аналізованої ділянки поверхні. Поверхню руйнування зразків аналізували на сканівному мікроскопі РЕМ 106И.

Деформацію матеріалу внаслідок пластичного течіння матриці і розкриття множинних дефектів описували формулою:

$$\varepsilon = \varepsilon^{int} + \sum_{i=1}^p \frac{\delta_i}{L}, \quad (2.2)$$

де ε^{int} – деформація острівців матеріалу, розташованих між тріщинами; δ_i – розкриття i – ї тріщини; p – кількість тріщин в межах аналізованої ділянки L .

Випробування проводили за статичного розтягу, за якого напружено-деформований стан матеріалу зразка є подібним такому у металі ролика машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при експлуатаційному навантаженні. Для вивчення специфіки їх деформаційної поведінки використовували оптико-телевізійну вимірну систему TOMSC [13]. Механізми деформування та руйнування матеріалу із множинними дефектами описано за кількома підходами. Серед них оптико-цифровий аналіз поверхні, метод тензометрії алгоритм оцінювання просторового положення множинних дефектів. Аналіз поверхні руйнування зразків виконано за методом фрактографічного аналізу.

Структуру матеріалу ролика аналізували на металографічному мікроскопі "Axiovert 40 MAT" фірми "Carl Zeiss" (Німеччина), який дає змогу визначати мікро- і макроструктуру металу, розмір зерна та аналізувати неметалеві включення.

2.2. Дослідження рельєфоутворення на поверхні теплостійкої сталі після лазерного ударно-імпульсного оброблення

Модифікування поверхні лазером. Аналізували рельєфоутворення на поверхні сталі 15X13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки та механізми статичного руйнування модифікованого матеріалу. Поверхню зразків після обробки досліджували за допомогою інтерференційного профілометра "Мікрон-альфа" [14,15].

Поверхню плоских зразків (10×5×3 мм) зі сталі 15X13МФ обробляли на повітрі, у воді та чорнилі лазером ГОС-1001 з LiF затвором в імпульсному режимі модульованої добротності з коротким імпульсом випромінювання (зазвичай становить десятки наносекунд). Діапазон зміни густини потоку випромінювання $5 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^9$ Вт/см², а діаметр зони оброблення – 3 мм. Прозоре конденсоване середовище обмежило розширення плазми й підвищило амплітуду

імпульсу тиску $P = 2$ ГПа [16]. Рельєф поверхонь оброблених зразків досліджували й фіксували на інтерференційному профілометрі "Мікрон-альфа", досліджували поверхню за допомогою сканівного мікроскопа РЕМ-106И.

Оцінювання кінетики розвитку деформацій на поверхні матеріалу показали, що цьому процесу притаманна локалізація, а її форми залежать від умов ударно-хвильової обробки.

Дослідження нанопокриття. Іонне наноструктурування поверхневого шару зразків зі сталі 25Х1М1Ф проводили за допомогою вакуумно-дугового джерела металевих іонів на установці УВН-0,2 "Квант" [17]. Зразки обробляли за умови досягнення вакууму в камері $3 \cdot 10^{-3}$ Па потоком іонів цирконію з енергією 0,9 – 2,8 кеВ та густиною іонного струму 0,1 – 0,3 мА/см². Тривалість обробки від 5 до 20 хв. Тримач зі зразками закріплювали безпосередньо на предметному столику, що входив до схеми прискорення іонів. Іони прискорювались у динамічному сомоорганізованому приповерхневому просторі, який є подвійним електричним шаром, сформованим навколо поверхні зразка з від'ємним потенціалом [18]. Зразки зі сталі 25Х1М1Ф з нанесенням цирконієвим нанопокриттям навантажували циклічним розтягом на випробувальній машині СТМ-100, за частоти $f = 1$ Гц. $\sigma_{max} = 500$ МПа, $\sigma_{min} = 0,1\sigma_{max}$. Після руйнування зразків проводили фактографічний аналіз стану покриття за різних значень відносної деформації (рис. 2.5,а). Виявлення основних закономірностей формування геометричної структури множинного розтріскування цирконієвого нанопокриття (розмірів тріщин, їх кроку в межах аналізованої ділянки) використано підходи цифрової ідентифікації, рис. 2.5,б [19].

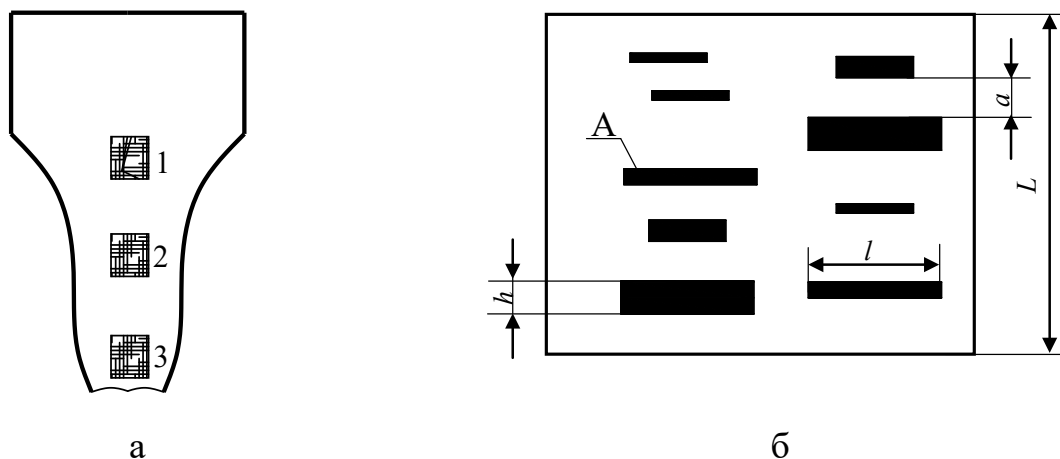


Рис. 2.5. Схема розташування деформованих ділянок (а) та вимірювання параметрів множинного розтріскування (б): n – товщина тріщин; a – відстань між фрагментами покриття; l – довжина тріщини; А – тріщина

Відносну деформацію аналізованих мікроділянок матеріалу визначали за формулою

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0}, \quad (2.3)$$

де l_0 , l_k – початкова та кінцева довжини аналізованої ділянки покриття відповідно.

Слід зазначити, що деформація поверхні визначається пластичним течінням основи та розкриттям множинних дефектів. Припустивши, що при деформації тіла в матеріалі з покриттям $\Delta L = l_k - l_0$ визначали різницю між кінцевим значенням аналізованої довжини l_k розтрісканого покриття та сумою значень зміщень δ_i розтрісканих фрагментів покриття на аналізованій довжині за формулою

$$l_0 = l_k - \sum_{i=1}^p \delta_i. \quad (2.4)$$

На основі аналізу фотозображень аналізували структурно-морфологічні дані тріщин у зонах локалізованого розтягу та зсуву. Визначали просторову орієнтацію елементів сітки тріщин, їх зв'язок з формуванням мезо- та макромасштабних розломних зон [21]. Аналізували топографію поверхні зразків з тріщинами на безконтактному 3D-профілометрі "Мікрон-альфа".

Використовували математичну модель циклічного випадкового процесу із зонною структурою, описану в роботі [22], якою може бути описаний процес множинного розтріскування. Застосовували статистичні методи оцінювання ймовірнісних характеристик такого випадкового процесу.

Дослідження сенсорів втоми. Методологічні засади оцінювання чутливості поверхневих шарів в матеріалі були використані при проектуванні сенсорів втоми для оцінювання накопичення структурних дефектів. При апробації сенсорів втоми враховувано вимоги [23-26]: а) режими випробувань були наближеними до умов навантажування авіаційних конструкцій; б) режими випробувань повинні забезпечувати визначення впливу параметрів циклу навантажування на формування і розвиток структурної пошкодженості поверхневих шарів металу при втомі з метою узагальнення отриманих даних для вирішення завдань прогнозування граничного стану металів за параметрами деформаційного рельєфу.

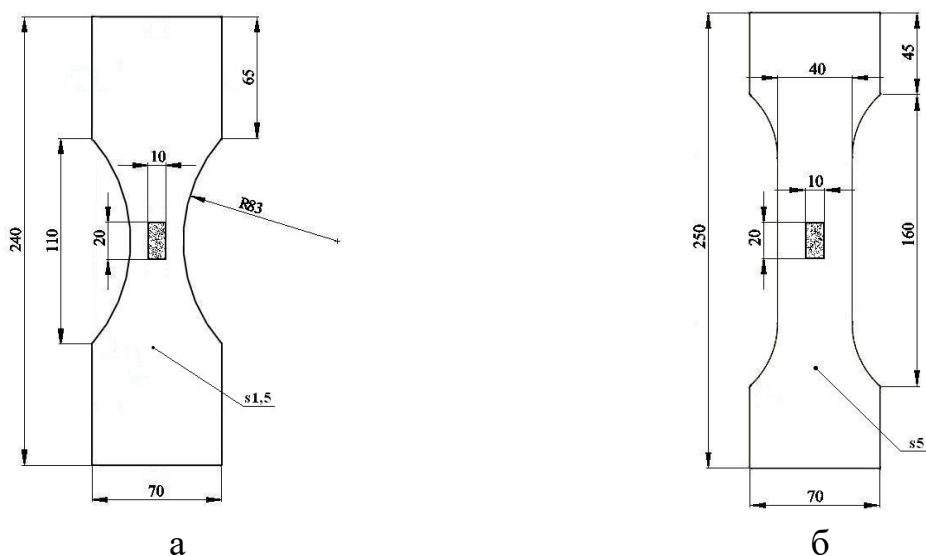


Рис. 2.6. Зразки з фольговими сенсорами втомного пошкодження: а) зразок, виготовлений з сплаву Д16АТ; б) зразок, виготовлений з сплаву 7075Т6 [23]

Зразки, на яких кріпилися зразки-свідки (рис. 2.6, 2.7) з ефектом підсилення деформації, виготовляли з плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ товщиною 5,0 мм і мали ті ж розміри, що й зразки сплаву 7075 Т6, представлені на рис. 2.3,б. Наявність плакування дозволяла відслідковувати еволюцію деформаційного рельєфу як на сенсорах, так і на зразках, які моделювали навантажений фрагмент лонжерона крила.

Базова версія зразка-свідка (сенсора втоми) з ефектом локального підсилення деформацій і напружень показана на рис. 2.7. Для первинного оперативного контролю стану поверхні з метою визначення моменту появи перших ознак деформаційного рельєфу, або досягнення критичного стану (формування втомної тріщини певної довжини), розроблено систему, яка складається із переносного оптичного мікроскопа (наближення $\times 24$), web-камери і портативного комп'ютера (рис. 2.8).

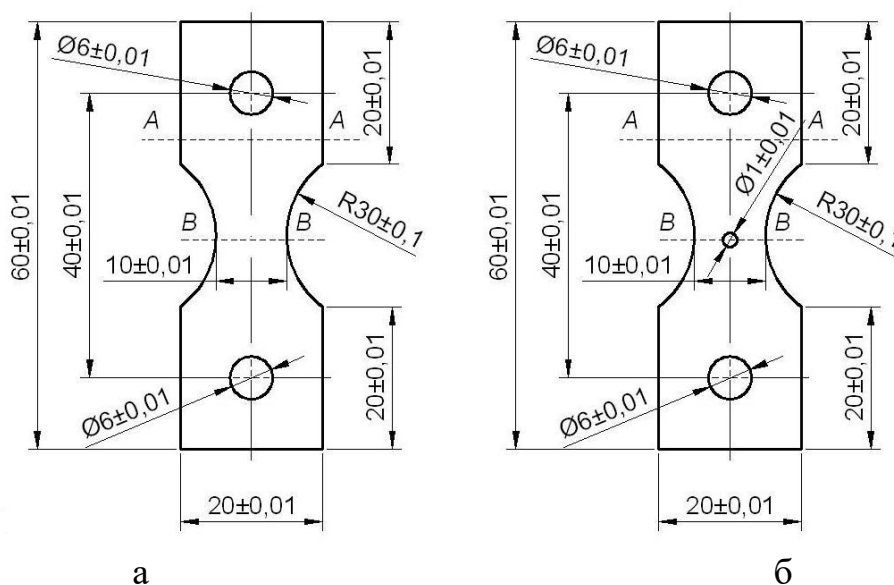


Рис. 2.7. Базова версія конструкції зразка-свідка втомного пошкодження з ефектом підсилення деформації: а) без додаткового концентратора напружень; б) з концентратором напружень у вигляді отвору [23]

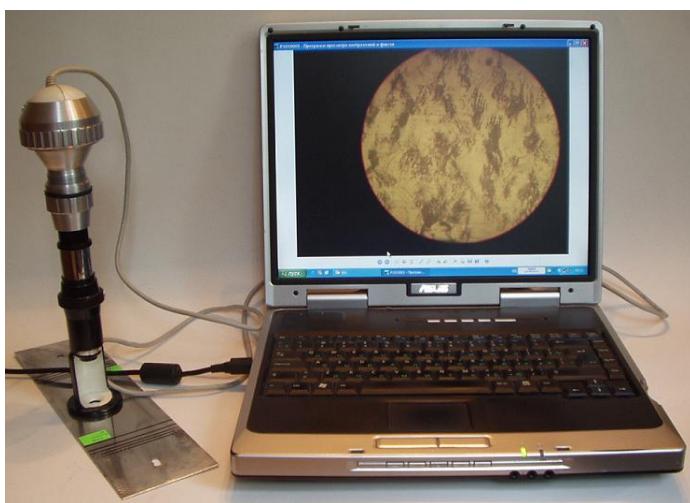


Рис. 2.8. Комп'ютеризований оптичний комплекс оперативного контролю стану поверхні [23]

Проведена модернізація дозволяє визначити топографію поверхні шляхом обробки послідовності інтерференційних даних, які реєструються цифровою камерою при комп'ютерному керуванні зміщенням опорного дзеркала і кількісно оцінювати характеристики 3D профілю поверхні.

Топографію поверхні матеріалу зразків в околі зародженої тріщини визначали на безконтактному інтерференційному профілометрі "Micron-beta". Аналізували послідовності інтерференційних зображень, зареєстрованих цифровою камерою при зсуві опорного (еталонного) дзеркала. При візуальному спостереженні прилад дозволяв реєструвати глибину (висоту) рельєфу з точністю 10,0 нм; при програмній обробці зображень точність 1,0 нм [23-26].

2.3. Методика побудови повних діаграм статичного деформування

Повні діаграми статичного деформування матеріалів виконано на установці, модернізованій проф. М.Г. Чаусовим та доц. А.П. Пилипенком [27]. Конструкція установки схематично наведена на рис. 2.9. Вона містить рухому 1 і нерухому 2 траверси, з'єднані з ними захоплювачі 3 та 4, зразок 5, пристрій для забезпечення змінної жорсткості навантажувальної системи 6 і комп'ютеризовану вимірювальну систему (КВС) 7 для проведення і обробки результатів випробувань. КВС складається із наступних складових: комп'ютера з операційною системою лінійки Windows (10), монітора, лазерного принтера, АЦП з 16 диференційними каналами, термінальних плат для під'єднання 16 диференційних каналів, модулів аналогового тензопідсилювача постійного струму для мостових схем ADAM 3016 15, тензодинамометра, екстензометра для вимірювання поздовжньої деформації, екстензометра для вимірювання поперечної деформації і програмного забезпечення Specimen, FastReg. Випробування всіх матеріалів проведено на описаній установці при 18 вимірюваннях за секунду. Маса її рухомих частин складає 1350 кг.

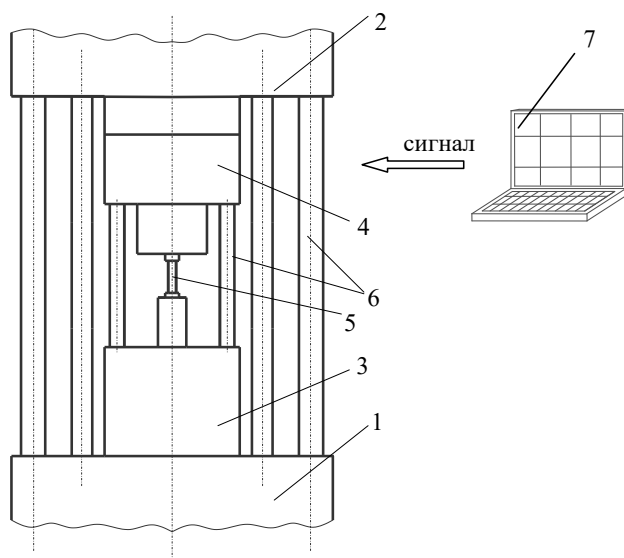


Рис. 2.9. Схема випробувальної установки

В даній установці реалізовано принцип регульованої жорсткості навантажувальної системи в процесі випробувань. Крім того, установка обладнана комп'ютеризованою вимірювальною системою для проведення й обробки результатів випробувань і пристроєм, який дозволяє реалізувати раптові зміни в режимі навантаження. Під час випробувань фіксували поперечне і поздовжнє звуження зразка за допомогою тензодавачів. Досліджували плоскі зразки з розмірами робочої частини 10×50 мм та товщиною 5 мм. Поверхню зразка фотографували фотоапаратом Canon D550 за допомогою оптичного мікроскопа МБС-10.

За параметрами спадаючих ділянок повних діаграм деформування визначали питому роботу руйнування A_p [27], яка має прямий і досить чіткий зв'язок з граничною пошкодженістю матеріалу, і параметр тріщиностійкості K_λ [28].

$$A_p = \frac{F_K \Delta l_p}{S_K^2}, \quad (2.5)$$

де F_K – площа поверхні руйнування; Δl_p – видовження зразка на стадії росту макротріщини; S_K – опір матеріалу відриву.

$$K_\lambda = \sqrt{S_0 A_p E}, \quad (2.6)$$

$$K_\lambda = \sqrt{S_K \overline{\Delta l_p} E}, \quad (2.7)$$

де $\overline{\Delta l_p}$ – нормована, шляхом приведення до початкової площі перерізу стандартного зразка, величина видовження зразка на стадії росту макротріщини відриву; E – модуль Юнга матеріалу.

Кінетику накопичення розпорошених пошкоджень у термоцикльованому матеріалі при статичному навантаженні описували за допомогою моделі [27], визначаючи значення деформації розпушення матеріалу ε_p , де за основний параметр прийнято поточне значення коефіцієнта поперечної деформації.

Повну деформацію обчислювали за підходами [28] як

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_n, \quad (2.8)$$

де ε_p – деформація розпушення; ε_n – пластична деформація.

Кінетику накопичення розсіяних пошкоджень визначали за деформацією розпушення [27]

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu(\varepsilon))\varepsilon, \quad (2.9)$$

де $\mu(\varepsilon)$ – поточний коефіцієнт поперечної деформації; ε – відносна деформація.

$$\mu = -\frac{\varepsilon^t}{\varepsilon}, \quad (2.10)$$

де ε^t – поперечна деформація.

Відомим інструментом для вимірювання висоти мікронерівностей є мікроінтерферометр Лінника МІІ-4, в якому об'єднано інтерферометр і мікроскоп [28]. Для забезпечення автоматизації реєстрації інформації про профілі нанометричного діапазону прилад МІІ-4 було модернізовано [29].

Проведена модернізація дозволяє визначити топографію поверхні шляхом обробки послідовності інтерференційних даних, які реєструються цифровою камерою при комп'ютерному керуванні зміщенням опорного дзеркала й кількісно оцінити характеристики 3D профілю поверхні. Зовнішній вид інтерферометру та його інтерфейс показано на рис. 2.10.



Рис. 2.10. Зовнішній вигляд інтерференційного профілометра [29-31]

Випробування на статичну та циклічну тріщиностійкість

Статична вязкість руйнування. В даній монографії для дослідження висоти зони витягування використано зруйновані компактні зразки товщиною 19 мм (рис. 2.11). Попередньо на них досліджували статичну тріщиностійкість корпусної реакторної сталі 15Х2МФА(П) після термообробки, яка моделює окрихчення матеріалу на середині терміну експлуатації реактора типу ВВЕР-440: гартування з 1000 °С, 6 год. в олії; відпуск 6 год. (одноразовий) при 600 °С на повітрі [34].

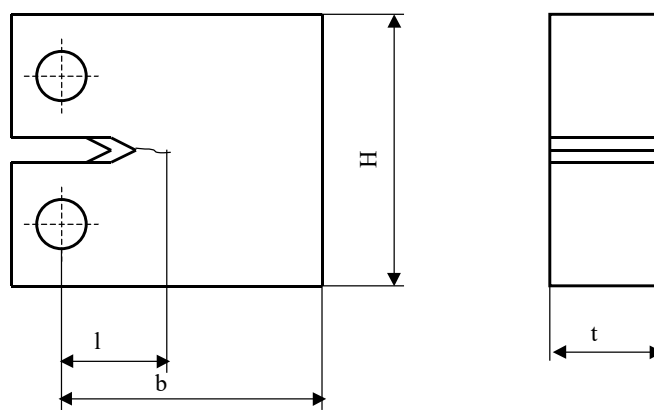


Рис. 2.11. Геометрія досліджених компактних зразків

Зразки (рис. 2.11) виготовляли з прямокутного бруса розміром 19×50×48 мм і 25×65×60 мм, який вирізали з темплету розміром 120×65×120 мм. На всіх зразках вирошували втомні тріщини за коефіцієнта асиметрії циклу навантажування $R = K_{min}/K_{max} = 0,1$ та частоти навантажування 40 Гц [4] (тут K_{min} , K_{max} – найменший і найбільший коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН)). Відносна довжина тріщини становила $(0,45 \dots 0,55)b$ (b - ширина зразка).

Оскільки величина розвантаження майже не впливає на критичний КІН K_f сталі 15X2МФА(П), в експериментах була використана схема ПТН з повним розвантаженням [5].

Зразки попередньо навантажували за температури $T_1 = 350^\circ\text{C}$ і $\bar{K}_1 = K_1/K_Q^{5\%} = 0,85$ за методикою [6] (де K_1 – максимальний КІН при термомеханічному навантаженні; $K_Q^{5\%}$ – критичний КІН, визначений за 5%-ою січною на діаграмі руйнування при температурі 350°C). Мікрорельєф зони витягування зони старту тріщини вивчали методом стереоскопічної фрактографії, за якого порівнювали кілька фотозображень однієї ділянки до та після повороту на кут $5, 10, 15^\circ$ навколо осі, перпендикулярної до напрямку фотографування.

Залишкове $\delta_{res(r)}$ і усереднене залишкове розкриття тріщини на поверхні зразка, виміряне на мікроскопі МІМ-10, залежить від відстані до вістря тріщини. Найбільшого значення $\delta_{res(r)}$ досягає на відстані $0,4 \dots 0,6$ мм від вершини тріщини (r). Зруйновані зразки повертали за годинниковою стрілкою на кут 20° з допомогою гоніометричного пристрою мікроскопа навколо своєї осі [35].

Циклічна тріщиностійкість. За умови втомного руйнування матеріалів на поверхні формуються впорядковані рельєфні утворення – борозенки, які можуть слугувати фрактодіагностичною ознакою мікрошвидкості поширення тріщини в межах аналізованої ділянки [35]. Слід зазначити, що ефекти мікрорівня є випадковими, проте втомні борозенки формуються самовпорядковано. Результатом цього є певні відмінності профілю борозенок, які залежать від механічних властивостей матеріалу, насамперед міцності й пластичності. При втомному механізмі руйнування найінформативнішою ознакою є крок борозенок (2D), який характеризує швидкість поширення втомної тріщини на мікрорівні [37]. Проте оцінити характер деформаційних процесів під час поширення тріщини, можна лише аналізуючи профіль борозенок, оскільки борозенки однакової ширини, як правило, відрізняються за висотою. Особливо доцільні такі методи для порівняльного аналізу традиційних та нових матеріалів або для оцінювання інтенсивності деградаційних процесів металу тривало експлуатованих конструкцій. Складність автоматизації такого вимірювання для сталених зразків полягає в тому, що фронт тріщини не завжди є однорідним. Йому притаманні локальні дисторсії, ділянки притуплення тріщини, які спричиняють утворення "горбків" та "западин" [37].

Структура сталі 25X1М1Ф має ферито-перлітну будову (рис 2.12а,б). Металогіфічними дослідженнями недеформованого матеріалу виявлено феритні та перлітні зерна, карбідні включення витягнутої й глобулярної форми.

За попередньо проведеними дослідженнями дисперсності цементитних пластин структуру можна класифікувати як сорбіт. У початковому стані дислокаційна мікроструктура сталі 25X1М1Ф має сіткову й частково коміркову дислокаційну будову [7].

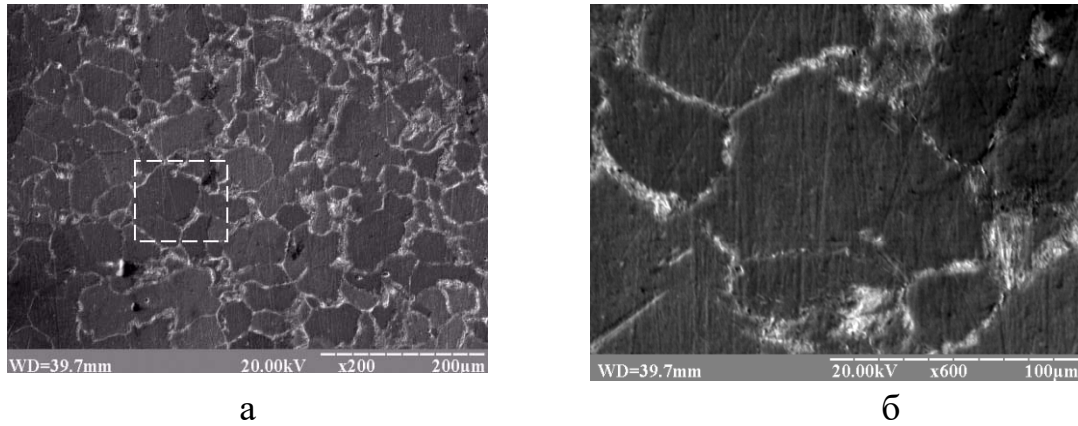


Рис. 2.12. Мікроструктура сталі 25X1M1Φ у вихідному стані: а – $\times 200$, б – $\times 600$

Досліджували швидкість росту втомної тріщини у призматичних зразках з бічним надрізом (SENT) за одновісного циклічного розтягу. Частота навантажування становила 0,1 Гц та 1,0 Гц. Попередньо у зразках зароджували втомні тріщини за частоти 25,0 Гц. Під час експерименту контролювали зусилля навантажування та швидкість підростання тріщини. Фотографували вершину тріщини у навантаженому та вільному станах.

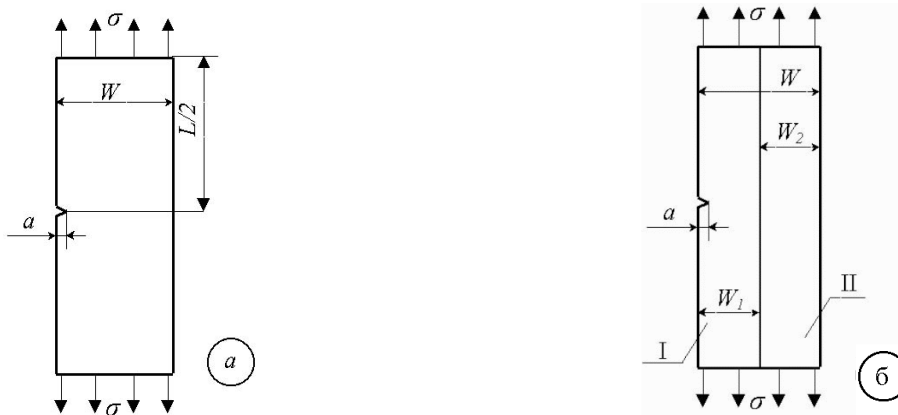


Рис. 2.13. Схема монометалевого (а) та біметалевого (б) зразків з бічною тріщиною

Швидкість поширення тріщини у межах середньоамплітудної ділянки кінетичної діаграми утомного руйнування (КДУР) описували залежністю Паріса

$$\frac{da}{dN} = (CK_{max})^m, \quad (2.12)$$

де C – та m – сталі матеріалу.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) плоского призматичного зразка (рис. 2.13,а) з жорстким затиском визначали за формулою [39]

$$K = \sigma_{app} \sqrt{W} F_1 \left(\frac{a}{W} \right), \quad (2.13)$$

для $L/W = 4$:

$$F_1 \left(\frac{a}{W} \right) = 0,288 + 3,779 \left(\frac{a}{W} \right) - 1,985 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 3,662 \left(\frac{a}{W} \right)^3,$$

де a – довжина тріщини; N – кількість циклів навантаження; W – ширина зразка; σ_{app} – напруження в бруто-перерізі зразка; L – відстань між захоплювачами.

Узагальнений вигляд КІН біметалевого зразка (рис. 2.13,б) можна записати [40]

$$K_{bil} = \frac{\sigma_{app} \sqrt{W}}{\left[\left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \sqrt{\left(\frac{W_1}{W}\right)^2 - \left(\frac{a}{W}\right)^2} + \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{a}{W}\right)^2} \right]} F_1 \left(\frac{a}{W}\right), \quad (2.14)$$

де E_1 , E_2 – відповідно модулі пружності першого роду першого та другого матеріалу біметалу; W_1 – ширина 1 – ої ділянки біметалевого зразка.

Методом пружної піддатливості одержали формулу [4]

$$K_I = \frac{P}{W \sqrt{2t}} F_2 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}, \quad (2.15)$$

$$F_2 \left(\frac{a}{W}\right) = 4,008 + 180,76 \left(\frac{a}{W}\right) - 709,21 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 1065,90 \left(\frac{a}{W}\right)^3$$

Дану формулу визначення КІН співставляли з даними аналітичного розв'язку, виявлено їх задовільне узгодження.

Темплети для електроннофрактографічних досліджень вирізали на спеціальному верстаті "Мікро-1". Злами зразків досліджували методом електронної фрактографії за допомогою растрового електронного мікроскопу типу РЕМ-106И.

Мікросвідкість РВТ в біметалі описували відомим рівнянням Періса:

$$S = C' (K_{Vimax})^{n'} \quad (2.16)$$

де K_{Vimax} – найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень біметалевого зразка з тріщиною; C' та n' – параметри матеріалу, що залежать від механічних властивостей; $S = L/n$, L – довжина аналізованої ділянки зламу; n – кількість борозенок у межах аналізованої ділянки.

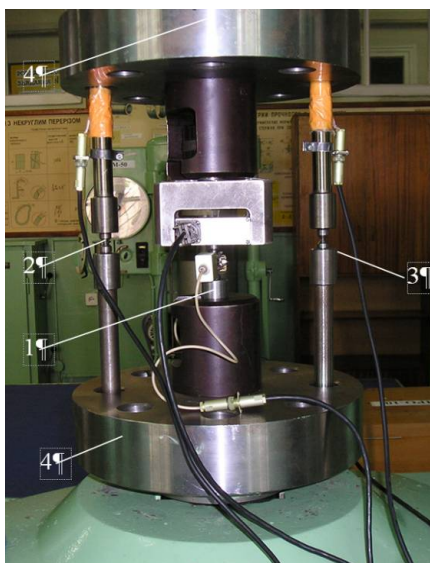
2.4. Динамічний нерівноважний процес

Дослідження проводили на модифікованій гідравлічній установці для статичних випробувань ZD-100Pu [41]. Модифікацію даної установки проводили з метою отримання складного режиму навантаження виду статичний розтяг – високочастотний, високошвидкісний коливальний процес (динамічний незрівноважений процес (ДНП)) – статичний розтяг.

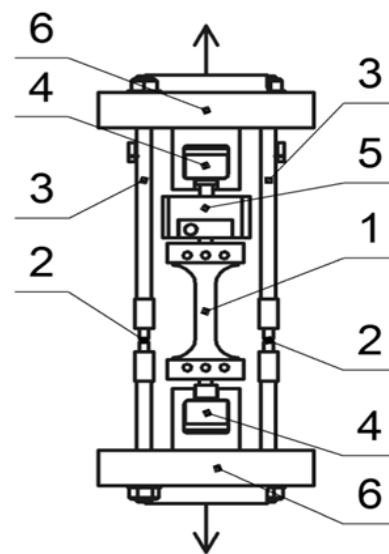
Модифікована версія установки складається з двох контурів – зовнішнього (навантажувальної рами випробувальної машини) і внутрішнього (рис. 2.14,а,б відповідно). Внутрішній контур являє собою найпростішу статично не визначену конструкцію у вигляді трьох паралельних елементів, що навантажуються одночасно – центрального зразка та двох симетричних зразків-супутників ("крихких проб") різного поперечного перерізу, виготовлених із загартованих сталей 65Г чи У8-У12. При навантаженні даної конструкції зразки-супутники руйнуються (при заданих навантаженні чи деформації) і здійснюється імпульсне введення енергії в матеріал досліджуваного зразка.

Для реалізації ДНП випробування проводили за такою схемою [42]:

1. Статичний розтяг досліджуваного зразка до заданого рівня навантаження/деформації, за регламентом проведення експерименту.
2. Закручування в штанги крихких зразків-супутників (крихких проб). Деформація проби до розриву не перевищує 0,1 мм.
3. Деформування внутрішнього контуру (зразок + крихкі проби) до моменту руйнування крихких проб. За цей період зразок здеформується не більше ніж на 0,5%, у випадку випробування зразків з найменшою базою (рис. 2.15), типове значення додаткової деформації на зразку ще менше.
4. Руйнування крихких проб, що призводить до коливань у випробувальній установці з одночасним переміщенням гідравлічного циліндра в напрямі розтягу досліджуваного зразка – реалізація ДНП.
5. Зупинка системи оператором чи подальше статичне деформування.



а



б

Рис. 2.14. Випробувальна установка модернізована проф. М.Г. Чаусовим, доц. А.П. Пилипенком [41]: а – загальний вигляд (сила рама установки – зовнішній контур); б – внутрішній контур: 1 – досліджуваний зразок; 2 – крихкі проби; 3 – тензометричні штанги; 4 – сферичні опори; 5 – динамометр (власна частота 12 кГц); 6 – фланці

Суть розробленої методики полягає у високошвидкісному розтягу матеріалу з накладанням на нього коливального процесу з високою частотою (кілька кілогерц). Такий режим навантаження досягається внаслідок вільних коливань механічної системи (рис. 2.14,а) та надлишку тиску в гідравлічній системі. Таким чином можна контролювати цей процес за допомогою зміни співвідношення жорсткість/маса зовнішнього контуру системи (рис. 2.14,а) та величиною проскакування гідроциліндра, що визначається руйнівним навантаженням крихких проб.

При проведенні експериментів зусилля на зразку, рис. 2.15 та крихких пробах фіксували незалежними тензодинамометрами виробництва АНТК ім. О. К. Антонова. У процесі статичного розтягу та реалізації ДНП деформації

на поверхні плоских зразків фіксували стандартним екстензометром на базі 16 мм виробництва АНТК ім. О. К. Антонова.

Механічні властивості сплавів у вихідному стані подано в табл. 2.1

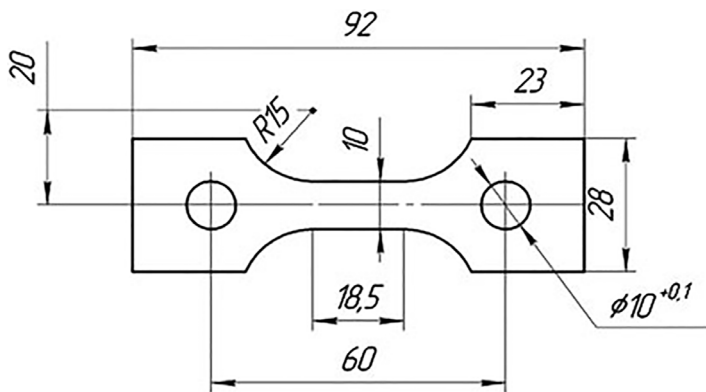


Рис. 2.15. Зразок для випробувань [41, 42]

Таблиця 2.1. Механічні властивості титанових сплавів VT23 і VT23М

Марки матеріалу	Механічні властивості		
	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
VT23	980-1180	1080-1280	15
VT23М	1000-1150	1080-1180	20

Хімічний склад сплаву VT23М такий же, як і сплаву VT23 (табл. 2.1), однак діапазон легування β - стабілізуючими елементами сплаву на 33% менший, ніж за відповідним стандартом для сплаву VT23.

З використанням розробленої й неодноразово апробованої методики реалізації ДНП за рахунок ударно-коливального навантаження [43] випробування проводили на зразках із листового двофазного високоміцного сплаву VT23 товщиною 3 мм. На партії зразків із титанового сплаву VT23 з 48 штук послідовно відпрацьовано низку режимів навантажування. Зразки досліджували за таких схем деформування:

1. Статичний розтяг до руйнування (СР).

2. Статичний розтяг зразка до рівня напружень $0,03\sigma_T$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня напружень на зразку $\sim\sigma_T$ ($\sigma_\Sigma = \sigma_{\text{стат}} + \sigma_{\text{імп}} = \sigma_T$) – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП 1).

3. Статичний розтяг зразка до рівня напружень $0,03\sigma_T$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня пластичної деформації на зразку 0,5...10% – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП 2).

У дослідах з реалізації обох видів ДНП руйнівне зусилля крихких проб було в межах: 42...156 кН.

Інформація, узагальнена у цьому розділі, є основою аналізу даних про навантажуваність і пошкоджуваність елементів конструкцій. Обрані режими навантажування дозволяють дослідити вплив режимів навантажування на еволюцію деформаційного рельєфу і відповідного пошкодження, застосувати отримані результати для оптико-цифрового контролю технічного стану елементів конструкцій.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРІЩИН ТА ОБЧИСЛЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

3.1. Цифрова дефектометрія в технічній діагностиці тріщин

Будь-яку ділянку поверхні з множинними тріщинами можна розглядати як сукупність структурних елементів (блоків), розділених тріщиноподібними дефектами [1]. Межі поділу блоків мають меншу міцність, ніж матеріал самих блоків, що зумовлює більшу піддатливість цих ділянок. Проте порушення суцільності металу тріщинами є одним зі способів релаксації напружень за умов циклічного та квазістатичного навантаження. Незважаючи на значну кількість механізмів деформування та руйнування, їх основою є локалізація напружень і пластичних деформацій в околі тріщиноподібних дефектів [2].

Виділяють кілька етапів множинного розтріскування: розпорошене розтріскування – результат зародження розпорошених тріщиноподібних дефектів (рис. 3.1,а); об'єднання тріщин з утворенням мережі перетином окремих дефектів (рис. 3.1,б); блочне розтріскування внаслідок коалесценції низки об'єднаних тріщин з утворенням повністю відокремлених блоків матеріалу, обмежених розвинутою мережею дефектів (рис. 3.1,в).

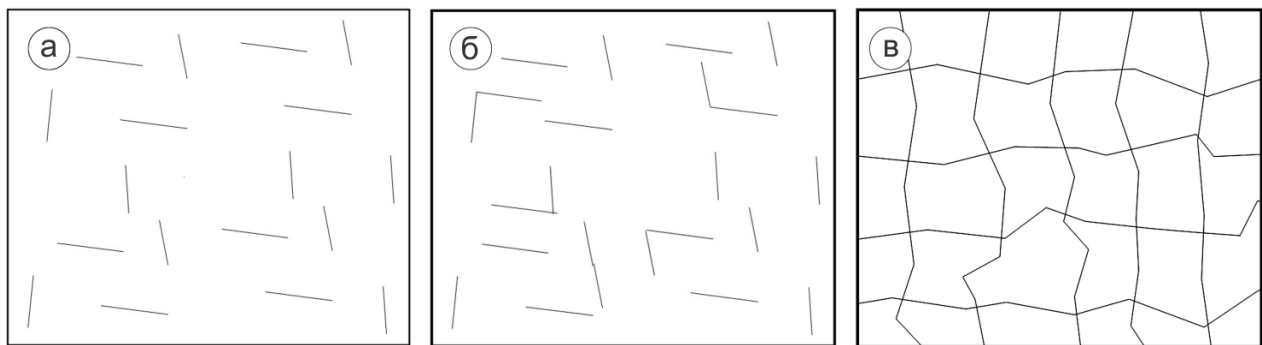


Рис. 3.1. Множинне розтріскування: а – розпорошене розтріскування; б – об'єднані тріщини; в – блочне розтріскування

Фізико-механічні закономірності множинного розтріскування докладно проаналізовано у працях, де обґрунтовано використання структурно-ієрархічного підходу, основою якого є твердження, що для коректного чисельного чи аналітичного моделювання властивостей тіла з множинними тріщиноподібними дефектами необхідно вивчити фізико-механічні закономірності розтріскування та параметри тріщиноподібних дефектів.

Переваги структурно-ієрархічного підходу [3-5]: врахування впливу параметрів елементів мережі тріщин на інтегральні властивості деформівного твердого тіла; впорядкованість результатів та збереження фізичних закономірностей, властивих реальному об'єкту, можливість їх подальшого оброблення та моделювання; взаємозв'язок між властивостями об'єктів з

дефектами нижчого рівня (тріщин), їх сукупностей (мережі тріщин) та зразка (конструкції).

Проте для використання в межах цього підходу математичного апарату механіки деформівного твердого тіла є низка принципів обмежень [6, 7]. У зв'язку з цим перспективніше застосовувати методи цифрового діагностування. Одним з них є запропонований підхід, який передбачає можливість урахування (інтегрально та параметрично) особливостей множинного термомеханічного розтріскування [8, 9].

Оцінювання стану робочої поверхні ряду механізмів та покриттів за допомогою аналізу їх цифрового зображення використовується доволі часто [10]. Такий підхід дозволяє автоматизовано проаналізувати поверхні та отримати важливу інформацію про поверхневі та внутрішні зміни у структурі матеріалу, які цікаві з точки зору його експлуатаційних характеристик. Особливо важливим є отримання цієї інформації на початковому етапі руйнування матеріалу, який супроводжується поверхневими явищами, – тріщинами, коробленням тощо. Аналізуючи зображення поверхні, можна отримати кількісні показники, які характеризують стан матеріалу: площу пошкоджень, їх розташування, розміри та напрям. Однією з переваг методик аналізу цифрових зображень є те, що вони дозволяють отримати експрес-інформацію про об'єкт і забезпечити оцінювання його технічного стану без зупинки експлуатації. Це особливо важливо для обладнання неперервних технологічних процесів, наприклад, для металургійного обладнання, де непрогнозовані зупинки не допускаються технологією виробництва, а час експлуатації конструкції з тріщинами становить до 80% загального ресурсу [10].

3.2. Виявлення тріщин на зображеннях

Загалом дослідження елементів поверхні шляхом аналізу зображень можна проводити, якщо початкові та пошкоджені фрагменти на зображенні відрізняються кольором, інтенсивністю або текстурою відповідних ділянок зображення. На рис. 3.2 зображено поверхні ролика машини безперебійного лиття заготовок (МБЛЗ), до яких на практиці можна застосовувати згадану методику.

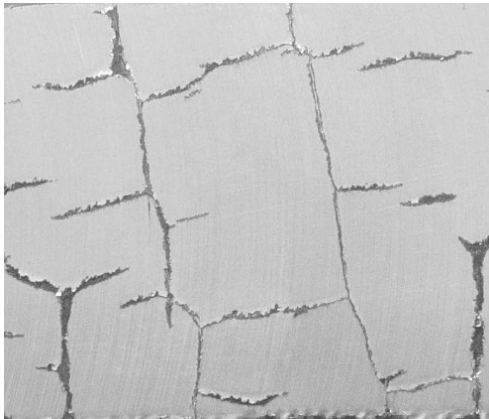
Нехай початкове зображення пошкодженої поверхні описує функція розподілу інтенсивності пікселів $i_0(x, y)$, де x та y – координати пікселя у системі координат зображення. Функція $i_0(x, y)$ дискретна через особливість отримання візуальної інформації за допомогою фоточутливої матриці й квантована відповідно до глибини кольору зображення. При глибині кольору 8 біт $i_0(x, y) \in [0, 255]$.



а



б



в

Рис. 3.2. Зображення поверхонь ролика машини безперерійного лиття заготовок з тріщинами

Таким чином, функція $i_0(x, y)$ описує початкове зображення у градаціях сірого кольору. Якщо отримане з камери зображення є кольоровим, то його приводили до градацій сірого на основі принципу збереження яскравості відповідно до рекомендацій Міжнародного союзу телекомунікацій [11]:

$$i_g(x, y) = 0.2126 \cdot i_R(x, y) + 0.7152 \cdot i_G(x, y) + 0.0722 \cdot i_B(x, y) \quad (3.1)$$

Кінцевою метою завдання виявлення тріщини на зображенні є сегментація областей, які належать тріщинам. Тому зручним засобом для такої сегментації є порогоування, яке дозволяє розділити всі пікселі зображення на два кластери. Передумови застосування бінаризації за рівнем інтенсивності (порогування) забезпечені особливістю топології розтрісканої поверхні: заглиблені ділянки тріщин відбивають менше світла і в загальному є темнішими від навколишніх ділянок. Найпростіший метод порогоування передбачає фіксоване значення межі L . Отримане бінарне зображення $i_b(x, y)$ містить тільки два типи пікселів:

$$i_b(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i_0(x, y) < L \\ 1, & \text{якщо } i_0(x, y) \geq L \end{cases} \quad (3.2)$$

Якщо значення 0 відповідає чорному кольору, а 1 – білому, то на отриманому зображенні виявлені об'єкти (тріщини) будуть чорними, а фон (непошкоджені ділянки) – білими.

Недоліком цього методу є небажана чутливість до шуму та нерівномірності освітлення поверхні, а також нечутливість до відносних перепадів яскравості тріщин різної глибини.

Тому ефективніше застосовувати адаптивне пороговання, при якому межу L обчислюють окремо для кожного пікселя на основі інтенсивностей пікселів оточуючої ділянки. Відмінну швидкодію та хороший результат забезпечує адаптивне пороговання Бредлі з використанням інтегрального зображення [12]. Інтегральне зображення використовують, коли потрібно обчислити суму значень функції зображення для його довільної прямокутної ділянки. При адаптивному порогованні інтенсивність кожного пікселя порівнюють із середнім значенням інтенсивності в оточуючій ділянці. Якщо інтенсивність пікселя на t відсотків менша за середнє значення навколишньої ділянки, то для нього приймається значення 0, а в іншому випадку – 1:

$$i_b(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i_0(x, y) \cdot C \leq \frac{S(100 - t)}{100}, \\ 1, & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$C = (x_2 - x_1)(y_2 - y_1),$$

$$S = \text{intImg}[x_2, y_2] - \text{intImg}[x_2, y_1 - 1] - \text{intImg}[x_1 - 1, y_2] + \text{intImg}[x_1 - 1, y_1 - 1],$$

де $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ – відповідно координати лівого верхнього та правого нижнього кута прямокутної ділянки навколо пікселя (x, y) ; $\text{intImg}[x, y]$ – значення інтегрального зображення у пікселі (x, y) [12].

Порівняння результатів класичного та адаптивного пороговання для зображення з рис. 3.2,б показано на рис. 3.3. Результат сегментації за допомогою класичного пороговання містить значно більше хибно віднесених до тріщин чорних зон, особливо у більше затіненій нижній частині зображення. Головною перевагою адаптивного пороговання є його орієнтованість на локальні особливості зображення, що дозволяє:

- відрізнити ділянки тріщин від фону незалежно від рівня освітленості різних фрагментів зображення;
- нехтувати затемненими, але однорідними ділянками зображень.

Тому в загальному випадку для зображень з невірвняною освітленістю доцільніше застосовувати адаптивне пороговання.

Як правило, початкове зображення реальних об'єктів має значну дисперсію у розподілі інтенсивності навіть для тих ділянок, які є однорідними (з точки зору виявлення пошкоджень) ділянками тріщин чи фону. При порогованні це зумовлює появу на результуючому зображенні великої кількості дрібних шумових елементів.

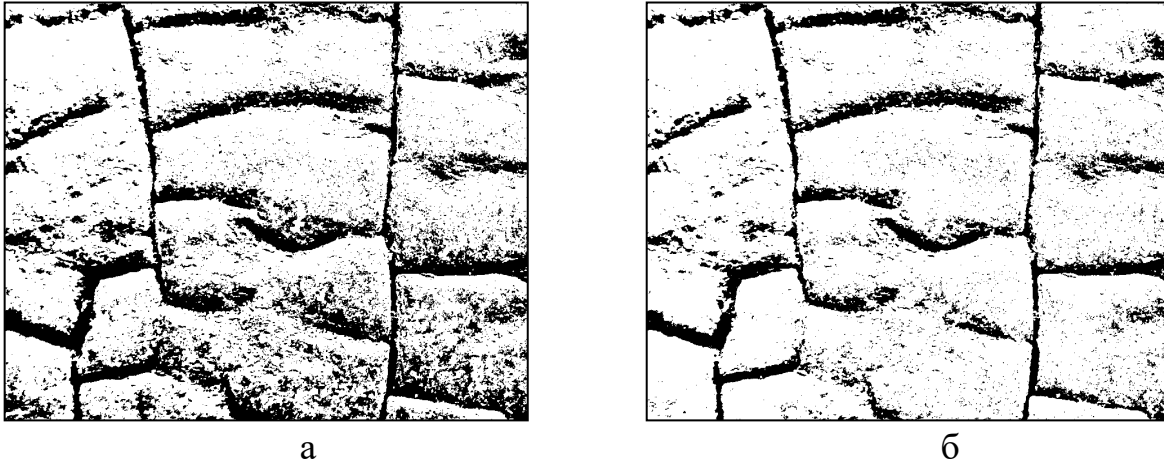


Рис. 3.3. Результати сегментації тріщин (рис. 3.2,б) за допомогою класичного (а) та адаптивного (б) порогування

Тому доцільним є використання згладжуючого фільтрування. Ми випробували такі види фільтрів: гаусівський, медіанний та однорідний згладжуючий. Коефіцієнти фільтра Гауса з квадратним вікном розміром $2h_f + 1 \times 2h_f + 1$ пікселів розраховували за формулою [13]:

$$h(j, k) = \frac{1}{2\pi\sigma_f^2} \exp\left(-\frac{\left((j - h_f - 1)^2 + (k - h_f - 1)^2\right)}{2\sigma_f^2}\right). \quad (3.4)$$

Для цього з початкового зображення було вирізано три види ділянок:

- ділянки, що належать тільки фону;
- ділянки, що належать тільки тріщині;
- ділянки, через які проходить візуальна межа між тріщиною та фоном у співвідношенні 1:1.

Кожну з цих ділянок обробляли вказаними фільтрами. На рис. 3.4,а-в приведено середньоквадратичні відхилення функції інтенсивності пікселів для ділянок фону, тріщин та межових областей, вирізаних із зображення на рис. 3.2,б. На графіках показано результати застосування фільтра Гауса та медіанного фільтра з вікном однакового розміру – 11 пікселів. Результат, отриманий з використанням усереднюючого фільтра, для досліджених зображень практично повторював результат медіанного фільтра, тому його на рис. 3.4 не показано.

До фільтра в нашому випадку ставили вимоги: а) зменшити перепади інтенсивності пікселів для однорідних ділянок фону і тріщини; б) залишити перепади інтенсивності меж "фон-тріщина". Отримані залежності демонструють, що фільтрування дозволяє ефективно усунути перепади для однорідних ділянок фону та тріщин (рис. 3.4,а,б). При цьому медіанний фільтр краще приглушує такі перепади. Але для межових ділянок (рис. 3.4,в) фільтр Гауса дозволяє досягти кращого результату, менше розмиваючи межі. Так як важливим є подальше виявлення краю тріщини, то для фільтрування вибрано саме фільтр Гауса, оскільки він поєднує ефективно приглушення перепадів інтенсивності для однорідних ділянок і значно менше впливає на межі тріщин [14,15].

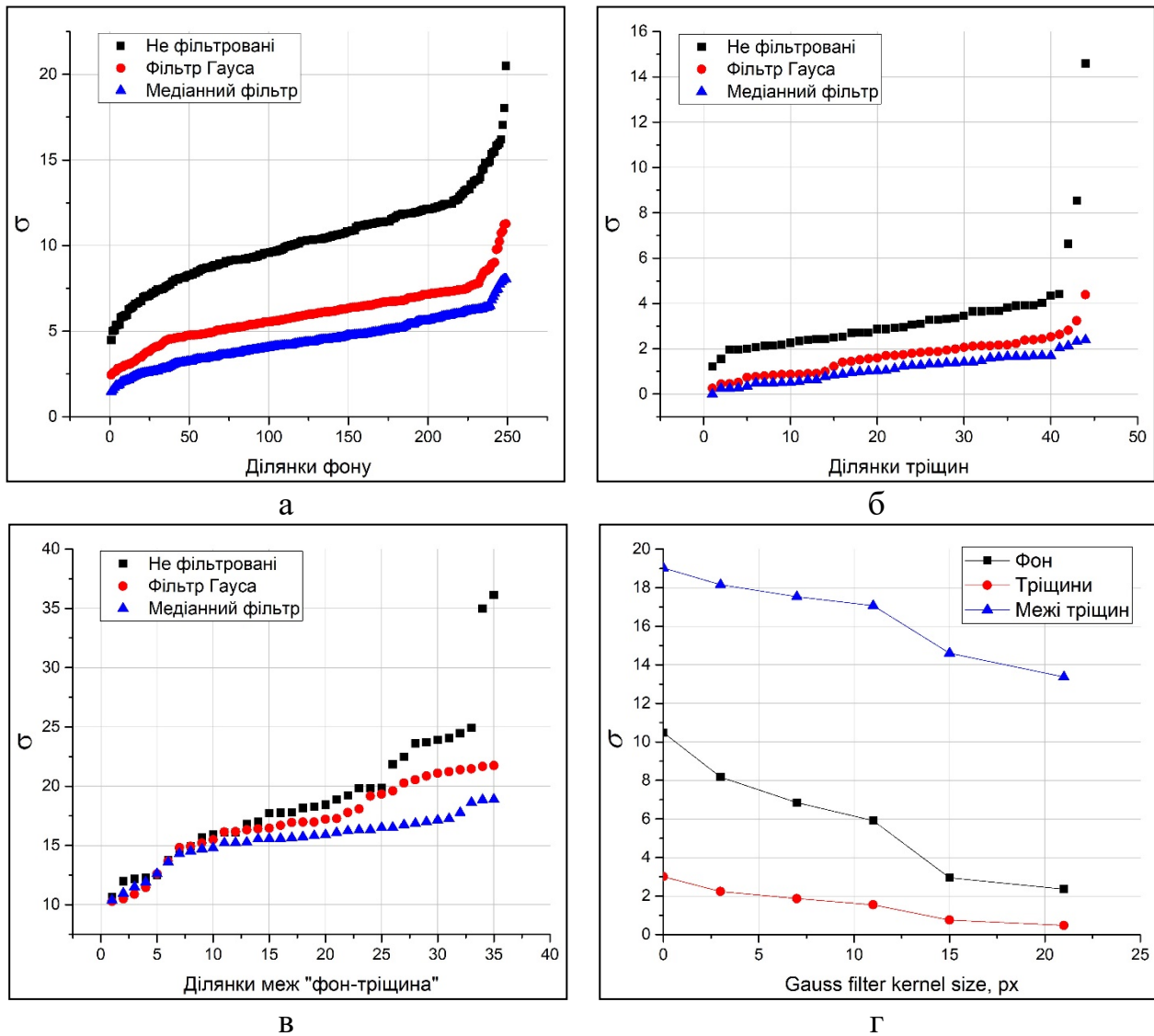


Рис. 3.4. Середньоквадратичні відхилення інтенсивності ділянок фону (а), тріщин (б) та границь тріщин (в) із зображення рис. 3.2,б до і після фільтрування. Значення відсортовні за зростанням. Залежність середньоквадратичного відхилення інтенсивності від розміру вікна фільтра Гауса на трьох довільно вибраних ділянках різних видів (г)

У загальному випадку середньоквадратичне відхилення інтенсивності пікселів непошкоджених ділянок σ_{bg} значно вище від середньоквадратичного відхилення на ділянках тріщин σ_{ob} . Це пов'язано з тим, що на добре освітлених зовнішніх ділянках поверхні зразка можна виявити багато дрібних деталей, тоді як затінені ділянки тріщин приховують їх. Фільтрування дозволяє суттєво зменшити σ_{bg} – від діапазону 6.6...13.0 до 3.4...7.4. Менший розкид інтенсивності пікселів на зображенні фону сприятиме меншій зашумленості при порогованні. Водночас на зображення тріщин фільтрування впливає значно менше: σ_{ob} знижується від діапазону 2.0...4.4 до 0.5...2.6. На середньоквадратичне відхилення для межових ділянок σ_{ed} фільтрування впливає значно менше (рис. 3.4, в), оскільки розкид інтенсивностей пікселів для них викликаний не випадковими особливостями поверхні, освітлення та фотозйомки, а різким перепадом між тріщиною та фоном.

На рис. 3.4,г зображено залежність середньоквадратичного відхилення інтенсивності пікселів від розміру вікна фільтра Гауса p_{fs} на трьох довільно вибраних ділянках різних видів (фону, тріщини та межі).

Отже, фільтрування суттєво зменшує розкид інтенсивностей пікселів для неоднорідних ділянок фону і значно менше впливає на ділянки тріщин. Для межових ділянок застосування фільтра спричинятиме формування плавнішої лінії розділу "тріщина-фон". Таким чином, чисельний аналіз доводить ефективність застосування операції фільтрування для попередньої обробки зображення перед проведенням сегментації порогуванням.

На рис. 3.5 наведено результати сегментації тріщин на зображеннях (рис. 3.2). До початкових зображень було застосовано фільтр Гауса та адаптивне порогування Бредлі.

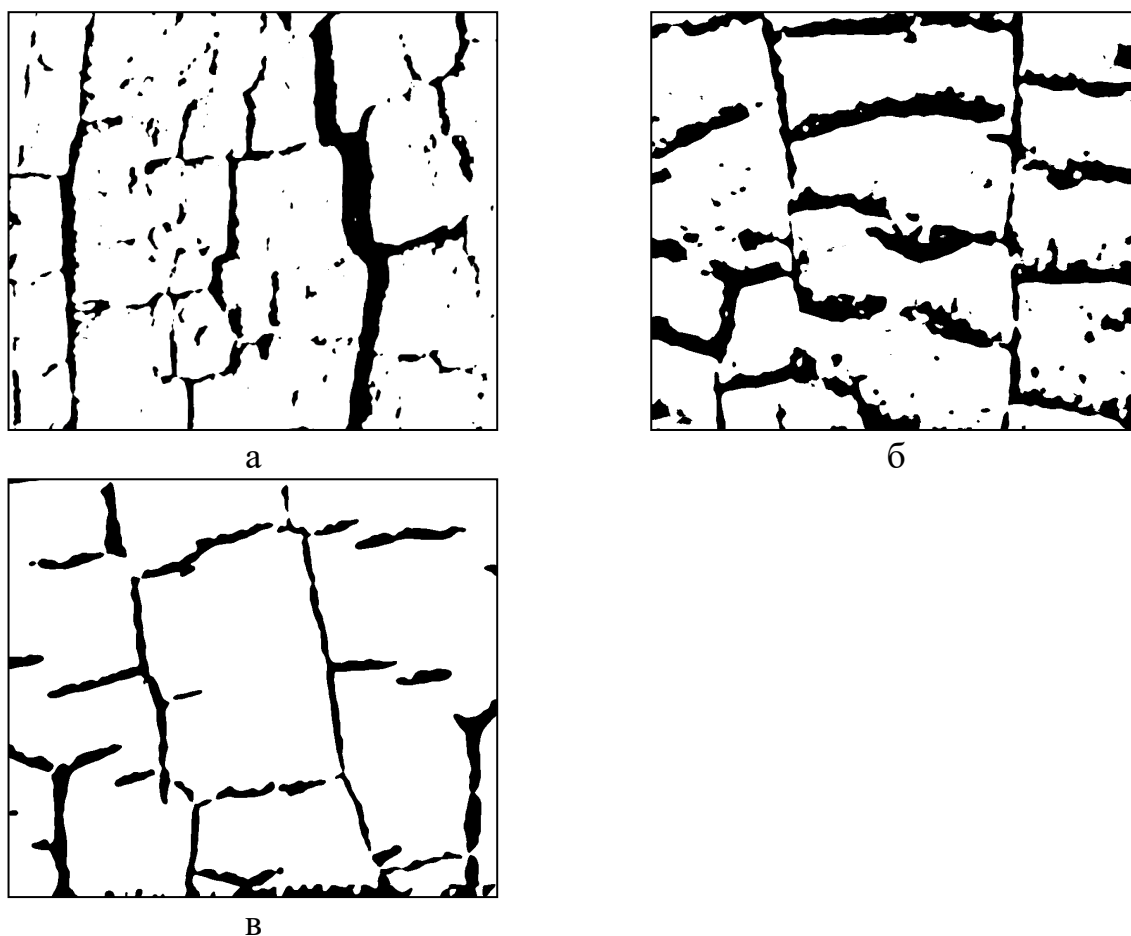


Рис. 3.5. Результат сегментації тріщин на зображеннях рис. 3.2

Під час сегментації описаним методом важливим є вибір правильних значень розміру фільтра p_{fs} границі порогування p_{th} . Якщо ці значення виходитимуть за межі оптимального діапазону, то в результаті частина пошкоджених зон не буде виявлена, або ж навпаки – частина непошкоджених ділянок буде віднесена до тріщин. Відомі методи порогування з автоматичним вибором межі [16, 17], але для більшості реальних зображень їх застосування давало незадовільний результат. Тому для кожного типу зображень параметри p_{fs} та p_{th} підбирали експериментально, аналізуючи вплив цього параметра на кінцевий результат [18].

Отримавши після сегментації сукупність пікселів, які представляють пошкоджені ділянки поверхні, можна обчислити інтегральний параметр – відносно площу пошкодження:

$$a_r = \frac{N_{ob}}{N} \cdot 100\% = \frac{N_{ob}}{I_w I_h} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

де N_{ob} – кількість пікселів, які належать пошкодженим ділянкам; $N = I_w I_h$ – загальна кількість пікселів на зображенні.

3.3. Розрахунок геометричних параметрів тріщин

Для розрахунку таких геометричних параметрів тріщин, як довжина та кут нахилу, проводили скелетизацію отриманого бінарного зображення $i_b(x, y)$ [19]. У результаті тріщини представлені серединними лініями товщиною 1 піксель. Скелетне зображення $i_s(x, y)$ отримували шляхом багатопроходового накладання на зображення $i_b(x, y)$ шаблонів (рис. 3.6). При цьому кожен із шаблонів під час застосування обертали навколо центру на 90° , 180° та 270° . У кожній ділянці зображення, яка відповідає шаблону, видаляли центральний чорний піксель [20].

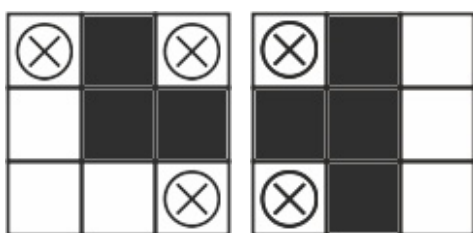
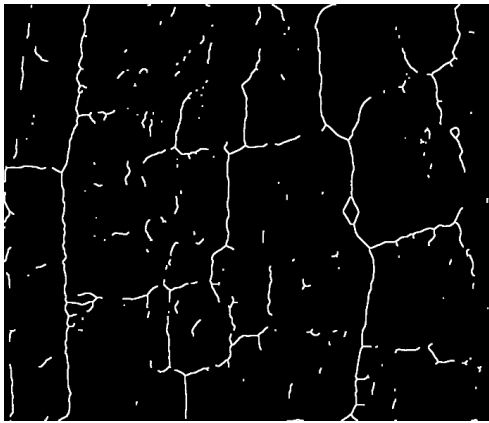
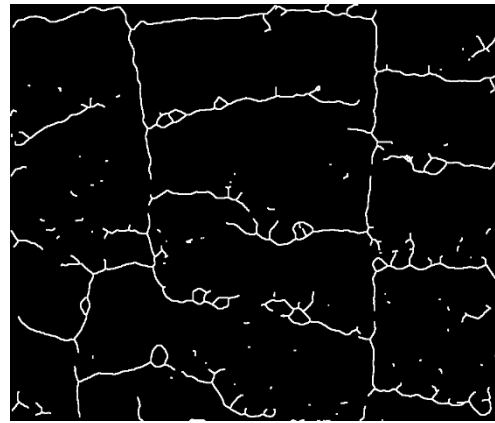


Рис. 3.6. Шаплони для скелетизації. Знак “ \otimes ” відповідає пікселям будь-якого кольору

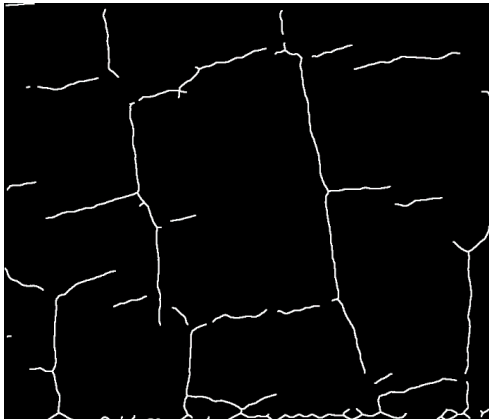
На рис. 3.7 наведено скелетні лінії тріщин для зображень на рис. 3.2. Скелетні лінії описують каркас сітки тріщин. На їх основі розраховували такі геометричні параметри тріщин, як довжина та кут нахилу. Для цього з сукупності точок, які формують каркас, виділяли *базові точки*, до яких належать початкові точки (вони мають тільки одного сусіда) та вузлові точки (мають більше двох сусідів). Оскільки ділянка тріщини, яка з’єднує будь-які дві пов’язані базові точки, може суттєво відхилитися від прямолінійності, то масив базових точок доповнювали проміжними точками каркаса, які розташовані з певним кроком відносно однієї з базових точок (рис. 3.8). Сформовану таким чином множину *опорних точок* використовували для обчислення геометричних параметрів сітки тріщин.



а



б



в

Рис. 3.7. Скелетні лінії тріщин з рис. 3.5

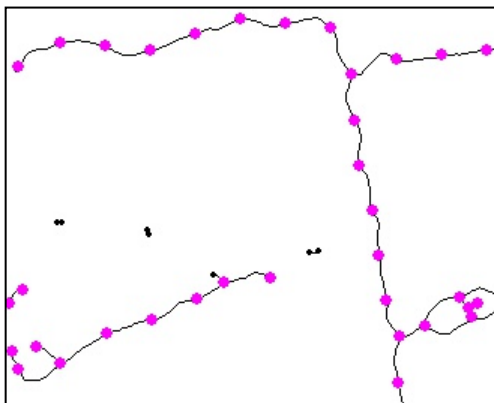


Рис. 3.8. Фрагмент зображення каркаса тріщин з нанесеними опорними точками

Після цього в межах кожного сегмента, який пов'язує дві базові точки, виділяли найбільшу взаємозв'язану множину опорних точок, які інтерполюються прямим відрізком із заданою точністю. З подальшого розгляду видаляли всі точки знайденого ланцюжка, крім кінцевих. У результаті вказаних операцій над зображенням отримуємо набір відрізків, які апроксимують окремі тріщини зображення. Їх геометричні параметри відображають відповідні параметри (напрямок, довжина) тріщин початкового зображення [20]. Далі розраховували довжину всіх знайдених прямолінійних фрагментів та їх нахил відносно горизонтальної осі зображення.

3.4. Дослідження поверхні ролика машини безперебійного лиття заготовок

Результатом застосування описаного алгоритму є ідентифікування мережі тріщин на зображенні та обчислення їх кількісних параметрів (довжини, кількості лінійних фрагментів), а також нахилу відносно горизонтальної осі. На рис. 3.9 наведено результати аналізу зображення ролика машини безперебійного лиття заготовок (МБЛЗ) з Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча.

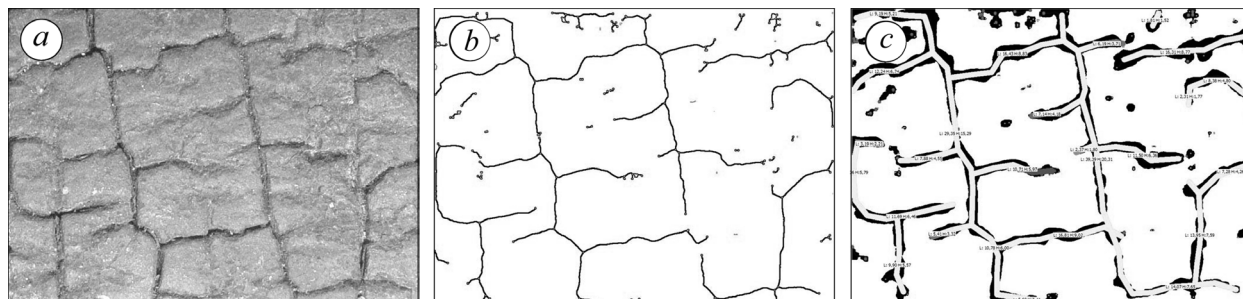


Рис. 3.9. Початкове багатоградатійне зображення поверхні ролика МБЛЗ (а); скелетизоване зображення (б); розпізнані прямолінійні фрагменти тріщини, накладені на бінарне зображення (в)

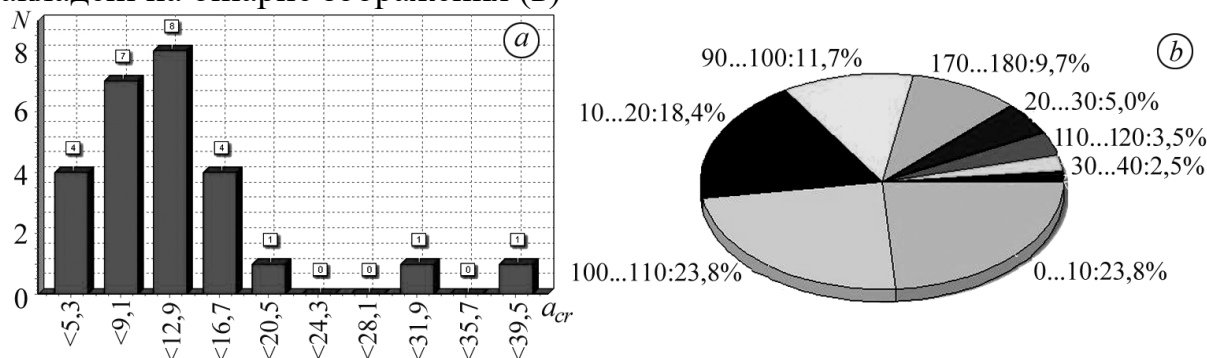


Рис. 3.10. Параметри розтріскування проаналізованої ділянки поверхні ролика МБЛЗ: а – розподіл довжин прямолінійних фрагментів тріщин; б – діаграма кутів нахилу тріщин

Виявлено, що переважають прямолінійні фрагменти тріщин довжиною від 12,9 мм до 16,7 мм, питома частка яких становить 31% від загальної кількості виявлених дефектів (рис. 3.10,а).

Більшість тріщин орієнтовано у двох взаємно перпендикулярних напрямках, що помітно на діаграмі кутів нахилу (рис. 3.10,б). На поверхні ролика ці напрямки розташовуються паралельно та нормально до його поздовжньої осі. Автоматизовано виявлені переважаючі напрями розтріскування співпадають з отриманими раніше під час пошарового зішліфовування ролика МБЛЗ, знятого з експлуатації [19]. Аналіз орієнтації множинного розтріскування свідчить, що ріст тріщин термічної втоми очевидно викликаний згинальними напруженнями, перпендикулярними до осі ролика.

Для виявлення залежностей глибини тріщини від її довжини поверхню досліджуваного зразка зішліфовували у глибину з кроком 3 мм і після зняття кожного шару фотографували. В результаті для кожного зразка отримано множину поверхонь, які відображають картину тріщин на певних глибинах (рис.3.11).

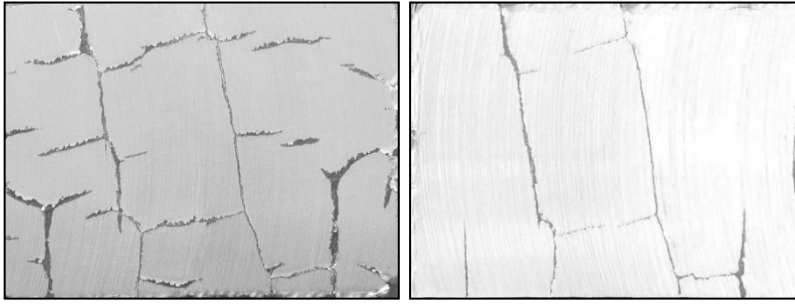


Рис. 3.11. Поверхні зразка (див. рис. 3.9), зішліфованого на глибину 3,0 мм та 6,0 мм відповідно

Було проведено програмну реалізацію алгоритму визначення глибини тріщини на основі її довжини. Припустивши, що залежність глибини тріщини від довжини описується лінійною залежністю виду $d_{cr} = kl_{cr} + b$ (де d_{cr} – глибина тріщини; l_{cr} – її довжина), проведено пошук таких значень коефіцієнтів апроксимації k та b , при яких похибка обчислення буде мінімальна.

Слід наголосити на кількох характерних лінійних стадіях тріщиноутворення. Зокрема, стадія I відповідає тріщинам довжиною $l_{cr} < 20$ мм. На цій стадії на форму фронту дефекту активно впливає розвантаження прилеглих ділянок матеріалу мережі тріщин розпалу, які сприяють релаксації напружень. Стадія II відповідає тріщинам з довжиною $20\text{ мм} \leq l_{cr} \leq l_{max}$ і аж до руйнування, тобто поширенню “довгих” дефектів (рис. 3.12).

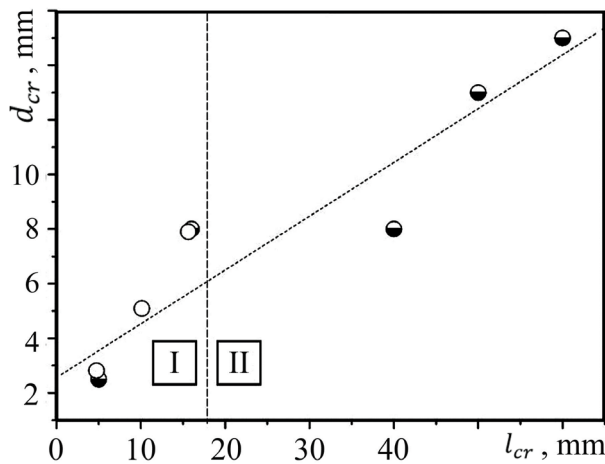


Рис. 3.12. Значення параметрів мережі множинного розтріскування, отримані під час зішліфовування натурального ролика МБЛЗ (●), обчислені за пропонуваною залежністю (O)

Якщо розглядати лише стадію I росту тріщини, то параметри її фронту набудуть значень $k = 0,5$, $b = 0$. Проте за аналізу “довгих тріщин” на стадії II $k = 0,19$, $b = 2,56$.

Оскільки форма фронту тріщини є випадковою величиною, наведено прямі діапазону, які відповідають крайнім значенням залежностей, що описують взаємозв’язок глибини та довжини тріщини. Отримані дані узгоджуються з даними [21].

Отримані закономірності взаємозв’язку довжини і глибини тріщини дозволяють відтворювати (моделювати) її глибину. За результатами автоматизованого аналізу виявлено, що тріщини, розміщені вздовж осі ролика, є, як правило, довгими, а перпендикулярні до осі об’єднуються з ними, формуючи сітку розпалу. Таким чином, об’єктом діагностичного контролю мають бути переважно “осьові” тріщини, які становлять найбільшу небезпеку. Пропонований метод дозволяє оцінювати глибину тріщин за параметрами

ідентифікованої довжини дефекту і може бути використаний для проведення експрес-аналізу розтріскування поверхонь металургійного обладнання.

На рис. 3.13 подано розподіл помилок обчислення глибини тріщин при послідовних зішліфовуваннях зразка (рис. 3.11), залежно від значень коефіцієнтів апроксимації k та b . З діаграми бачимо, що існує діапазон значень коефіцієнтів, у якому для розглянутих зразків підтверджується припущення про лінійну залежність глибини тріщини від її довжини. Вибір значень коефіцієнтів апроксимації k та b з цього діапазону дозволяє побудувати модель тріщини, яка адекватно відображатиме залежність глибини тріщини від її довжини. За допомогою такої моделі на основі плоского двовимірного зображення поверхні розтріскування можна сформулювати схематичну тривимірну картину, яка характеризуватиме поширення тріщин у глибину [22].

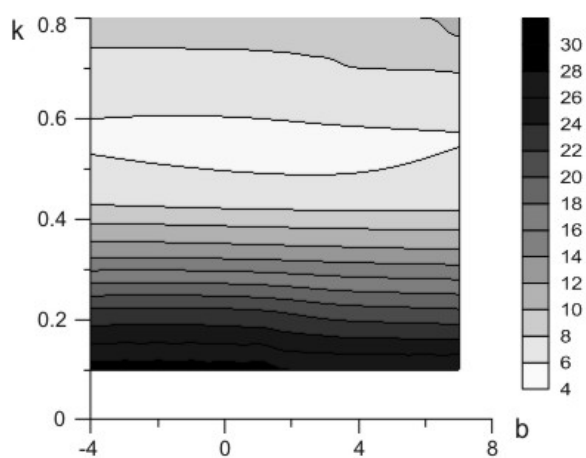


Рис. 3.13. Похибки обчислення глибини тріщини (мм) залежно від значень коефіцієнтів k та b

3.5. Вплив параметрів алгоритму на результат виявлення тріщин

Найважливіші параметри описаного алгоритму – розмір вікна фільтра p_{fs} та границя порогування p_{th} [18]. Розмір вікна фільтра (рис.3.14,а) впливає на процеси "відсіювання" викидів серед фонових пікселів та об'єднання розрізнених фрагментів тріщин. Тому його зміна може суттєво змінити кінцевий результат розпізнавання. Границя фону є важливим параметром, який суттєво впливає на результат виокремлення на зображенні об'єктів розпізнавання. Неправильний вибір цього параметра призведе до того, що частина об'єктів розпізнавання буде прийнята за фон, або ж будуть знайдені "фантомні" об'єкти, які насправді є частиною фону. Зміна границі фону спричиняє зміщення краю знайдених на зображенні об'єктів на величину W_L (рис. 3.14,б), унаслідок чого можуть дещо змінюватися геометричні характеристики тріщин, обчислені в результаті роботи алгоритму.

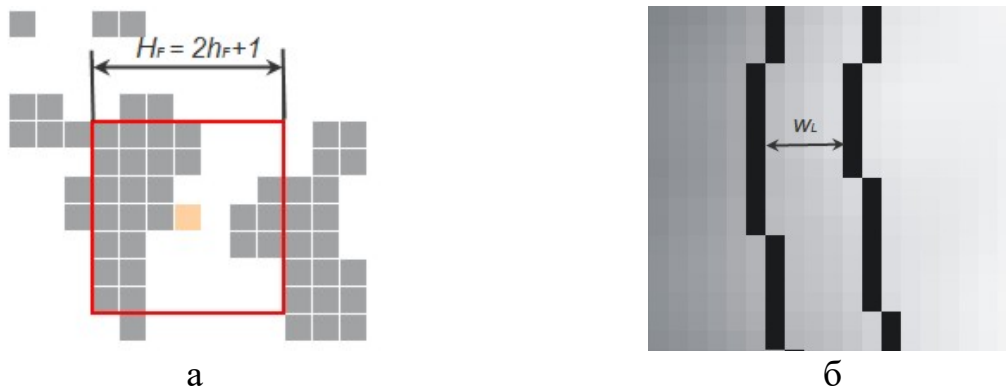


Рис. 3.14. Вплив головних параметрів алгоритму на результат розпізнавання тріщин: розмір ядра фільтра впливатиме на процес об'єднання відокремлених фрагментів тріщини (а), а зміна границі фону спричиняє зміщення розпізнаного краю об'єкта на відстань W_L (б)

Обидва розглянуті параметри алгоритму безпосередньо впливають на положення отриманих каркасних (серединних) ліній. Тому важливим є питання оцінювання їх впливу на точність визначення розпізнаних тріщин. Оцінювання впливу цих параметрів проводили дослідженням роботи алгоритму зі зміною їх величини у певному діапазоні значень. Для цього для кожного набору значень параметрів (p_{fs} та p_{th}) фіксували множину точок $P = \{p_i\}$, які формують каркасну лінію. Отримані таким чином масиви P використовували для визначення зміщення пікселів каркасних ліній залежно від значень досліджуваних параметрів алгоритму (рис. 3.15).

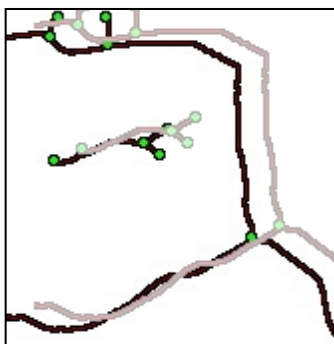


Рис. 3.15. Зміщення каркасної лінії при зміні параметрів алгоритму

Як показали дослідження, інші параметри алгоритму мають незначний вплив на результат розпізнавання. Тому в загальному сукупну похибку визначення положення каркасної лінії тріщини ξ , зумовлену налаштуванням параметрів алгоритму, можна обчислити так:

$$\xi = \xi_{fs} + \xi_{th}, \quad (3.6)$$

де ξ_{fs} – похибка, зумовлена зміщенням точки при налаштуванні розміру ядра фільтра; ξ_{th} – похибка налаштування границі порогування.

Для оцінювання впливу зміни вказаних параметрів алгоритму на величину зміщення каркасної лінії значення відносної границі фону p_{th} змінювали в межах 5...30%, а розмір ядра фільтра p_{fs} – від 5 до 15 пікс. При цьому для кожного набору значень параметрів фіксували свою множину точок каркасної лінії $F^\mu(p_{th}, p_{fs})$, де $\mu \in [1 \dots N]$, а N – кількість досліджених комбінацій значень

параметрів. Щоб обчислити величину зміщення каркасної лінії, для кожної точки F_1^μ знаходили найближчу точку множини F_2^μ , й обчислювали відстань між ними. В результаті таких розрахунків отримано сукупність множин, які характеризують зміщення точок каркасної лінії $\delta^\mu(p_{th1}, p_{fs1}, p_{th2}, p_{fs2})$. Кожен елемент δ_i^μ дорівнює відстані від деякої точки $F_i^{\mu1}$ до найближчої точки $F_j^{\mu2}$:

$$\delta_i^\mu = |F_i^{\mu1}, F_j^{\mu2}|. \quad (3.7)$$

Проте зміна параметрів алгоритму не лише зміщує каркасні лінії (рис. 3.15), але незначною мірою змінюватиметься і сам їх рисунок: деякі фрагменти можуть зникати, а деякі – з’являтися. Тому не для кожної точки $F^\mu(p_{th}, p_{fs})$ можна знайти відповідну точку після зміни параметра алгоритму. В результаті цього множина $\delta^\mu(p_{th1}, p_{fs1}, p_{th2}, p_{fs2})$ міститиме грубі похибки (промахи), які не можна використовувати для оцінювання впливу параметрів алгоритму на точність визначення каркасної лінії.

Щоб забезпечити однорідність вибірки та видалити із неї промахи, виконували цензурування вибірки через використання критерію Райта. При цьому із сукупності значень $\delta^\mu(p_{th1}, p_{fs1}, p_{th2}, p_{fs2})$ видаляли ті, для яких виконувалась умова $|\delta_i - \bar{\delta}| \geq 3S_\delta$ (де S_δ – середнє значення, S_δ – стандартне відхилення вибірки).

Гістограма розподілу розрахованих значень δ^μ (для зображення на рис. 3.16,а) при зміні розміру ядра фільтра від 5 до 7 пікс та постійній границі фону 20% показано на рис. 3.16,б. Бачимо, що переважна кількість точок зміщується дуже незначно (всього на кілька пікселів).

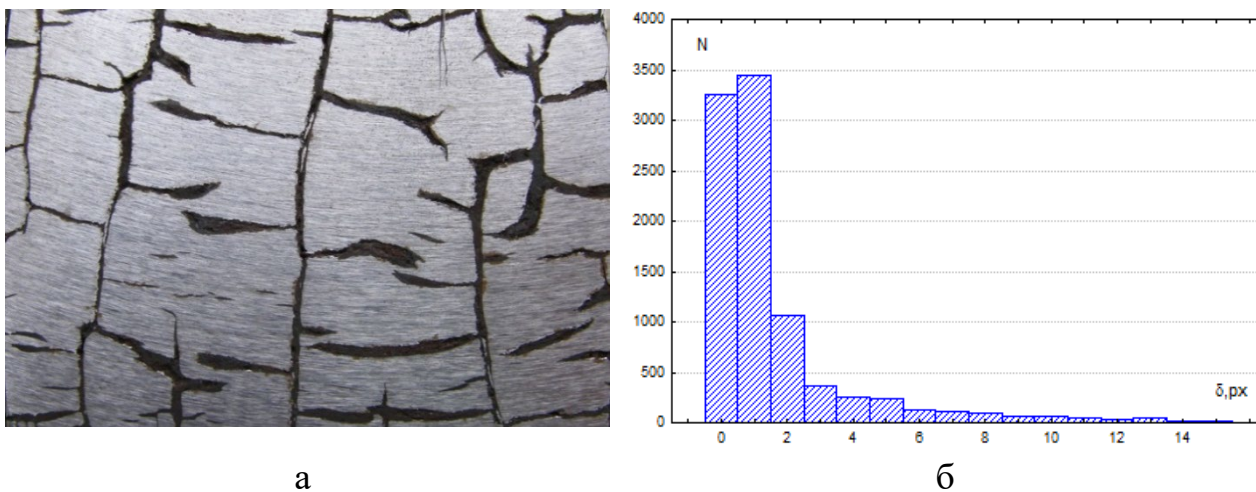


Рис. 3.16. Зображення поверхні з тріщинами (а) та гістограма розподілу зміщень точок каркасної лінії тріщин при зміні параметрів алгоритму (б)

Дослідження групи з 10 зображень показали, що за сталої границі фону $p_{th} = 20\%$ та зміні ядра фільтра p_{fs} від 5 до 15 пікс стандартне відхилення вибірки коливається в межах 1.6...7.9 пікс (рис. 3.17, а), а середнє зміщення становить 1.0...5.3 пікс. У перерахунку на одиницю довжини реального об’єкта середнє зміщення дорівнює 0.02...0.11 мм. Максимальне зафіксоване зміщення для різних вимірювань коливалось від 0.21 до 0.92 мм. При цьому

спостерігається чіткий тренд: збільшення розміру ядра пропорційно впливає на зміщення каркасних ліній тріщин.

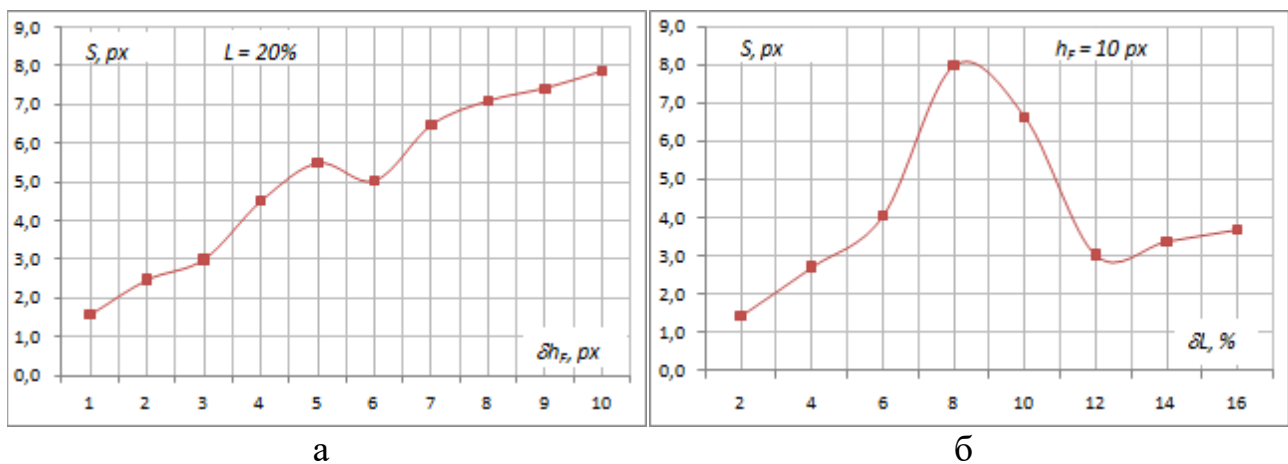


Рис. 3.17. Зміна стандартного відхилення вибірки зміщень каркасних ліній при зміні ядра фільтра (а) та зміні границі фону (б)

Деяко складнішою є залежність зміщення від зміни відносної границі фону (рис. 3.17,б). За результатами досліджень, при постійному розмірі ядра $p_{fs} = 5$ пікс та зміні p_{th} від 10 до 30%, стандартне відхилення коливається в межах 1.4...8.0 пікс. Середнє значення зміщення знаходилося в межах 0.8...4.2 пікс, а максимальне зміщення – 9.5...42.4 пікс (що відповідає 0.2...0.9 мм на дослідному зразку). Вплив границі фону на зміщення каркасної лінії є складнішим, оскільки його зміна деяко по-різному впливатиме на різні частини зображення. Крім цього, границя фону впливає на значно більшу кількість пікселів, ніж фільтр, оскільки при її зміні частина пікселів може взагалі відкидатися з подальшого розгляду, або ж, навпаки, вводиться до аналізу.

Щоб виявити вплив зміни кожного з досліджених параметрів алгоритму на кінцевий результат – геометричні параметри мережі тріщин, було проведено ряд досліджень, коли межу порогоування змінювали в межах 10...30%, а розмір вікна фільтра – від 5 до 15 пікс. При цьому фіксували такі кінцеві дані аналізу, як матрицю розподілу кутів нахилу тріщин і матрицю їх довжин. Матрицю кутів нахилу будували на підставі діаграми розподілу кутів [23,24], яка враховує частку загальної довжини всіх прямолінійних фрагментів, нахил яких знаходиться в певному діапазоні. Матриця кутів, побудована на основі множини $F^\mu(p_{th}, p_{fs})$, показує розподіл довжин тріщин залежно від значення кута нахилу і виглядає так:

$$A^\mu = \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_i + \delta\alpha & l_i \\ \alpha_{i+1} & \alpha_{i+1} + \delta\alpha & l_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n & \alpha_n + \delta\alpha & l_n \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де α_i – початковий кут діапазону; $\delta\alpha$ – розмір діапазону ($\alpha_{i+1} \rightarrow \alpha_i + \delta\alpha$); l_i – сумарна довжина тріщин, що потрапляють у діапазон $[\alpha_i; \alpha_{i+1})$; n – кількість діапазонів кутів.

Вектор довжин містить сукупність довжин прямолінійних ділянок тріщин, які виявлені на зображенні:

$$L^\mu = [\lambda_i \quad \lambda_{i+1} \quad \dots \quad \lambda_m], \quad (3.9)$$

де λ_i – довжина прямолінійної ділянки тріщини; m – кількість ділянок.

Дослідження показали, що зміна параметрів алгоритму несуттєво впливає на обчислені значення кутів нахилу тріщин [25-28]. Це пояснюється тим, що зміна межі порогоування або розміру ядра фільтра викликають приблизно симетричне щодо осі тріщини розширення (або звуження) її країв. Тому нахил отриманої після скелетизації середньої лінії змінюється мало. Аналіз зразків розтрісканої поверхні показав, що при зміні параметрів алгоритму розкид загальної довжини всіх прямолінійних фрагментів тріщин, що потрапляють у довільний кутовий діапазон, не перевищував 3.5% від середнього значення.

Дещо по-іншому зміна параметрів алгоритму впливає на обчислення довжини тріщини. На рис. 3.18,а наведено графіки, що демонструють зміну довжини тріщин, отриманих для зображення (рис. 3.16,а), при чотирьох крайніх значеннях межі порогоування і розміру вікна фільтра. Для наочності тріщини впорядковані за зростанням довжини (M – їх порядковий номер). Отримані результати показують, що для різних зображень у дослідженому діапазоні значень параметрів алгоритму відхилення довжини від середнього значення знаходиться в межах 0...89 пікс. З довірчою ймовірністю 95% відхилення не перевищує 71 пікс. При цьому величина похибки визначення довжини тріщини слабо пов'язана з довжиною, оскільки визначається, перш за все, характеристиками зображення (освітленість, контрастність і т.д). Природа впливу параметрів алгоритму на обчислення довжини полягає в тому, що на торцях тріщина буде, залежно від значень p_{fs} і p_{th} , "стискуватися" (або "розтягуватися"), оскільки частина пікселів по краях тріщини може видалятися з розгляду.

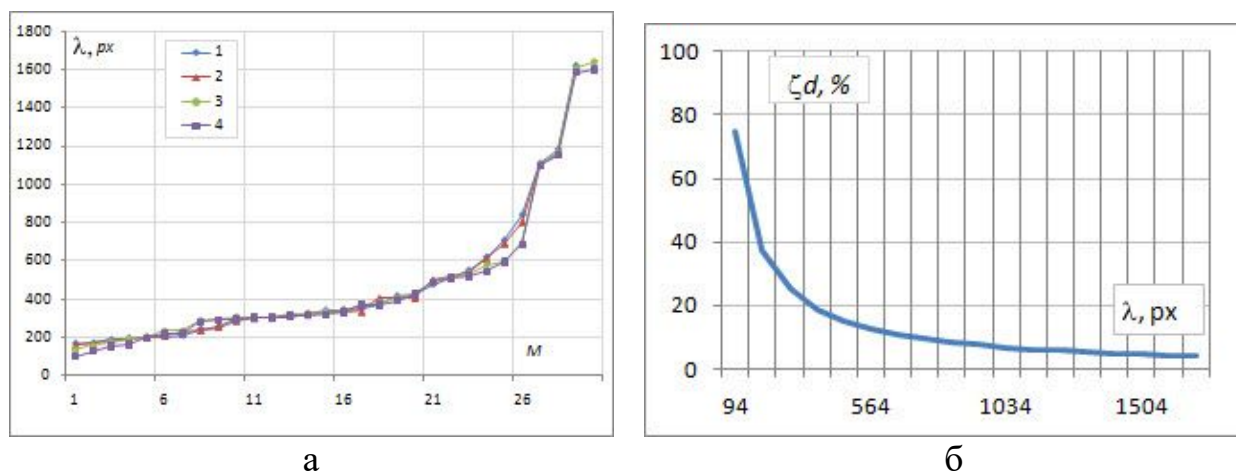


Рис. 3.18. Графіки довжин знайдених прямолінійних ділянок тріщин λ для різних значень параметрів алгоритму (а): 1 – при $p_{fs} = 5$ пікс, $p_{th} = 20\%$; 2 – при $p_{fs} = 10$ пікс, $p_{th} = 10\%$; 3 – при $p_{fs} = 10$ пікс, $p_{th} = 30\%$; 4 – при $p_{fs} = 15$ пікс, $p_{th} = 20\%$. Графік відносної похибки визначення довжини тріщини (б)

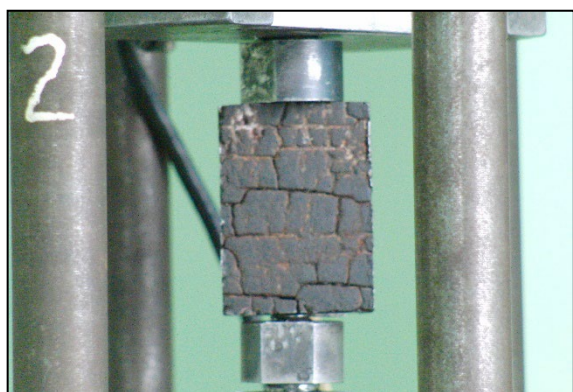
На рис. 3.18,б наведено графік зміни відносної похибки визначення розміру тріщини залежно від її довжини. Таким чином, для тріщин довжиною понад 250 пікс відносна похибка визначення довжини (для використаного способу

отримання зображення) не перевищує 25%. Водночас залежність величини зменшення країв тріщини від значень параметрів алгоритму можна до певної міри передбачити, розробивши шкалу компенсації.

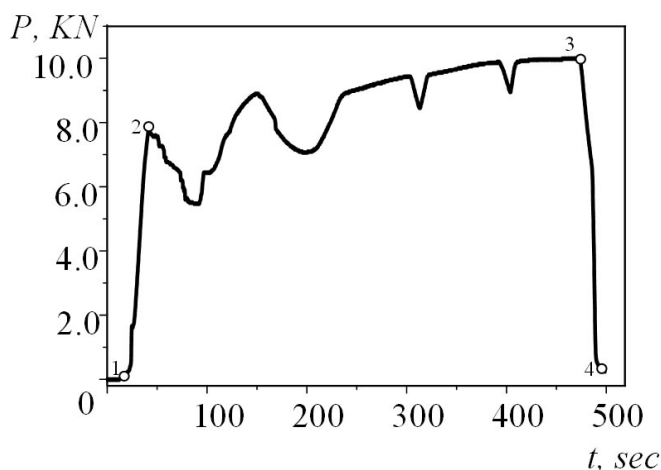
3.6. Дослідження деформаційної поведінки матеріалу, пошкодженого сіткою тріщин термовтоми

Існуючі критерії ідентифікації множинних дефектів базуються переважно на врахуванні їх морфологічних ознак і окремих механізмів коалесценції [27, 28]. Їх виділення ґрунтується на визначенні контуру об'єкта з інтерполяцією між точками ідентифікації. При цьому виявляються дефекти різного розміру й конфігурації, окремі ділянки яких мають квазівпорядкований характер [29, 30]. Однак такий підхід має ряд недоліків, головним з яких є неможливість оцінки еволюції існуючої мережі дефектів. На нашу думку, цифрова діагностика подібних процесів вимагає розвитку структурно-орієнтованого підходу на основі механіки і цифрових методів ідентифікації, орієнтованих на виявлення зон розломів, оцінювання їх будови і кінетики розвитку [31, 32].

Нами проведено дослідження закономірностей кінетики старту мікрodefектів у розломно-блоковому середовищі [33]. Для дослідження використано призматичні зразки шириною $b = 40$ мм і товщиною $t = 10$ мм, висота темплети становила $L = 50$ мм. Випробування проводили в умовах одновісного розтягу на гідравлічній випробувальній машині ZD 100Pu (рис. 3.19,а). Для вимірювання осьової деформації зразків використовували метод тензометрії з точністю вимірювання деформацій до 10^{-3} мм. Проводили цифрову фотозйомку поверхні навантаженого зразка і подальший автоматичний аналіз геометрії розтріскування. Результат програмного аналізу містить сукупність кількісних параметрів, які характеризують стан поверхні зразка.



а



б

Рис. 3.19. Схема випробування зразка з сіткою тріщин термовтоми (а); залежність навантаження зразка P від часу деформування t (б)

Випробування проводили за схемою статичного розтягування, при якій напружено-деформований стан матеріалу зразка був таким же, як у металі ролика МБЛЗ при експлуатаційному навантаженні.

Розвиток процесу множинного руйнування на різних масштабних рівнях вимагає виявлення і формулювання єдиних закономірностей накопичення та розвитку дефектів. З позицій системного підходу суть проблеми полягає у спробі проведення аналізу не тільки за двома формальними системоутворюючими факторами – розміру тріщин і їх положенню в просторі, але враховуючи також структурно-ієрархічну будову матеріалу.

Локалізована пластичність виникає в зонах розтягу, де матеріал є у дуже нерівноважному стані. При цьому описати природу локалізації пластичності можна тільки при розгляді деформованого твердого тіла у вигляді багаторівневої системи [33].

Виділимо ряд стадій процесу навантаження залежно від деформаційно-силової поведінки зразка (рис. 3.19,б):

- 1-2. Ділянка пружного деформування характеризується мікрооднорідною деформацією переважно пружно-навантаженого матеріалу.
- 2-3. Розкриття найбільшого дефекту на фоні "стохастичної поведінки" другорядних, менших за розміром тріщин. При цьому розкривається тріщина, розташована нормально до осі навантаження. Однак її подальше поширення не відбувається у зв'язку з тим, що вона оточена неушкодженим матеріалом, який володіє достатнім запасом міцності, а також внаслідок його високої в'язкості. Незважаючи на її розкриття і падіння податливості зразка, відбувається перерозподіл напружень у матеріалі й деформування триває. Більше того, внаслідок значних релаксаційних процесів для подальшого деформування матеріалу слід докласти додаткове зусилля.
- 3-4. Розвантаження зразка проводиться для визначення зміни податливості матеріалу при руйнуванні.

Алгоритм аналізу кінетики розвитку пошкоджень зразка складається з двох етапів. Перший є підготовчим і призначений для розпізнавання на зображенні зон локалізації тріщин. Він складається з послідовних операцій фільтрування та порогоування. На другому етапі шляхом аналізу отриманого бінарного зображення обчислювали кількісні характеристики, які дозволяють оцінити деформаційний стан зразка і локалізувати зону його максимального пошкодження.

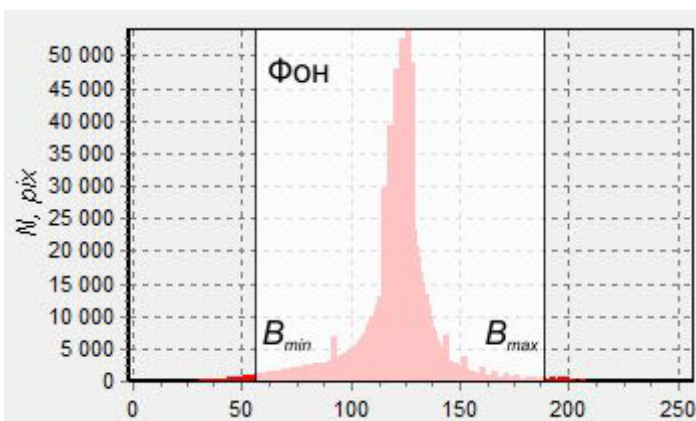


Рис. 3.20. Типова гістограма розподілу інтенсивності пікселів для досліджених зображень

Специфіка досліджуваних зображень така, що на однорідному фоні поверхні зразка знаходяться об'єкти тріщин. Залежно від глибини і впливу корозійного середовища вони можуть бути темнішими або світлішими за фон. Тому для їх локалізації на зображенні використано дворівневе бінарне перетворення. При цьому на гістограмі інтенсивності зображення (рис. 3.20) виділяти два рівні – V_{min} та V_{max} , що обмежують область фону. Кожна точка отриманого бінарного зображення i_b визначається за умовою:

$$i_b(x, y) = \begin{cases} 0, & i_f(x, y) > V_{max} \text{ або } i_f(x, y) < V_{min} \\ 1, & V_{min} \leq i_f(x, y) \leq V_{max} \end{cases} \quad (3.10)$$

На отриманому зображенні фону відповідають білі пікселі, а ушкодженим ділянкам (тріщинам) – чорні (рис. 3.21, б,д).

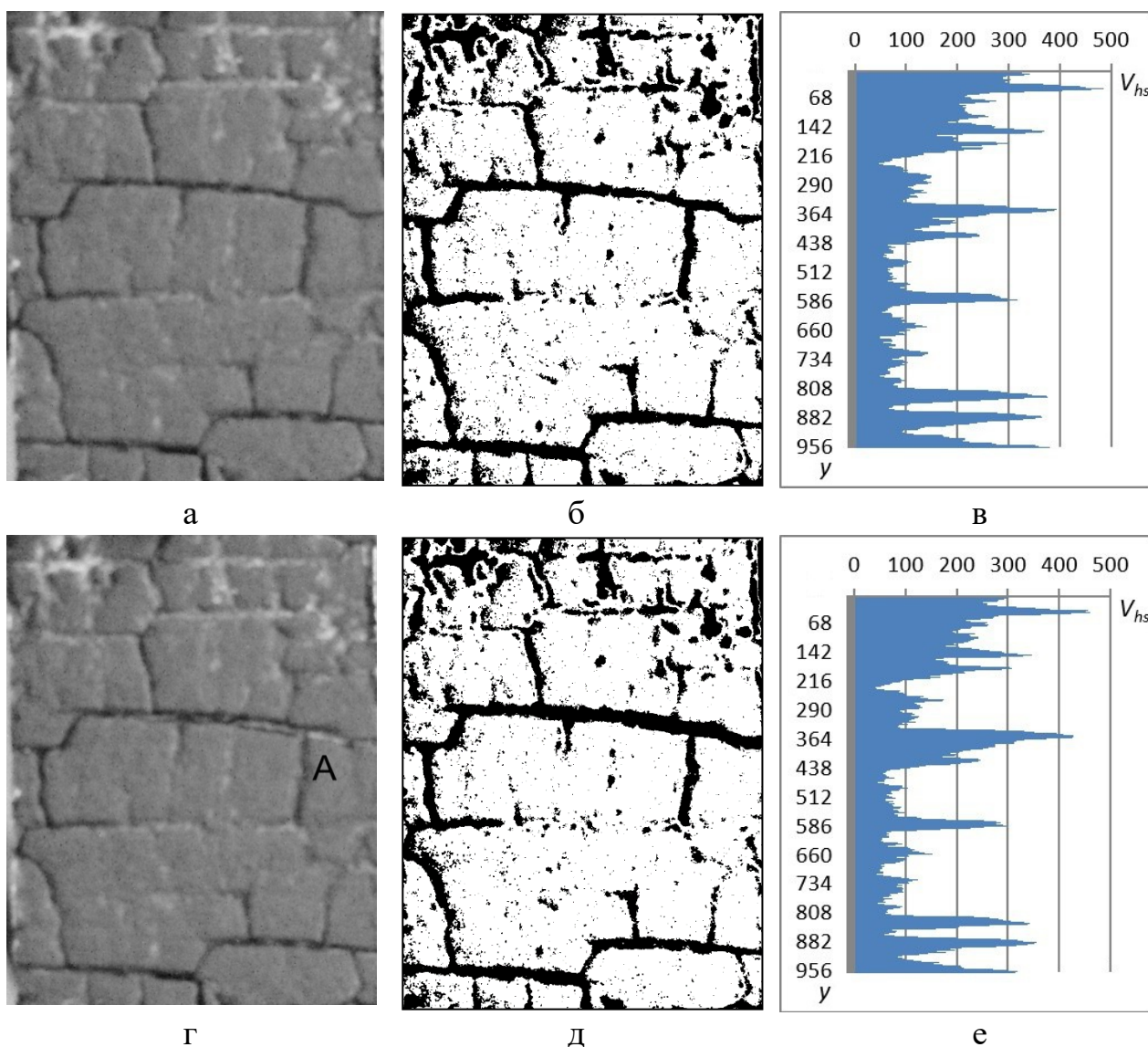


Рис. 3.21. Початкове цифрове зображення зразка (а), результат ідентифікації положення тріщин (б), вертикальна гістограма (в) у вільному стані (точка 1 на рис. 3.19,б) і при максимальному навантаженні (точка 3 на рис. 3.19,б) (г-е)

Оскільки сітка пошкоджень на досліджуваному зразку сформована взаємно перпендикулярними тріщинами, напрям яких приблизно співпадає з осями зображення, то для оцінювання загального стану пошкодженої поверхні для

кожного отриманого бінарного зображення розраховували вертикальну V_{hs} та горизонтальну H_{hs} гістограми:

$$V_{hs}(y) = \sum_{x=0}^{I_w-1} i_b(x, y),$$

$$H_{hs}(x) = \sum_{y=0}^{I_h-1} i_b(x, y),$$
(3.11)

де I_w, I_h – відповідно ширина і висота зображення.

Кожен елемент вертикальної та горизонтальної гістограм містить кількість ненульових пікселів відповідно у рядках та стовпчиках зображення. Гістограми (3.10) містять масив даних, на підставі якого оцінювали ступінь розтріскування аналізованої поверхні уздовж координатних осей і визначали ділянки зображення, що відповідають пошкодженим фрагментами поверхні. Гістограми дають загальну характеристику про ступінь розтріскування поверхні вздовж двох координатних осей. Вертикальні гістограми для дослідного зразка наведено на рис. 3.21, в,е.

Для оцінювання динаміки руйнування дослідного зразка використовували функції зміни вертикальної та горизонтальної гістограм відповідно:

$$DV = \frac{dV_{hs}(y)}{dt} \approx \frac{\Delta V_{hs}(y)}{\Delta t},$$

$$DH = \frac{dH_{hs}(x)}{dt} \approx \frac{\Delta H_{hs}(x)}{\Delta t},$$
(3.12)

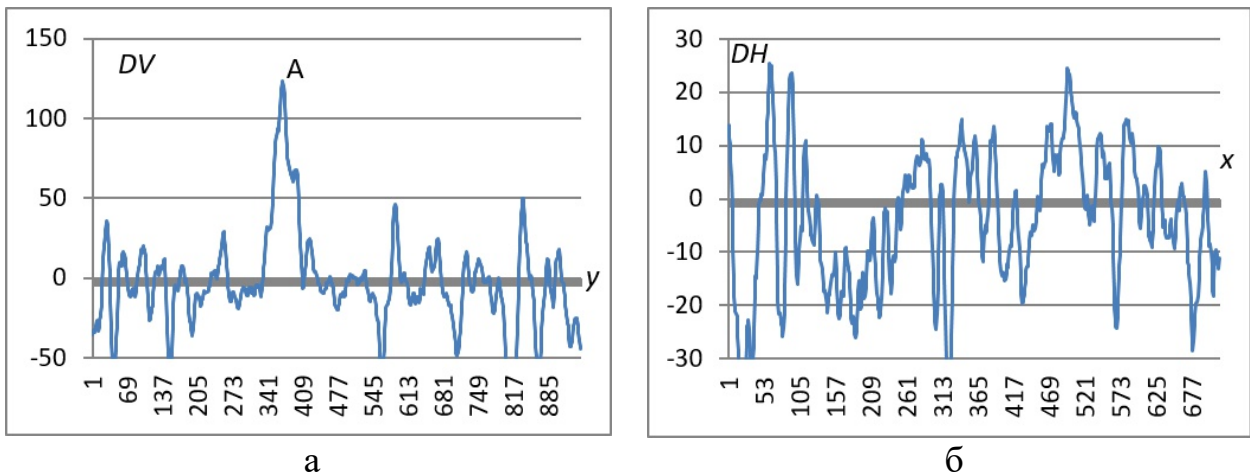


Рис. 3.22. Графіки функцій зміни вертикальної (а) і горизонтальної (б) гістограм, які відповідають діапазону часу $\Delta t = t_1 t_3$

На рис. 3.22, а зображено графік функції зміни вертикальної гістограми, що відповідає діапазону часу $\Delta t = t_1 t_3$ (рис. 3.19, б). На ньому присутні яскраво виражені піки, які відповідають зонам зображення, що характеризуються накопиченням (розкриттям) дефектів. При цьому найвищий пік (зона А на рис. 3.22, а) характеризує поведінку макродефектів у зоні А на рис. 3.21, г. Бачимо, що максимальне значення цього піку в середньому на 170% перевищує

екстремуми, які відповідають іншим зонам дослідного зразка. Використання запропонованого підходу дозволяє виявити зони зразка з найбільшою інтенсивністю дефектоутворення.

На підставі аналізу графіків функції зміни горизонтальної гістограми (рис.3.22, б) виявлено, що амплітуда максимумів значно менша, яскраво виражені максимуми відсутні, а сам характер змін є випадковим. Це пояснюється тим, що зони зразка, які найбільшою мірою схильні до руйнування, мають горизонтальну орієнтацію, тому переважно впливають на вигляд вертикальної гістограми.

Таким чином, результати аналізу функцій DV , DH дають можливість визначити переважну орієнтацію множинних дефектів, ідентифікувати зони максимального руйнування, а також оцінити кінетику поширення множинних дефектів.

З рис. 3.22,а бачимо, що функція зміни вертикальної гістограми містить ряд негативних викидів порівняно високої амплітуди. Головна причина їх виникнення – зміщення фрагментів зображення внаслідок розкриття тріщини в зоні А (рис. 3.21,г). Крім того, лінійне і кутове зміщення зразка протягом деформування, а також зміна параметрів алгоритму розпізнавання тріщин також призводить до появи шумів у функціях зміни гістограм.

Наявність таких шумів певною мірою ускладнює аналіз зміни гістограми й визначення зон локалізації руйнування, а також задає обмеження області застосування запропонованого методу. Методику можна застосовувати для порівняно значних змін у формі тріщин, при яких амплітуда зміни функції гістограми переважає над амплітудою шумів. Для усунення впливу високочастотних перешкод використали фільтрацію Фур'є. Дослідним шляхом встановлено, що для інформативного аналізу досить враховувати 7–10 нижніх гармонік.

Деформаційна поведінка матеріалу з множинними тріщиноподібними дефектами визначається геометричними та структурно-ієрархічними факторами. Тому форма діаграми об'єднує як ділянки деформування, так і "зриву навантаження", пов'язаного з локалізацією деформації в елементах розломно-блокових структур множинного розтріскування [23]. Крім того, різна глибина тріщиноподібних дефектів призводить до неоднорідності деформаційної поведінки і структурної перебудови матеріалу. Старт тріщини для такого матеріалу викликає релаксацію напружень у прилеглих ділянках, при цьому деформаційні процеси локалізуються в околиці магістрального дефекту [32]. Це й дозволяє реалізувати запропонований алгоритм, який "відстежує" деформаційні сингулярності на поверхні. Ідентифікація ділянок активації ротаційних зміщень структур множинного розтріскування дозволила виявити тріщиноподібні дефекти і проаналізувати їх деформаційну поведінку. При цьому високо- і низькоамплітудні коливання відповідають тріщинам термовтоми, а їх комплексна конфігурація формує зону підвищеної деформаційної активності [34-43].

3.7. Використання нечітких множин для оцінювання геометричних параметрів пошкоджень поверхні

Особливістю методів дослідження стану поверхні, заснованих на аналізі зображення, є те, що на кінцевий результат виявлення й обчислення параметрів пошкоджень впливає багато чинників: від зміни оптичних властивостей досліджуваної поверхні та специфіки її освітлення при отриманні фотозображення, до параметрів алгоритму, який використовується для обробки зображення. Таким чином, результат, отриманий на одному і тому ж зображенні при різних параметрах буде різним. Завдання вибору точних значень параметрів алгоритму для розпізнавання складне і не завжди може бути вирішене однозначно. Тому важливим є оцінювання впливу параметрів алгоритму на кінцевий результат; а також оцінювання діапазону можливого відхилення кінцевих розрахованих характеристик при зміні параметрів алгоритму. У ряді робіт розглядають проблему точності різних методик обробки зображень [18, 43, 44]. Однак внаслідок складності й різноманітності алгоритмів аналізу зображень, а також через наявність неконтрольованих вимірювальною системою факторів (наприклад, зміна освітленості поверхні), питання оцінювання залежності результатів розпізнавання від внутрішніх і зовнішніх умов вимірювання залишається відкритим.

Ми запропонували спосіб оцінювання варіативності результатів розпізнавання елементів структури пошкодженої поверхні при зміні основних параметрів досліджуваного алгоритму [45]. Спосіб полягає у множинному розпізнаванні зображення при різних наборах значень параметрів алгоритму, поданні отриманих результатів у вигляді нечіткої множини і подальшому аналізі цієї нечіткої множини.

У попередніх роботах [14, 15, 18] розроблено й описано алгоритм для розпізнавання дефектів зображення і розрахунку їх кількісних характеристик: координат, довжини, нахилу, площі, кількості. Такі характеристики дозволяють оцінити загальний стан досліджуваного зразка та виявити фундаментальні прояви кінетичних закономірностей накопичення пошкоджень.

Вхідними даними для алгоритму є цифрове зображення пошкодженої поверхні у градаціях сірого кольору. Базовий алгоритм для розпізнавання положення елементів структури пошкодження передбачає попередню обробку зображення, його фільтрування, бінаризацію отриманого зображення та його скелетизацію. В результаті послідовності зазначених операцій отримуємо множини точок, яка описує геометричні параметри мережі пошкоджень на дослідженому зображенні (рис. 3.23).

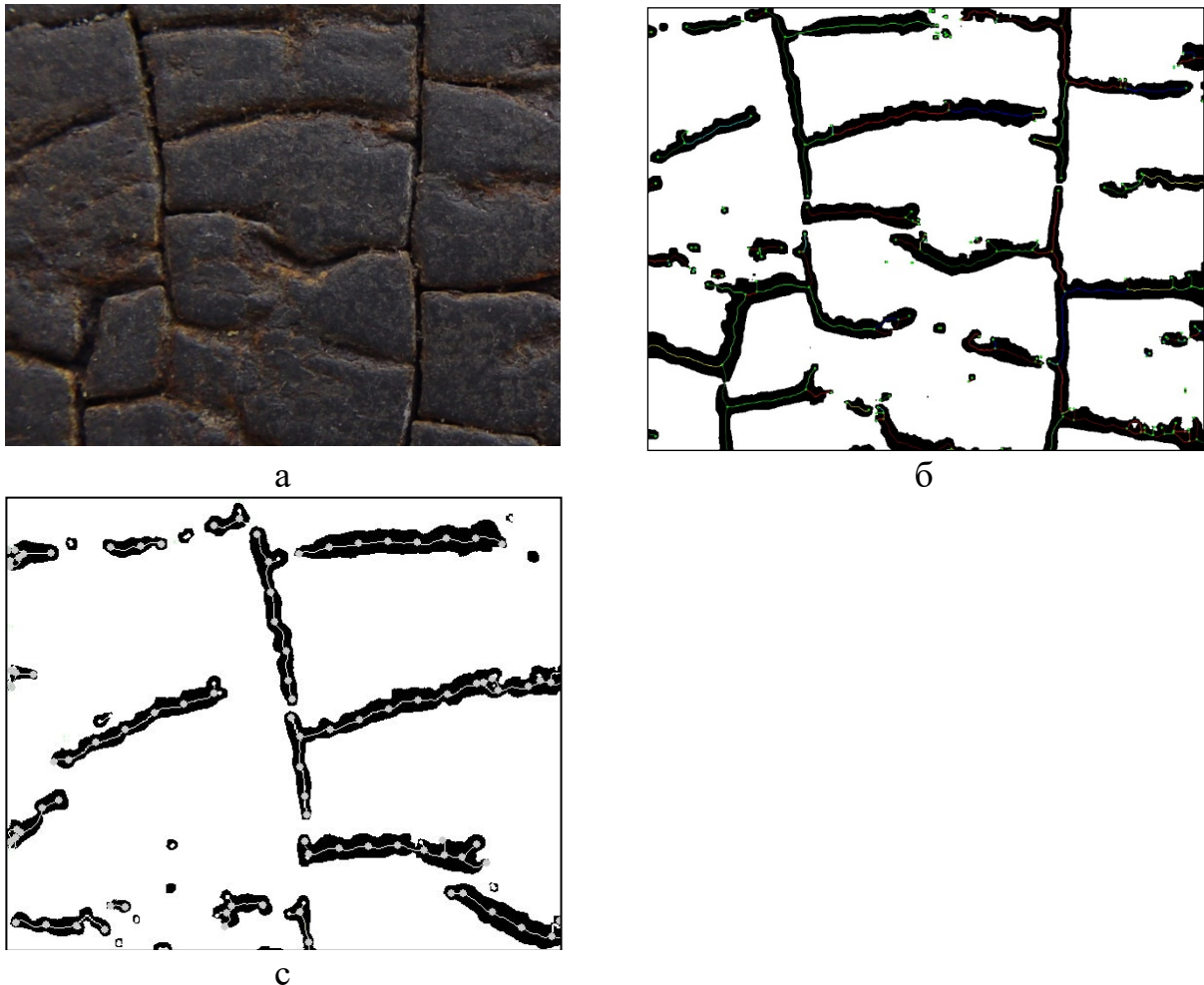


Рис. 3.23. Зображення поверхні ролика МБЛЗ. Початкове зображення з ушкодженнями у вигляді тріщин (а); результат сегментації вихідного зображення (б); збільшений фрагмент розпізнаного зображення з нанесеними каркасними лініями й опорними точками (в)

Для налаштування оптимальної роботи алгоритму використовують ряд параметрів, які важливі для правильного і точного розпізнавання шуканих об'єктів. Найважливіші з них – розмір вікна фільтра та межа порогування [18]. Вони впливають на віднесення пікселів до кластерів "фон" та "об'єкт". Тому неправильний підбір цих параметрів призведе до того, що частину об'єктів буде розпізнано як фон, або будуть знайдені фантомні об'єкти, які насправді є фоном. Зокрема, зміна межі порогування викликає зміщення краю знайдених на зображенні об'єктів. Внаслідок цього можуть змінюватися геометричні характеристики розпізнаних ушкоджень (тріщин), розраховані в результаті роботи алгоритму.

Позначимо за допомогою оператора \mathcal{B} сукупність дій базового алгоритму, які застосовуються до початкового зображення i_0 і в результаті яких отримується скелетне (каркасне) зображення i_s тріщин:

$$i_s(x, y) = \mathcal{B}(i_0(x, y)). \quad (3.13)$$

Визначимо також множину змінних параметрів алгоритму, які істотно впливають на результат його роботи, як $A = \{P_1, P_2, \dots, P_\eta\}$, де η – кількість параметрів. Наприклад, P_1 відповідає параметру "розмір вікна фільтра", P_2 – параметру "межа порогування" і т.д. Значення кожного з параметрів P_i може

змінюватися в діапазоні $[\pi_i^{min}, \pi_i^{max}]$ з кроком $\delta\pi_i$. Тоді $P = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_\eta)$ – конкретний набір значень параметрів, при яких отримано каркасні лінії в результаті застосування операції (3.12).

Позначимо множину всіх точок, які належать каркасним лініям при даному наборі значень параметрів алгоритму:

$$F(P) = \{(x, y) \mid \chi_F(x, y, P) = 1\},$$

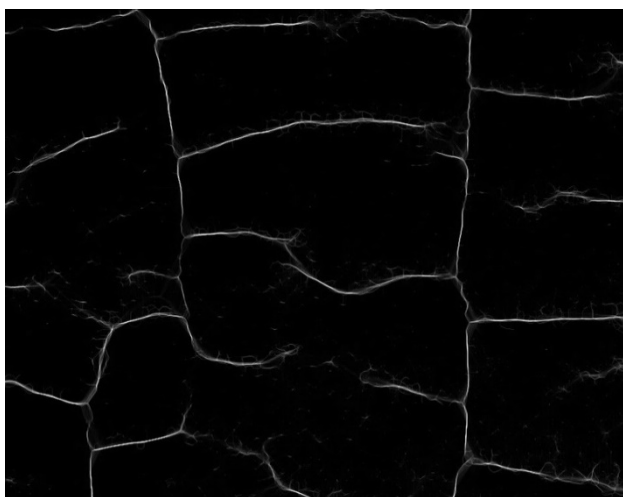
$$\chi_F(x, y, P) = \begin{cases} 1, \forall i_s(x, y) \in F(P) \\ 0, \forall i_s(x, y) \notin F(P) \end{cases} \quad (3.14)$$

де χ_F – характеристична функція, яка дорівнює 1, якщо піксель належить каркасній лінії, і 0 – в іншому випадку.

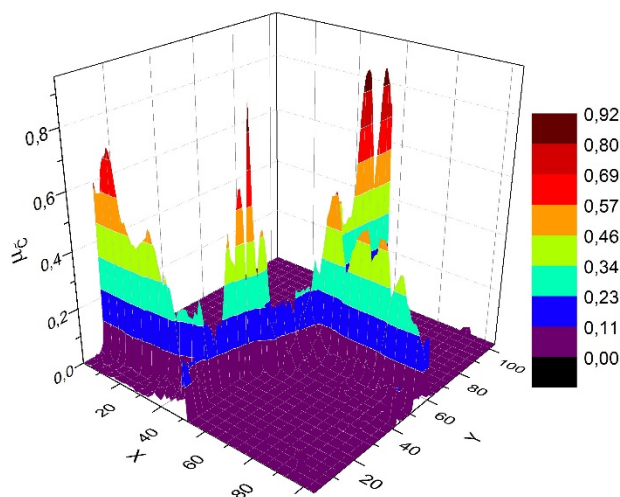
Кожному набору значень параметрів алгоритму $P_k, k = \overline{1, K}$ (де K – кількість наборів значень) відповідає своя множина точок $F(P_k)$. Визначимо функцію, яка підраховує частоту потраплянь точки (x, y) у каркасну лінію для всіх досліджених K наборів значень:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^K \chi_F(x, y, P_k). \quad (3.15)$$

Якщо подати функцію $S(x, y)$ як напівтонове зображення (інтенсивність пікселя представляє значення функції), то світліші ділянки будуть відповідати частинам зображення, на яких каркасна лінія пошкодження розпізнавалась частіше при різних наборах значень параметрів $P = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_\eta\}$ (рис. 3.24, а). Цим зонам відповідають піки на тривимірному поданні (рис. 3.24, б). Ширина смуг на зображенні рис. 3.24, а, (або ширина "гірського хребта" на рис. 3.24, б) показує розкид обчислених значень.



а



б

Рис. 3.24. Функція $S(x, y)$ підрахунку кількості потраплянь точки у каркасну лінію. Приклад функції для зображення на рис. 3.23 (а); фрагмент тривимірного подання нечіткої множини \tilde{C} (б)

Зауважимо, що функція, зображена на рис. 3.24,а, отримана при сукупності значень параметрів алгоритму, які значно перевищують межі їх оптимального діапазону. Опрацьована сукупність значень параметрів включала такі набори значень, при яких шукані на зображенні об'єкти пошкоджень не розпізнавалися взагалі, або ж помилково розпізнавалися практично по всій площі зображення. Але, не дивлячись на відсутність попередньо підібраних оптимальних значень параметрів алгоритму, функція $S(x, y)$ досить чітко виділила найімовірніші зони ушкоджень (див. рис. 3.24). Таким чином, існують передумови для самоналаштування запропонованого алгоритму (автоматичного пошуку оптимальних значень параметрів).

Якщо значення функції $S(x, y)$ нормалізувати, то зображення на рис. 3.24,а можна подати у вигляді нечіткої множини $\tilde{C} = \{(x, y) | \mu_{\tilde{C}}(x, y)\}$, функцію приналежності якої $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ задає вираз:

$$\mu_{\tilde{C}}(x, y) = \frac{S(x, y)}{\sup(S)}. \quad (3.16)$$

Функція приналежності $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ визначає ймовірність потрапляння точки в каркасну лінію для дослідженої сукупності значень параметрів алгоритму. Тоді точки, що належать каркасним лініям з певною ймовірністю, містить α -зріз:

$$\tilde{C}(\alpha) = \{(x, y) | \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1]. \quad (3.17)$$

Нечітка множина \tilde{C} містить повну інформацію про ступінь приналежності його точок каркасним лініям пошкоджень поверхні, які розраховані при всіх можливих наборах значень параметрів $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$, і представляє нечітку каркасну лінію цих ушкоджень.

Для можливості практичного застосування до отриманих результатів математичного апарату нечіткої геометрії введемо поняття нечіткої квазіточки. *Нечіткою квазіточкою* будемо називати обмежену нечітку множину в просторі \mathbb{R}^2 . Функція приналежності нечіткої квазіточки $\tilde{P}(x, y)$ задовольняє умові: $\tilde{P}(\alpha)$ є обмеженою підмножиною \mathbb{R}^2 для всіх α , $0 \leq \alpha \leq 1$.

Щоб оцінити ступінь відхилення координат каркасної лінії в певних зонах, виділимо на зображенні, представленою у вигляді функції $S(x, y)$ (рис. 3.24,а), опорні квазіточки, кожна з яких обмежена сукупністю пов'язаних точок, розташованих у вузлових місцях "нечітких каркасних ліній". До таких місць відносяться: кінцеві зони "нечітких каркасних ліній", зони їх перегину, зони їх розгалуження.

Для виділення опорних квазіточок виконаємо ряд операцій. Спочатку сформуємо множину $F_f \subseteq \tilde{C}(\alpha_0)$, застосувавши алгоритм скелетизації до α -зрізу $\tilde{C}(\alpha_0)$. Величина α_0 визначає нижнє граничне значення, так що для всіх α -зрізів $\tilde{C}(\alpha)$ при $\alpha < \alpha_0$, всі точки $(x, y) \notin \tilde{C}(\alpha_0)$ вважаються шумом, для них приймається $\mu_{\tilde{C}}(x, y) = 0$. У результаті цього отримаємо розгалужений ланцюжок точок з одиничною товщиною, який гарантовано проходить уздовж усіх віток α -зрізу $\tilde{C}(\alpha_0)$ від їх початку до кінця (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Фрагмент α -зрізу $\tilde{C}(\alpha_0)$ нечіткої множини. Світла лінія одиничної товщини представляє множину F_f ; світлі кружки зображують підмножину вузлових точок F_{f_0}

Далі у множині точок F_f виділимо підмножину вузлових точок $F_{f_0} = \{f_{f_0}\}$, до яких віднесемо кінці віток, що належать F_f , точки перегину і точки розгалуження. Підмножину $F_{f_0} \subseteq F_f$ сформуємо послідовним перебором елементів F_f і відбором тих, які задовольняють умовам: є початковими точками (мають одного сусіда), точками розгалуження (що мають більше двох сусідів), і точками перегину (в них апроксимуюча пряма відхиляється більше певного допустимого значення кута φ відносно попередньої ділянки).

Як квазіточки будемо розглядати околиці точок $f_{f_0} \in F_{f_0}$ з радіусом $\rho(f_{f_0})$ у множині \tilde{C} . Нехай $d(u, v)$ – Евклідова метрика відстані між точками u і v . Околицею довільної точки u вважатимемо нечітку підмножину $\tilde{Q} \subseteq \tilde{C}$

$$\tilde{Q} = \{\tilde{C}(x, y) | d((x, y), u) \leq \rho(f_{f_0}), \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha_0\} \quad (3.18)$$

з функцією приналежності

$$\mu_{\tilde{Q}}(x, y) = \mu_{\tilde{C}}(x, y). \quad (3.19)$$

Нехай N_r – підмножина точок множини \mathbb{N}^2 , розташованих у межах кола з центром у точці u і радіусом r : $N_r = \{(x, y) | d((x, y), u) \leq r\}$, $r \in \mathbb{N}$. Радіус околиці визначимо як максимальний радіус, при якому відносна частка елементів множини \tilde{C} , які потрапляють в коло з центром у точці u , буде не менше, ніж граничне значення δ_ρ :

$$\rho(f_{f_0}) = \sup \left\{ r \mid \frac{|\tilde{Q}|}{|N_r|} \geq \delta_\rho \right\}. \quad (3.20)$$

Нечітку множину \tilde{Q} будемо розглядати як нечітку квазіточку. Виділені описаним способом квазіточки є вузловими точками нечіткого каркаса пошкоджень поверхні, на підставі яких розраховуватимемо геометричні параметри пошкоджень: довжину і нахил, а також оцінимо ступінь нечіткості розрахованих значень. На рис. 3.26 зображено фрагмент тривимірного подання групи нечітких множин \tilde{Q} , які відповідають кільком виявленим квазіточкам.

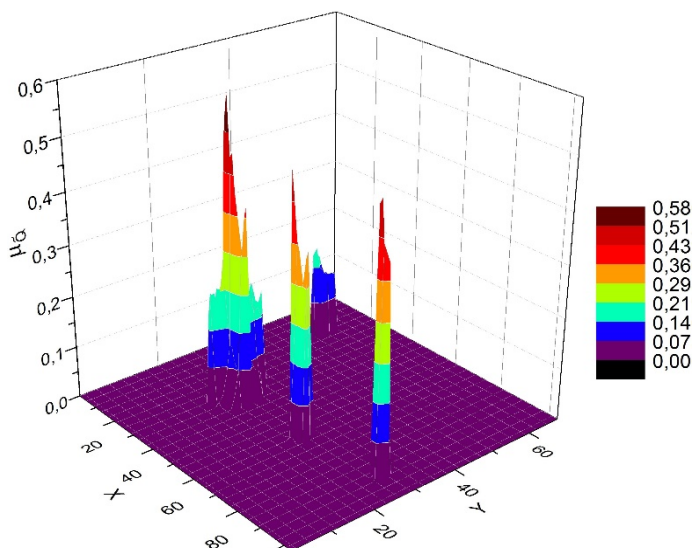


Рис. 3.26. Тривимірне подання нечітких множин \tilde{Q} , які описують квазіточки нечіткого каркасу

Для оцінювання розкиду координат квазіточки використаємо зовнішній діаметр нечіткої множини [46]:

$$E(\tilde{Q}) = \sup_{\xi} \left\{ \sum_{j=1}^{I_{h\xi}} \sup_{x(\xi)} \{ \mu_{\tilde{Q}}(x(\xi), y(\xi)) | y(\xi), x = \overline{1, I_{w\xi}}, y = \overline{1, I_{h\xi}} \} \Delta x | \xi \in \overline{0, \Xi} \right\}, \quad (3.21)$$

де ξ – кут повороту системи координат щодо початкового положення, $\Xi = 359^\circ$; $I_{w\xi}$, $I_{h\xi}$ – відповідно ширина і висота зображення в напрямку осей $x(\xi)$ і $y(\xi)$; Δx – величина дискретизації, приймали, що $\Delta x = 1$ пікс.

Діаметр (3.20) залежить не тільки від геометричних розмірів множини \tilde{Q} , але й від значення її функції приналежності $\mu_{\tilde{Q}}$. Для чіткої множини зовнішній діаметр буде максимальним, коли вісь $x(\xi)$ прийме напрямок, при якому проекція множини $\mu_{\tilde{Q}}$ має найбільший розмір. Для зображення, функція $S(x, y)$ якого показана на рис. 3.24,а, зовнішній діаметр для різних квазіточок коливається в межах від 2 до 14 пікс, середнє значення – 4 пікс.

Для обчислення відстані між нечіткими квазіточками за основу взято підхід, запропонований в [47] для визначення відстані між нечіткими точками. Нехай \tilde{D} – нечітка відстань, а $\mu_{\tilde{D}}(d)$ – її функція приналежності. Тоді для певного α -зрізу нечітка відстань між двома нечіткими квазіточками \tilde{Q}_1 і \tilde{Q}_2 складе:

$$\begin{aligned} \tilde{D}(\alpha) &= \{d(u, v) | u \in \tilde{Q}_1(\alpha), v \in \tilde{Q}_2(\alpha)\}, 0 \leq \alpha \leq 1, \\ \mu_{\tilde{D}}(d) &= \sup\{\alpha | d \in \tilde{D}(\alpha)\}, \end{aligned} \quad (3.22)$$

де $\tilde{Q}_1(\alpha)$, $\tilde{Q}_2(\alpha)$ – α -зрізи нечітких множин відповідно першої та другої квазіточок.

У загальному випадку функція приналежності $\mu_{\tilde{D}}(d)$, що описує розподіл можливих значень довжин між квазіточками, носить випадковий характер. На рис. 3.27 зображено приклади графіків $\mu_{\tilde{D}}(d)$, отриманих при аналізі зображення (рис. 3.23), коли $\alpha = \alpha_0 = 0.04$.

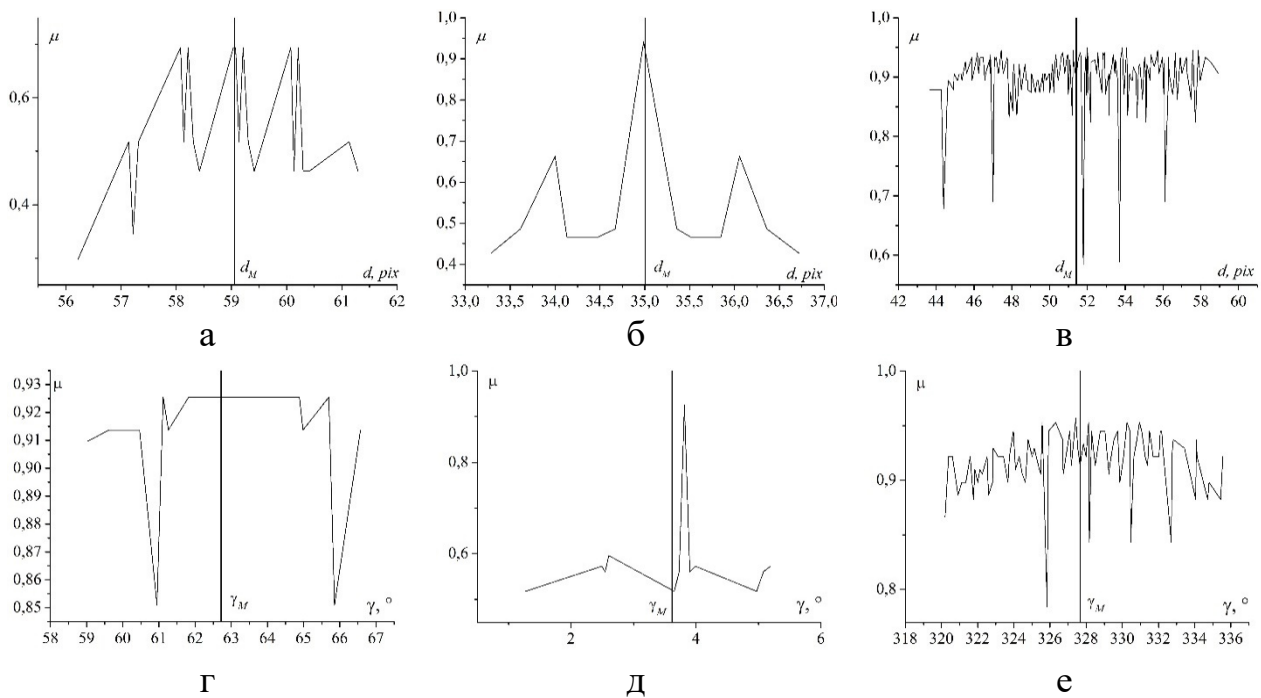


Рис. 3.27. Графіки функції приналежності μ для кількох розрахованих геометричних параметрів тріщин. Функція μ для відстаней (а-в) і кутів (г-е). Значення d_M, γ_M – результат дефазифікації через центр мас функції приналежності

Інший важливий параметр, що характеризує мережу ушкоджень досліджуваної поверхні – кут нахилу прямолінійних фрагментів. Нехай $\gamma(u, v)$ – кут нахилу між точками u та v . Кут нахилу кожного відрізка між двома нечіткими квазіточками \tilde{Q}_1 і \tilde{Q}_2 розглянемо як нечітке число $\tilde{\Gamma}$ з функцією приналежності $\mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma)$:

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}(\alpha) &= \{\gamma(u, v) | u \in \tilde{Q}_1(\alpha), v \in \tilde{Q}_2(\alpha)\}, 0 \leq \alpha \leq 1, \\ \mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma) &= \sup\{\alpha | \gamma \in \tilde{\Gamma}(\alpha)\}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Для нечітких відстаней і кутів (3.21) – (3.22) функція приналежності показує ймовірність того, що для дослідженого набору значень параметрів вимірювана величина набуде певного значення. У загальному, при вищих значеннях α розкид функцій приналежності $\mu_{\tilde{D}}(d)$ і $\mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma)$ буде зменшуватися, також будуть звужуватися інтервали їх областей визначеності.

Для чіткого оцінювання отриманого нечіткого параметра (довжини, кута нахилу) виконується дефазифікація за формулою центру мас:

$$x_M = \frac{\sum x_i \mu(x_i)}{\sum \mu(x_i)}, \quad (3.24)$$

де x_i – елементи нечіткої множини.

На рис. 3.27 наведено обчислені таким чином точні значення відстані d_M і кута нахилу γ_M .

Нечіткі множини \tilde{D} і $\tilde{\Gamma}$ містять повну інформацію про розрахунок довжини або нахилу прямолінійного фрагмента розпізнаного на зображенні каркаса. Ця інформація отримана при різних наборах значень параметрів алгоритму розпізнавання. Таким чином, коли чіткі критерії вибору значень параметрів

алгоритму відсутні, запропонований алгоритм дозволяє проаналізувати результат для сукупності можливих значень кожного параметра. На підставі отриманих нечітких результатів можна розрахувати найвірогідніше положення каркасної лінії пошкодження для всіх досліджених наборів значень параметрів.

Для оцінювання параметрів розкиду обчислених значень можна використовувати, наприклад, математичний апарат теорії ймовірностей.

3.8. Автоматизований аналіз стану поверхні, пошкодженої мережею тріщин термовтоми

Відомо, що система тріщиноподібних дефектів визначає деформаційні властивості матеріалу, а зварні шви перерозподіляють деформації поверхні зразка, знижуючи інтенсивність деформування прилеглих тріщин.

Характерною особливістю такого матеріалу є виникнення локальних ділянок, навантажених стиском або за схемою "стиск + зсув". Така нетипова поведінка є результатом геометричних особливостей блоків матеріалу і їх орієнтацією до осі навантажування. Слід зазначити, що аналіз поведінки системи "матеріал – множинні дефекти" дозволяє встановити основні закономірності деформаційної перебудови механічних дисипативних структур. Використання отриманих результатів дозволить підвищити чутливість авіаційних сенсорів, забезпечити міцність нанопокриттів, геометрію модифікованих шарів нанотитанових імплантатів [36]. Їх вивчення забезпечує опис еволюції структури тріщин, множинного розкриття та морфологічних переходів (точок біфуркації) між ними [37]. Усі ці процеси відображаються на оптико-цифровому зображенні й можуть бути чисельно охарактеризовані за відповідними параметрами оцінювання.

Аналіз стану поверхні розтріскування проводили за бінарним зображенням $i_b(x, y)$. На його основі розраховували вертикальну та горизонтальну гістограми (3.11), а також функції зміни гістограм (3.12).

Площа тріщин піз час деформування (рис. 3.28) інтегрально відображала перебіг деформаційного процесу. У початковому стані вона становила $a_r = 0.25$, при максимальному навантаженні $a_r = 0.30$, в момент руйнування $a_r = 0.32$.

Аналізуючи деформаційну поведінку матеріалів з множинними тріщинами та враховуючи результати попередніх праць, можна зробити низку узагальнюючих висновків:

- процес деформування тіла з множинним дефектами є структурно-неоднорідним, його можна розглядати на основі підходів фізичної мезомеханіки;
- продемонстровано можливість використання оптико-цифрових методів та параметрів описування процесів активації дефектів які спричинені кінетичними особливостями деформування і локалізації деформацій.
- активація, або об'єднання дефектів, спричиняє перехід на вищий структурний рівень деформування;
- зразок руйнується за умови втрати зсувної макростійкості й переходу процесу деформування на макрорівень, а момент переходу є точкою біфуркації.

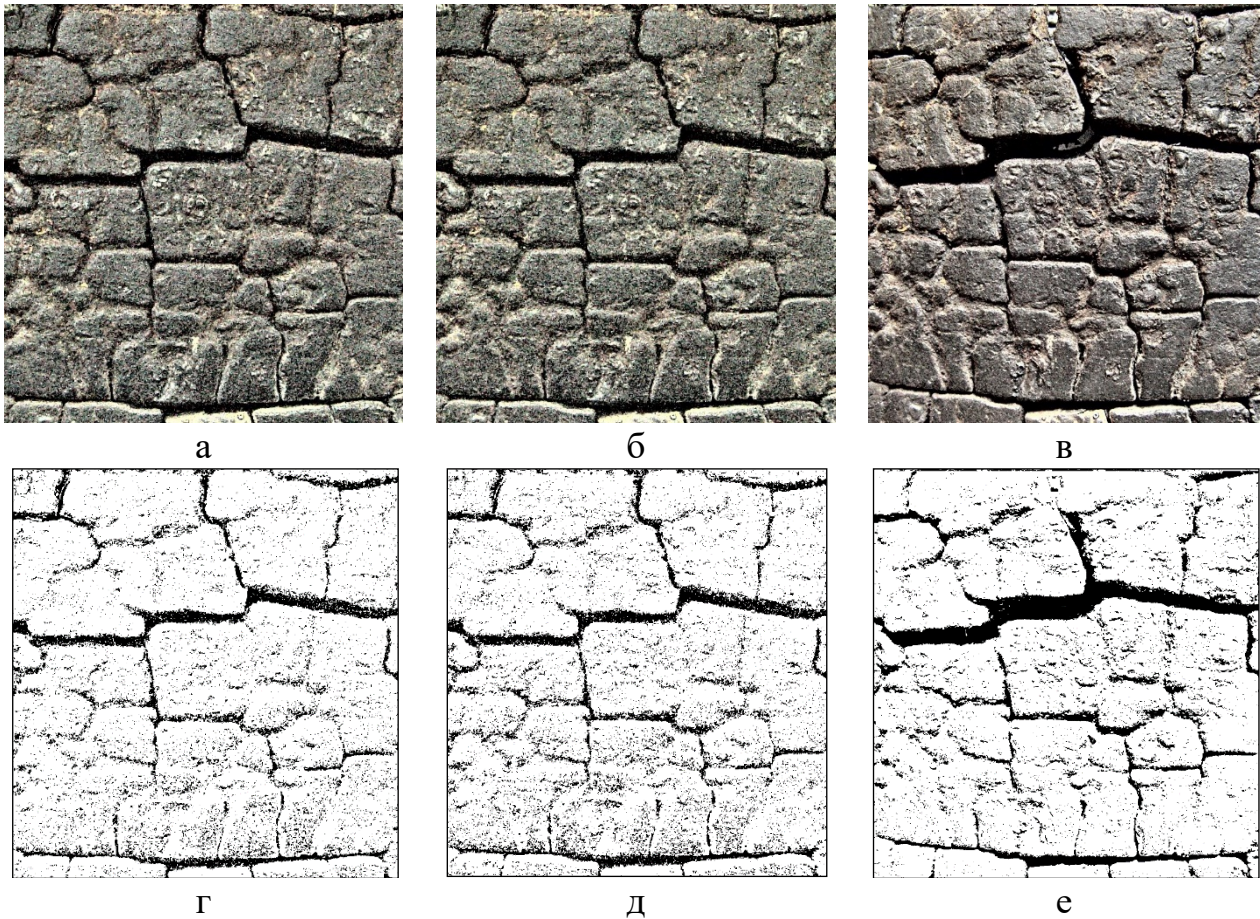


Рис. 3.28. Початкове зображення поверхні матеріалу з тріщинами на різних стадіях деформування (а, б, в) та результат сегментації шляхом бінарного перетворення (г, д, е)

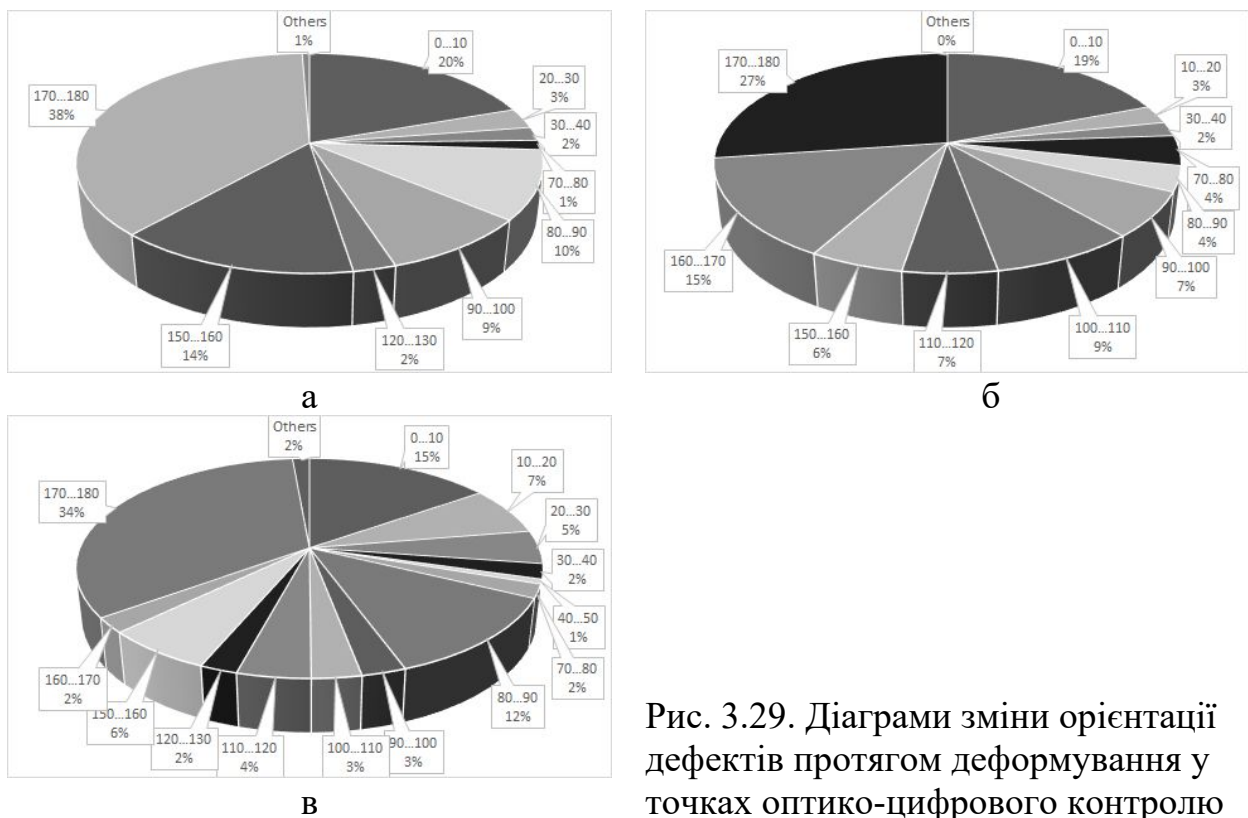


Рис. 3.29. Діаграми зміни орієнтації дефектів протягом деформування у точках оптико-цифрового контролю

Завдяки обчисленню орієнтації дефектів у точках біфуркації, рис. 3.29, вдалось ідентифікувати окремі дефекти та узагальнити їх колективну поведінку в межах аналізованої ділянки матеріалу. При цьому зміщення фрагментів матеріалу залишається одним із проявів мезорівня [38].

На рис. 3.30 зображено діаграми деформування матеріалу з тріщинами термовтоми. Зазначимо значну довжину лінійної ділянки $P-\Delta l$ (рис.3.30,б). Тобто матеріал деформується подібно суцільному середовищу, а вплив розпорошених пошкоджень проявляється лише у збільшенні піддатливості зразка. Перехід процесу деформування на вищий структурно-ієрархічний рівень супроводжується активацією і сумісним розкриттям кількох дефектів, подальше розкриття групи дефектів спричиняє порушення суцільності (руйнування) матеріалу [39].

Аналіз фотозображень поверхні темплету під час навантажування дозволили встановити узагальнену картину розвитку деформаційного процесу. Показано, що матеріал хоча й має низку "великих" та малих дефектів, проте поводить себе як квазісуцільне середовище. Це може бути викликано наявністю двох зварних швів, які є макроконцентраторами і знижують деформаційний потенціал матеріалу. Отже "оточення" ділянки матеріалу із дефектами – зварними швами, спричиняє "усереднення" деформацій.

Особливо цікавим є колективна активація кількох тріщин. Вона має переважно релаксаційний характер із ротаційним зсувом прилеглих конгломератів матеріалу. Зсувні деформації зумовлені неоднорідністю матеріалу, що ще раз підтверджує правомірність аналізу даного матеріалу як розломно-блокового середовища [40].

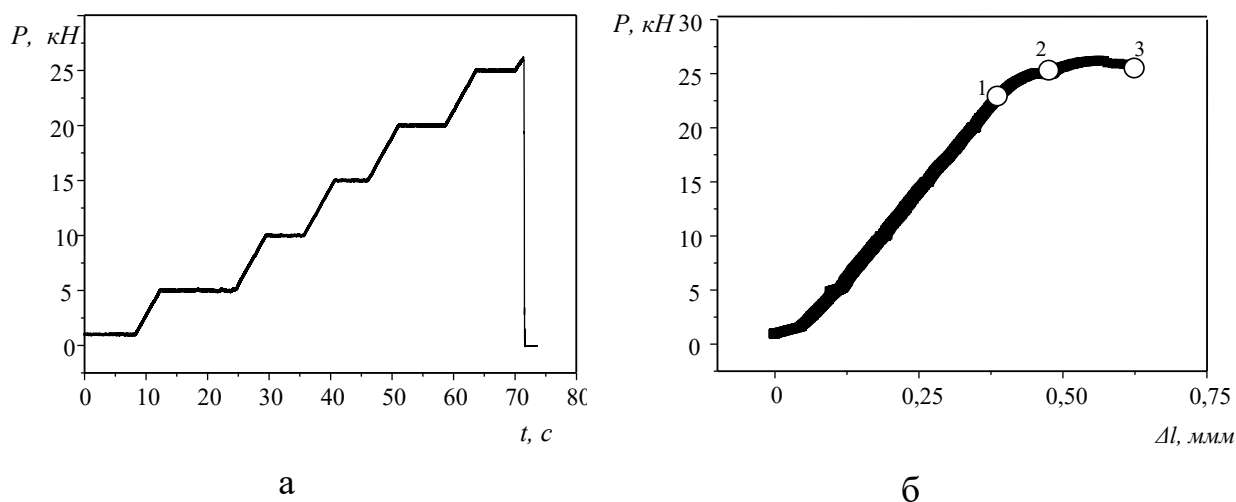


Рис. 3.30. Криві навантажування (а) та деформування матеріалу з множинними дефектами (б); 1,2,3 – точки оптико-цифрового контролю

Для оцінювання впливу дефектів на деформування обчислювали поля переміщень і деформацій досліджуваного зразка (рис. 3.31). Перше зображення (а) відповідає ділянці діаграми 0-1 (рис. 3.30,б) до появи перших мезоконцентраторів напружень, тобто проявів колективного зміщення фрагментів поверхні.

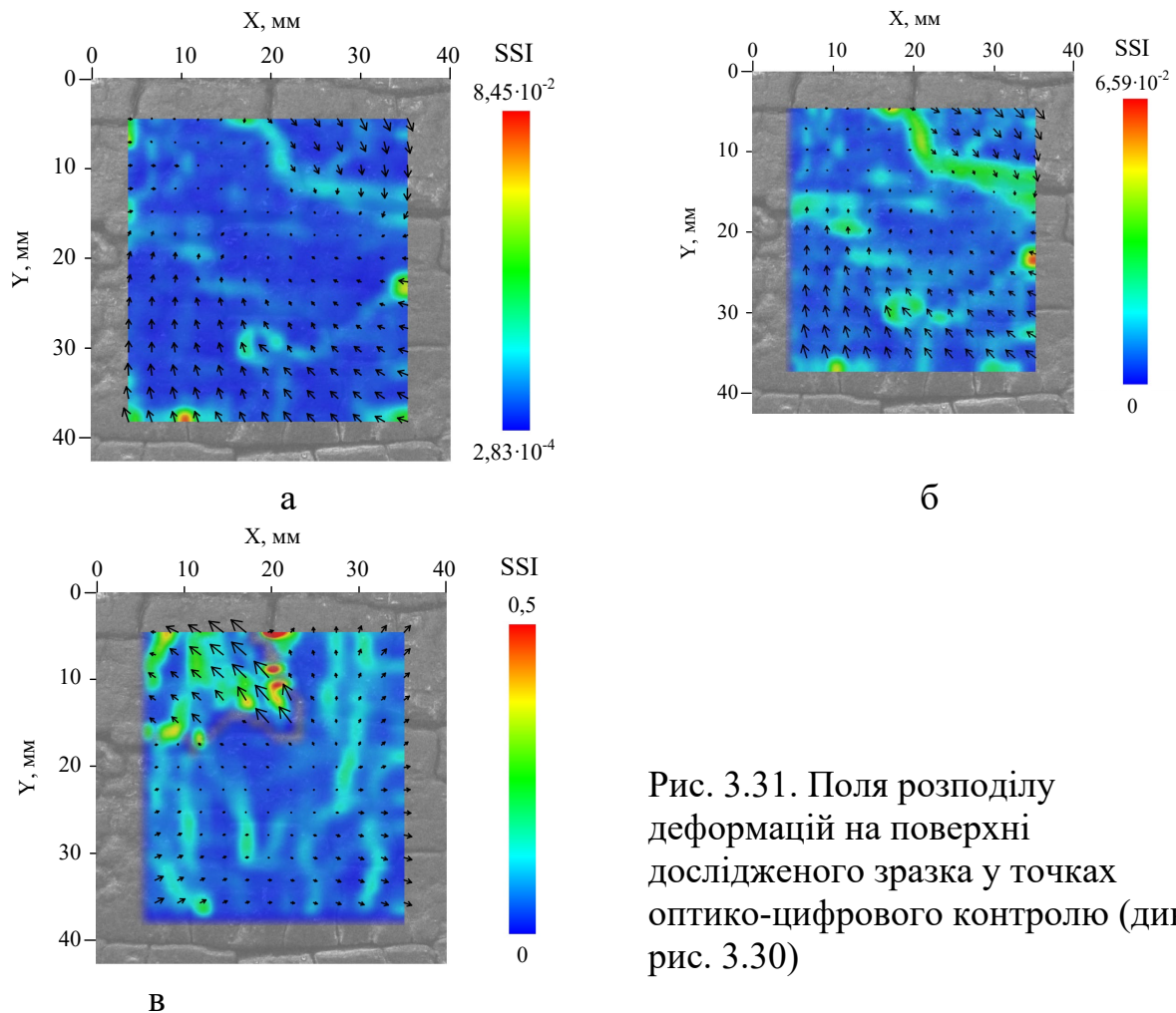


Рис. 3.31. Поля розподілу деформацій на поверхні дослідженого зразка у точках оптико-цифрового контролю (див. рис. 3.30)

Деформаційна поведінка матеріалу з множинними тріщинами залежить від геометричного та структурно-ієрархічного чинників. Тому вже на початковому етапі (рис. 3.31,а) на поверхні є ділянки пружного деформування і мікропластичного течіння. Це зумовлено локалізацією деформацій в елементах розломно-блокових структур множинного розтріскування [41]. Структура тріщиноподібних дефектів спричиняє неоднорідну деформаційну поведінку і перебудову матеріалу (рис. 3.31,б). Активація однієї з тріщин зумовлює релаксацію напружень у прилеглих ділянках. На рис. 3.31,б зростання інтенсивності зсуву зумовлене зміщенням окремих "острівців" матеріалу, оточених тріщинами, та відповідає ділянці 1–2 (рис. 3.30,б). Це й дозволяє реалізувати алгоритм, який "відстежує" поверхневі деформаційні сингулярності. Втрата зсувної стійкості матеріалу в околі перетину кількох концентраторів напружень супроводжується локалізацією деформаційного процесу (рис. 3.31,в). Виникнувши поблизу концентратора, зсувні процеси поширюються, охоплюють і прилеглі ділянки. Відбувається перерозподіл деформаційних полів у матеріалі. Завершальним етапом є перехід деформування на макрорівень, коли матеріал досягає граничного стану.

Аналіз горизонтальної та вертикальної гістограм дозволяє ідентифікувати зони активного руйнування, а також оцінити кінетику активації множинних дефектів. На рис.3.32,а,б наведено функції горизонтальних та вертикальних гістограм (3.10) для зображень, отриманих у точках оптико-цифрового контролю. Функції гістограм містять піки, які показують місця локалізації

виявлених пошкоджень уздовж відповідної координатної осі. Функції V_{hs} , H_{hs} показують статичний стан зразка в певний момент часу. Для аналізу динаміки процесу руйнування використано функції зміни гістограми (3.11) (рис. 3.32, в,г).

З рис. 3.32,в бачимо, що функція зміни вертикальної гістограми містить низку яскраво виражених піків порівняно високої амплітуди. Вони показують місця найбільшої локалізації пошкоджень у горизонтальній площині. Головна причина їх виникнення – зміщення фрагментів матеріалу із розкриття тріщин.

Функція зміни горизонтальної гістограми (рис. 3.32,г) не містить таких пікових зон, що вказує на переважно горизонтальний напрямок розвитку пошкоджень поверхні.

Слід відзначити, що лінійне і кутове зміщення зразка протягом деформування, а також зміна параметрів алгоритму розпізнавання тріщин спричиняють появу шумів у функціях зміни гістограм. Їх наявність певною мірою ускладнює аналіз зміни гістограми та визначення ділянок локалізації руйнування [42].

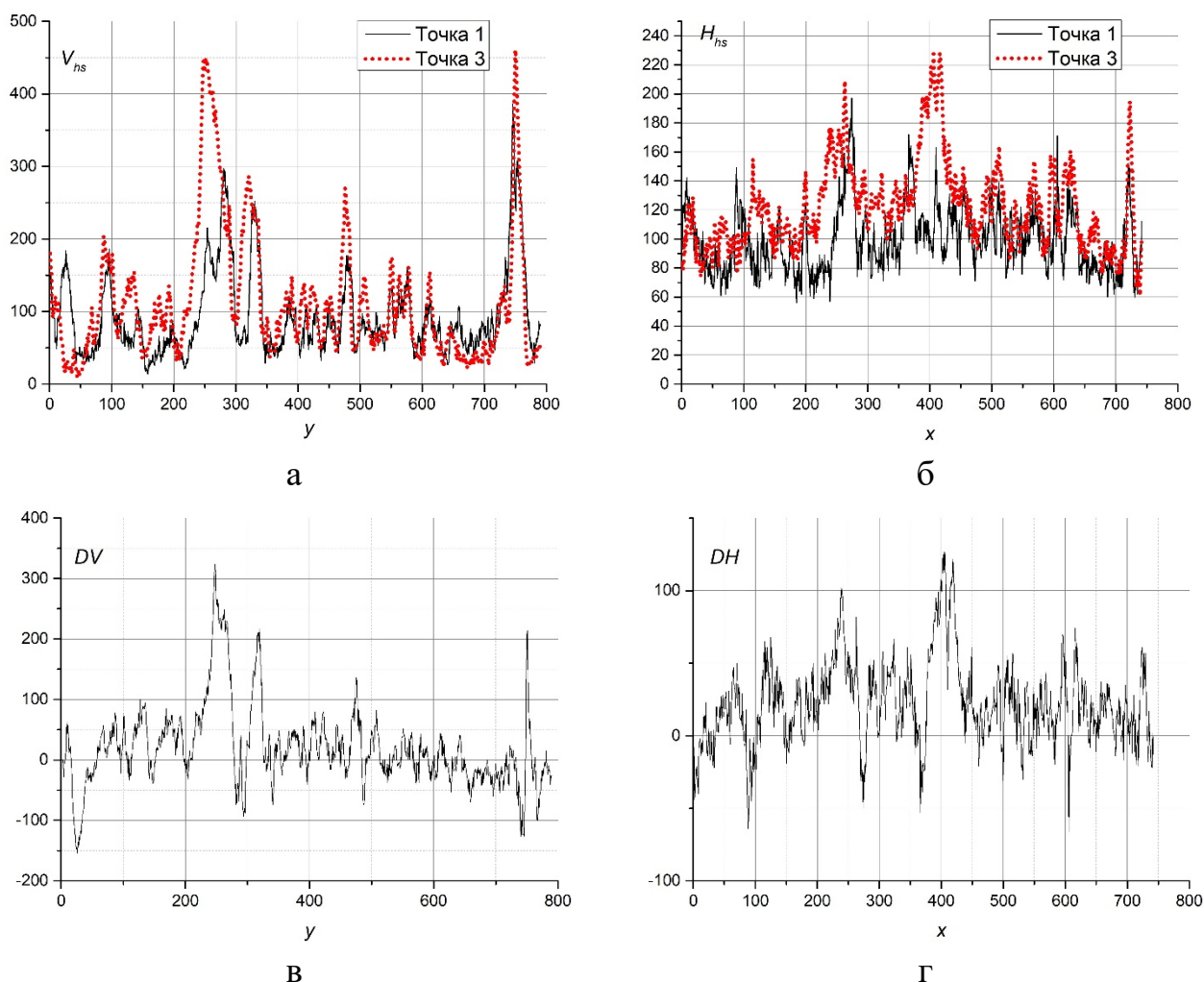
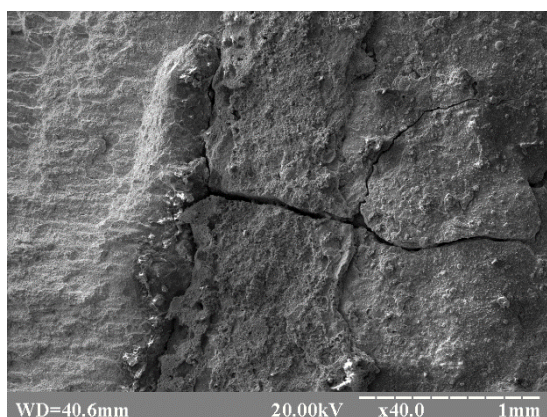


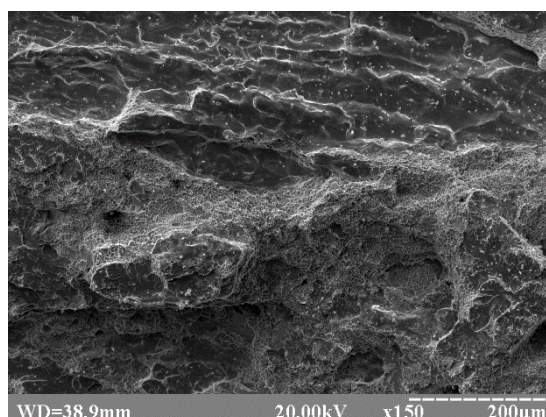
Рис. 3.32. Вертикальна (а) та горизонтальна (б) гістограми у вільному стані та на різних стадіях деформаційного процесу в точках оптико-цифрового контролю (рис. 3.30), а також функції зміни вертикальної (в) та горизонтальної (г) гістограми між точками 1 та 3

Розглянемо закономірності руйнування основного металу і зварного шва (рис. 3.33). *Основний метал.* Руйнування відбулось за в'язкопластичним механізмом. Спостерігали ділянки зі змішаним рельєфом руйнування. В'язкий відрив матеріалу орієнтований у макроплощині нормальній осі поздовжнього навантаження, крім того наявні відносно невеликі ділянки зсуву.

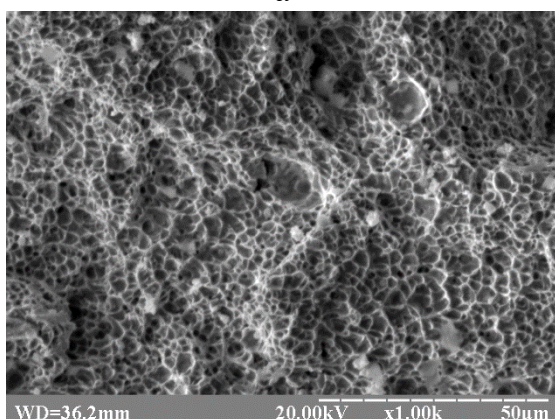
Зварний шов. Крихкий механізм руйнування із наявністю значного градієнта пластичного деформування у перерізі зразка. Поверхня руйнування має згладжений вигляд, характерний для макросколювання. Руйнування за механізмом "зсув + поворот".



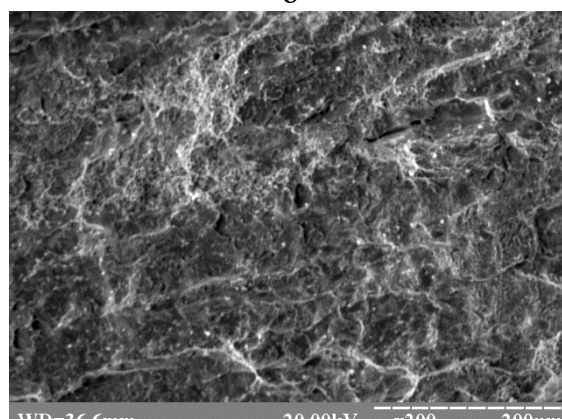
а



б



в



г

Рис. 3.33. Мікромеханізми руйнування у зоні зварний "шов-основний метал" – а,б, а також механізми руйнування основного металу і зварного шва – в,г

Дані тензометрії, обчислення площі дефектів і розрахунку полів деформацій дозволяють одночасно реєструвати прояви деформаційної активності на різних структурних рівнях:

- тензометрія відображає *макрорівень* або відгук зразка в цілому на силове навантаження;
- обчислення зміни орієнтації окремих дефектів, як прояв процесів *мезорівня*.

Фізико-механічні закономірності деформування матеріалу з множинними дефектами подано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Структурно-ієрархічні рівні деформування та руйнування темплета з множинними дефектами

Ділянки діаграми деформування	Фактори впливу на статичну міцність	
	Накопичення пошкоджень	Вплив сітки тріщин
0-1	Мікропластичне деформування є переважно локальне у вигляді окремих мікропроявів на фоні загального пружного деформування матеріалу	Складна структурно-механічна система матеріалу із дефектами зумовлює наявність дефектних ділянок, які є локальними концентраторами напружень. Під час деформування ці дефекти є зонами локальної деформаційної сингулярності
1-2	Зниження зсувної стійкості матеріалу. Спостерігали нелінійну залежність пластичного деформування від силового впливу. Відбувається поступове вичерпування пластичності, що відображається до наявності нелінійності на діаграмі навантажування	Розкриття та підростання дефектів із порушенням пропорційності між напруженнями і деформаціями за схемою "зсув+відрив"
2-3	Деформування матеріалу відбувається внаслідок пружної та пластичної складових. Критичні деформації та втрата стійкості відбуваються з умови перевищення досягнення критичних деформацій локальних ділянок та переходу процесу на макрорівень	Старт та підростання макротріщини

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ НАНОПОКРИТТІВ ТА СЕНСОРІВ ВТОМИ

Системний підхід до вивчення поведінки поверхневих та внутрішніх шарів матеріалів як ієрархічних систем, в яких деформаційні процеси виникають внаслідок силового впливу та відбуваються самоузгоджено на різних масштабних рівнях, можливий на основі підходів фізичної мезомеханіки [1].

Він особливо актуальний для поверхневих явищ, оскільки зміна морфології поверхні є індикатором внутрішнього стану навантаженого матеріалу, що дозволяє отримати кількісну інформацію про наявність (виникнення) пошкоджень [2,3]. Вивчення перебігу деформаційних процесів у матеріалах (особливо у покриттях) є першим кроком до керування даними процесами та створення алгоритмів їх оцінювання та прогнозування з метою розробки нових методів технічного діагностування конструкцій тривалої експлуатації [4-6].

Слід зазначити, що результати, отримані для системи "поверхня – внутрішній шар" на основі значної кількості експериментів, ще потребують поглибленого вивчення, узагальнення та фізико-механічної інтерпретації. Використання підходів фізичної мезомеханіки дозволяє розглянути деформаційні процеси на кількох структурно-ієрархічних рівнях, що достовірніше відображає будову реальних фізико-механічних систем [1]. Тобто фізичні закономірності є підґрунтям структурного підходу, визначальною особливістю якого є стадійність процесу деформування з урахуванням зовнішніх та внутрішніх структурних параметрів матеріалу [2-4].

Поверхневий шар матеріалу розглядають як особливу деформаційну підсистему з інтенсивними зсувними та ротаційними переміщеннями, які зумовлюють виникнення у цьому шарі нелінійних хвильових процесів з утворенням регулярного або впорядкованого рельєфу [5]. Саме це є передумовою модифікування поверхневих шарів матеріалів та нанесення на них захисних покриттів [1-6].

Деформаційні процеси у системі "основа–покриття" мають складний та неоднорідний характер. Основні закономірності формування рельєфу за "шахового" розподілу розтягувальних та стискувальних напружень на поверхні циклічно деформованого матеріалу проаналізовано в працях [6,7]. Відомі результати розрахунків нормальних і дотичних напружень уздовж площини "поверхневий шар – основа" [7], які показали періодичний характер обох напружень на межі поділу середовищ з різними модулями пружності чи коефіцієнтами термічного розширення.

Оптико-цифрові методи аналізу поверхневих явищ забезпечують виявлення і кількісний опис ділянок локалізації деформацій і руйнування з високою точністю. Проте однією з найгостріших проблем є створення дієвих алгоритмів та вибір параметрів оцінювання пошкоджених множинними дефектами поверхонь. Не менш важливим є створення швидкодіючих, завадостійких алгоритмів, які можуть описати стан поверхні як сенсора стану внутрішніх шарів матеріалу зразка, а в перспективі – й інженерної конструкції.

4.1. Автоматизований аналіз множинного розтріскування нанопокриття

Сучасні підходи до аналізу цілісності покриттів ґрунтуються переважно на морфологічних особливостях множинних дефектів [8-10]. При цьому основною методичною перевагою є їх автоматизований опис та ідентифікація. Наслідком цього є впорядкований масив даних про структурні складові або дефекти матеріалу. Системність вказаного підходу полягає у спробі аналізу за двома структуроутворювальними ознаками – положенням і розмірами структурних елементів та їх просторовою орієнтацією.

Узагальнюючи опис деформаційних процесів у покритті, можна відзначити наступні закономірності [8, 12-15]:

- зародження та активація тріщиноподібних розломів відбувається при перевищенні локальними напруженнями номінальних напружень у матеріалі;
- старт тріщини в системі з кількома дефектами можливий за умови локалізації деформацій у районі дефекту з енергетично найвигіднішою орієнтацією.

Виділяють кілька етапів множинного розтріскування: розпорошене розтріскування – результат зародження відокремлених поперечних та поздовжніх тріщин; об'єднання тріщин з утворенням мережі внаслідок перетину окремих дефектів; блочне розтріскування внаслідок коалесценції об'єднаних тріщин з утворенням повністю відокремлених блоків матеріалу, обмежених розвиненою мережею дефектів. Блочне розтріскування – це сукупність взаємопов'язаних тріщин, яка формує великі замкнені контури прямокутної форми. Алігаторські тріщини – це мережа об'єднаних тріщин, що мають спільні точки перетину та формують мережу багатокутників [11]. Схематично описану класифікацію тріщин за їх напрямом і загальним "малюнком" ілюструє рис. 4.1.

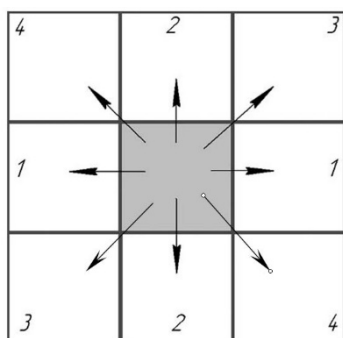


Рис. 4.1. Схема визначення напрямків поширення тріщини [11]: поздовжні (1); поперечні (2); блочні тріщини (1 та 2); алігаторські тріщини (3 та 4)

Досліджували зразки з цирконієвим нанопокриттям на малоциклову втому. Випробування проводили на випробувальній машині СТМ-100 з такими параметрами навантажування: частота $f = 1.0$ Hz, $\sigma_{max} = 500$ МПа, $\sigma_{min} = 0,1\sigma_{max}$.

Після досягнення певного циклічного напруження зразки знімали з випробувальної машини та фотографували поверхню за допомогою скануючого електронного мікроскопа РЕМ-106И.

Для автоматизації процесу класифікації тріщин використано метод аналізу розтрісканої поверхні на основі її зображення. Початкове багатоградієне фотозображення дослідного зразка обробляли відповідно до алгоритму пошуку пошкоджених фрагментів поверхні. В результаті отримували бінарне

зображення з локалізованими ділянками тріщин. Далі його аналізували відповідно до методики інтегрального оцінювання поверхні та класифікації тріщин.

4.1.1. Алгоритм розпізнавання положення тріщин на поверхні нанопокриття

Для ідентифікації тріщин на фотозображенні дослідного зразка використали алгоритм, що містить операції вирівнювання освітленості, фільтрування, бінаризації, скелетизації та визначення положення тріщин [13]. Початковим для аналізу є багатоградаційне зображення досліджуваного зразка $i_0(x, y)$, отримане на виході цифрової камери.

Вирівнювання освітленості є підготовчою операцією і дозволяє зменшити вплив нерівномірності яскравості різних ділянок зображення на подальшу роботу алгоритму. Ця операція містить два кроки: (а) формування загальної картини освітленості шляхом низькочастотного фільтрування та (б) видалення з початкового зображення отриманої низькочастотної складової.

Порогування є первинною базовою операцією виявлення частин зображення, що належать тріщинам, і виокремлення їх від фону. Використано адаптивний метод бінаризації Бредлі (3.3), при якому границя перетворення обчислюється окремо для кожного фрагмента зображення. Проте складна геометрія тріщин зумовлює неоднорідний характер отриманого бінарного зображення, яке містить значну кількість фрагментів однієї і тієї ж тріщини. Для усунення із зображення малих шумових елементів та підсилення на ньому ділянок тріщин отримане зображення фільтрували дискретним гаусовим фільтром (3.4). Таке фільтрування "розмиває" границі об'єктів, у результаті чого близькі об'єкти об'єднуються, формуючи одну неперервну тріщину. Повторна бінаризація дозволяє на основі відфільтрованого багатоградаційного зображення сформувати масив точок, які описують положення тріщини й приймаються для подальшого розгляду. Отримане на цьому етапі бінарне зображення $i_b(x, y)$ описує загальну картину розтріскування і може бути використане для отримання інтегральних показників, які характеризують стан нанопокриття [14-20].

Подальші етапи обробки зображення дозволяють отримати такі кількісні показники, як число тріщин, їх положення, напрям та розмір.

Для виявлення на отриманому бінарному зображенні каркасних (центральных) ліній тріщин проводили скелетизацію. Скелетне зображення $i_s(x, y)$ отримували шляхом багатопроходового накладання на зображення $i_b(x, y)$ шаблонів (рис. 3.6). На основі каркасних ліній робили висновок про положення, напрямок поширення та довжину тріщин. Зі скелетизованого зображення формували масив базових точок P , які з заданою точністю апроксимують тріщини. Сукупність цих точок описували двонаправленими графами P_{gk} ($k \in (1 \dots N)$), де N – кількість графів, що відповідає кількості "об'єднаних тріщин". Ребра цих графів вказують на зв'язок між певними точками. Кожен граф P_{gk} містить інформацію про прямолінійні фрагменти тріщин, які з'єднують базові точки.

Для кожного графа P_{gk} виділяли найбільшу взаємно зв'язану множину точок, які інтерполюються прямим відрізком із заданою точністю. Всі точки

знайденого ланцюжка, крім кінцевих, видаляли з подальшого розгляду. Вказану операцію циклічно виконували, поки всі вершини графа P_{gk} не ввійшли у ланцюжки.

В результаті сукупності вказаних операцій над зображенням отримали набір відрізків P_{pj} ($j \in (1 \dots m)$, де m – кількість відрізків), які апроксимують окремі тріщини зображення. Їх геометричні параметри характеризують відповідні параметри (напрямок, довжина) тріщин початкового зображення $i_0(x, y)$.

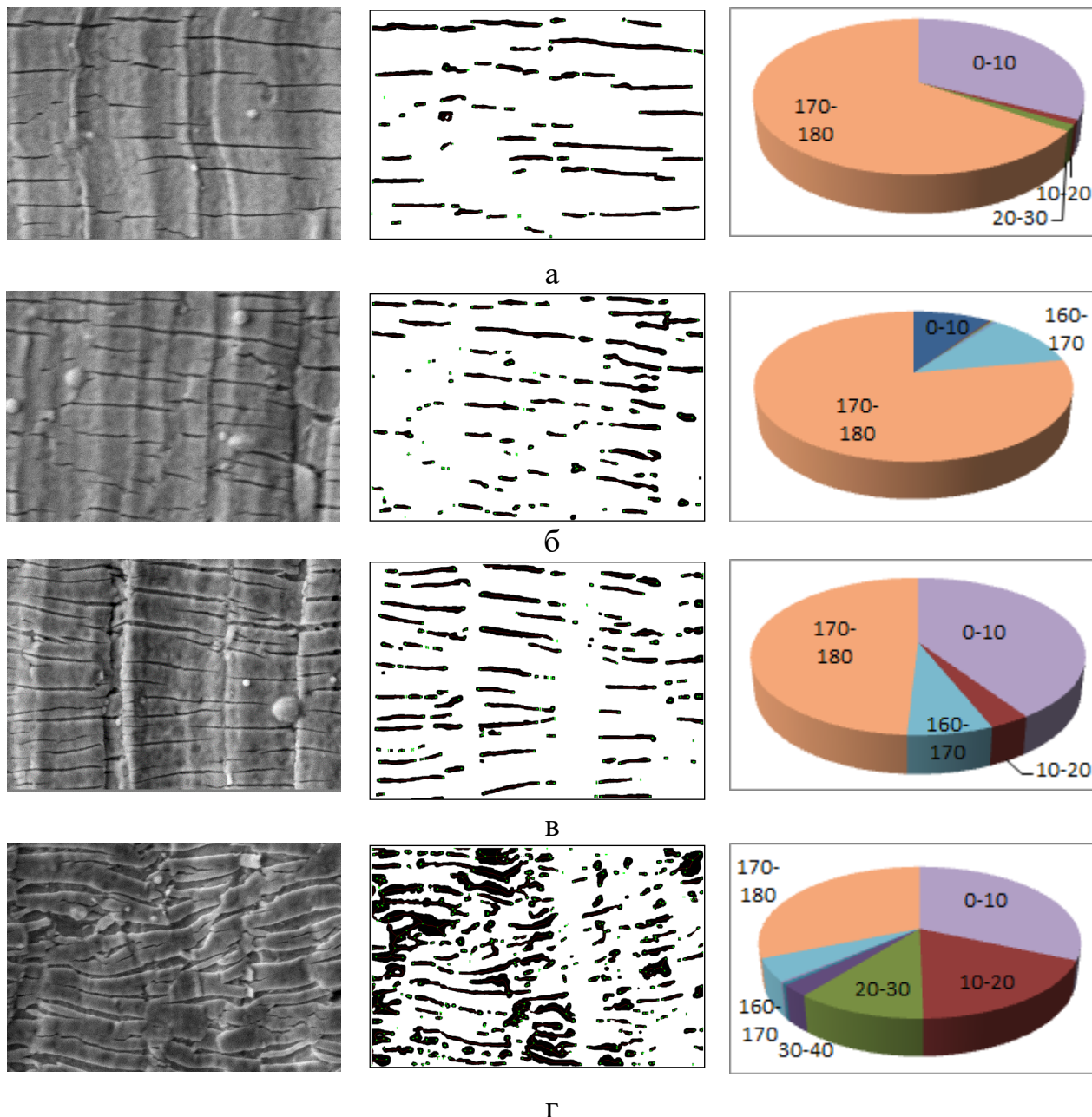


Рис. 4.2. Початкове зображення деформованої поверхні, результати виявлення тріщин та орієнтації тріщиноподібних дефектів за відносної деформації $\varepsilon = 5,9\%$ (а); $7,8\%$ (б); $15,3\%$ (в); $45,4\%$ (г)

Зображення пошкодженої поверхні отримували при різних деформаціях, після чого аналізували відповідно до описаного алгоритму. На рис. 4.2 наведено отримані за допомогою мікроскопа багатоградацийні фотографії поверхні, виявлені зони локалізації тріщин як результат їх ідентифікації описаним

алгоритмом, та діаграми розподілу кутів нахилу тріщин до горизонтальної осі зображення.

Для оцінювання впливу зміни головних параметрів алгоритму (розмір ядра фільтра p_{fs} та границі порогування p_{th}) на величину зміщення отриманих після скелетизації каркасних ліній, значення p_{th} змінювали в межах 10...30%, а p_{fs} – від 5 до 10 пікс. Типовий вид гістограми розподілу зміщень $\delta^\mu(p_{th1}, p_{fs1}, p_{th2}, p_{fs2})$ (див. залежність 3.6) для зображення (рис. 4.2,а) при зміні розміру ядра фільтра та постійній границі порогування 20% показано на рис. 4.3. Бачимо, що переважна кількість точок зміщується дуже незначно (всього на кілька пікселів).

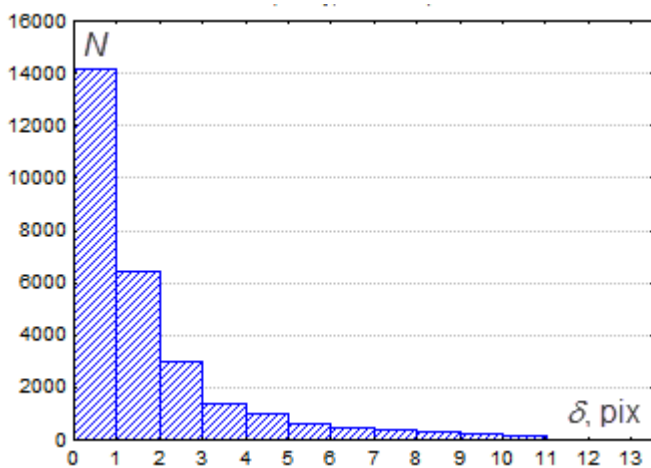


Рис. 4.3. Гістограма розподілу зміщень точок каркасної лінії для зображення рис. 4.2,а при зміні p_{fs} від 5 до 7 пікс та $p_{th} = 20\%$

Дослідження групи зображень показали, що при сталій границі порогування $p_{th} = 20\%$ та зміні ядра фільтра p_{fs} від 5 до 10 пікс стандартне відхилення вибірки коливається в межах 1,7 ... 2,2 пікс.

В перерахунку на одиницю довжини реального об'єкта зміщення коливається у межах 0,20...0,26 мкм. Максимальне зафіксоване зміщення для різних вимірювань коливалося від 0,18 до 0,29 мкм. При цьому збільшення розміру ядра пропорційно впливає на зміщення каркасних ліній тріщин.

Враховуючи, що товщина тріщин (8-26 пікселів) значно більша за типове зміщення каркасної лінії (1-3 пікселя), можна стверджувати, що зміна вказаних параметрів алгоритму у доволі широких межах незначно впливає на результат.

При постійному розмірі ядра $p_{fs} = 5$ пікс та зміні p_{th} від 5 до 20%, стандартне відхилення коливається в межах 1,14...1,95 пікс (що відповідає 0,13...0,23 мкм на дослідному зразку).

Отримані результати показують, що для різних зображень у дослідженому діапазоні значень параметрів алгоритму відхилення довжини від середнього значення знаходиться у межах 0...0,30 мкм. З довірчою ймовірністю 95% відхилення не перевищує 0,26 мкм.

4.1.2. Методика інтегрального оцінювання стану поверхні та класифікації тріщин

Для аналізу розтріскування використовували бінарне зображення $i_b(x, y)$ аналізованої поверхні, на якому нульові пікселі відповідають фону, а ненульові –

об'єктам тріщин. За результатами обробки зображення було побудовано вертикальну V_{hs} та горизонтальну H_{hs} гістограми (3.10). Гістограми для дослідного зразка (рис. 4.2,а) при деформації $\varepsilon = 5,9\%$ приведено на рис. 4.4.

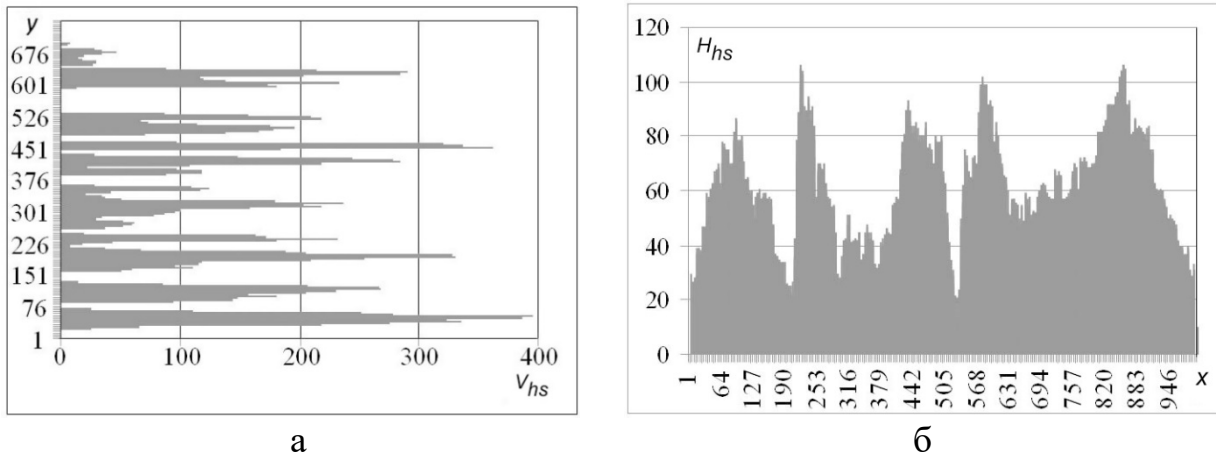


Рис. 4.4. Вертикальна (а) та горизонтальна (б) гістограми для зображення деформованої поверхні на рис. 4.2,а

Вертикальна V_{hs} та горизонтальна H_{hs} гістограми є базовим масивом даних, на основі якого оцінювали ступінь розтріскування аналізованої поверхні вздовж координатних осей та визначали ділянки зображення, що відповідають пошкодженим фрагментам поверхні.

Для кожної з гістограм розраховували середні значення [11]:

$$\begin{aligned} \mu_v &= \frac{1}{I_h - 1} \sum_{y=0}^{I_h-1} V_{hs}(y), \\ \mu_h &= \frac{1}{I_w - 1} \sum_{x=0}^{I_w-1} H_{hs}(x). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Параметри μ_v та μ_h містять усереднену кількість ненульових пікселів відповідно у вертикальній та горизонтальній гістограмах. Таким чином, коефіцієнти μ_v та μ_h дають загальну характеристику про ступінь розтріскування поверхні по двох координатних осях зображення. Однією з переваг використання середнього значення гістограм є чутливість даного параметра до зміни напрямку поширення тріщини. Крім цього, коефіцієнти μ_v та μ_h інваріантні щодо положення тріщини: якщо її зсунути вздовж однієї з координатних осей зображення, середні значення будуть незмінними.

Для кожної гістограми обчислювали також схожість як накопичену різницю між суміжними значення гістограми [11]:

$$\begin{aligned} \Omega_v &= \sum_{y=1}^{I_h-1} |V_{hs}(y+1) - V_{hs}(y)|, \\ \Omega_h &= \sum_{x=1}^{I_w-1} |H_{hs}(x+1) - H_{hs}(x)|, \end{aligned} \quad (4.2)$$

де Ω_v , Ω_h – відповідно вертикальна та горизонтальна схожість.

За параметрами Ω_v та Ω_h оцінювали однорідність розтрісканої поверхні у двох координатних напрямках. Низьке значення коефіцієнта схожості свідчить про незначні відмінності між окремими рядками (стовпцями) зображення. На практиці це відповідає однорідній картині розтріскування в певному напрямку.

Таким чином, наявність пари узагальнених характеристик – середніх значень μ_v та μ_h та схожості Ω_v та Ω_h дозволяє отримати загальну інтегральну характеристику аналізованого зображення у двох взаємно перпендикулярних координатних напрямках.

4.1.3. Закономірності множинного розтріскування

Аналіз фізико-механічних закономірностей поведінки активних розломів і тріщин показав, що дослідженому матеріалу притаманний складний розподіл деформацій і зсувів, які спричиняють різні ступені деформування і зміщення фрагментів покриття [20]. Пластичні зсуви покриття спричиняють зміну відносного положення між множинними дефектами. При цьому зміщення поверхні у горизонтальному напрямку вздовж розлому (зсуви) та під кутом до нього (насування) є випадковими, тоді як вертикальна компонента переміщень має циклічний впорядкований характер.

Слід зазначити, що деформація поверхні визначається пластичним течінням основи та розкриттям множинних дефектів [21]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{int} + \sum_{i=1}^p \frac{\delta_i}{l_k}, \quad (4.3)$$

де ε^{int} – деформація фрагментів покриття між тріщинами; δ_i – розкриття i – ї тріщини; p – кількість тріщин на дослідженій довжині l_k .

Цирконієве нанопокриття можна вважати багаторівневою системою, у якій пластичне течіння розвивається як втрата стійкості на різних масштабних рівнях (мікро-, мезо-, макро-) [9, 22].

Отримані результати (рис. 4.5) показують, що при малих деформаціях (до 15%) значення μ_v та μ_h зростають незначно – це означає, що загальна картина розтрісканості залишається практично незмінною. Вищі значення μ_v вказують на більшу площу розтріскування у горизонтальному напрямку. При цьому деформування відбувається на *мікрорівні*, а концентраторами напружень є мікронеоднорідності структури [23]. Низькі значення коефіцієнта горизонтальної схожості Ω_h при деформаціях до 15% свідчить про малозмінність картини розтріскування вздовж цієї координатної осі: значні фонові проміжки змінюються однорідними фрагментами тріщин.

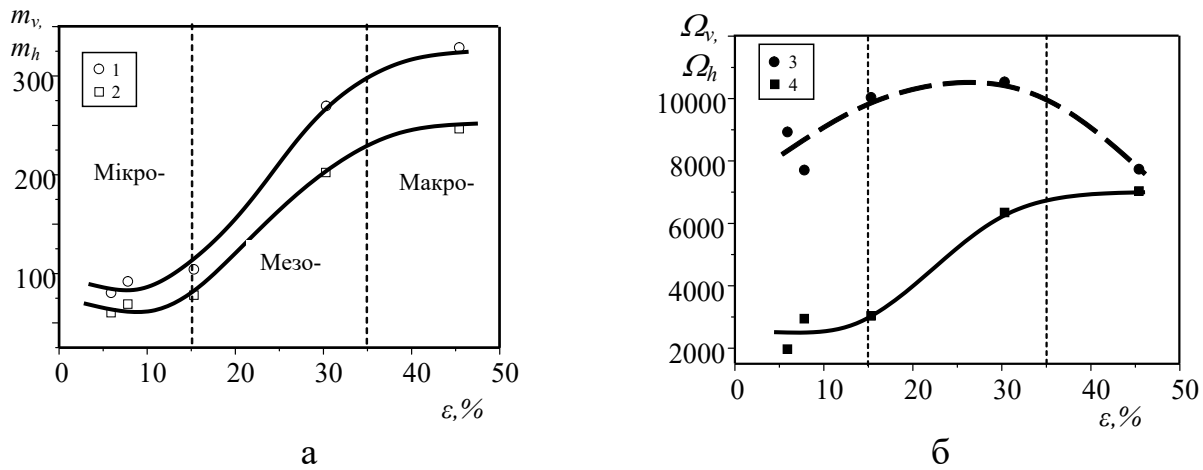


Рис. 4.5. Залежність інтегральних параметрів розтріскування від відносної деформації зразка ε : середні значення μ_v (1) та μ_h (2); схожість Ω_v (3) та Ω_h (4)

Характер фрагментації покриття визначається параметрами розташованих уздовж нього тріщин [20]. З точки зору класифікації тріщин, інформативним є спектральний аналіз функцій $H_{hs}(x)$ та $V_{hs}(y)$. Застосувавши щодо цих функцій перетворення Фур'є, отримаємо множину гармонік, які характеризують картину розтріскування вздовж відповідної осі. Якщо поверхня містить переважно перпендикулярні до координатної осі тріщини, то у функції гістограми для цієї осі переважатимуть високочастотні складові (вертикальна гістограма, рис. 4.4,а). Гістограма для осі, вздовж якої направлені тріщини, містить в основному низькочастотні складові (горизонтальна гістограма, рис. 4.4,б).

За допомогою швидкого перетворення Фур'є функції гістограм подавали у вигляді рядів:

$$H_{hs}(x) \approx H_{hs}^F(x) = A_{h0} + \sum_{k=1}^{K_h} A_{hk} \cos\left(2\pi \frac{k}{n} x - \vartheta_h\right),$$

$$V_{hs}(y) \approx V_{hs}^F(y) = A_{v0} + \sum_{k=1}^{K_v} A_{vk} \cos\left(2\pi \frac{k}{m} y - \vartheta_v\right),$$
(4.4)

де A_h, A_v – амплітуди гармонік; ϑ_h, ϑ_v – фази гармонік; k – номер гармоніки.

Число гармонік розкладу K_h, K_v брали таке, щоб точність подання функції гістограми у вигляді суми гармонік була не нижчою за деяке граничне значення ε :

$$\begin{aligned} |H_{hs}(x) - H_{hs}^F(x)| &\leq \varepsilon, \\ |V_{hs}(y) - V_{hs}^F(y)| &\leq \varepsilon. \end{aligned}$$
(4.5)

У ролі інформативних параметрів вибрано середні амплітуди гармонічного спектра функцій горизонтальної та вертикальної гістограм A_{ah}, A_{av} :

$$A_{ah} = \frac{1}{K_h} \sum_{k=0}^{K_h} A_{hk},$$
(4.6)

$$A_{av} = \frac{1}{K_v} \sum_{k=0}^{K_v} A_{vk}.$$

Середня амплітуда спектру дозволяє кількісно оцінити орієнтацію елементів поверхневого рельєфу вздовж осей зображення. Її вищі значення відповідають більшій ступені пошкодження по даній осі. Отже, порівнюючи значення A_{ah} , A_{av} , можна отримати інформацію про переважний напрям дефектів поверхні.

Наявність множини згаданих узагальнених характеристик дозволяє отримати комплексну інтегровану характеристику аналізованого зображення у двох взаємоперпендикулярних координатних напрямках [15, 23].

Як інтегральну величину, що характеризує амплітудний спектр функцій $H_{hs}(x)$ та $V_{hs}(y)$, використано значення центральної гармоніки C (рис. 4.6). На рис. 4.7 показано графіки зміни величини центральної гармоніки C_h , C_v для групи проаналізованих зображень (рис. 4.2) залежно від значення відносної деформації зразка.

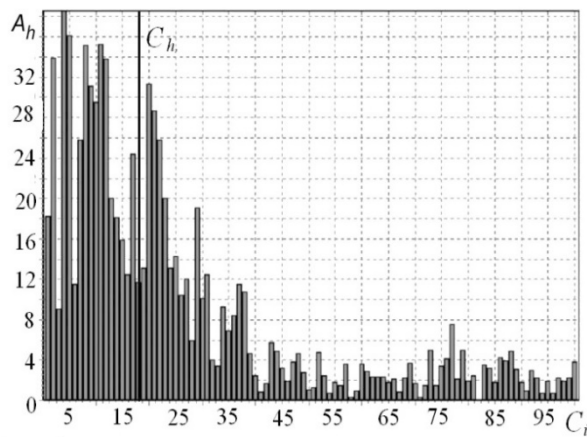


Рис. 4.6. Амплітудний спектр функції $H_{hs}(x)$ для зображення рис. 4.2,а

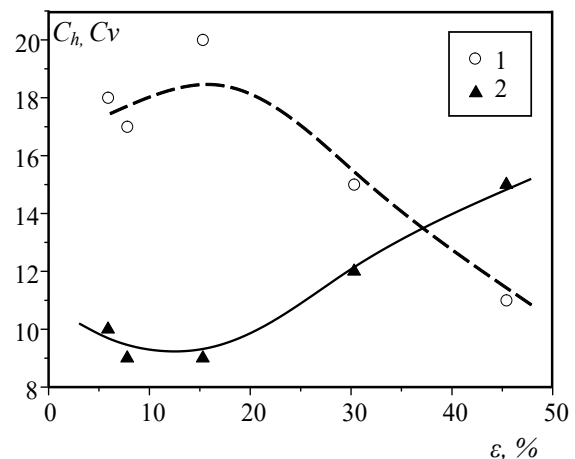


Рис. 4.7. Залежність зміщення середини спектра C_h (1) та C_v (2) від відносної деформації ϵ

Виявлено, що за малих відносних деформацій (до 15%), тріщини орієнтовані переважно у горизонтальному напрямку, а у функції вертикальної гістограми $V_{hs}(x)$ переважають гармоніки з вищими частотами. Водночас функція горизонтальної гістограми $H_{hs}(y)$ містить переважно низькочастотні гармоніки, що вказує на більшу однорідність розтріскування у горизонтальному напрямку.

При значних деформаціях (на етапі руйнування покриття) величина C_h для горизонтальної гістограми стрімко знижується – спектр зміщується в сторону низькочастотних гармонік. Це підтверджує розорієнтацію тріщин та втрату ними переважно горизонтального напрямку. Проте, спектр функції горизонтальної гістограми зміщується в сторону високочастотних гармонік, що вказує на посилений ріст тріщин уздовж вертикальної осі. Зазначимо, що залежності (рис. 4.7) відображають ту ж закономірність, яка прослідковується у зміні коефіцієнтів схожості (рис. 4.5,б).

4.1.4. Параметри множинного розтріскування

Розтріскування є стадійним та одночасним з деформуванням, при цьому активуються наявні у матеріалі тріщини. Це пов'язано з їх вибіркоким підростанням та об'єднанням з більшими дефектами (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Параметри та типи множинного розтріскування дослідженого цирконієвого нанопокриття

Відносна деформація покриття, ε , %	Параметри пошкодження, μ_v, μ_h	Тип тріщини	Домінуюча орієнтація тріщин ($0 \dots 180^\circ$), %
5,9	21,4 / 28,5	Поздовжні тріщини	65,18
7,8	27,9 / 37,2	Поздовжні тріщини	77,86
30,3	94,2 / 125,6	Поздовжні+поперечні тріщини	49,13
45,4	134,4 / 179,1	Фрагментація та руйнування покриття	31,18

За відносної деформації $\varepsilon = 6,0\% \dots 8,0\%$ покриття вкривається мережею горизонтально орієнтованих тріщин. Відносна деформація $\varepsilon = 15 \dots 35\%$ спричиняє зростання значень коефіцієнтів μ . Це вказує на активацію поширення тріщин в обох координатних напрямках, тобто на ротаційне та зсувне зміщення блоків матеріалу (*мезорівень*). Слід зазначити, що швидкість збільшення μ_v помітно вища. Оскільки переважаючий напрям тріщин горизонтальний, то швидше зростання коефіцієнта μ_v вказує, що на цьому етапі ріст ширини тріщин (μ_v) переважає над поширенням у довжину (μ_h). Переважання горизонтального напрямку підростання дефектів підтверджується високим значенням середньої гармоніки C_h .

При $\varepsilon = 15 \dots 35\%$ схожість суттєво зменшується – це вказує на утворення нових тріщин та їх розорієнтацію (рис. 4.2). Високі значення Ω_v та Ω_h за великих деформацій свідчать про складну неоднорідну картину розтріскування, зумовлену загальним руйнуванням покриття. На цьому ж етапі відбувається зміщення початкового високочастотного спектра функції $V_{hs}(y)$ у сторону низьких частот, відхилення орієнтації тріщин від горизонталі. Елементарними носіями деформування на мезорівні є структурні елементи (фрагменти покриття), рух яких визначається схемою "зсув+поворот" [24-26].

При $\varepsilon \approx 45\%$ відбуваються значні зміни в орієнтації тріщин, пов'язані з їх розкриттям та фрагментацією покриття. Завершальним етапом є руйнування.

Стадійність процесу розтріскування, активація та коалесценція дефектів пов'язана з деформаційними процесами [27]. Зокрема, на макрорівні процес вичерпування пластичності пов'язаний з рівнем локалізації деформацій. Даний процес прогресує зі зростанням макродеформацій та підвищенням напружень у фрагментах покриття. При цьому наявність множинних дефектів у матеріалі частково збільшує деформаційні властивості матеріалу та спричиняє "поглинання" енергії пружно-пластичних деформацій прилеглих ділянок.

На основі запропонованої методики виявлено основні закономірності процесу руйнування цирконієвого покриття, нанесеного на сталюну основу за відносних деформацій від 5% до 45%. Встановлено, що окремим стадіям процесу руйнування покриття відповідають свої значення інтегральних параметрів. Ця залежність дозволяє використовувати запропонований підхід для технічного діагностування стану досліджуваної поверхні.

4.1.5. Стадійність та морфологічні особливості руйнування нанопокриття

У працях С.А. Лупенка та Я.В. Литвиненка [28-30] запропоновано стохастичну математичну модель циклічного випадкового процесу для задач оброблення даних, моделювання складчастого рельєфу та розроблено алгоритм і створено пакет комп'ютерних програм, що ґрунтуються на математичній моделі аналізу зонно-просторової двовимірної структури циклічного рельєфу модифікованої поверхні.

У контексті застосування згаданої моделі для дослідження поверхні руйнування розглянуто такі базові величини моделі: цикл, фаза і ритм процесу розтріскування. Під циклом розтріскування розуміли найменший сегмент експериментальної залежності "ширина тріщини – довжина нерозтрісканої ділянки покриття", отримані за множинного розтріскування, що містить усю послідовність його фаз (стадій). Руйнування нанопокриття розглядали у вигляді впорядкованої сукупності циклів розтріскування. Між циклами розтріскування існує певний тип подібності, який у рамках циклічного випадкового процесу інтерпретовано як наявність ізоморфізму за впорядкованістю та відповідністю ймовірнісних характеристик однотипним фазам досліджуваного процесу.

Під однотипними фазами множинного розтріскування нанопокриття розуміли сукупність тих значень, які є у різних циклах, проте мають однакове (щодо впорядкування) розташування щодо фаз свого циклу й однакові ймовірнісні характеристики.

За ритм (темп) колювання процесу множинного розтріскування нанопокриття приймали властивість його просторової структури, що дозволяє визначати розміри просторових проміжків між однофазними значеннями циклічного процесу розтріскування для всіх його циклів і фаз.

Саме тому, що циклічний процес розтріскування нанопокриття ніби "зшитий" з послідовності циклів різної довжини, а цикли можуть мати характерні ділянки – сегменти, й було використане поняття циклічного випадкового процесу з зонної структурою [29, 30].

Графіки розподілу ширини тріщин дефектів, отримані для фрактограм (рис. 4.2) у межах аналізованої ділянки поверхні, приведено на рис. 4.8,а. Результати експериментального оцінювання множинного розтріскування за даними фрактографічного аналізу подано на рис. 4.8,б.

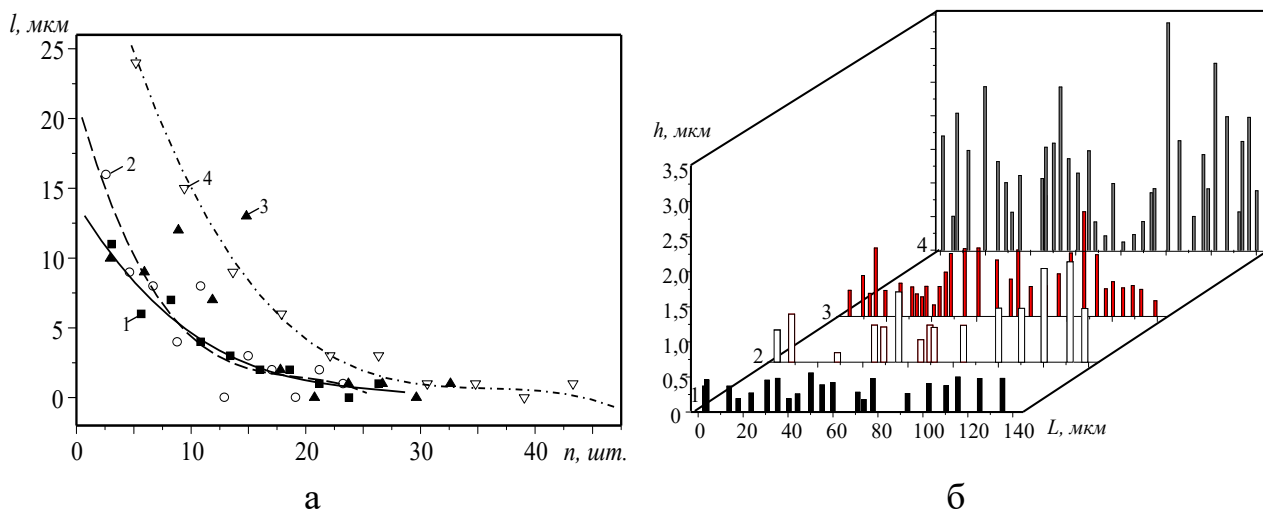


Рис. 4.8. Закономірності накопичення тріщин довжини (l) – а та розподіл тріщин (n), ширини (h) у межах аналізованої довжини (L) – б, за різних значень відносної деформації мікроділянки $\varepsilon = 5,9\%$ (1); $7,8\%$ (2); $15,3\%$ (3); $45,4\%$ (4) [29]

Використання математичного апарату [29] дозволило узагальнити параметри множинного розтріскування нанопокриття за різних значень відносної деформації, результати обчислень систематизовано у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Параметри множинного розтріскування цирконієвого нанопокриття [29]

№ з/п	Відносна деформація, ε , %	Середня ширина тріщин, μm	Дисперсія, μm
1	5,9	0,45	0,002
2	7,8	0,75	0,04
3	15,3	0,67	0,13
4	30,3	1,70	0,08
5	45,4	1,45	0,22

Аналізуючи дані таблиці 4.2 та скориставшись підходами фізичної мезомеханіки, можна стверджувати, що зростання рівня деформації спричиняє формування впорядкованої розломно-блокової структури покриття та його руйнування протягом кількох етапів. При цьому зони комбінованого деформування "стиснення + зсув" є зонами впорядкованої геометричної сингулярності [1-7].

Слід зазначити, що початковий масив тріщин має чітку орієнтацію під кутом 90° до осі навантажування (рис. 4.9). Злиття тріщин збільшує розорієнтацію тріщин на 9° . Для значення відносної деформації $\varepsilon = 15,3\%$ спостерігали зміну характеру деформування та процесів релаксації множинного ковзання. Це зумовлено чергуванням процесів самоорганізації та розорієнтації мезосмуг пластичності.

За значних деформацій ($\varepsilon = 45,4\%$) тріщини є цілком розорієнтовані, при деформації відбуваються процеси множинної фрагментації та зміщення мезофрагментів покриття на 20° .

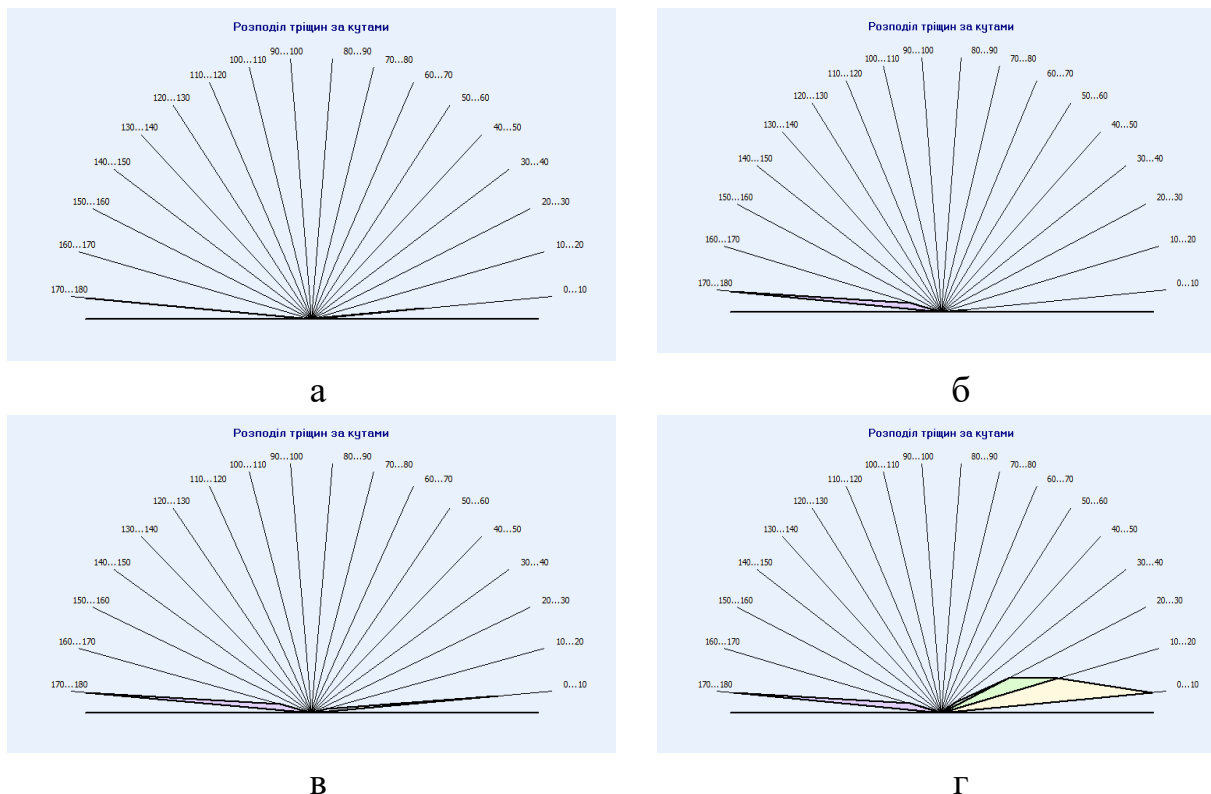


Рис. 4.9. Зміна орієнтації тріщиноподібних мікрodefektів у деформованому нанопокритті за різних значень відносної деформації $\varepsilon = 5,9\%$; $7,8\%$; $15,3\%$; $45,4\%$

Розглянемо профілограму фрагмента поверхні деформованого покриття в околі зони руйнування зразка. Її наведено у вигляді плоского зображення, доповненого двомірними зрізами (рис. 4.10).

Виявлено, що зсувні ділянки, утворені внаслідок фрагментації покриття, пропорційні величині деформації. Це підтверджує певну стадійність процесу фрагментації.

Сформовані деформаційні смуги можуть взаємодіяти одна з одною, формуючи "переплетені" деформаційні утворення (рис. 4.10,а). Це характерно для смуг з похилою орієнтацією, на які діють зсувні напруження, спричиняючи локальні поворотні деформаційні процеси, що поширюються на прилеглі ділянки. Саме ділянки матеріалу, залучені до зсувних та поворотних процесів, розтягуються, витискаючись назовні, або утворюють заглибини, формуючи деформаційний рельєф (рис. 4.10,б). Слід зазначити, що регулярно розташовані фрагменти покриття можна використати у ролі масштабного маркера для кількісного встановлення локальних деформаційних процесів у матеріалі [9].

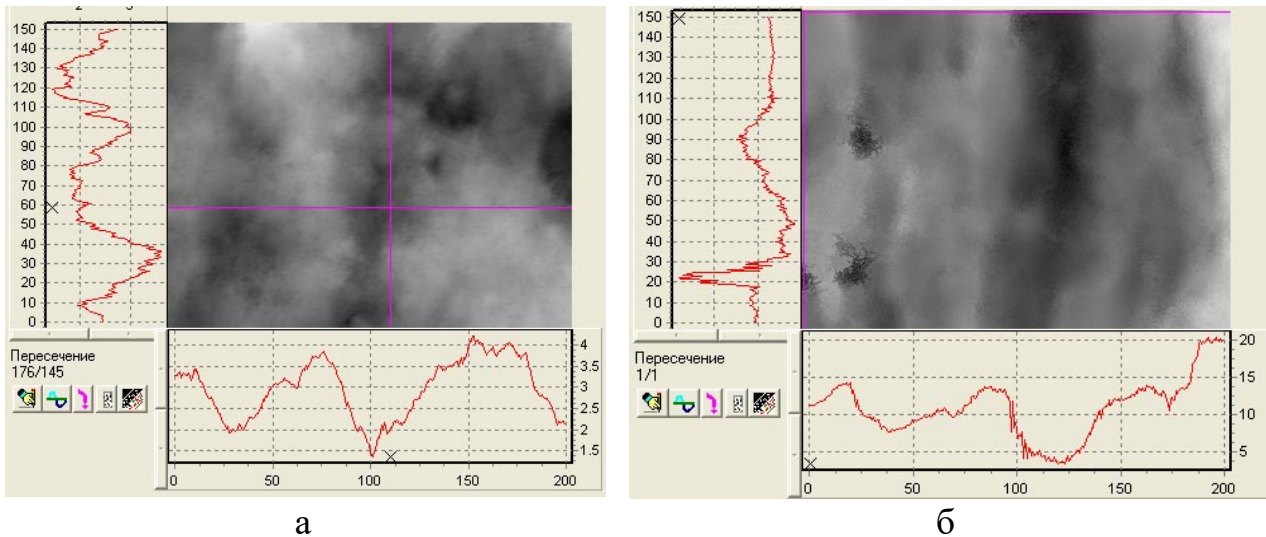


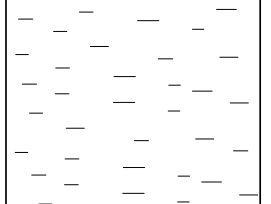
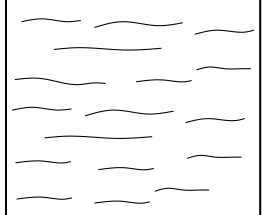
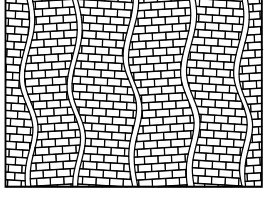
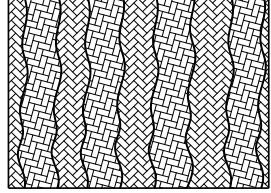
Рис. 4.10. Деформаційний рельєф на поверхні шийки зразка сталі 25Х1М1Ф з цирконієвим нанопокриттям у зоні руйнування зразка

У працях [14,22] досліджено, що подальше пластичне течіння спричиняє утворення регулярного деформаційного рельєфу. Виникнення такого рельєфу свідчить про активацію стискувальних напружень у напрямку, нормальному до осі деформування.

Ці процеси спричиняють додаткову розорієнтацію фрагментованого покриття, проте відстань між смугами на порядок більша відстані між фрагментами покриття. Поверхневі нерівності набувають форми спіралей, орієнтованих уздовж осі зразка. Наявність нанопокриття частково блокує локальні зсувні деформації, які є джерелами локальних згинаючих напружень, що інтенсифікують генерацію смуг локального зсуву. Деформація в цих смугах у кілька разів перевищує середні значення, процес течіння відбувається за схемою "розтяг+зсув" значних ділянок матеріалу, які чергуються з зонами пластичної релаксації [1,2]. При цьому раніше утворені деформаційні структури зберігаються, декоруючи рельєфні утворення більшого масштабного рівня. Розміри та кількість таких ділянок пов'язані з вихідною структурою матеріалу та закономірностями деформування макрорівня [30, 31]. Стадії множинного деформування та розтріскування цирконієвого нанопокриття узагальнено в табл. 4.3.

Отримані результати свідчать, що пластичне деформування матеріалу основи спричиняє виникнення в нанопокритті процесів множинного розтріскування та мікрофрагментації, схильних до самоорганізації. Виявлено, що при локалізації пластичної деформації в мезооб'ємах можуть формуватися об'ємні структурні елементи, які містять фрагменти покриття, зміщені з певним кроком. Запропонований підхід має універсальний характер і може бути використаний для кількісного оцінювання деформаційних процесів розломно-блокових середовищ.

Таблиця 4.3. Стадійність множинного розтріскування цирконієвого нанопокриття

№ з/п	Стадії деформування руйнування	Схема процесу
1	Утворення системи множинних мікродефектів (тріщин), перпендикулярних до осі навантажування	
2	Об'єднання мікродефектів та утворення макротріщин внаслідок індивідуального підростання наявних та утворення нових множинних дефектів. Об'єднання, або крихке підростання тріщин, спричиняє релаксацію напружень у цій ділянці, що призводить до "перемикання" процесу деформування на прилеглі ділянки	
3	Зсувне подрібнення покриття на фрагменти різної ширини та формування смужової структури внаслідок деформування матеріалу основи розтягом. Фрагментація покриття спричиняє активацію релаксаційних процесів, поступове формування смуг локалізації деформацій – гофрів	
4	Локалізація деформаційних процесів у матеріалі основи спричиняє виникнення напружень горизонтального стиску. На локальних ділянках зразка відбувається крихке і пластичне зміщення руйнування фрагментів покриття. В місцях локалізації деформацій утворюється деформаційний рельєф. Інтенсифікація зсувних процесів у напрямку дії максимальних зсувних напружень. Утворення впорядкованої фрагментованої структури внаслідок вихрових мезоповоротів матеріалу основи та зміщення фрагментів покриття за схемою "зсув+поворот". Мезоповороти утворюють стійкі конгломерати фрагментів із взаємоузгодженим поворотом	

4.2. Оптико-цифровий аналіз морфології рельєфу поверхні після імпульсного оброблення лазером

Аналіз умов лазерної ударно-хвильової обробки та існуючих методів оцінювання рельєфу поверхневих шарів матеріалів дозволив сформувані основні підходи до вирішення проблеми кількісного оцінювання параметрів хвильових утворень модифікованої поверхні [32-34]. Технологічна складність багатьох існуючих інструментальних методів визначення стану поверхні, недостатня

точність і надійність обмежують їх використання у практичних цілях [35]. Кількісне оцінювання параметрів упорядкованого рельєфу дозволяє не лише прогнозувати місце і час появи тріщини, але й виявити фізичні закономірності її формування. Таке прогнозування на етапі розробки технології модифікації матеріалу суттєво зменшує вартість натурних випробувань і скорочує їх тривалість, а на стадії експлуатації дає можливість підвищувати надійність конструктивних елементів [36]. Проте очевидною є необхідність обґрунтування інтенсивності формування впорядкованого рельєфу нержавіючої сталі як характеристики лазерного ударно-хвильового впливу для певних режимів модифікування [37].

Вплив лазерної ударно-хвильової обробки у різних конденсованих середовищах досліджували експериментально. Для цього виготовили призматичний зразок, одну з граней якого шліфували, полірували та піддавали лазерному імпульсному впливу. Геометрію зразка наведено на рис. 4.11, із ділянками лазерної ударно-хвильової обробки та їх оптичними зображеннями.

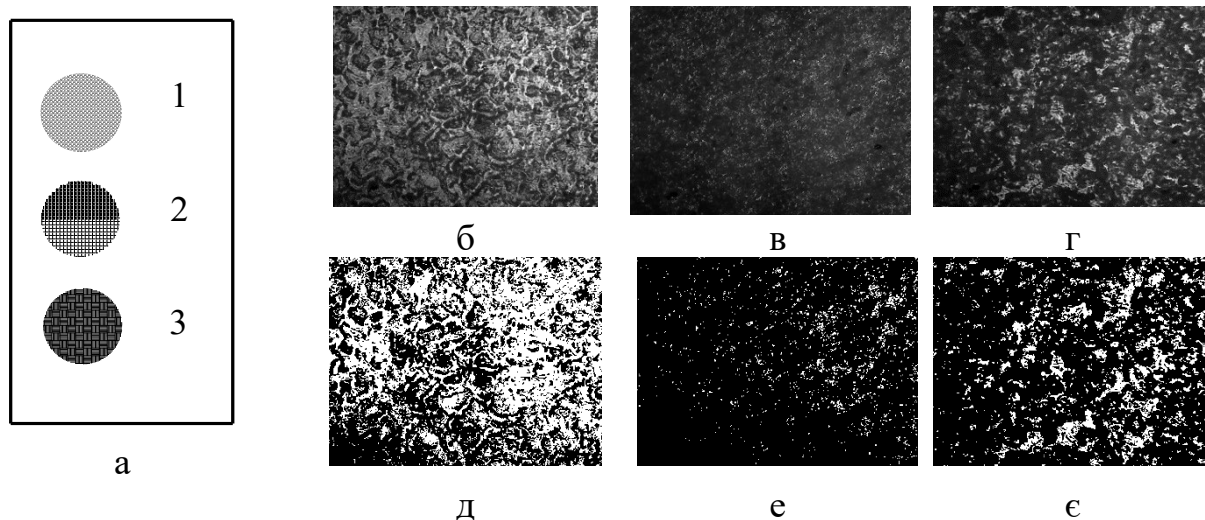


Рис. 4.11. Схема дослідженого зразка – (а) та приклади впорядкованих структур на поверхні 15X13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки на повітрі – (а,г); у воді – (б,д); в чорнилі – (в,е); (б-г) – початкові зображення; (д-є) – бінарні

Проаналізовано стан поверхні на кількох масштабних рівнях [37]:

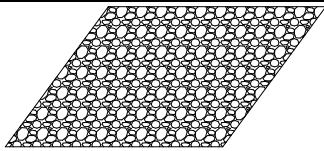
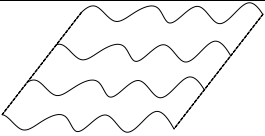

Мікрорівень – на ньому відбулися процеси структуроутворення (зародження, рух, анігіляція дислокацій тощо), які зумовили рельєфоутворення на поверхні матеріалу.

Мезорівень – кооперативні процеси пластичного деформування та самоорганізації рельєфу поверхні.

Макрорівень – процеси локалізації макроскопічного рівня, які за масштабом співмірні з розмірами об'єкта.

Узагальнення механізмів поверхневого структуроутворення для досліджених зразків подано у табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Структурні рівні автоматизованого діагностування параметрів упорядкованих поверхневих структур

№ з/п	Схема об'єкта досліджень	Масштабний рівень	Інформативні ознаки
1		макро-	Градiєнт кольору поверхні
2		мезо-	Просторова структура впорядкованої системи виступів та западин
3		мікро-	Усереднений параметр елементарного рельєфного утворення

4.2.1. Алгоритм ідентифікації

Для комп'ютерного діагностування параметрів поверхневого рельєфу використано алгоритм, який містить операції фільтрування, бінаризації та визначення параметрів поверхні [44]. Оцінювання стану поверхні зразка проводили шляхом аналізу її фотозображень після лазерної ударно-хвильової обробки. Початкове зображення з фотокамери (рис. 4.11,б-г) перетворювали у "сіре" за рекомендаціями Міжнародного союзу телекомунікацій (3.1).

Для кожної точки зображення розраховували абсолютне значення горизонтального та вертикального градієнтів яскравості:

$$\nabla i_h(x, y) = \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right|, \quad \nabla i_v(x, y) = \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial y} \right|. \quad (4.7)$$

На практиці для визначення градієнта застосували оператор Собела [38].

Для узагальненого оцінювання стану дослідженої поверхні використали середні значення горизонтального та вертикального градієнтів зображення:

$$G_h = \overline{\nabla I_h} = \frac{1}{mn} \iint_0^{m,n} \nabla i_h(x, y) dx dy, \quad G_v = \overline{\nabla I_v} = \frac{1}{mn} \iint_0^{m,n} \nabla i_v(x, y) dx dy. \quad (4.8)$$

Ці градієнти дають змогу оцінити переважний напрям формування хвилястих структур на досліджуваній поверхні та ступінь їх неоднорідності [39]. Нижче середнє значення градієнта свідчить про незначну зміну інтенсивності вздовж вибраної лінії на зображенні. Практично це означає, що в певному напрямі структура рельєфу поверхні є одноріднішою [40-43].

Щоб виділити інформативні ознаки, які відповідають елементам пошкодження поверхні, до отриманого зображення у градаціях сірого кольору застосовували бінарне перетворення. В результаті цього отримували чорно-біле зображення пошкодженої поверхні, на якому білі пікселі відповідають фону, а чорні – об'єктам впорядкованих структур (рис. 4.11,д-є).

Найзагальнішим інформативним параметром, який дозволяє оцінити ступінь пошкоженості зразка за отриманим зображенням, є відносна площа, яка

відповідає морфологічним ознакам пошкодженої поверхні (3.5). Розподіл елементів упорядкованих структур уздовж осей зображення описують вертикальна V_{hs} та горизонтальна H_{hs} гістограми (3.11).

У роботі [11] для отримання узагальненої оцінки пошкоджень поверхні за допомогою гістограм запропоновано використовувати середні значення цих гістограм (4.1). Проте ці параметри доцільно використовувати при масових вимірюваннях в однакових умовах та сталому прямокутному вікні спостереження. В умовах лабораторних досліджень різних зразків, особливо при різних умовах виникнення дефектів поверхні, середні значення гістограм є малоінформативні. Крім цього, при прямокутному вікні спостереження значення μ_v та μ_h по-різному змасштабовані (відносно розмірів зображення) і тому незручні у порівнянні, а при квадратному вікні вони стають однаковими.

Тому кількісне оцінювання виду вертикальної V_{hs} та горизонтальної H_{hs} гістограм виконано за спектральним аналізом їх функцій. За допомогою швидкого перетворення Фур'є функції гістограм подавали у вигляді гармонічного ряду (4.4). У ролі інформативних параметрів вибрано середні амплітуди спектра функцій горизонтальної та вертикальної гістограм A_{ah} , A_{av} (4.6). Середня амплітуда спектра дозволяє кількісно оцінити орієнтацію елементів поверхневого рельєфу поверхні вздовж осей зображення. Її вищі значення відповідають більшому ступеню пошкодження по даній осі.

Наявність пари узагальнених характеристик: середніх градієнтів G_h , G_v та середніх амплітуд спектра A_{ah} , A_{av} дозволяє отримати комплексну інтегровану характеристику аналізованого зображення у двох взаємоперпендикулярних координатних напрямках.

4.2.2. Закономірності рельєфних утворень

За умов надшвидкої кристалізації металу в його поверхневих шарах можна відзначити два принципово відмінні механізми метастабільного стану матеріалу: зростання вільної енергії матеріалу внаслідок збільшення енергії центрів кристалізації; утворення пересиченого твердого розчину з виникненням напружень та локальних температурно-силових полів. Таким чином, відбувається багаторівнева фрагментація поверхні металу з формуванням рельєфу із впорядкованою структурою, геометричні ознаки якої визначені умовами лазерного оброблення матеріалу [42, 43].

Правомірність застосування терміну "впорядкований рельєф" доведена результатами досліджень оброблених поверхонь із використанням оптичної й електронної мікроскопії [29, 30]. Закономірності зміни обчислених інтегральних параметрів впорядкованого рельєфу за імпульсного лазерного оброблення в різних середовищах наведено на рис. 4.12. Рельєф на модифікованій поверхні виникає внаслідок швидкого охолодження металу, що спричиняє значну термодинамічну нестабільність поверхневого шару і забезпечує йому унікальні механічні властивості. Пластичне течіння металу в зоні обмеженої деформації поверхневого шару має яскраво виражений хвильовий характер. При цьому метал у зоні оброблення ділиться на окремі ділянки, роз'єднані зонами ламінарного плину різної інтенсивності. Адже відомо, що градієнт напружень зумовлює хвильовий характер поширення пластичної деформації та пов'язаний

з цим дискретний характер ділянок релаксації і локалізації напружень, спричиняючи морфологічні зміни в металі [45,46].

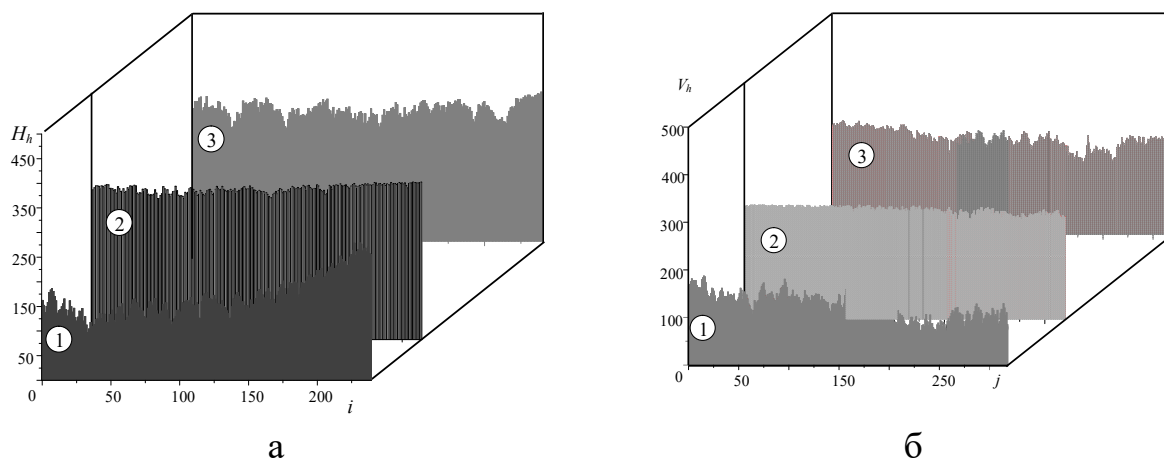


Рис. 4.12. Горизонтальна (а) та вертикальна (б) гістограми для поверхні 15X13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки

З фізичної точки зору на поверхні металу формується прошарок, який має вищі, ніж в його об'ємі, модуль пружності та мікротвердість (утворюється своєрідний "покрив"). При цьому рельєф поверхневого шару металу стає хвилястим з утворенням "виступів" та "западин". Для оцінювання морфологічних параметрів упорядкованих структур рельєфу на поверхні зразків, оброблених лазером, використовували параметри гістограм зображення (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Морфологічні параметри впорядкованих структур рельєфу на поверхні зразків сталі 15X13МФ після оброблення лазером у різних середовищах

Середовище оброблення	Параметри впорядкованої структури рельєфу			
	G_h	G_v	A_{ah}	A_{av}
повітря	11286,4	8201,8	1,7	1,3
вода	3380,3	2610,3	0,5	0,5
чорнило	6783,0	5275,8	1,1	0,9

Оброблення на повітрі. На поверхні металу сформувався деформаційний рельєф з хвилеподібною структурою розташування виступів та западин (рис. 4.12,а, гістограма 1).

Оброблення у воді. Сформувався дещо розорієнтований рельєф (рис. 4.12,а, гістограма 2). Нижчий (порівняно з горизонтальним) вертикальний градієнт рельєфу вказує на те, що вздовж вертикальної осі формується однорідніша впорядкована структура рельєфу. Водночас у горизонтальному напрямі градієнт поверхонь зразків змінювався істотніше. Нижчим градієнтам відповідають напрями, вздовж яких орієнтований рельєф поверхні. Монотонне зростання параметрів G_h , G_v підтверджує раніше зроблений висновок [39] про повторюваність та масштабування сформованих деформаційних структур.

Оброблення у чорнилі. Дещо іншу морфологію впорядкованого рельєфу (порівняно з отриманою на повітрі) отримали за оброблення в чорнилі (рис. 4.12,а, гістограма 3), що зумовлено тиском плазми. Крім того, вода та чорнило перерозподіляють поглинальну здатність середовища. Форма деталей зі сформованим рельєфом пов'язана не лише з тепловим впливом розплаву у поверхневому шарі зразка, але із виникненням у ньому високого тиску внаслідок значних стискувальних напружень [40].

4.2.3. Двовимірне оцінювання морфології рельєфу із впорядкованими структурами

За імпульсного лазерного впливу на поверхневий шар металу в ньому виникає двофазний стан (рідина на поверхні + тверда основа). Релаксація напружень у металі відбувається шляхом структурування поверхні, розвиток якого припиняється при встановленні динамічної рівноваги між кристалічною та рідкою фазами. При цьому виявили, що зміна середовища оброблення не змінює загальної тенденції утворення рельєфу, проте змінює його параметри: висоту виступів та глибину западин (рис. 4.13).

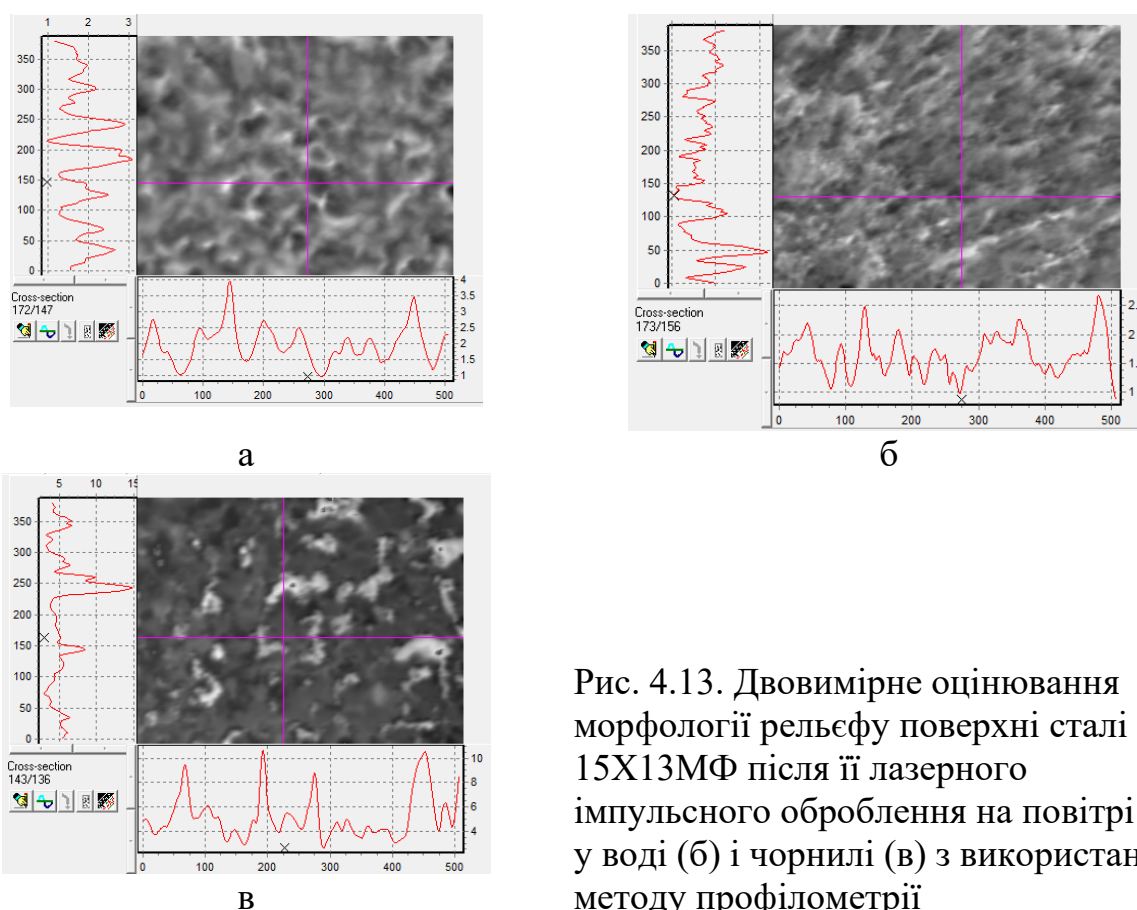


Рис. 4.13. Двовимірне оцінювання морфології рельєфу поверхні сталі 15X13МФ після її лазерного імпульсного оброблення на повітрі (а), у воді (б) і чорнилі (в) з використанням методу профілометрії

Можна припустити, що неоднорідність на межі поділу системи поверхневий шар – тверда основа є однією з причин формування впорядкованих структур на поверхні. Завдяки мікрогетерогенності структури метал має певну неоднорідність фізико-механічних властивостей, що під час лазерного оброблення спричи-

няє різні за інтенсивністю збурення, які залежать від розподілу напружень та деформацій на локальному рівні. Результиуюче поле переміщень фіксується на поверхні металу у вигляді періодичної системи деформаційних хвиль [28]. Розвинені підходи дають змогу аналізувати кількісні показники морфології поверхневих шарів сталей після лазерного оброблення. Порівняння та можливості розробленого й відомого методів аналізу наведено у табл. 4.6.

Таблиця 4.6. Методи аналізу та можливість їх використання для діагностування параметрів упорядкованих поверхневих структур

Підходи	Ієрархічно-структурні рівні		
	Мікро	Мезо	Макро
Оптико-цифровий аналіз	–	+	+
3-D профілометрія	+	+	–

Перспективним для оцінювання стану поверхні після лазерної ударно-хвильової обробки є метод оптико-цифрового контролю. Він може бути основою дистанційного експрес-аналізу стану конструкції. Проте для достовірнішого оцінювання стану поверхні слід використовувати комплекс методів дефектоскопії. Методом 3D- профілометрії встановлено параметри рельєфу та виявлено, що термічний чинник спричиняє розплавлення поверхневого шару матеріалу, релаксація стискувальних термічних напружень та формування на поверхні металічних плівок упорядкованого деформаційного рельєфу. Основною передумовою використання запропонованої методики є насиченість поверхні матеріалу візуальними ознаками рельєфу, які можуть бути визначені методами оптичної мікроскопії.

Відомо, що поверхневі шари металів є найчутливішими до деформаційного впливу на матеріал, що створює передумови їх використання для діагностування накопичення розпорошених пошкоджень. Відомі праці, в яких запропоновано ряд підходів аналізу зображень поверхні з дефектами різної фізико-механічної природи [29]. Обґрунтовано методичні аспекти ідентифікації розпорошених та локалізованих дефектів, зокрема й на зображеннях зі значною кількістю завад [29, 30]. На їх основі обґрунтовано методологію визначення параметрів оцінювання стану літаків транспортної авіації за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків-свідків [30].

Існують методи оцінювання накопичення внутрішніх мікродефектів і матеріалі, одним з яких є метод повних діаграм [31]. Перевагами цього підходу є можливість оцінювання кінетики пошкодженості матеріалу не лише на висхідній, але й на спадній ділянці діаграми статичного розтягу. Поєднання переваг методів оптико-цифрового контролю та повних діаграм дозволяє встановити взаємозв'язок між внутрішньою та поверхневою розпорошеною пошкодженістю [32].

4.3. Автоматизоване діагностування пошкодженості алюмінієвого сплаву за умов статичного розтягу

Досліджували алюмінієвий сплав Д16чт, який має схильність до поверхневих хвильових процесів протягом пластичного деформування, що дозволяє чітко фіксувати пошкодженість діагностованого об'єкта [47, 48]. Випробування проведено на модернізованій гідравлічній установці для статичних випробувань ZD-100Pu.

Методом тензометрії отримано криві статичного розтягу зразків до різного рівня залишкових деформацій (рис. 4.14,а).

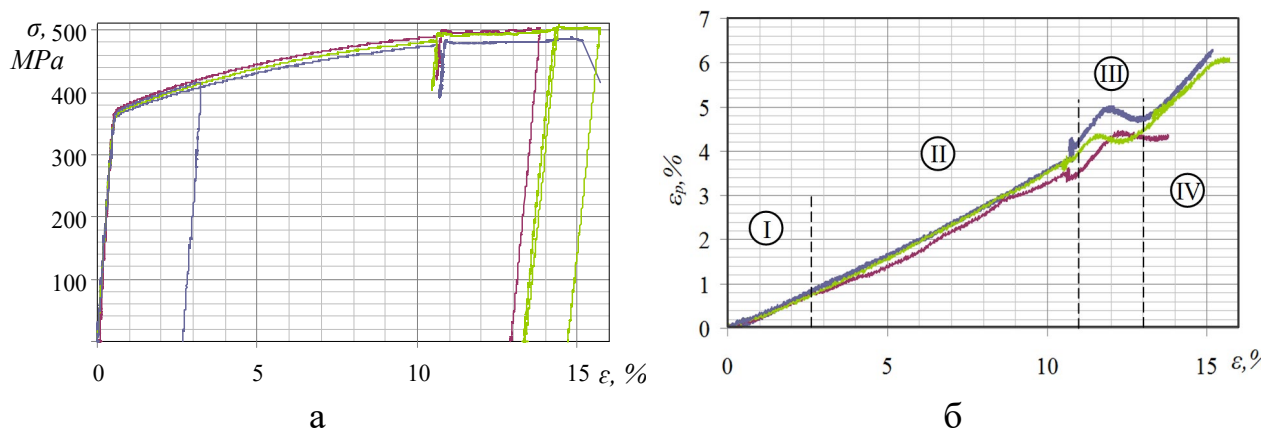


Рис. 4.14. Криві статичного деформування алюмінієвого сплаву – а; залежність деформації розпушування від залишкової деформації зразка – б; I, II, III, IV – пропонувані етапи пошкодженості

Для оцінювання кінетики розсіяних пошкоджень у матеріалі на різних стадіях деформування використано модель накопичення пошкоджень у металевих матеріалах при статичному навантаженні, розроблену в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, в якій у ролі основного параметра поточного стану матеріалу прийнято коефіцієнт поперечної деформації та відповідну йому деформацію розпушування [49].

Встановлено зв'язок між параметрами відносної деформації (ε) та параметрами деформації розпушування (ε_p), що дозволило уточнити кінетику накопичення розпоросених дефектів у матеріалі (рис. 4.14,б). Залежність $\varepsilon - \varepsilon_p$ є практично лінійною до залишкової деформації $\varepsilon = 11\%$. Це свідчить про "однорідність" накопичення структурних дефектів у матеріалі, що зумовило збільшення відносного видовження зразків. Проте при $\varepsilon < 11\%$ на графіку є хвилеподібні коливання з амплітудою 2...3 %, які містять інформацію про об'єднання дефектів із утворенням мікропор. Це вказує на те, що дисипативна структура утворюється переважно на заключному етапі такого специфічного коливання ε_p . Дані експерименту показують, що на цій ділянці змінюється густина матеріалу (накопичуються структурні дефекти). Це дає підстави стверджувати, що зростає ступінь розпушення матеріалу, внаслідок істотної зміни структури матеріалу порівняно з деформаційними процесами за менших деформацій [50, 51].

Слід зазначити, що особливості процесу деформування алюмінієвого сплаву можна пояснити з позицій оцінювання поточної пошкодженості, накопиченої внаслідок деформування (табл. 4.7).

Таблиця 4.7. Залежність $\varepsilon - \varepsilon_p$ у точках розвантаження повної діаграми сплаву Д16чт

Вид деформування	Значення деформації, %			
	Поздовжня деформація	2,6	13,0	14,6
Деформація розпушення	0,8	4,8	5,6	6,2

Пластичну деформацію матеріалу Д16чт зосереджено у локальних зонах, які вкривають поверхню системою суміжних смуг локалізованого деформування. Причиною їх утворення є структурна неоднорідність матеріалу, насамперед наявність внутрішніх меж між зернами та їх конгломератами [51].

Для оцінювання стану поверхні за її фотозображенням використовували алгоритм [52, 53], який має такі стадії: а) вирівнювання освітленості; б) бінарне перетворення; в) обчислення площі поверхневих утворень.

Зв'язок між структурними параметрами матеріалу та відгуком його поверхневих шарів на деформаційний вплив [50, 51] є фізичною передумовою оцінювання механічної поведінки матеріалів та інтерпретації фізичних механізмів процесу деформування. При цьому параметри поверхневого деформаційного рельєфу є джерелом інформації про стан усього матеріалу.

Проведення досліджень, спрямованих на встановлення зв'язку між кількісними параметрами деформації розпушування, яка характеризує процес накопичення дефектності матеріалу, і площею поверхневих пошкоджень ґрунтувалось на припущенні щодо їх взаємної кореляції. Основною причиною деградації поверхні матеріалу є високий рівень внутрішніх напружень, що розвиваються в тонких приповерхневих шарах при пластичному деформуванні [48, 54]. Так як пошкодженість є функцією накопичених на поверхні пластичних зсувів, то у якості параметра її оцінювання прийнято площу поверхневих дефектів a_r (3.4).

Початкове зображення поверхні (рис. 4.15,а-д) внаслідок різної освітленості різних зон містить спотворену картину розподілу поверхневих утворень. Для усунення цього недоліку виконували вирівнювання освітленості. Після цього проводили сегментацію зображення за допомогою адаптивного порогування Бредлі (3.3). На отриманому бінарному зображенні $i_b(x, y)$ фону відповідають білі пікселі, а розпізнаним поверхневим утворенням – чорні (рис. 4.15, е-и).

У фізичній мезомеханіці поверхневий шар розглядають як самостійну ділянку матеріалу, яка відіграє важливу роль у механічній поведінці деформованого твердого тіла [51]. Поверхневий шар має ослаблені міжмолекулярні зв'язки [51,52], що зумовлює утворення найефектнішої структури. Отже, зсувна стійкість поверхневого шару є нижчою порівняно з внутрішніми шарами матеріалу, і пластичне деформування розвивається в ньому інтенсивніше.

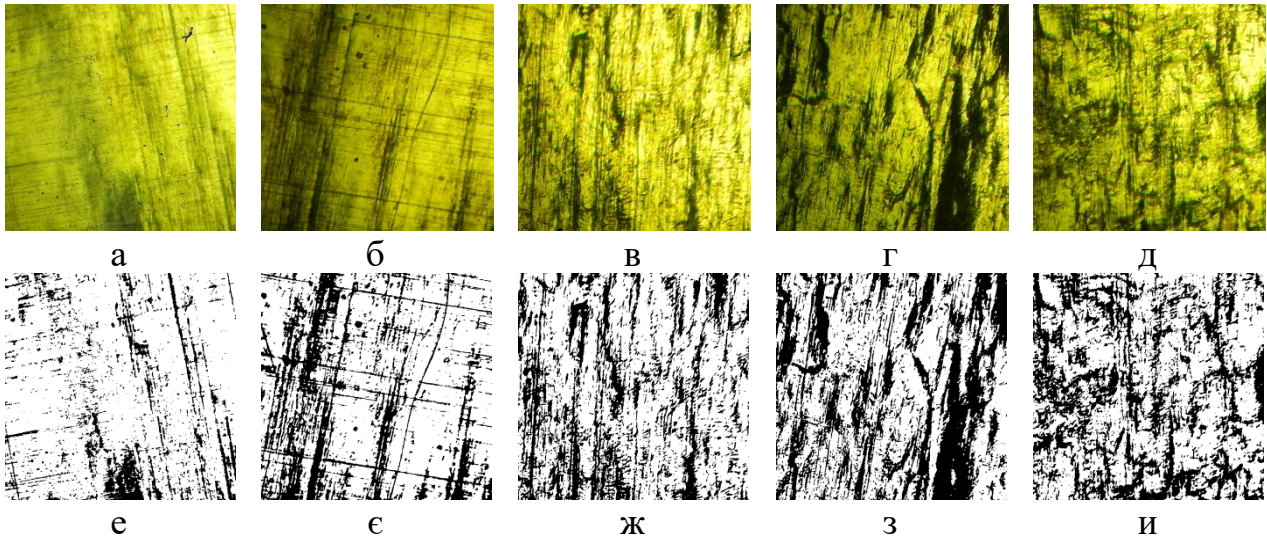


Рис. 4.15. Початкові зображення дослідженої поверхні у точках розвантаження повної діаграми (рис. 4.14,а) – а-д; зображення, які ілюструють результат кластеризації (білі пікселі – фон, чорні – деформаційний рельєф) – е-и

Деформування матеріалу Д16чт розглянуто як процес, який відбувається у двошаровій системі "поверхневий шар – об'єм матеріалу". Граничний стан матеріалу досягається за умови насичення поверхні деформаційними утвореннями [48, 55, 56]. За даними автоматизованого аналізу зображень поверхні деформованих зразків отримано експериментальні дані, що дозволяють співставити кінетику накопичення поверхневих пошкоджень із відносною деформацією зразка (рис. 4.16).

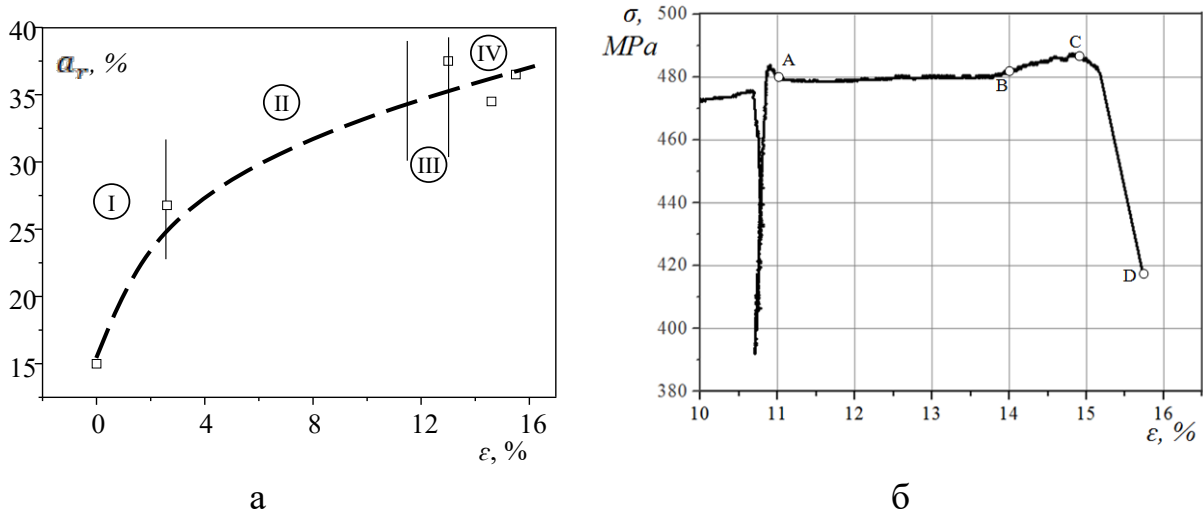


Рис. 4.16. Залежність площі поверхневого рельєфу від значення відносної деформації ($a_r - \varepsilon$) – а; деформаційний процес на ділянках III та IV – б

З метою поглибленого вивчення поведінки матеріалу в стані передруйнування, проаналізовано деформаційні процеси у внутрішніх шарах матеріалу (рис. 4.16,б). Ця ділянка кривої деформування має локальне зниження при $\varepsilon = 11\%$ (т. А) та зростання напружень (т. В.), що свідчить про зміни мікромеханізмів руйнування й високу чутливість матеріалу до цих фізичних процесів (рис. 4.16,б). Шийкоутворення (т. С) та вихід фронту руйнування на

бічну поверхню зразка (т. D) відбувся методом "швидкого зсуву", який має низьку енергоємність, що підтверджується геометрією стадної ділянки діаграми (рис. 4.16,б). Внаслідок значної жорсткості системи навантажування [49] зафіксовано коливання деформаційного процесу в матеріалі на стадії передруйнування. Це свідчить, що у матеріалі завершується процес злиття розпорошених дефектів у макротріщину (рис. 4.16,б). Подібні "коливні" процеси зафіксовано і на поверхні досліджених зразків, що свідчить про подібну еволюцію стану поверхні та її адаптацію до зовнішнього впливу, а її мікроструктурні складові самоорганізуються [51, 55, 56]. Накопичення пошкоджень відбулось внаслідок об'єднання дрібних мікрodefektів зі збільшенням їх розмірів. Утворення макроdefektів за різних значень деформації є нелінійною та значно зростає на етапі передруйнування [55].

Отримані результати добре узгоджуються із даними В.А. Романової [51, 73, 74], яка довела, що зерна поблизу поверхні мають менший опір зсувним процесам, ніж у об'ємі матеріалу, а збільшення рівня пластичної деформації зумовлює нелінійність цього процесу, як було показано на рис. 4.14.

4.4. Автоматизоване діагностування пошкодженості алюмінієвого сплаву за умов багатоциклової втоми

Первинна діагностика стану обшивки сучасних літаків передбачає пошук та ідентифікацію втомних пошкоджень із використанням візуальних методів контролю. Відомо, що інкубаційна стадія накопичення втомного пошкодження в багатьох випадках також має візуальні ознаки, які визначають можливість як якісного, так і кількісного оцінювання накопиченого втомного пошкодження [59]. Кількісне оцінювання накопиченого пошкодження на початковій стадії втоми дозволяє прогнозувати місце і час появи втомної тріщини. Такий прогноз на етапі розроблення авіаційної техніки суттєво зменшує вартість натурних втомних випробувань унаслідок скорочення їх тривалості, а на стадії експлуатації дає можливість підвищувати надійність літаків і безпеку польотів [60].

Деформаційний рельєф формується на поверхні плакуючого шару алюмінієвих сплавів при напруженнях, які відповідають умовам навантажування багатьох елементів конструкції в експлуатації і при випробуваннях. Концентрація напружень зумовлює першочергове формування рельєфу поблизу клепових отворів клеєварних точок і т.п., тобто місць потенційного руйнування. Деформаційний рельєф поверхні спостерігається на кількох масштабних рівнях. За допомогою оптичної мікроскопії можна спостерігати ознаки рельєфу на мезо- і макрорівні [61].

Очевидною є необхідність обґрунтування і впровадження об'єктивних показників інтенсивності деформаційного рельєфу, як характеристик накопиченого втомного пошкодження. Вирішення цього завдання шляхом аналізу зображень пошкодженої поверхні буде показано нижче. Найбільше практичне значення мають залежності, які дозволяють прогнозувати залишковий

ресурс. Такі залежності можна отримати з даних про еволюцію параметрів деформаційного рельєфу [61].

Для оцінювання втомної пошкодженості алюмінієвого сплаву для літакобудування ми запропонували [62] використовувати інтегральні параметри, отримані за допомогою аналізу зображень дослідженої поверхні.

Геометрія зразка представлена на рис. 4.17,а. Зразок випробовували в умовах консольного згину при $R = 0$, $\sigma_{max} = 147$ МПа. Аналіз деформаційного рельєфу проводили поблизу концентратора напруження (отвір діаметром 1,0 мм).

У процесі випробувань фіксували стан поверхні поблизу концентратора напружень після певних циклічних напрацювань, кількість циклів навантажування до появи втомної тріщини довжиною 1,0 мм і кількість циклів навантажування до повного руйнування.

Оцінювання стану поверхні зразка проводили шляхом аналізу його фотозображень, послідовно отриманих після певної кількості циклів навантаження. Початкове зображення з фотокамери (рис. 4.17,б-г) перетворювали у "сіре" зображення з функцією яскравості $i_0(x, y)$ за формулою (3.1).

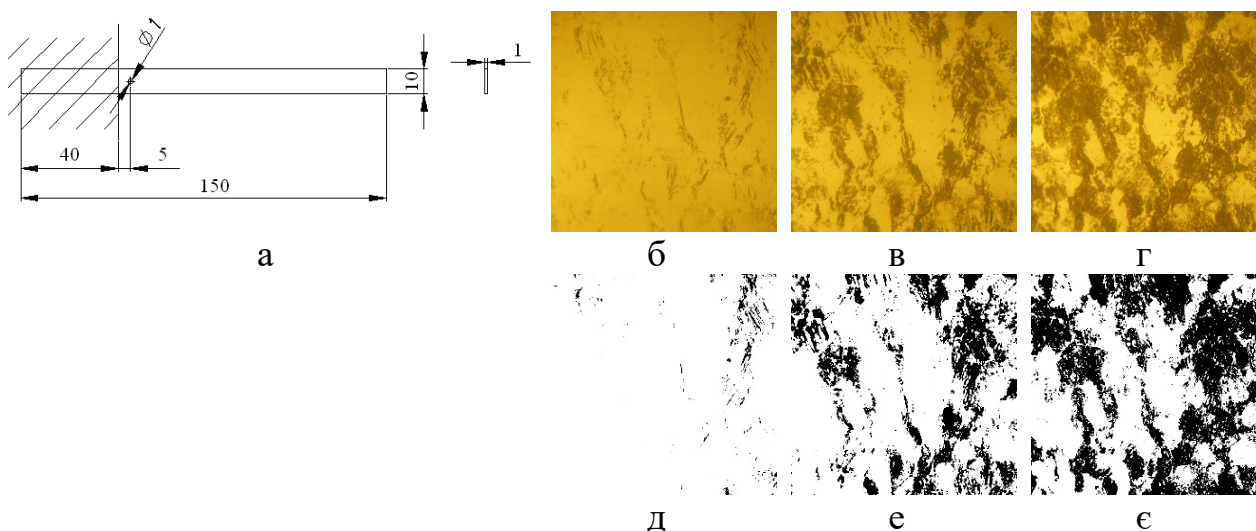


Рис. 4.17. Схема дослідженого зразка та приклади деформаційного рельєфу після 15, 100, 711 тис. циклів навантажування: б,в,г – початкове зображення; д,е,є – бінаризоване

Для кожного пікселя зображення розраховували середні значення горизонтального та вертикального градієнтів зображення G_h , G_v (4.8), середні амплітуди спектра A_{ah} , A_{av} (4.6) та відносну площу пошкоджень поверхні a_r (3.5).

Циклічне напрацювання формує деформаційний рельєф на поверхні конструкційних алюмінієвих сплавів, інтенсивність якого вказує на рівень накопиченого втомного пошкодження [10]. Такий рельєф спостерігався як на стандартних зразках для втомних випробувань у широкому діапазоні умов навантаження, так і на зразках, які були препаровані з обшивки літака Ан-24 і випробувані при напруженнях, близьких до експлуатаційних [57-59]. Результати дослідження, яке проведено за допомогою оптичної і електронної мікроскопії,

вказують на правомірність застосування терміна "деформаційний рельєф" та його використання у вигляді діагностичного параметра втомного пошкодження [57,58].

На рис. 4.18 приведено залежності обчислених інтегральних параметрів зображення від кількості циклів навантаження. Ріст відносної площі a_r вказує на зростання ступеня пошкоженості дослідженої поверхні. За експериментальними даними, при навантаженнях до 100 тис. циклів відбувається швидкий ріст пошкоджень поверхні, (рис. 4.18,а). Водночас, після 100 тис. циклів навантаження деформаційний рельєф змінюється незначно.

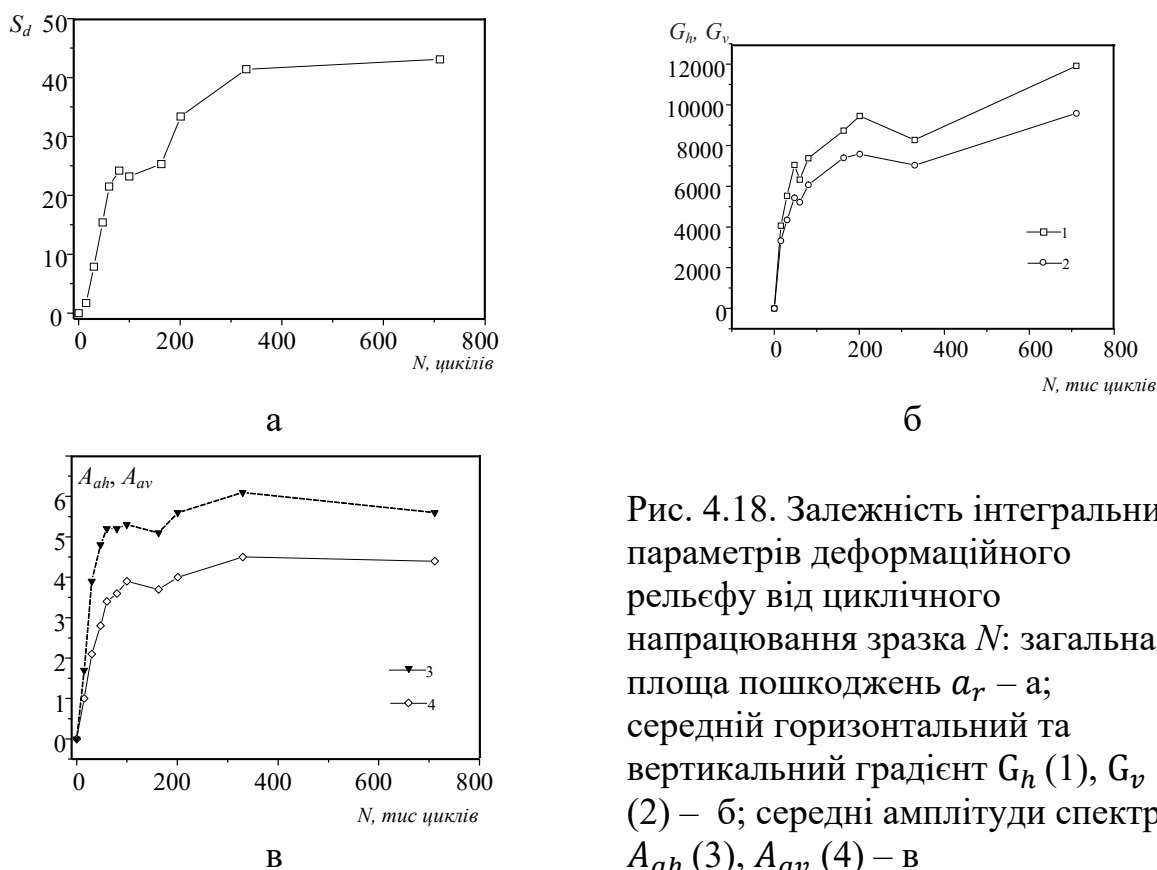


Рис. 4.18. Залежність інтегральних параметрів деформаційного рельєфу від циклічного напручування зразка N : загальна площа пошкоджень a_r – а; середній горизонтальний та вертикальний градієнт G_h (1), G_v (2) – б; середні амплітуди спектру A_{ah} (3), A_{av} (4) – в

Проведено кількісний аналіз кінетики зміни орієнтації деформаційного рельєфу під час циклічного напручування алюмінієвого сплаву. Виявлено, що циклічне напручування 80 тис. циклів спричиняє формування складної системи зсувів на поверхні зразка. На цьому етапі відбувається інтенсивне насичення поверхні деформаційними зсувами. Окремі кристалічні блоки та їх конгломерати то піднімаються, то опускаються над поверхнею, їх утворення зливаються у групи, розміри пошкоджень поступово зростають. Цей динамічний хаос є відображенням динамічних кооперативних дислокаційних процесів на мікро- та мезорівнях [60, 61]. Приблизно однакові значення градієнтів у першій фазі дослідження свідчать про хаотичний невпорядкований процес зародження дефектів.

У подальшому рельєф набуває впорядкованої орієнтації. Нижчі значення вертикального градієнта (порівняно з горизонтальним) вказують на те, що вздовж вертикальної осі картина деформаційного рельєфу однорідніша, у той час як по горизонталі спостерігаються різкіші зміни інтенсивності зображення.

Таким чином, менші значення градієнта відповідають напрямку, вздовж якого витягуються області пошкоджень поверхні. Монотонне зростання параметрів G_h , G_v підтверджує раніше отримані результати [63, 64], які свідчать про самоподібність та скейлінг утворених деформаційних структур.

Середні амплітуди спектра функцій гістограм A_{ah} , A_{av} (рис. 4.18,в) певною мірою повторюють залежність рис. 4.18,а, але дозволяють охарактеризувати процес руйнування поверхні у двох координатних напрямках. Більше значення вертикальної амплітуди свідчить про переважаючий ріст пошкоджень саме у цьому напрямі.

Обрані діагностичні параметри пошкодження і методика їх кількісного оцінювання дозволяє розглядати розроблений метод як експрес-діагностування втомного пошкодження.

4.4.1. Стадійність розвитку деформаційного рельєфу

Перший етап – швидке накопичення дефектності дослідженої поверхні. Структурна неоднорідність матеріалу зумовлює формування надлишкових полів напружень, які частково релаксують шляхом утворення в окремих зернах матеріалу смуг ковзання, екструзій та інтрузій [57]. Спостерігаються характерні структурні сліди локалізації в макроекструзіях у вигляді утворення сукупності “гребенів” (“гір”). Відбувається інтенсивне формування деформаційного рельєфу. Виявлено, що даний етап становить близько 15...20% загальної кількості циклів до формування тріщини.

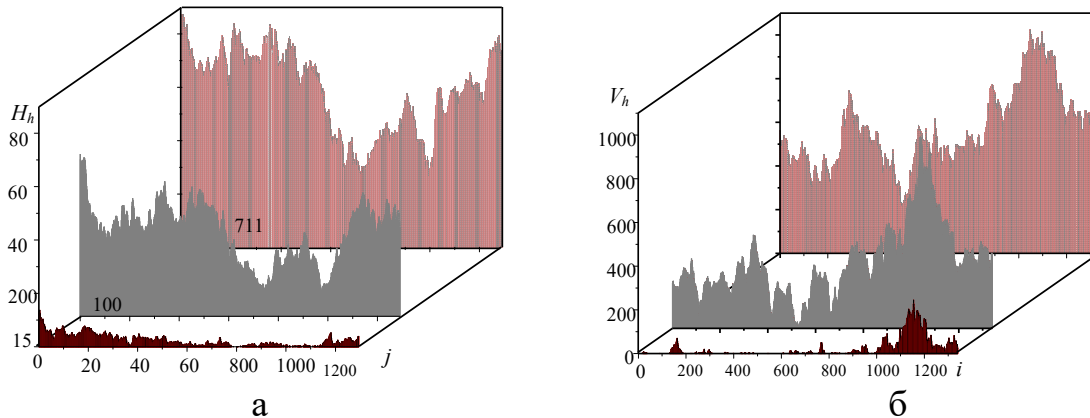


Рис. 4.19. Горизонтальна (а) та вертикальна (б) гістограми для зображення деформованої поверхні після 15, 100, 711 тис. циклів навантажування

Другий етап – уповільнення процесу мікропластичних зсувів зерен матеріалу, об'єднання окремих ділянок деформаційного рельєфу та набуття системою насиченості. Хоча процес накопичення пошкоджень (деформаційного рельєфу) на даному етапі уповільнений порівняно з попереднім етапом, проте його перебіг є квазістаціонарним. Саме це дозволяє використовувати його для технічного діагностування стану пошкодженої поверхні з метою прогнозування граничного стану. Під граничним станом розуміли зародження втомної тріщини довжиною 1,0 мм, яка може бути ідентифікована засобами оптичного контролю. Граничне значення параметрів пошкодження розглядали як останнє в ряду значень, що були отримані до моменту формування втомної тріщини.

Базовим фактором, що дозволяє використовувати запропоновану методику, є насиченість поверхні матеріалу візуальними ознаками рельєфу, які виявляються методами оптичної мікроскопії. Для кількісної характеристики рельєфу можуть бути застосовані запропоновані кількісні параметри пошкодження, які дозволяють аналізувати зміну просторової орієнтації дефектів деформаційного пошкодження у межах поверхні, де ознаки локалізованої деформації відсутні.

4.5. Оцінювання кінетики втомної пошкоженості матеріалу за параметрами поверхневого деформаційного рельєфу

У працях С.Р. Ігнатовича та М.В. Карускевича [65-77] розроблено структурно чутливі зразки-свідки втомного пошкодження, застосування яких ґрунтується на кількісному оцінюванні накопиченого втомного пошкодження за параметрами деформаційного рельєфу поверхні. Чутливість зразків-свідків може бути оптимізована відповідно до режимів експлуатаційного циклічного навантажування конструкцій. Проте загальним для обох конструкцій є використання показників насиченості й форми кластерів деформаційного рельєфу поверхні як діагностичних параметрів і оптичного неруйнівного контролю, як способу кількісного визначення діагностичних параметрів. При цьому поверхню із пошкодженнями, які виникли під час напрацювання, розглядали як сукупність структурних дефектів, розташованих у межах аналізованої ділянки. Дефектами є прояви мікросувних та ротаційних процесів, пошкодження меж зерен. Збільшення кількості циклів, як правило, спричиняє формування ліній ковзання та їх локалізацію із утворенням ліній локалізованого зсуву, що є одним зі способів релаксації напружень за умов циклічного навантаження.

Фольговий сенсор закріплювали на зразку сплаву Д16АТ, який випробовували при максимальному напруженні від нульового циклу навантажування $\sigma_{max} = 180,0$ МПа з частотою навантажування 11,0 Гц [75]. Сенсор втоми дозволяє спостерігати кінетику накопичення і локалізації втомних пошкоджень у поверхневому шарі матеріалу з використанням підходів фізичної мезомеханіки. Елементарним актом пластичного течіння під час накопичення втомних пошкоджень у матеріалі є "зсув+поворот" структурних елементів [70]. Це спричиняє виникнення дисипативних мезоструктур і накопичення втомних дефектів на сенсорах втоми.

4.5.1. Алгоритм обчислення параметрів деформаційного рельєфу

Параметри рельєфу поверхні полікристалічного алюмінієвого сенсору втоми обчислювали шляхом аналізу вихідного фотозображення (рис. 4.20,а-в) $i_0(x, y)$. Алгоритм складається з двох етапів (рис. 4.21). Перший, підготовчий етап, містить операції вирівнювання освітленості, фільтрування, бінаризації та визначення нахилу. На цьому етапі отримуємо бінарні зображення, на яких кожен піксель належить до одного з класів: "фон" чи "об'єкт" (рис. 4.20,г-е).

Протягом другого етапу шляхом аналізу отриманого зображення обчислювали кількісні інтегральні характеристики, які дозволяють оцінити загальний стан зразка [76]. Розорієнтація ліній зсуву є одним із фундаментальних проявів кінетичних закономірностей накопичення пошкоджень [70-72]. Локальні мікроссуви на окремих ділянках смуг спричиняють зміну їх інтегральної орієнтації. Відбувається перехід від одноорієнтованої структури зсувів до частково розорієнтованої з наростанням кількості мікроспотворень геометрії деформаційного рельєфу.

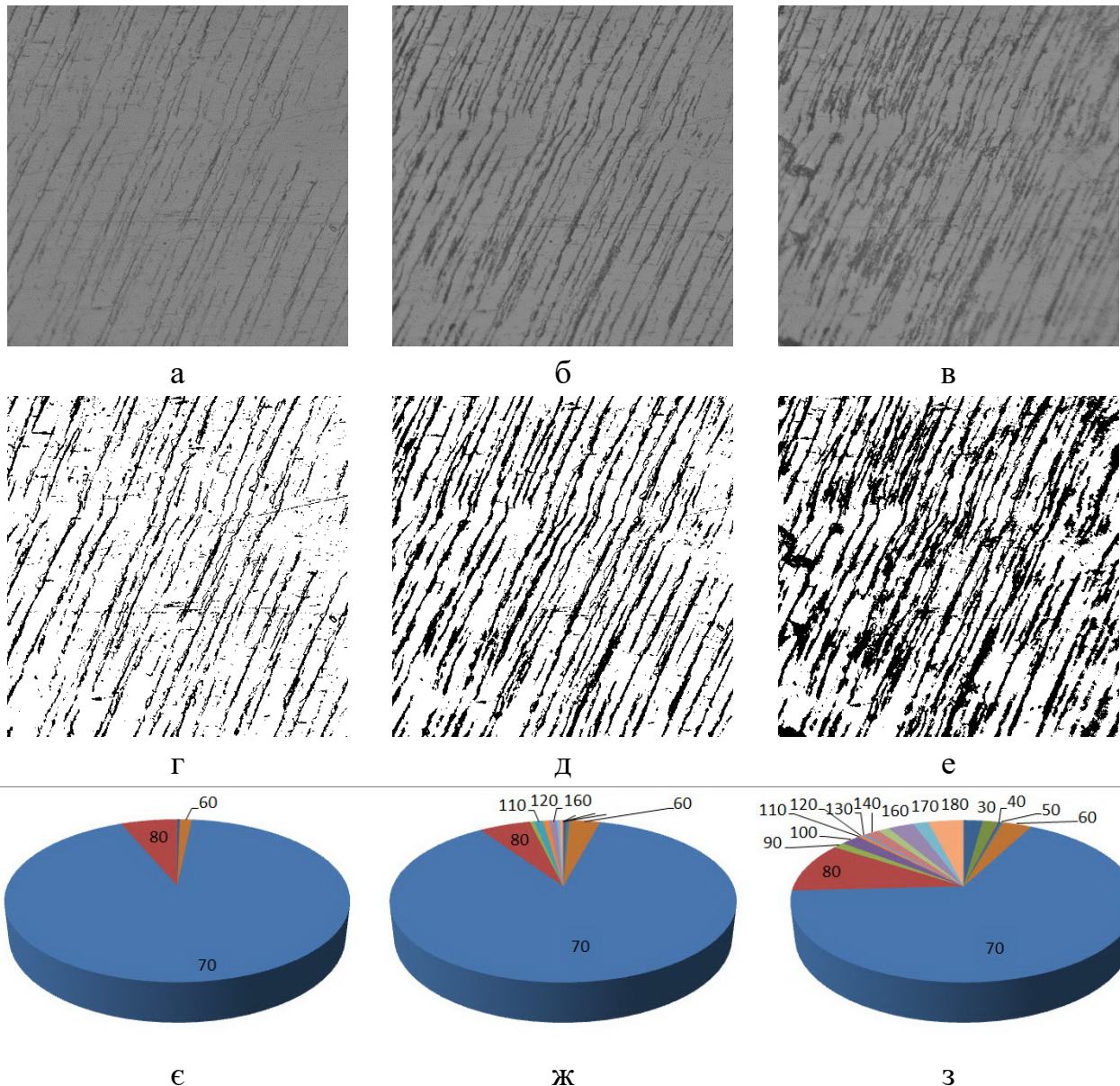


Рис. 4.20. Вихідне багатоградацийне (а-в) та кінцеве бінарзоване (г-е) зображення поверхні полікристалічного алюмінієвого сенсора в томи і діаграми розподілу кутів орієнтації рельєфних утворень (є-з) після 10^4 ; $4 \cdot 10^4$; $2 \cdot 10^5$ циклів навантаження

Наявність цього явища підтверджується діаграмою орієнтації рельєфних утворень (рис. 4.20,є-з). Помітно, що напрям деформаційних утворень спочатку спотворюється, а потім виникають альтернативні механізми самоорганізації, які є результатом впливу локальних релаксаційних процесів мезорівня [73-78]. Для аналізу кутів розповсюдження рельєфних утворень використовували алгоритм ідентифікації [79].

Попередня обробка зображення. Вирівнювання освітленості зображення призначене для усунення впливу затінених областей початкового зображення на результат роботи. Ця операція виконується за допомогою згортки зображення з низькочастотним фільтром і подальшого усунення низькочастотної складової.

Для усунення на вихідному отриманому зображенні дрібних шумів, викликаних особливостями роботи фотоматриці, використаний медіанний фільтр. У результаті обробки отримуємо зображення $i_f(x, y)$.

Після попередньої обробки та покращення якості початкового зображення $i_0(x, y)$ проводили його сегментацію. На зображенні визначали інформативні пікселі (точки цікавості), які відповідають зонам деформаційного рельєфу. Сегментацію проводили за допомогою бінарного перетворення. Для цього на гістограмі яскравості зображення знаходили граничне значення p_{th} , яке розділяє пікселі фону від інформативних пікселів. Результатом є бінарне зображення $i_b(x, y)$ (рис. 4.20,г-е), на якому елементам деформаційного рельєфу відповідають чорні пікселі (інформативні), а фону – білі.

Деформаційний рельєф на поверхні полікристалічного алюмінієвого сенсора втоми характеризується наявністю численних лінійних фрагментів. Передумовою отримання інтегральних кількісних показників таких зображень [66] є система координат, одна з осей якої співпадає з напрямом поширення лінійних фрагментів.

Поворот осі координат. Напрямок поширення лінійних фрагментів деформаційного рельєфу визначали за допомогою перетворення Хафа, яке полягає у порівнянні зображення із параметричним простором прямих [80]. Нехай сімейство прямих на площині задане параметричним рівнянням

$$h(\theta, \rho, x, y) = x \cos \theta + y \sin \theta - \rho, \quad (4.9)$$

де (x, y) – параметричний простір зображення $i_b(x, y)$; (θ, ρ) – параметричний простір сімейства прямих на зображенні (θ, ρ – складові нормального рівняння прямої).

У перетворенні Хафа обчислювали матрицю акумуляторів S у просторі параметрів (θ, ρ) з дискретністю $\Delta\theta, \Delta\rho$ (на практиці при аналізі зображень на рис. 4.20,а-в приймали $\Delta\theta = 1^\circ, \Delta\rho = 4$ пікс). Кожній комірці фазового простору відповідає акумулятор з певною кількістю інформативних точок на зображенні.



Рис. 4.21. Блок-схема алгоритму

Умову належності точки $i_b(x, y)$ зображення до прямої h , заданої коміркою параметричного простору $S(\theta, \rho)$ приймали таку:

$$r(x, y, \theta, \rho) = f(x) = \begin{cases} 1, & d(i(x, y), h(\theta, \rho, x, y)) \leq d_{lim}, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (4.10)$$

де $d(i(x, y), h(\theta, \rho, x, y))$ – відстань від точки $i_b(x, y)$ до прямої $h(\theta, \rho, x, y)$; d_{lim} – граничне значення.

Таким чином, функція перетворення Хафа має вигляд:

$$H(S(\theta, \rho)) = \sum r(x, y, \theta, \rho). \quad (4.11)$$

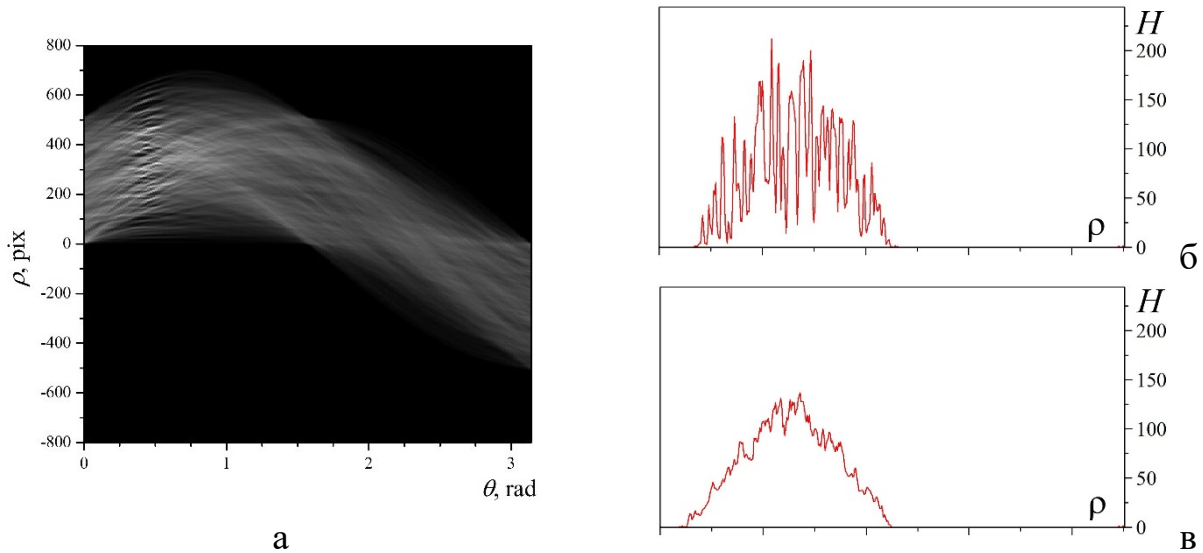


Рис. 4.22. Вигляд функції $H(S(\theta, \rho))$ для утворень деформаційного рельєфу (а); її перерізи для ділянки $\theta = \theta_{base}$ (б) та інших ділянок (в)

Кількісний аналіз акумуляторів у параметричному просторі дозволив знайти на зображенні прямі з найбільшою кількістю інформативних точок. Зони, в яких функція $H(S(\theta, \rho))$ досягає максимумів, відповідають найкраще вираженим прямим. Відповідне значення параметра $\theta = \theta_{base}$ характеризуватиме переважаючий напрямок поширення інформативних точок (елементів деформаційного рельєфу). Вигляд функції $H(S(\theta, \rho))$ для зображення (рис. 4.20, д) показано на рис. 4.22, а.

Для пошуку значення θ_{base} на графіку функції $H(S(\theta, \rho))$ розглядали її перерізи для кожного θ в діапазоні від 0 до π з кроком $0,01rad$: $\tilde{H} = H(S(\theta, \rho))|_{\theta=const}$.

Перерізи для оптимального значення θ характеризуються значними перепадами, у той час як на інших ділянках вони плавні (рис. 4.22, б, в). Для кожного θ у розглянутому діапазоні розраховували дисперсію $D_H(\theta)$. Значення θ , при якому для відповідного перерізу дисперсія була максимальна, приймали за шукане $\theta = \theta_{base}$.

Далі розглядали зображення $i_b(x, y)$ у системі координат (x^φ, y^φ) , повернутій відносно початку координат осі (x, y) на кут $\varphi = \theta_{base} - \pi/2$ (рис. 4.23). Для зображення на рис. 4.20, д кут $\theta_{base} = 0,47rad = 27^\circ$.

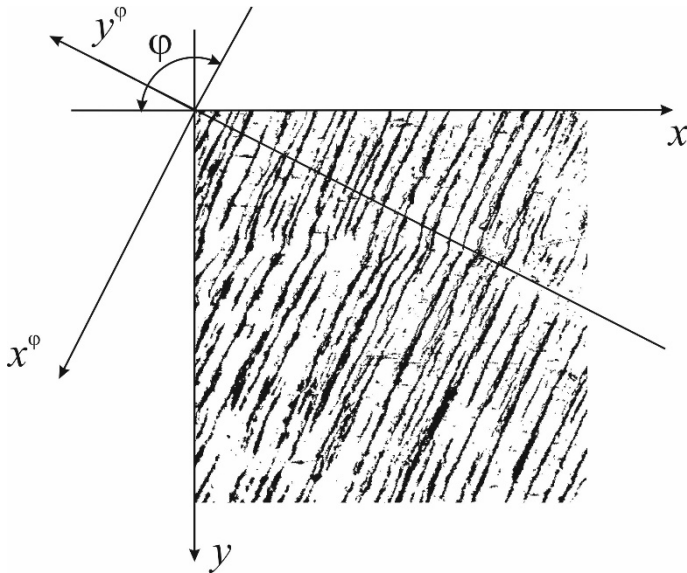


Рис. 4.23. Поворот системи координат зображення у напрямі поширення елементів деформаційного рельєфу

Зауважимо, що обчислення переважаючого нахилу рельєфних утворень можливе лише за лінійної форми та наявності тенденції до витягнутості в якомусь напрямі. В іншому випадку на параметричній площині перетворення Хафа будуть відсутні яскраво виражені зони, які відповідають певному куту нахилу. Тоді крок алгоритму з поворотом системи координат можна пропустити, перейшовши відразу до обчислення кількісних параметрів, які розраховуватимуться у початковій системі координат зображення і не матимуть вираженої відмінності для обох осей координат.

4.5.2. Параметри кількісного оцінювання елементів рельєфу

З метою кількісного оцінювання стану деформаційного рельєфу поверхні дослідного зразка використовували ряд параметрів, розрахованих на основі отриманого багатоградацийного зображення $i_f(x, y)$ та бінарного зображення $i_b(x, y)$.

Для кожного пікселя зображення $i_f(x, y)$ розраховували абсолютне значення горизонтального та вертикального градієнта:

$$\begin{aligned} \nabla i_f^h(x^\varphi, y^\varphi) &= \left| \frac{\partial i_f(x^\varphi, y^\varphi)}{\partial x^\varphi} \right|, \\ \nabla i_f^v(x^\varphi, y^\varphi) &= \left| \frac{\partial i_f(x^\varphi, y^\varphi)}{\partial y^\varphi} \right|. \end{aligned} \quad (4.12)$$

З метою узагальненого оцінювання стану дослідженої поверхні використовували середні значення горизонтального та вертикального градієнтів зображення:

$$\begin{aligned} G_h &= \overline{\nabla i_f^h} = \frac{1}{S_i} \iint \nabla i_f^h(x^\varphi, y^\varphi) dx^\varphi dy^\varphi, \\ G_v &= \overline{\nabla i_f^v} = \frac{1}{S_i} \iint \nabla i_f^v(x^\varphi, y^\varphi) dx^\varphi dy^\varphi, \end{aligned} \quad (4.13)$$

де $S_i = I_w I_h$ – площа зображення.

Градієнт дозволяє кількісно оцінити ступінь неоднорідності досліджуваної поверхні вздовж координатних осей. Мале середнє значення градієнта свідчить

про незначну зміну інтенсивності вздовж даної осі зображення. На практиці це означає одноріднішу картину впорядкованих структур у певному напрямку [77] і вказує на вісь координат, яка відповідає переважаючому напрямку поширення пошкоджень.

Найзагальнішим інформативним параметром, який дозволяє оцінити ступінь пошкоженості зразка за отриманим зображенням, є відносна площа морфологічних утворень a_r (3.4).

Розподіл елементів упорядкованих структур вздовж осей (x^φ, y^φ) зображення описують вертикальна V_{hs} та горизонтальна H_{hs} гістограми (3.11):

$$\begin{aligned} V_{hs}(y^\varphi) &= \sum_{x^\varphi=0}^{I_{w\varphi}-1} i_b(x^\varphi, y^\varphi), \\ H_{hs}(x^\varphi) &= \sum_{y^\varphi=0}^{I_{h\varphi}-1} i_b(x^\varphi, y^\varphi), \end{aligned} \quad (4.14)$$

де $I_{w\varphi}, I_{h\varphi}$ – розміри зображення у системі координат x^φ, y^φ відповідно вздовж осі x^φ та y^φ .

Оскільки після повороту системи координат переріз зображення для різних значень x^φ (чи y^φ) буде різним, то для можливості порівняльного аналізу виконували нормалізацію гістограм:

$$\begin{aligned} V_{hs}^n(y^\varphi) &= \frac{V_{hs}(y^\varphi)}{d_i(y^\varphi)} \cdot 100\%, \\ H_{hs}^n(x^\varphi) &= \frac{H_{hs}(x^\varphi)}{d_i(x^\varphi)} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (4.15)$$

де $d_i(y^\varphi), d_i(x^\varphi)$ – розмір зображення відповідно для координати y^φ та x^φ .

Кожен елемент гістограми містить кількість пікселів, які відповідають об'єктам упорядкованих структур рельєфу в певному напрямі аналізованого зображення. Функції гістограм містять базовий масив інформації про розподіл упорядкованих структур уздовж координатних осей зображення.

Нормалізовані гістограми для розглянутого зображення поверхні полікристалічного алюмінієвого сенсора втомі (рис. 4.20,д) зображено на рис. 4.24. Відзначимо, що вертикальна гістограма характеризується яскравими піками, які відповідають блокам витягнутих елементів рельєфу. Водночас, горизонтальна гістограма відзначається значно одноріднішою формою, що вказує на відсутність яскраво виражених лінійних елементів у цьому напрямі.

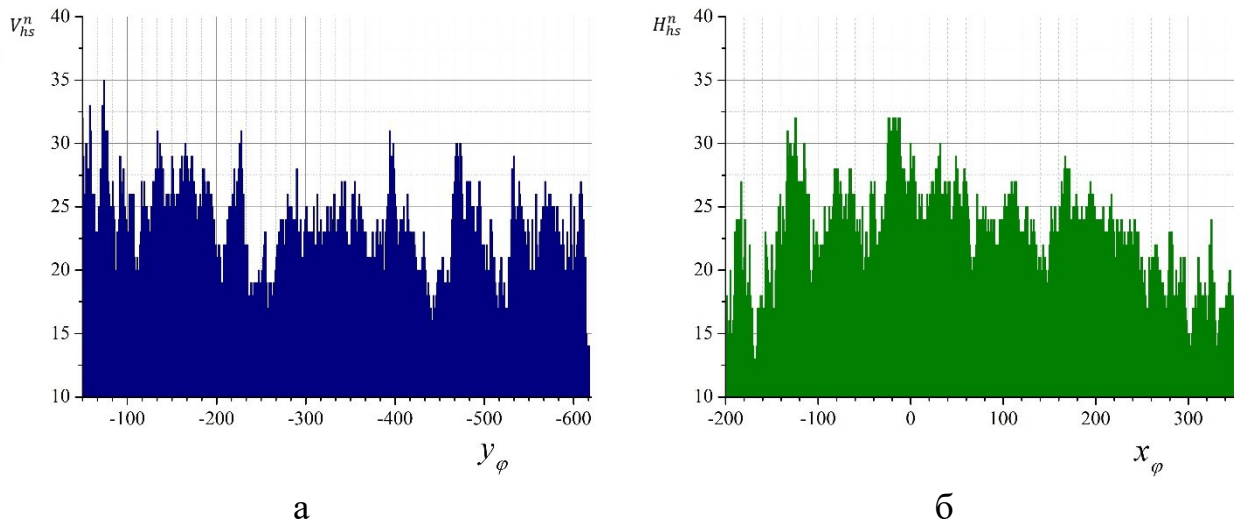


Рис. 4.24. Нормалізована вертикальна V_{hs}^n (а) та горизонтальна H_{hs}^n (б) гістограми для зображення поверхні полікристалічного алюмінієвого сенсора втоми

Кількісне оцінювання вигляду гістограм (4.15) виконано за спектральним аналізом їх функцій. За допомогою швидкого перетворення Фур'є функції гістограм подавали у вигляді ряду (4.4). За інформативні параметри вибрано середні амплітуди спектра функцій горизонтальної та вертикальної гістограм A_{ah} , A_{av} (4.6).

Середня амплітуда спектра дозволяє кількісно оцінити орієнтацію елементів поверхневого рельєфу поверхні вздовж осей зображення. Зростання її значення відповідає більшій пошкодженості вздовж даної осі. Отже, порівнюючи значення A_{ah} , A_{av} , можна отримати інформацію і про переважний напрям орієнтації дефектів поверхні.

Наявність пари узагальнених характеристик: середніх градієнтів G_h , G_v та середніх амплітуд спектра A_{ah} , A_{av} , дозволяє отримати комплексну інтегровану характеристику аналізованого зображення у двох взаємоперпендикулярних координатних напрямках.

4.5.3. Дослідження втомної пошкодженості фольгового сенсора

Процес накопичення втомних пошкоджень можна умовно поділити на два основних етапи: інтенсивне утворення пошкоджень та їх та стадію "насичення", коли відбувається переважно ріст утворених дефектів (рис. 4.25).

Відносна площа пошкоджень вказує на питому частку деформаційних елементів на поверхні зразка. Найбільших значень вона досягає до кінцевої стадії дослідження (200000 циклів навантаження). Відбувається локальна релаксація напружень і одночасна генерація локальних напружень на суміжних ділянках із активаціями локальних ділянок зсуву (табл. 4.8).

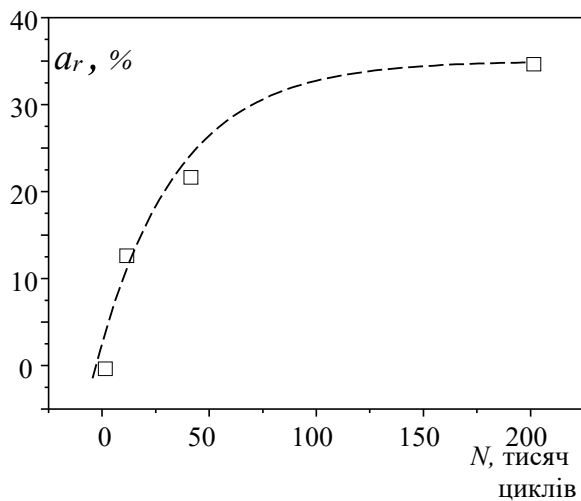


Рис. 4.25. Зміна площі пошкоджень (a_r) від напрацювання (N)

Таблиця 4.8. Значення параметрів поверхні сенсора втоми за різної тривалості напрацювання

К-сть циклів напрацювання N	Градiєнт		Середня амплітуда спектра	
	гориз. G_h	вертик. G_v	гориз. A_{ah}	вертик. A_{av}
10000	12,0	17,6	0,5	0,6
40000	16,1	28,8	0,7	0,9
200000	15,8	27,9	1,3	2,0

Площа пошкоджень як параметр стану поверхні інтегрально враховує ці фізичні закономірності, проте є нечутливою до просторового розподілу елементарних пошкоджень та не дозволяє оцінити ступінь їх впорядкованості. Пропонований підхід дозволяє глибше зрозуміти кінетику процесу накопичення структурно-механічних пошкоджень та еволюцію їх морфології.

Пошкодженість поверхні розглядали як багаторівневу ієрархічну систему впорядкованих дефектів, еволюція якої спрямована на мінімізацію зовнішнього впливу на всіх масштабних рівнях та має властивість просторової і часової самоподібності [81,82].

Отримані результати дозволяють оцінювати технічний стан поверхні сенсора без деталізації елементарних (мікроскопічних) актів зародження дефектів, ґрунтуючись на геометричних характеристиках структурних пошкоджень.

На початковому етапі (до 10000 циклів) відбулось утворення смуг локалізованого зсуву, у яких зосереджена основна частина пластичної деформації. При цьому деформація суміжних областей є значно нижчою з метою акомодатії пластичного течіння та забезпечення суцільності середовища [70]. На зображенні сенсора (рис. 4.20,а) виявлено наявність смуг ковзання. Помітною є перевага однієї системи ковзання, що чітко відображається на значенні параметрів оцінювання пошкодженості (табл. 4.8).

За напрацювання до 40000 циклів стрімко зростає ступінь пошкодженості зразка, що відповідає швидкому росту вертикального градієнта (в цей час

горизонтальний градієнт також зростає, проте значно повільніше). Зростання кількості циклів напруження спричиняє збільшення ширини та щільності смуг ковзання, відбувається їх об'єднання в смуги локалізованого зсуву. Це засвідчує наявність елементів деформаційного рельєфу, орієнтованих уздовж горизонтальної осі (в нашому випадку x^{φ}). Водночас швидко зростає також середня амплітуда спектра вертикальної гістограми, що свідчить про появу на зображенні періодичних утворень деформаційного рельєфу.

За тривалого напруження горизонтальний градієнт удвічі менший вертикального, що доводить значно більшу однорідність поверхневого рельєфу вздовж осі x^{φ} . При високих навантаженнях градієнт починає дещо зменшуватися. Це відповідає фазі "насичення" зображення елементами рельєфу, за якої зображення знову стає структурно одноріднішим, але вже не за рахунок фону (як протягом початкової стадії), а за рахунок елементів рельєфу.

Стадійність накопичення пошкоджень, кінетика локалізації деформацій залежить від його зсувної стійкості [73]. Вичерпування пластичності під час багатоциклової втоми пов'язане з рівнем локалізації деформацій. Цей процес активізується зі зростанням інтенсивності зсувних процесів, спричиняючи виникнення на поверхні пошкодженого матеріалу дисипативних субструктур [83]. Запропоновані підходи і обчислювальний алгоритм розширюють можливості автоматизованого оцінювання процесів накопичення поверхневих пошкоджень [84].

РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗОВАНІ МЕТОДИ ФРАКТОДІАГНОСТУВАННЯ

Фрактографічний аналіз – це окремий напрям механіки руйнування та технічного діагностування, який в якості інструментів використовує фізику твердого тіла (теорію дислокацій та інш.), матеріалознавство (у випадку побудови кореляцій між параметрами зламу та розміром зерен, включень та інш.), оптико-цифрові методи тощо.

Фрактографічні дослідження є одними з найінформативніших для оцінювання причин та механізмів руйнування матеріалів і конструкцій [1, 2]. Водночас даний метод є трудомістким та вимагає значної кількості вимірювань об'єктів на зображеннях поверхонь руйнування. Інтерпретація виявлених результатів, оцінювання впливу структурних і металургійних чинників на процеси руйнування матеріалів також потребує накопичення й аналізу значних масивів даних [3, 4].

До сьогодні вимірювання параметрів поверхні руйнування виконували вручну, або автоматизовано, але шляхом позиціювання програмних засобів вимірювання оператором, що ускладнювало фрактографічні дослідження. Проте все частіше використовують методи автоматизованого дослідження фрактограм.

Останнім часом проблема автоматизованого фрактодіагностування є надзвичайно актуальною у зв'язку із вичерпуванням ресурсу та деградацією конструкцій протягом напрацювання, що зумовлюють адаптацію норм та вимог до властивостей матеріалів. Крім того, розроблення нових, прогресивних методів модифікування властивостей матеріалів зумовлює часткове вичерпування їх пластичності. При цьому виникає необхідність оцінювання імовірності руйнування і встановлення взаємозв'язку характеристик міцності, пластичності та тріщиностійкості з механізмами руйнування. Це також стимулює розвиток підходів фрактодіагностування, які дозволяють за параметрами зламів зразків та інженерних конструкцій встановити причини і механізми їх руйнування.

Відомо, що в'язке руйнування матеріалів зумовлює формування ямок відриву на поверхнях зламу [1]. Як правило, такі ямки формуються внаслідок об'єднання мікропор, що утворилися в матеріалі протягом пластичного деформування. Ямки є наслідком розриву цих пор та руйнування оточуючого їх матеріалу [2-4]. Відома низка моделей зародження, росту та коалесценції пор. Проте їх застосування за умов непрогнозованого руйнування матеріалів є, як правило, ускладненим внаслідок необхідності лабораторного визначення багатьох параметрів матеріалу [5-7].

Кількісний фрактографічний аналіз дозволяє оцінити причини утворення ямок відриву та пов'язати їх зі структурними параметрами матеріалу, зокрема, – розмірами зерен, формою та кількістю включень. Разом з тим даний метод є трудомістким та вимагає значної кількості вимірювань об'єктів на зображеннях поверхонь руйнування [8-10].

Розроблення алгоритмів автоматизованого аналізу зображень, отриманих методами скануючої мікроскопії, дозволяє кількісно описати морфологію зламів

матеріалів і конструкцій, форм та розмірів елементів поверхні руйнування, що підвищує точність та достовірність отриманих результатів [7-9].

Для виявлення та аналізу ямок відриву на поверхні руйнування матеріалу є ряд методик, оснований на аналізі зображення поверхні. При цьому використовують поєднання різних відомих алгоритмів для аналізу зображення (зокрема аналіз гістограми зображення, порогування, фільтрування, вейвлети, аналіз текстур тощо) [7-9]. Незважаючи на ефективність, описані алгоритми мають недоліки.

Саме тому фрактодіагностування на основі нових алгоритмів автоматизованого аналізу зламів матеріалів забезпечує кількісний аналіз механізмів руйнування, оцінювання кінетики накопичення структурно-механічних пошкоджень матеріалів і конструкцій.

Серед методів для виявлення особливостей поверхні виділяють чотири основні категорії: статистичні [10], структурні, фільтрувальні [11] та засновані на моделі. Часто застосовують також техніки на основі аналізу гістограм [12, 13], матриць суміжності [14] та локальних бінарних шаблонів [15, 16]. Все частіше застосовують підходи, що базуються на використанні нейронних мереж.

5.1. Автоматизований аналіз зламів методами оптичної псевдостереоскопії

Використання псевдостереометричного аналізу дозволяє за аналізом кількох послідовно зроблених фотозображень відтворювати висоту поверхневого рельєфу, тобто отримувати додаткові дані про досліджуваній об'єкт [17]. Одним із завдань даного підрозділу є розробка автоматизованого методу аналізу зламів на прикладі фрактограм компактних зразків сталі 15X2МФА, що використовується для виготовлення корпусів атомних реакторів типу ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 [18].

Термообробка сталі 15X2МФА(II): гартування з 1273 К, 6 год в олії – відпуск (одноразовий) при 873 К на повітрі. Після такої термообробки механічні властивості сталі такі: $\sigma_{0,2} = 900$ МПа, $\sigma_B = 1000$ МПа, $\delta = 15,8$ %, $\psi = 39,2$ % [19].

Тріщиностійкість матеріалу визначали на компактних зразках товщиною 19 мм. Попередньо на всіх зразках вирощували втомні тріщини за коефіцієнта асиметрії циклу навантажування $R = K_{min}/K_{max} = 0,1$ та частоти навантажування 40 Гц, (K_{min} , K_{max} – найменший і найбільший коефіцієнти інтенсивності напружень). Відносна довжина тріщини становила $(0,45 \dots 0,55)b$ (де b – ширина зразка).

5.1.1. Методика визначення висоти структур мікрорельєфу

Для обчислення висоти рельєфних утворень дослідний зразок розмістили так, щоб аналізована ділянка поверхні була перпендикулярна до оптичної осі жорстко зафіксованої цифрової фотокамери, і отримали первинне зображення $i_1(x, y)$. Систему координат вибирали так, щоб осі X та Y лежали у площині аналізованої поверхні, а вісь Z співпадала з оптичною віссю фотокамери. Після цього зразок обертали навколо координатної осі Y на кут α (у межах $2 \dots 20^\circ$) та

при незмінних параметрах наближення камери отримували вторинне зображення аналізованої ділянки $i_2(x, y)$.

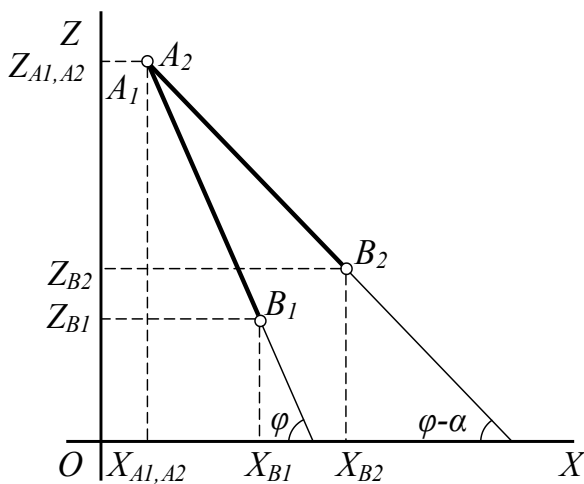
Первинне та вторинне зображення ($i_1(x, y)$ та $i_2(x, y)$) утворюють стереопару, на основі якої можна отримати інформацію про рельєф сфотографованої поверхні. Для цього на зображеннях $i_1(x, y)$ та $i_2(x, y)$ ідентифікували положення базової точки A та фіксували її координату X_{A1} (на першому зображенні) та X_{A2} (на другому). Далі на обох зображеннях вибирали точку B , для якої потрібно обчислити висоту відносно базової точки A , і фіксували її координати X_{B1} (на першому зображенні) та X_{B2} (на другому).

Висоту між точками A та B вздовж координатної осі Z обчислювали за формулою [20]:

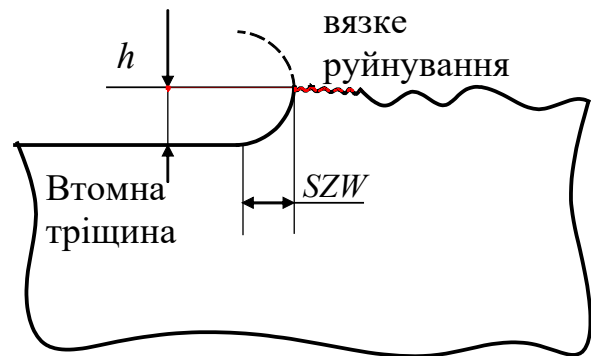
$$\delta Z_{AB} = \delta X_{A1B1} \left(\operatorname{ctg} \alpha - \frac{\delta X_{A2B2}}{\delta X_{A1B1} \sin \alpha} \right), \quad (5.1)$$

де $\delta X_{A1B1} = X_{A1} - X_{B1}$, $\delta X_{A2B2} = X_{A2} - X_{B2}$,
 $\delta Z_{A1B1} = Z_{A1} - Z_{B1}$.

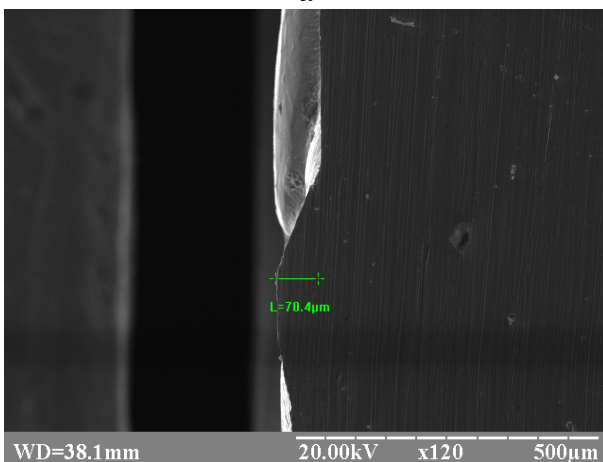
Схема, яка ілюструє описаний спосіб обчислення висоти, показана на рис. 5.1,а, висота зони витягування (схематично) – на рис. 5.1,б.



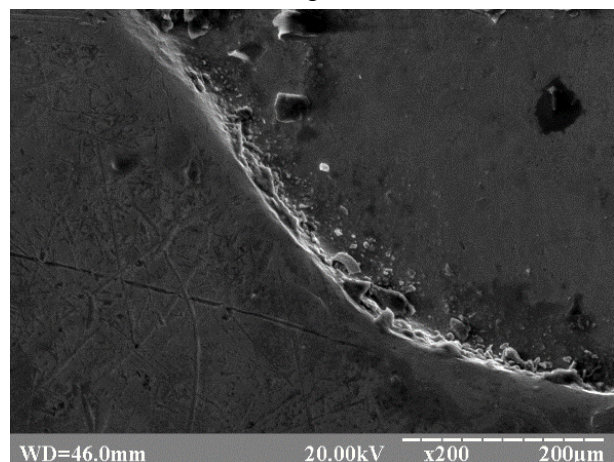
а



б



в



г

Рис. 5.1. Схема стереоскопічного повороту (а); зони витягування (б); зображення еталонної поверхні – вигляд збоку (в) та зверху (г)

Стереопари отримували на скануючому мікроскопі РЕМ 106 із виконанням рекомендацій [20, 21]:

- тотожність збільшення на обох зображеннях;
- збереження однакового рівня яскравості та контрастності;
- збереження однакової фокусної відстані для обох фотознімків.

Таким чином, отримання стереопари полягає у одержанні фотозображень об'єкта до і після повороту на певний зазделегідь вибраний кут. Таку стереопару називають псевдостереопарою, оскільки зображення отримують з однієї точки простору, а не двох [20].

Кут повороту аналізованої поверхні змінювали з допомогою гоніометричного пристрою мікроскопа, тобто отримання псевдостереопари ґрунтується на зміні нахилу предметного столика шляхом його обертання навколо своєї осі. З певними припущеннями такий вид зйомки можна назвати "псевдоконвергентним" [21].

Експериментальна перевірка стереоскопічного методу на еталонних зразках з відомою висотою мікронерівностей (рис. 5.1,б,в) дозволила встановити, що відхилення вимірної висоти рельєфу від дійсних значень не перевищувало 4,0%. Це доводить можливість застосування даного методу для аналізу геометричних нерівностей поверхні руйнування. Метод був використаний для дослідження морфології квазістатичного зламу і вимірювання висоти зони витягування зразків сталі 15Х2МФА(II).

З метою визначення висоти нерівностей поверхні зразка виконували серію дискретних поворотів зразка навколо координатної осі Y з кроком $\alpha = 5^\circ$. Після кожного повороту при незмінних параметрах наближення оптичної системи отримували одне вторинне зображення аналізованої ділянки (рис. 5.2).

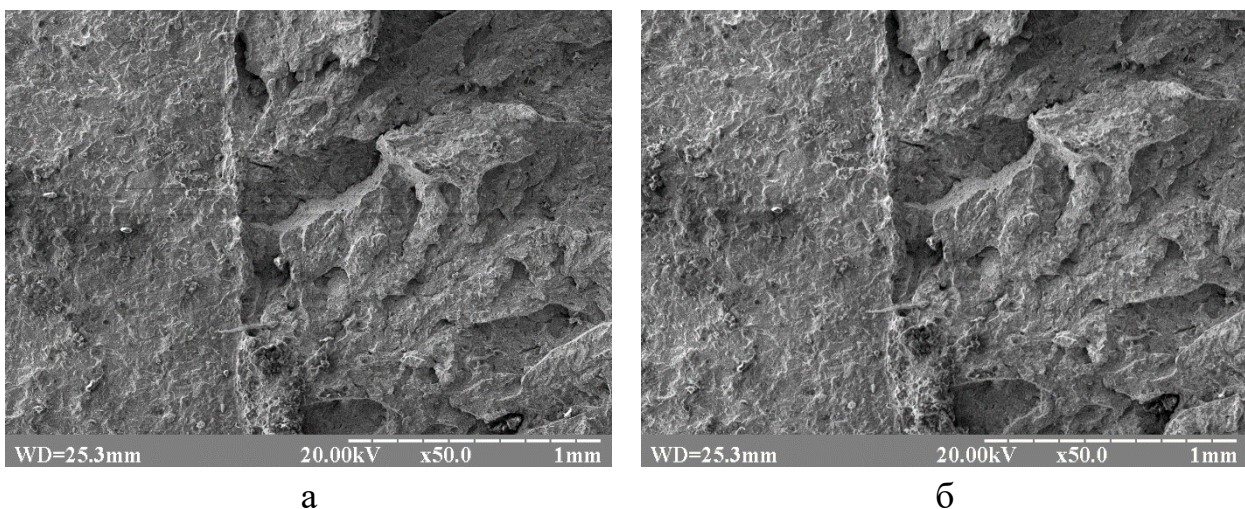


Рис. 5.2. Первинне, до повороту (а) та вторинне, після повороту на 5° (б) зображення поверхні зразка

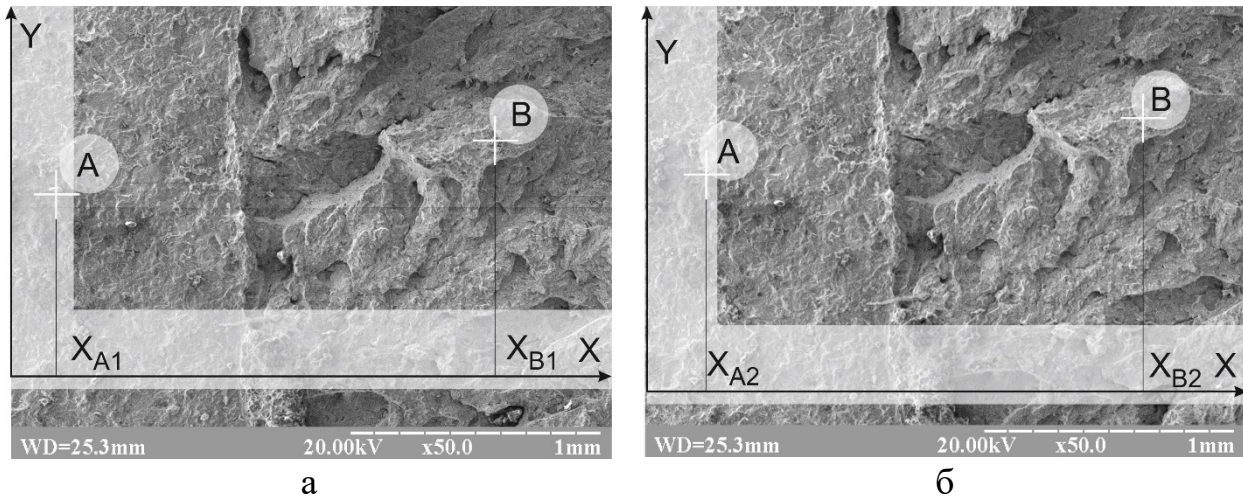


Рис. 5.3. Первинне (а) та вторинне (б) зображення з ідентифікованою парою точок А та В

Базове зображення $i_1(x, y)$ та вторинні зображення, отримані при поворотах зразка ($i_2(x, y)$, $i_3(x, y)$ тощо) вводили у ЕОМ, запам'ятовували в окремих графічних файлах та передавали у спеціалізовану програму для обробки за алгоритмом визначення мікронерівностей поверхні.

Алгоритм містить такі кроки:

1. На базовому зображенні вибрати пару характеристичних точок A і B та запам'ятати їх координати у пікселях X_{A1} і X_{B1} (рис. 5.3, а).
2. Для кожного із вторинних зображень:
 - 2.1. На вторинному зображенні ідентифікувати положення точок A і B та запам'ятати їх координати у пікселях X_{A2} і X_{B2} (рис. 5.3, б).
 - 2.2. За формулою (5.1) розрахувати висоту δZ_{ABi} між точками A і B вздовж осі, яка співпадає з оптичною віссю мікроскопа і камери.
 - 2.3. Отримане значення δZ_{ABi} запам'ятати у пам'яті ЕОМ.
3. З метою підвищення достовірності отриманого результату розрахувати середнє значення висоти між точками:

$$\delta Z_{AB} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta Z_{ABi}, \quad (5.2)$$

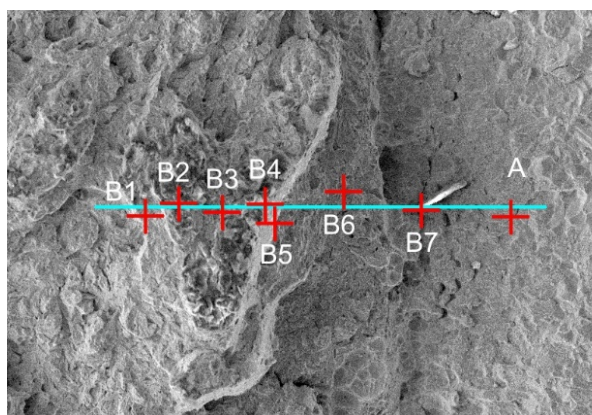
де M – кількість проаналізованих пар зображень.

Запропоновану методику використовували для обчислення висоти ділянки старту тріщини в'язкого відриву. Висоту обчислювали при різних кутах повороту (α) зразка відносно його початкового положення. Дослідження проводили при наближенні мікроскопа від $\times 50$ до $\times 150$.

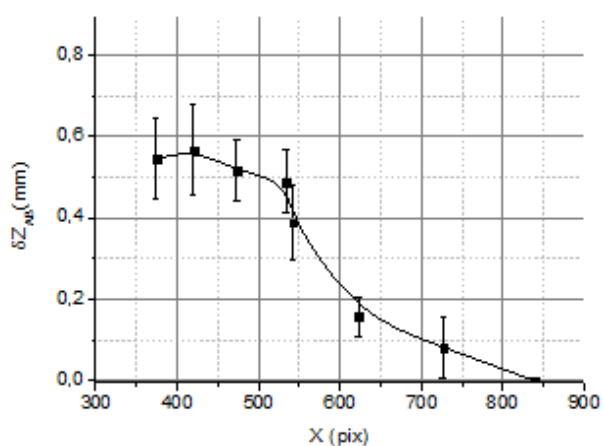
Встановлено, що для досліджених зразків середньоквадратичне відхилення значень висоти δZ_{ABi} (5.1), отриманих для одних і тих же точок A і B при різних кутах повороту, не перевищує 10 %.

Запропонована методика дозволяє обчислити відносну висоту аналізованої точки зображення. Якщо вибрати сукупність точок, розташованих уздовж певної лінії, то можна отримати наближений профіль перерізу зразка у даному напрямку. На рис. 5.4,а показано фрагмент зображення зони витягування дослідного зразка з вибраними вздовж осі X точками. Відхилення точок від

горизонтальної прямої викликані необхідністю вибору легко ідентифікованих точок, які належать добре впізнаваним елементам поверхні.



а



б

Рис. 5.4. Сукупність точок уздовж лінії, паралельної осі X (а); графік їх висот відносно базової точки A

На рис. 5.4,б наведено графік, який показує зміну висоти дослідженого зразка у перерізі. По осі абсцис відкладено відстані від лівого краю зображення (тобто осі Y) (пікс), а по осі ординат – обчислені за допомогою запропонованої методики висоти вибраних точок (рис. 5.4,а).

Значення висоти кожної точки отримували для різних збільшень (від $\times 60$ до $\times 150$) та різних кутів повороту. Отримані значення усереднювали за формулою (5.2), після чого для кожної точки розраховували середньоквадратичне відхилення та довірчий інтервал отриманої висоти. На рис. 5.4,б для кожної точки показано інтервал для довірчої ймовірності 95%.

На розкид отриманих для окремої точки значень впливають різні фактори. Серед них – точність визначення кута стереоповороту, взаємна перпендикулярність осі повороту та напряму спостереження, однакове збільшення на обох зображеннях, розміщення осі повороту паралельно вертикальному краю зображення та ідентифікація на обох зображеннях одних і тих же точок об'єкта [22-24].

У нашому випадку точність цих величин, крім останньої, забезпечувалась можливостями скануючого мікроскопа РЕМ 106. Тому найбільший вклад у розкид отриманих значень висоти точки вносить точність ідентифікації на обох зображеннях пар точок.

На похибку ідентифікації точок впливають особливості рельєфу дослідного зразка, зміна освітленості при повороті, розмір окремих елементів зображення, чіткість границь елементів зображення тощо. Важливим фактором для забезпечення точності вимірювань є також висока роздільна здатність зображення [22]. За малої роздільної здатності похибка ідентифікації координати точок ξ_x може бути співвимірною з обчислюваними значеннями δX_{AB} . Така особливість може також проявлятися при певних комбінаціях роздільної здатності, кута повороту та висоти обчислюваних мікронерівностей.

Загальною умовою отримання достовірних результатів за допомогою описаної методики є виконання нерівності $\delta X_{AB} \gg 0$. Цього можна досягти збільшенням роздільної здатності фотокамери та збільшенням кута стереоповороту.

5.1.2. Апробація методу псевдостереоскопічного аналізу при дослідженні зламів зразків корпусних реакторних сталей.

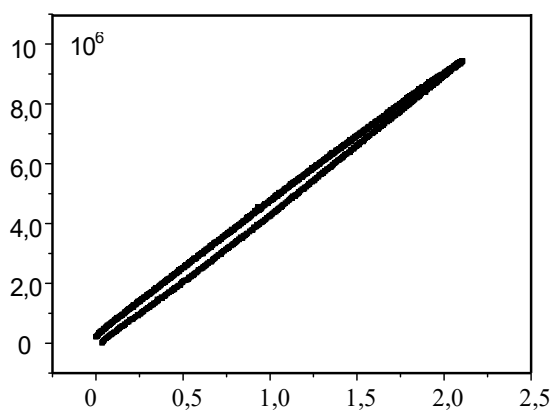
Пропонований вище підхід апробовано під час аналізу поверхні руйнування компактних зразків у вихідному стані та після різних схем попереднього термомеханічного навантажування (ПТН), руйнування та подальшого навантаження. Методика ПТН загалом полягала у збільшенні радіуса вершини тріщини, яке спричиняло зростання тріщиностійкості досліджених сталей. Докладніше методичні аспекти ПТН розкрито у працях П.В. Яснія та І.Б. Окіпного [18, 19].

Фізична мезомеханіка розглядає деформування матеріалу як багаторівневий ієрархічно організований процес, у якому внутрішні межі матеріалу визначають розмір та поведінку самостійних підсистем [25]. З цієї точки зору ПТН, яке створює високодефектну субструктуру, що блокує розвиток деформацій на мікрорівні та спричиняє релаксацію напружень на макрорівні, є надзвичайно цікавим. До старту тріщини після навантаження матеріалу залучаються механізми вищого масштабного рівня. Одним із параметрів, який пов'язує структурні властивості матеріалу з його тріщиностійкістю, є зона витягування зруйнованих зразків. Найчастіше її розглядають як бар'єрну ділянку, що характеризує в'язкість матеріалу під час старту тріщини. Її виникнення безпосередньо пов'язане з притупленням вершини тріщини та розвитком локалізованих мікропластичних процесів, які передують підростанню тріщини. Тому висота зони витягування зразків, як параметр руйнування, дозволяє пов'язати структурно-механічні властивості матеріалу з його тріщиностійкістю. Це створює значні можливості для його обчислення методом скінченних елементів та експериментального визначення методами фрактодіагностики [18].

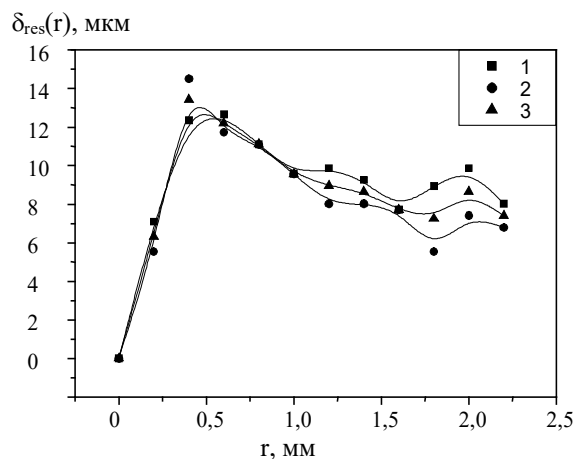
Попередньо на всіх зразках вирощували втомні тріщини за коефіцієнта асиметрії циклу навантажування $R = 0,1$ та частоти навантажування 40 Гц згідно з рекомендаціями [7]. Відносна довжина тріщини становила (0,45 ... 0,55 W) (де W – ширина зразка). Оскільки величина розвантаження майже не впливає на критичний КІН K_f сталі 15Х2МФА, в експериментах була використана схема ПТН із повним розвантаженням. Після цього зразок розвантажували, охолоджували до кімнатної температури. Згодом зразки перед випробуванням на в'язкість руйнування наводнювали електролітичним способом [18, 19].

На рис. 5.5 подано залежність залишкового розкриття вершини тріщини після ПТН від відстані до її вістря. Помітно (рис. 5.5,а), що після обробки у вершині тріщини залишається залишкове розкриття $\delta_{res(r)}$.

Залишкове $\delta_{res(r)}$ й усереднене залишкове розкриття тріщини на поверхні зразка, виміряне мікроскопом МІМ-10, залежить від відстані до вістря тріщини (рис. 5.5,б) [18]. Найбільшого значення $\delta_{res(r)}$ досягає на відстані 0,4...0,6 мм від вершини тріщини (r) [19].



а



б

Рис. 5.5. Графік деформування матеріалу (а) та залежність $\delta_{res}(r)$ у сталі 15X2МФА(II) після ПТН за температури 623К від відстані до її вістря (б). Лицева поверхня зразка (1); зворотна поверхня зразка (2); усереднені значення (3) [18, 20]

У подальшому спостерігається зменшення залишкового розкриття тріщини в міру віддалення від вершини [18]. Слід зазначити, що на рис. 5.5 зображено лише дані по одному зразку після комбінованого ПТН при 623 К і $\bar{K}_1 = 0,85$. Існує чітка залежність критичного КІН K_f після ПТН від критичного розкриття вершини тріщини (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Критерії тріщиностійкості сталі 15X2МФА(II) після різних схем оброблення компактних зразків [18, 19]

№ зразка	Схема обробки	K_f	δ_f	h , мм
1	Д	138,4	0,133	0,120
2	ДК	108,1	0,076	0,100
3	ДКН	121,8	0,118	0,400
4	ДН	101,5	0,071	0,200

*Д – статичне деформування; ДК – деформування комбінованим розтягом; ДКН – деформування комбінованим розтягом + наводнювання; ДН – статичне деформування + наводнювання

За результати дослідження в'язкості руйнування сталі 15X2МФА (II) після ПТН встановлено, що старт тріщини можна розглядати як багаторівневий процес поворотного типу. Незалежно від режимів ПТН на повітрі та в агресивному середовищі (електролітичний водень) у всіх випадках опір крихкому руйнуванню дослідженої сталі підвищувався порівняно зі статичною в'язкістю руйнування вихідного матеріалу. Статичне ПТН підвищує опір крихкому руйнуванню на 40%, а для насиченого воднем матеріалу – на 20% [19].

Незалежно від режимів навантаження (ПТН чи комбіноване ПТН) на повітрі і в агресивному середовищі (електролітичний водень) в усіх випадках опір

крихкому руйнуванню досліджуваної сталі підвищувався у порівнянні із K_{Ic} . Так, за статичного ПТН опір крихкому руйнуванню збільшувався на 40% для ненаводненого матеріалу та на 20% для наводненого. Отже, за статичного ПТН електролітичне наводнювання знижує критичний КІН K_f порівняно із ненаводненим матеріалом [18]. За комбінованого ПТН опір крихкому руйнуванню збільшився на 25% для ненаводненого матеріалу товщиною 19 мм і на 30% для наводненого незалежно від товщини. Отже електролітичне наводнювання за комбінованого ПТН дещо підвищує опір крихкому руйнуванню порівняно з комбінованим ПТН ненаводненого матеріалу, що може бути пов'язане з розкидом його властивостей, однак залишається меншим у порівнянні зі статичним ПТН (рис. 5.6,а,б) ненаводненого матеріалу [25].

Накладання циклічної складової збільшує розмір зони витягування в порівнянні з вихідним станом (рис. 5.6,в). Старт і поширення тріщини в зразку, обробленому за схемою ДН, відбулися при досягненні значно меншого значення критичного значення розкриття дефекту та зони витягування (рис. 5.6,г).

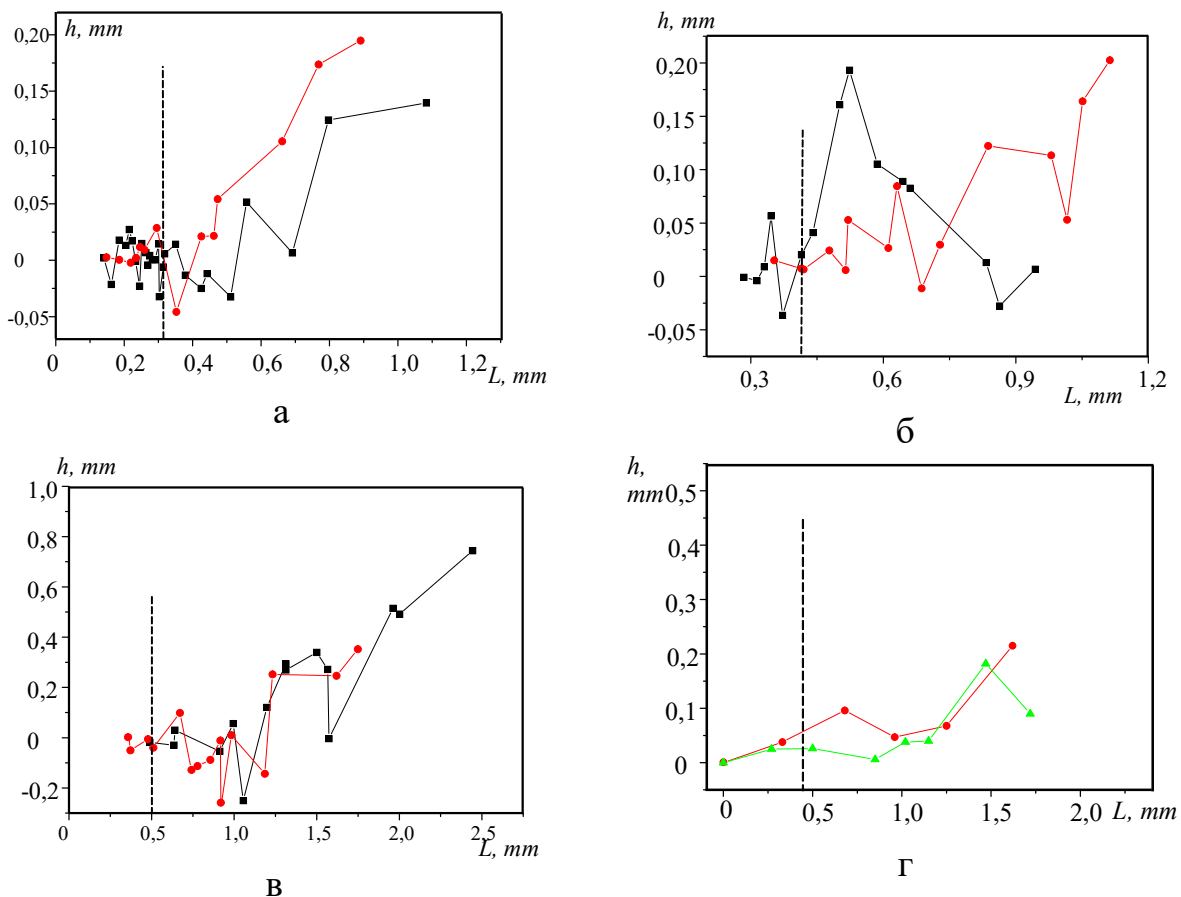


Рис. 5.6. Морфологічні особливості ділянки старту тріщини для зразків, досліджених за різних схем деформування: Д – а; ДК – б; ДКН – в; ДН – г, див. табл. 5.1

Отримані результати є основою уточнення гарантованої міцності конструктивних елементів із тріщиноподібними дефектами та добре узгоджуються з макрозаконотвірностями впливу режимів ПТН на структурно-механічні законотвірності деформування матеріалу у вершині тріщини з

використанням силових і деформаційних параметрів механіки руйнування, отриманими у працях П.В. Яснія та І.Б. Окіпного [18, 19].

Параметри зони витягування є кількісними характеристиками в'язкості руйнування. Також встановлено, що основною складовою мікроморфології зони старту тріщини є ямки мікропластичного деформування. Вони присутні на фрактограмах усіх досліджених зразків, що свідчить про активну участь у процесі руйнування механізму утворення і злиття пор.

5.1.3 Фрактодіагностування втомних пошкоджень

За умови втомного руйнування матеріалів на поверхні формуються впорядковані рельєфні утворення – борозенки, які можуть слугувати фрактодіагностичною ознакою мікрошвидкості поширення тріщини у межах аналізованої ділянки [27]. Слід зазначити, що ефекти мікрорівня є випадковими, проте втомні борозенки формуються самовпорядковано. Результатом цього є певні відмінності профілю борозенок, які залежать від механічних властивостей матеріалу, насамперед міцності і пластичності.

При втомному механізмі руйнування найінформативнішою ознакою є крок борозенок, оскільки він характеризує швидкість процесів накопичення пошкоджень у матеріалі [28]. Проте оцінити характер деформаційних процесів під час поширення тріщини можна, аналізуючи профіль борозенок, оскільки борозенки однакової ширини, як правило, відрізняються за висотою [4]. Особливо доцільні такі методи за порівняльного аналізу традиційних та нових матеріалів, або для оцінювання інтенсивності деградаційних процесів металу конструкцій, які експлуатують тривалий час. Складність автоматизації такого вимірювання для сталених зразків полягає в тому, що фронт тріщини не завжди є однорідним. Йому притаманні локальні дисторсії, ділянки притуплення тріщини, які спричиняють утворення "горбків" та "западин" [25].

Використання псевдостереометричного методу дозволяє за допомогою кількох послідовно зроблених фотозображень відтворювати висоту поверхневого рельєфу, тобто отримати додаткові дані про досліджуваний об'єкт.

Досліджували макро- і мікрошвидкість росту втомних тріщин у призматичних біметалевих зразках із бічним надрізом (SENT) за одновісного циклічного розтягу з частотою навантажування 0,1 Гц. Зразки вирізали з біметалевого ролика МБЛЗ (машини безперебійного лиття заготовок) [29]. Попередньо у зразках зароджували втомні тріщини за частоти 25,0 Гц. Злами зразків досліджували методом електронної фрактографії.

Досліджували швидкість росту втомної тріщини у призматичних зразках з бічним надрізом (SENT) за одновісного циклічного розтягу. Частота навантажування становила 0,1 Гц та 1,0 Гц. Попередньо у зразках зароджували втомні тріщини за частоти 25,0 Гц [3]. Під час експерименту контролювали зусилля навантажування та швидкість підростання тріщини. Фотографували вершину тріщини у навантаженому та вільному станах. Для визначення висоти нерівностей поверхні дослідних зразків використовували метод псевдостереометрії [20]. В ролі стереопари використовували два зображення, отримані за допомогою електронного мікроскопа, до і після повороту зразка на певний кут.

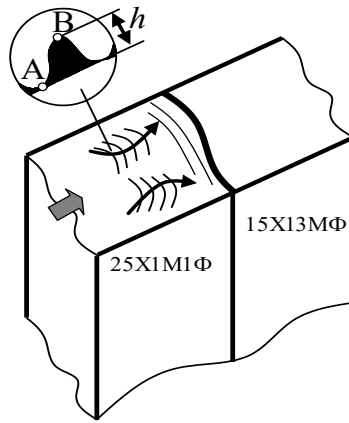


Рис. 5.7. Схема фрактографічного вимірювання мікрошвидкості (кроку втомних борозенок) – поверхні руйнування біметалевого зразка (напрямок поширення тріщини вказано стрілкою)

Мікрошвидкість росту втомної тріщини в біметалі описували рівнянням Періса:

$$S = C(K_{Vimax})^n, \quad (5.3)$$

де K_{Vimax} – найбільший коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) біметалевого зразка з тріщиною; C та n – параметри матеріалу, що залежать від механічних властивостей.

Разом з цим $S = L/n$, де L – довжина аналізованої ділянки зламу; n – кількість борозенок у межах аналізованої ділянки.

Аналізуючи дані таблиці 5.2, можна стверджувати, що поряд з утворенням борозенок у матеріалі діють механізми пластичного зсуву, які визначаються локальними напруженнями в околі вершини тріщини, що спричиняє відмінність між мікро- та макрошвидкостями. Відомо, що процес пластичного деформування сталі 25X1M1Ф можна розглядати як багаторівневу систему, в якій пластичне течіння розвивається самоузгоджено на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях [29].

Таблиця 5.2. Взаємозв'язок між макро- та мікрошвидкістю утомної тріщини в сталі 25X1M1Ф для біметалевих зразків [29]

№ з/п	K_{max} , МПа $\sqrt{м}$	Мікрошвидкість S , $\times 10^{-4}$ мм/цикл	Макрошвидкість, da/dN $\times 10^{-4}$ мм/цикл	
1	25	6,5	3,0	20,0
2	35	8,4	6,0	25,0

Можна стверджувати, що тріщина під час поширення змінювала свою просторову мікроорієнтацію. При малих наближеннях мікроскопа у зламі можна помітити відокремлені ділянки з різноорієнтованими втомними борозенками.

Циклічне деформування спричиняє інтенсифікацію накопичення втомних пошкоджень у структурних елементах (зернах) матеріалу, полегшуючи реалізацію зсувних процесів. Тому пластична деформація відбувається нижче

макрOMEжі текучості матеріалу. Проявом пластичних деформацій при $K_{max} = 35,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ є форма борозенкових утворень, а межі між ними сформовані відривом внаслідок локальної деформації та в'язко-крихких надривів (рис. 5.8).

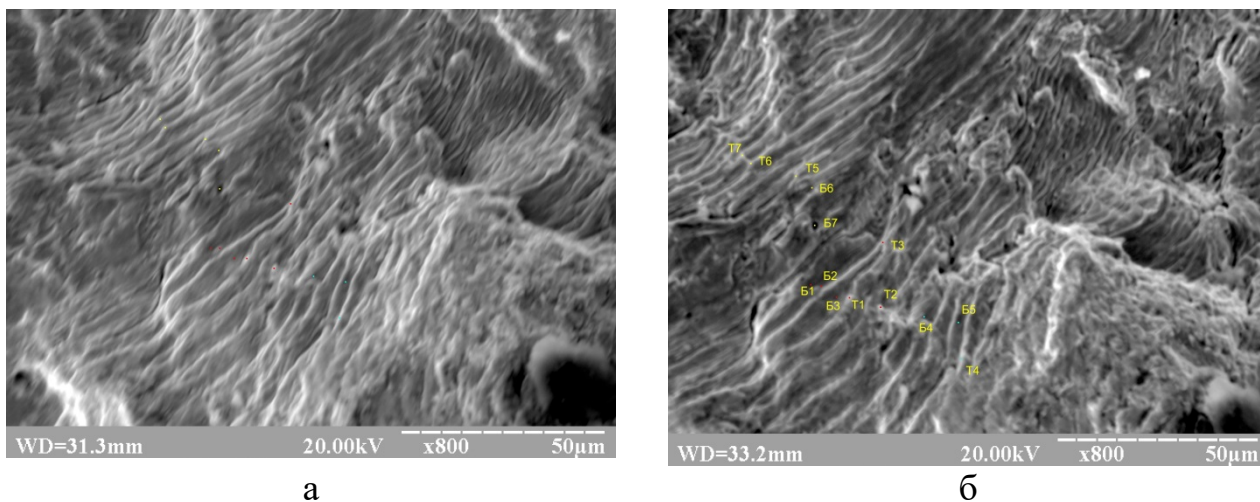


Рис. 5.8. Первинне (а) та вторинне (б) зображення (при 0° та 20°) з ідентифікованими точками вимірювання висоти втомних борозенок

Подібні процеси, але нижчого ієрархічного рівня, відбуваються і при утворенні борозенок [24], проте величина цих утворень є меншою, а поверхня між ними має незначну шорсткість, яка візуально виглядає як гладка ділянка. Для вимірювання висоти борозенок відносно площинних ділянок вибирали базові точки (Б) та аналізовані точки (Т), рис. 5.8,б.

Слід зауважити, що морфологія борозенкових утворень може змінюватись із зростанням довжини тріщини. По-перше, зростає довжина "одноорієнтованих" ділянок із втомними борозенками, що зумовлено інтенсифікацією та ростом масштабного рівня зсувних процесів у вершині втомної тріщини. По-друге, розвиток втомних пошкоджень спричиняє зростання ширини борозенок, рис. 5.9.

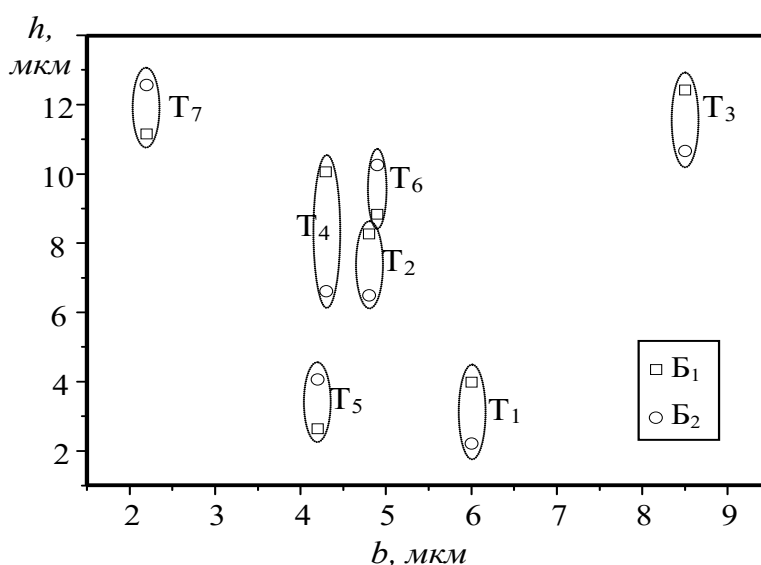


Рис. 5.9. Результати стереоскопічного вимірювання висоти (h) втомних борозенок різної ширини (b) для баз B_1 та B_2 , позначення точок див. на рис. 5.8,б

Розвиток зсувних процесів зумовлює подрібнення зерен на блоки. Тангенціальні та нормальні напруження циклічного розтягу зумовлюють локалізацію та накопичення деформацій окремих блоків зерен. При цьому кут між площиною переважного проковзування змінюється випадково у різних ділянках фронту тріщини [31]. Це спричиняє розорієнтацію напрямку мікропідростання та дисперсію ширини і висоти борозенок (рис. 5.9).

Вивчення ділянок між групами борозенок показало, що поверхні руйнування формуються переважно внаслідок відриву матеріалу, який має в'язкий характер. Встановлено, що механізм руйнування окремих ділянок може суттєво відрізнятись. Це залежить від їх кристалографічної орієнтації, кількості циклів пружно-пластичного деформування, їх орієнтації відносно площини навантажування. Слід відзначити, що деформація полікристалічного матеріалу зростає із збільшенням напрацювання матеріалу, а коли здатність до подальшого деформування вичерпується, в матеріалі виникають і розвиваються субмікроскопічні тріщини, які послаблюють зв'язок окремих блоків.

5.2. Автоматизоване оцінювання пошкодженості поверхні корозійними пітингами

Відомо, що пітингова корозія – один із найпоширеніших видів локального пошкодження металу [32]. Кородують з утворенням пітингів метали та сплави, експлуатовані в морській воді, атмосферних умовах та ґрунті. Через різноманіття їх форм і стадійності виникнення суттєво ускладнюється поточний контроль об'єктів та прогнозування швидкості корозії [33, 34]. Існує чимало контактних і безконтактних методів діагностування та дефектометрії. Серед оптичних безконтактних досить прецизійним, оперативним і водночас простим у реалізації є метод цифрової спекл-кореляції [35], за яким визначають лінійні розміри, площу та розташування пошкоджень і тріщиноподібних дефектів за цифровим зображенням поверхні, забезпечуючи моніторинг процесів зародження та розвитку пітингів у режимі реального часу [36, 37].

Разом з тим, автори на основі описаних вище алгоритмів накопичили власний досвід аналізу множинних дефектів, що знайшло відображення у створенні власного підходу аналізу оптичних і фрактографічних зображень корозійних дефектів.

5.2.1. Аналіз експлуатаційних пітингів

Методика випробувань. Досліджували фрагмент магістрального газопроводу “Київ – Захід України-1” після сорока років експлуатації в землі. Газопровід має діаметр 1020 мм товщиною стінки 10 мм та гумово-бітумний ізоляційний покрив. Через порушення ізоляції на зовнішній поверхні труб внаслідок взаємодії металу труби з середовищем виникли корозійні пошкодження у вигляді плям, виразок і каверн різних розмірів та глибини. Під час ремонтних робіт з труби у радіальному та осьовому напрямках на спеціалізованому верстаті Q-80Z (УРМО-80А) з водяним охолодженням

вирізали фрагменти, щоб оцінити дефектність металу. Аналізовану поверхню шліфували на верстаті МР-1В.

Поверхню трубопроводу фотографували (отримуючи оптико-цифрові зображення) та досліджували за допомогою скануючого мікроскопа РЕМ 106И, отримуючи РЕМ-зображення. Наявність двох відмінних за своєю фізичною природою методів отримання зображення аналізованої поверхні дозволила співставити та порівняти їх можливості.

Оптичне зображення. Для аналізу використовували зображення пошкодженої поверхні у градаціях сірого кольору (рис. 5.10,а). Такий вигляд зображення дозволяє характеризувати стан поверхні з пітингами, оскільки є двовимірним відображенням поверхні з дефектними утвореннями, отриманим за певної освітленості.

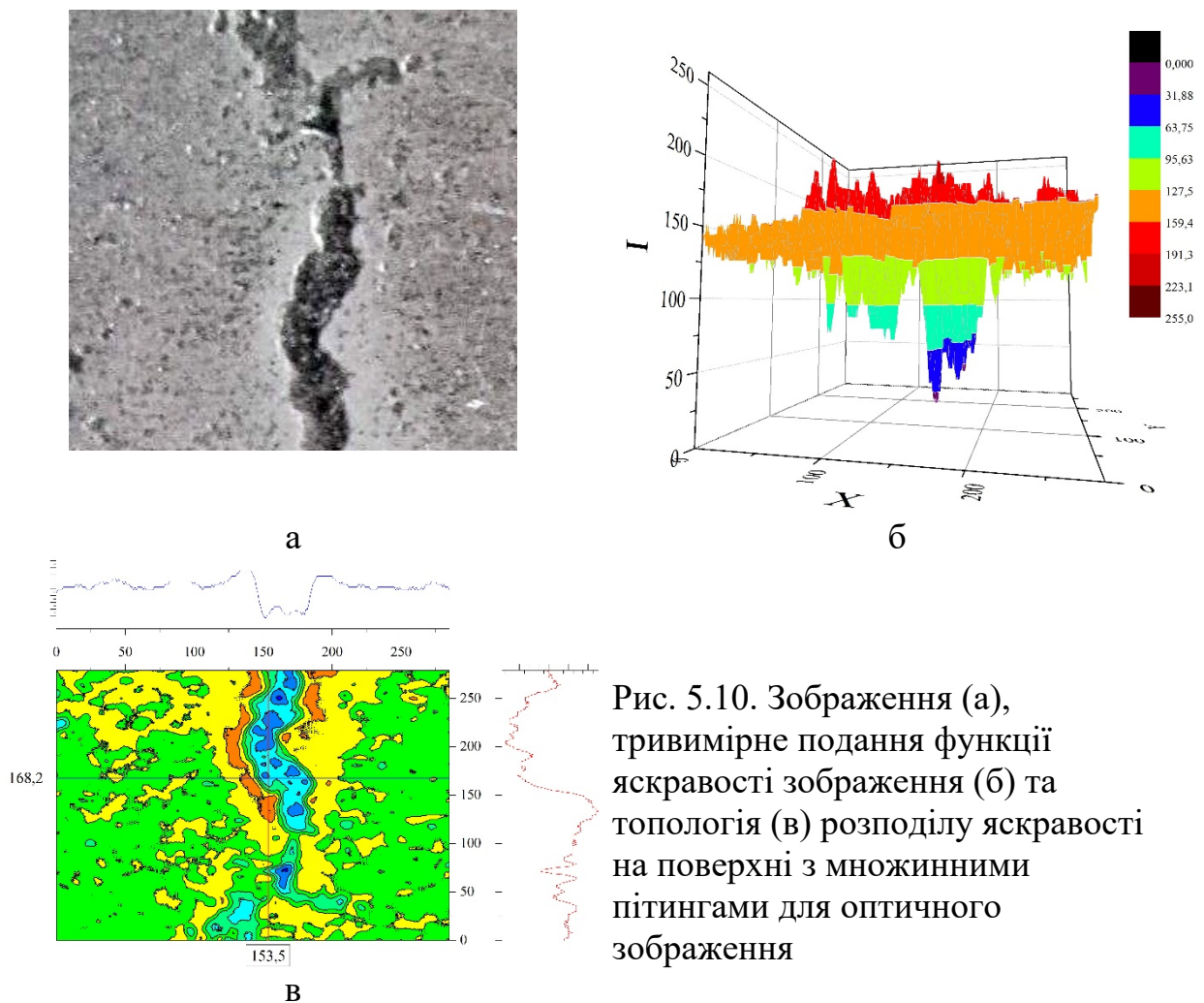


Рис. 5.10. Зображення (а), тривимірне подання функції яскравості зображення (б) та топологія (в) розподілу яскравості на поверхні з множинними пітингами для оптичного зображення

Так як пітинги є заглибленнями у матеріалі (й часто містять темні продукти корозійного процесу), то на оптичних зображеннях вони мають вигляд затінених областей, які вирізняються на світлішому фоні неушкодженої (малоушкодженої) поверхні [38]. Це створює передумову для застосування оптичного методу аналізу поверхні шляхом виділення на зображенні двох класів ділянок. При цьому пітингам відповідатимуть темніші ділянки, а неушкодженій поверхні – світліші.

Ці особливості ілюструє тривимірний розподіл яскравості оптичного зображення поверхні з множинними пітингами. На зображенні (рис. 5.10,б) пітингам відповідають западини у поверхні розподілу яскравості зображення. Це також підтверджується графіком двомірного перерізу ділянки пошкодженої поверхні. На рис. 5.10,в зображено топологію поверхні розподілу яскравості зображення (рис. 5.10,а) з вертикальним та горизонтальним перерізом в зоні пітингу. Перерізи показують, що в зоні пітингу спостерігається різкий спад яскравості. Таким чином, зображення, отримані за допомогою оптичного мікроскопа, можуть бути використані для аналізу пошкодженої пітингами поверхні матеріалу та розпізнавання геометричних властивостей пошкоджень (координат, площі).

Використовуючи розроблений у попередніх працях [39,40] алгоритм та ґрунтуючись на припущенні, що суміжні точки, рівень яскравості яких належить одному діапазону, відповідають об'єкту одного класу (пітинг або фон), проводили сегментацію зображення. В результаті отримували два кластери пікселів, які відповідають фону та розпізнаним об'єктам – пітингам. Оскільки пітинги на аналізованих темплетях мають досить чіткі межі та є ідентичними за фізичною природою, такий підхід дозволяє виявити їх положення на вихідному зображенні.

Особливістю оптичного способу отримання зображень є вимогливість до підбору освітлення, що утруднює його використання. При невдалому освітленні яскравості пошкоджених та непошкоджених ділянок будуть близькі, пітинги зливатимуться з фоном та не будуть виявлені. Однією з переваг оптичного способу є можливість неруйнівного аналізу значних за площею поверхонь.

З метою оцінювання можливості використання оптичних зображень провели порівняння картини розподілу яскравості зображення у зоні пітингу з його реальним профілем у глибину. Для цього виготовили дослідні зразки шляхом зішліфовування частини пітингу. На рис. 5.11,а зображено частково зішліфований пітинг (фото отримане за допомогою оптичного мікроскопа), а на рис. 5.11, б – його профіль у глибину, отриманий за допомогою електронного мікроскопа.

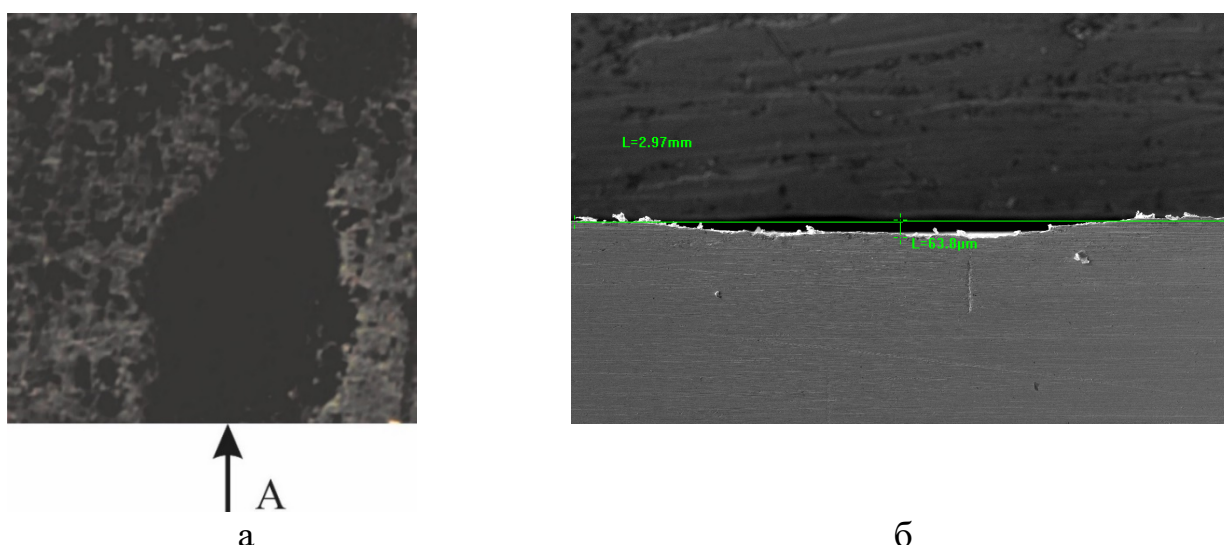


Рис. 5.11. Оптичне зображення пітинга (а), його профіль у напрямку А (б)

Порівняльний аналіз кривих розподілу яскравості в зонах пітингів із відповідними кривими зміни глибини показав, що зони різкого спаду яскравості відповідають краям пітингових пошкоджень (рис. 5.12). Дві вертикальні лінії показують краї пітинга, ідентифіковані за допомогою раніше розробленого алгоритму [39, 40]. Провівши ряд подібних дослідів, встановлено, що для розглянутої множини оптичних зображень є можливим їх використання для розпізнавання геометричних параметрів пітингів.

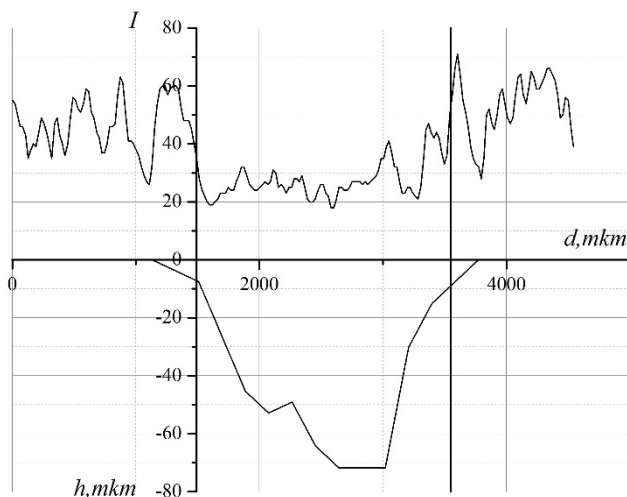


Рис. 5.12. Зріз яскравості зображення i (рис. 5.11,а) вздовж нижнього краю пітинга (верхня крива) та глибина пітинга h (нижня крива), отримана за допомогою РЕМ-зображення (рис. 5.11, б) [41]

Також під час аналізу було виявлено, що пітинги у глибину мали параболічну форму із гладкими краями. Дно пітингів було згладженим, без ознак тріщиноутворення, глибина дна рівномірна, що підтверджується пошаровим фрезеруванням та вимірюванням у різних точках дна.

РЕМ-зображення отримують у високому вакуумі скануванням пошкодженої поверхні електронним пучком у режимі відбитих електронів. Зображення, отримані цим способом, мають більший розкид яскравості між ділянкою фону та пітингу (рис. 5.13). Через особливість отримання зображень цього вигляду (чутливість до окислів на дні корозійних ямок) пітингам відповідають яскравіші ділянки, а фону – темніші. Топографічне зображення (рис. 5.13, в) також демонструє зростання яскравості в зоні пітинга. Дуже часто пошкоджені ділянки на РЕМ-зображеннях характеризуються неоднорідним розподілом яскравості, на відміну від оптичних зображень, де і фон, і пітинги мають одноріднішу картину яскравості. Це створює передумови використання методу кластеризації зображення шляхом текстурного аналізу, але загалом утруднює операцію сегментації зображення на фон та об'єкт.

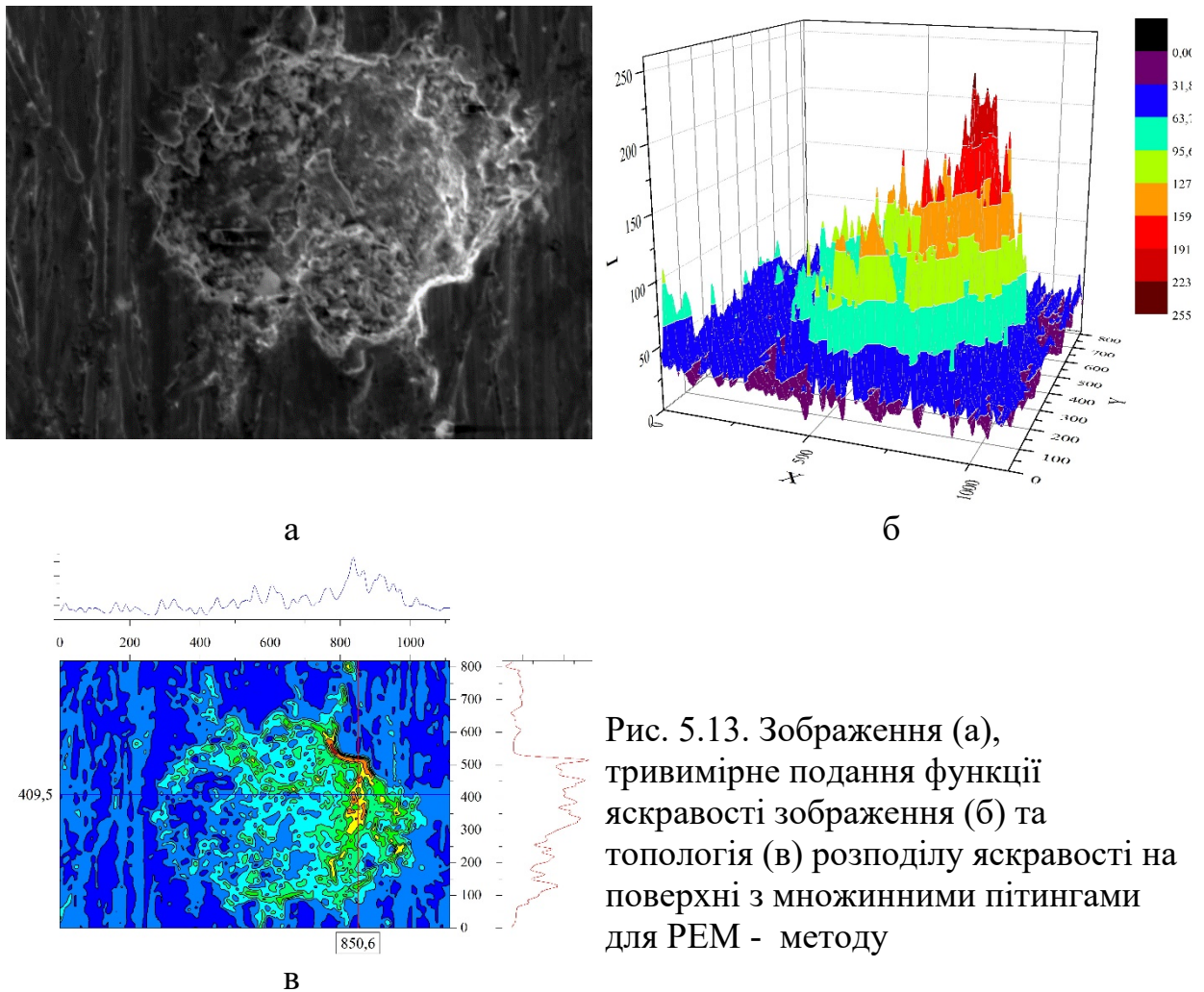


Рис. 5.13. Зображення (а), тривимірне подання функції яскравості зображення (б) та топологія (в) розподілу яскравості на поверхні з множинними пітингами для REM - методу

Особливістю REM-зображень є те, що фрактограма ілюструє розподіл непровідного матеріалу на досліджуваній поверхні. Тому у випадку, коли пітинг чи його частина не вкритий шаром окислу, відповідна ділянка об'єднується із фоном і не буде розпізнана.

5.2.2. Алгоритм для ідентифікації корозійних пошкоджень

Ми запропонували алгоритм ідентифікації корозійних пошкоджень і метод для аналізу пітингів різної геометричної форми [41].

Під час топологічного обстеження поверхні об'єктів підвищеного технологічного ризику необхідно узагальнити, класифікувати та накопичити інформацію про її стан. Корозія суттєво знижує термін експлуатації газопроводів. За якісної ізоляції поверхні трубопроводу в поєднанні з катодним захистом труба кородує досить повільно і рівномірно. Проте через старіння ізоляційної плівки виникають її локальні відшарування й наскрізне руйнування. Отже, локалізуються осередки корозії, які й спричиняють аварії на лінійній частині газопроводів. Для аналізованого фрагмента характерні саме локалізовані корозійні ямки – пітинги [41].

Такі пошкодження властиві ділянкам газопроводу зі зношеним покривом та високими напруженнями (коловими – від робочого тиску та згинальними – від складного рельєфу місцевості). Під час макроаналізу встановили, що усі пітинги підростали у глибину стінки труби перпендикулярно до її поздовжньої осі, що

було однією із фізико-механічних передумов їх автоматизованого аналізу. Таким чином, одним з найважливіших завдань є автоматизований інтегральний аналіз топологічних результатів пошкодження для їх подальшої числової інтерпретації.

Розрізняють кілька типів пітингів: розпорошені корозійні ямки переважно округлої форми, спричинені впливом середовища; об'єднання суміжних пітингів з утворенням гантелеподібних корозійних ямок унаслідок перетину окремих дефектів; конгломерати пітингів через коалесценцію низки об'єднаних пітингів, що формують розгалужені морфоструктурні утвори значного периметра (рис. 5.14).

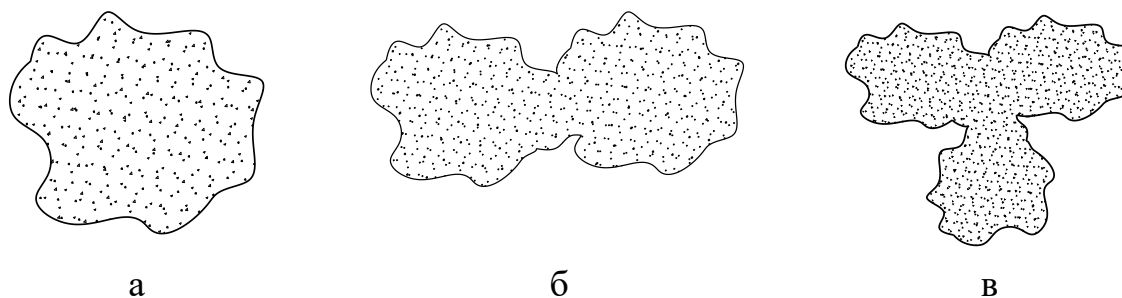


Рис. 5.14. Схема досліджених форм пітингів [41–43]: округлі (а), видовжені (б), розвинені + об'єднані (в)

Щоб автоматизувати класифікацію пітингів, використали метод, в основі якого лежить аналіз зображення. Вихідне багатоградаційне фотозображення дослідного зразка обробляли згідно з алгоритмом пошуку та розпізнавання пошкоджених фрагментів. У результаті отримали бінарне зображення з локалізованими ділянками пітингів, яке аналізували за інтегральною методикою.

Розташування корозійних ямок визначали, оцінюючи фотозображення досліджуваної поверхні. Вхідне багатоградаційне зображення перетворювали у зображення у градаціях сірого кольору $i_0(x, y)$ (рис. 5.15, а). Передумовою застосування пропонованого алгоритму є те, що здебільшого корозійні виразки відрізняються за кольором та інтенсивністю відбитого світла від основної непошкодженої поверхні (вони темніші). Алгоритм для ідентифікації пошкоджень складається з послідовних операцій вирівнювання освітленості, бінарного перетворення, фільтрування та ще одного бінарного перетворення [38].

Вирівнювання освітленості зображення дозволяє зменшити вплив нерівномірності освітлення під час фотографування зразка на результат роботи алгоритму. Для цього використовували операцію згортки зображення з низькочастотним фільтром із подальшим усуненням низькочастотного складника. На практиці, щоб отримати загальну картину освітленості $i_l(x, y)$ (рис. 5.15, б), застосували кілька послідовних проходжень гаусового фільтра (3.4) з великим розміром вікна (100 пікселів). Зображення з вирівняною освітленістю обчислювали за формулою:

$$i_{le}(x, y) = i_0(x, y) + \bar{i}_l(x, y) - L, \quad (5.5)$$

де $\bar{i}_l(x, y) = I_{max} - i_l(x, y)$ – інвертоване зображення $i_l(x, y)$; I_{max} – максимально можливе значення інтенсивності пікселя для зображення; L –

рівень зміщення загальної картини освітленості. Для 8-бітного зображення у градаціях сірого $I_{max} = 255$. Зміщення в загальному випадку знаходиться у межах $L \in [0, I_{max}]$. При обробці зображення з рис. 5.15 приймали $L = 90$.

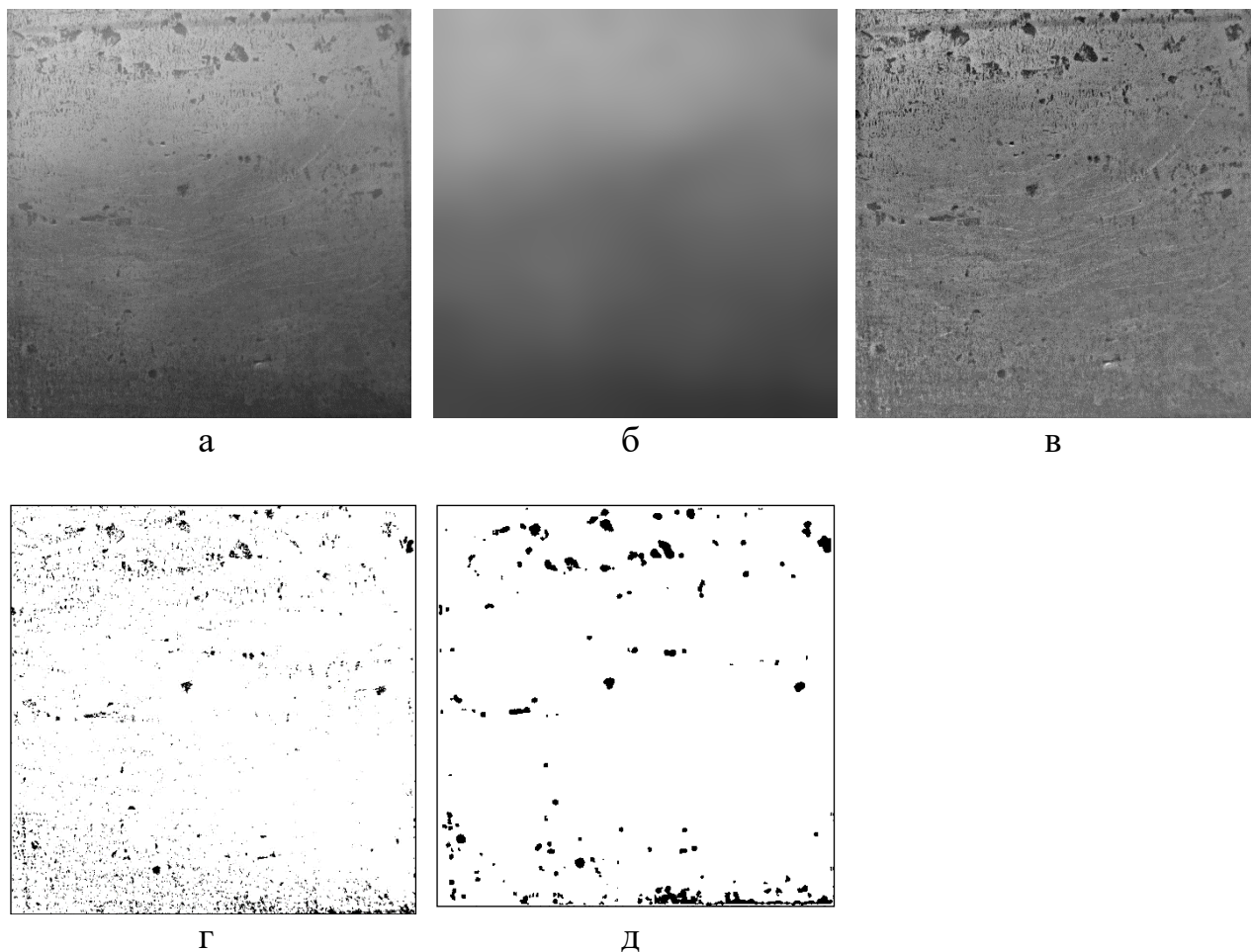


Рис. 5.15. Вхідне багатоградаційне зображення $i_0(x, y)$ (а); загальна картина освітленості (б); початкове зображення з вирівняною освітленістю (в); зображення після попередньої бінаризації $i_b(x, y)$ (г); результат розпізнавання положення корозійних пітінгів $i_{b2}(x, y)$ (д)

Далі отримане зображення нормували:

$$i_{ln}(x, y) = \frac{i_{le}(x, y) - \min(i_{le})}{\max(i_{le}) - \min(i_{le})} I_{max}, \quad (5.6)$$

де $\min(i_{le})$, $\max(i_{le})$ – відповідно мінімальне та максимальне значення інтенсивності для зображення $i_{le}(x, y)$.

Нормоване зображення з вирівняним освітленням для поверхні рис. 5.15, а показано на рис. 5.15, в. Подальші дії виконували над отриманим зображенням $i_{ln}(x, y)$.

Порогування – базова операція виявлення частин зображення, що належать пітінгам, і виокремлення їх від фону (3.2). Але бінаризоване зображення все ще містить багато дрібних шумових утворень, які спотворюють результати діагностування (рис. 5.15, г). Тому до нього повторно застосували розмиваючий фільтр та повторне порогоування. Воно призначене для кінцевої сегментації зображення на два кластери: фону та шуканих об'єктів. Кінцеве зображення

$i_{b2}(x, y)$ (рис. 5.15, д) представляє картину пошкодженості досліджуваної поверхні. При цьому білі пікселі відповідали фону, чорні – корозійним ямкам. Аналізуючи це зображення, обчислювали відносну площу пошкоджень a_r (3.5), кількість корозійних ямок, їх розмір та координати.

Виявлення корозійних утворень контролювали, підбираючи оптимальні параметри алгоритму. Зокрема, під час аналізу зображення на рис. 5.15, а використали значення границі порогування 14% та радіус вікна фільтра при повторному фільтруванні 5 пікселів. Для аналізованого фрагмента відносна площа пошкоджень становила $a_r = 5\%$.

Щоб кількісно описати особливості розподілу корозійних ямок на поверхні зразка, зображення $i_{b2}(x, y)$ кластеризували, розбиваючи його на сукупність окремих розпізнаних об'єктів. Кожен з таких об'єктів, оточений зі всіх боків фоном, є окремою корозійною ямкою (або шумовим артефактом, зумовленим особливостями зображення та алгоритмом його обробки). В результаті отримали масив об'єктів, для кожного з яких розраховували площу a_i та координати центра мас об'єкта. Площу a_i обчислювали як загальну кількість усіх пікселів, які формують об'єкт, і за її значенням для кожного об'єкта знаходили еквівалентний діаметр $d_{ei} = 2\sqrt{a_i/\pi}$ круга з такою ж площею.

Координати центра мас (x_{ci}, y_{ci}) розраховували за формулою:

$$x_{ci} = \sum_{m=1}^{a_i} \frac{x_m}{f_i}, \quad y_{ci} = \sum_{m=1}^{a_i} \frac{y_m}{f_i} \quad (5.7)$$

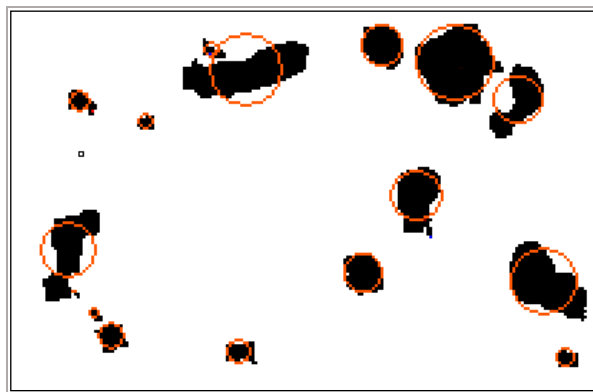
Щоб виявити ступінь наближення форми корозійних плям до колової, для кожного об'єкта обчислювали коефіцієнт круглості K_{ci} – частку пікселів об'єкта, які потрапляють у коло з діаметром d_{ei} , центр якого суміщено з центром мас (x_{ci}, y_{ci}) (рис. 5.16, а):

$$K_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{a_i} g(\vec{r}_m, d_{ei})}{a_i} \cdot 100\%, \quad (5.8)$$

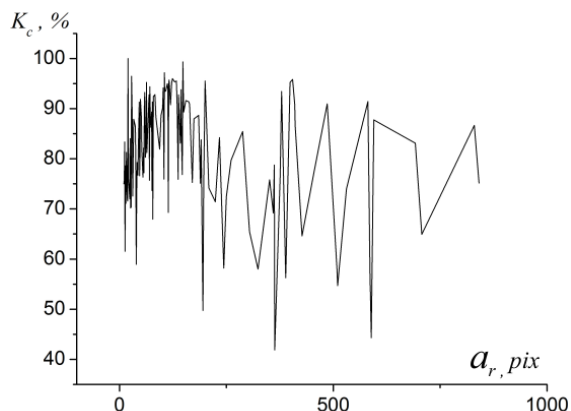
$$g(\vec{r}_m, d_{ei}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\vec{r}_m| \leq d_{ei}/2 \\ 0, & \text{якщо } |\vec{r}_m| > d_{ei}/2 \end{cases}$$

де $g(\vec{r}_m, d_{ei})$ – індикаторна функція потрапляння m -го пікселя об'єкта в межі еквівалентного кола діаметром d_{ei} ; \vec{r}_m – радіус-вектор, направлений від центра еквівалентного кола (x_{ci}, y_{ci}) до m -го пікселя об'єкта з координатами (x_m, y_m) .

Аналізуючи поверхню (рис. 5.15), виявлено, що значну частку (60,45%) займають дрібні ямки, середні – 27,27%, великі – 12,28% (рис. 5.17). Однак як дрібні ямки можуть сприйматися шумові артефакти, що може спричинити деяке завищення кількості розпізнаних пітингів. Збільшення еквівалентного діаметра може зумовити індивідуальне зростання розміру пітинга або об'єднання кількох дефектів. В останньому випадку він зростає, проте як умовний параметр лише частково характеризує геометрію дефекту. Для поглибленого аналізу структури та морфологічних особливостей дефектів використовували параметр оцінювання наближення корозійних плям до колової форми – коефіцієнт круглості K_c (рис. 5.16, б).

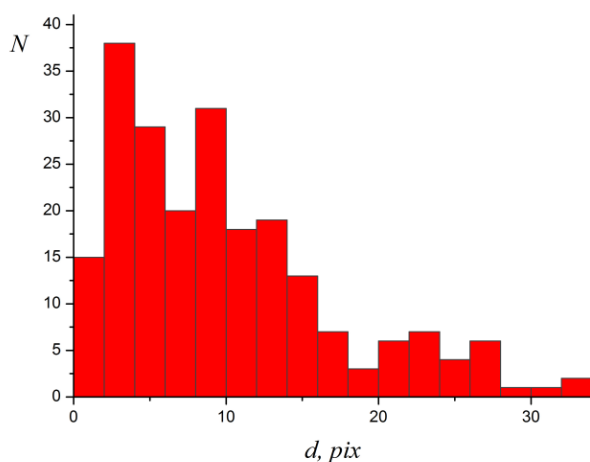


а

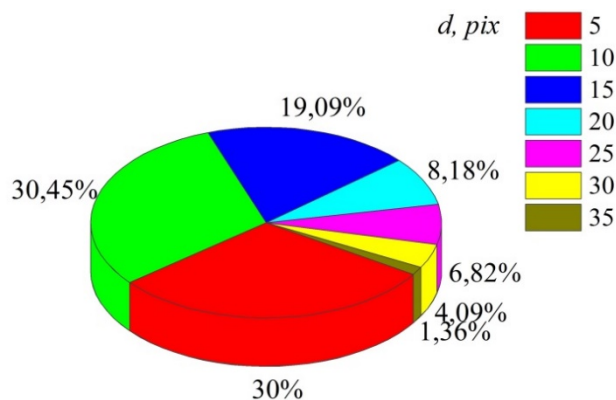


б

Рис. 5.16. Розпізнані на зображенні корозійні ямки (збільшений фрагмент рис. 5.15, д) і накладені на них кола з еквівалентним діаметром d_{ei} (а) та графік зміни коефіцієнта круглості K_c для об'єктів різних площ (б)



а



б

Рис. 5.17. Гістограма розподілу розпізнаних об'єктів за їх еквівалентними діаметрами (а) та відносна частка об'єктів різних діаметрів у їх загальній кількості (б) для зображення рис. 5.15, а

Аналіз фізико-хімічних закономірностей розвитку пітингів виявив, що дослідженому матеріалу притаманний складний розподіл структурно-механічної неоднорідності, яка спричиняє відмінності у швидкості розвитку та злиття корозійних ямок [41, 42]. Через “злиття” окремих пітингів в об'єднані корозійні утвори змінюється їх геометрія і формується спільний геометричний центр маси дефекту. Особливо небезпечним є об'єднання трьох і більше пітингів [42]. Фактично ямкоутворення у першому наближенні можна розглядати як багаторівневу систему, в якій об'єднання пітингів є послідовною еволюцією розмірів і форми дефектів. Відбувається перехід дефектів від колової форми до розвиненої з відповідною морфологічною перебудовою.

Характер розвитку пошкоджень поверхні визначають за параметрами розташованих на ній пітингів [43]. Для класифікації тріщин інформативним є коефіцієнт круглості K_c . Виявлено, що малі пітинги мають близьку до округлої форму (рис. 5.16, б). Проте за індивідуального підростання та об'єднання з сусідніми дефектами збільшується розкид форм (зменшується коефіцієнт K_c).

Подальший розвиток та об'єднання пітингів свідчить про певну тенденцію до набуття конгломератами округлішої форми, згладжування крайових ефектів та орієнтацію вздовж певного напрямку. Округлі пітинги утворювалися на ділянках структурної неоднорідності, зокрема в околі включень, що супроводжувалося накопиченням продуктів корозії внаслідок руйнування матеріалу. Укрупнення пітингів пов'язане насамперед з тривалим впливом корозії, що спричиняє підростання та коалесценцію дефектів з формуванням видовжених пітингів. Пітингам різної форми притаманні не лише геометричні, але й фізико-хімічні особливості, зокрема відмінності в інтенсивності корозійного підростання. Саме тому певні класифікаційні ознаки є основою розуміння механізму накопичення дефектів в аналізованому матеріалі. Особливо цікавими є розвинені та об'єднані пітинги, які вирізняються складним рельєфом дна й переважно нерівномірні за глибиною. Встановлено, що рельєф дна тісно пов'язаний з груповим об'єднанням пітингів, яке пришвидшує деградацію аналізованої поверхні. З одного боку, зменшується “витягнутість” – орієнтація пітинга у певному напрямку, проте зростає морфологічна неоднорідність форми об'єданого пітинга.

Розвиток пітингів неоднорідний з одночасним зародженням нових, що пов'язано з їх вибіркоким підростанням та об'єднанням з більшими дефектами (див. таблицю 5.3). Стадійність формозміни пітингів, активація та коалесценція дефектів певною мірою залежать і від деформаційних процесів [44]. Зокрема на макрорівні зародження пітингів пов'язане з локалізацією деформацій і активується зі зростанням макродеформацій та підвищенням напружень у металі труби [43].

Таблиця 5.3. Параметри та типи пітингів, виявлених на стінці труби магістрального газопроводу

Еквівалентний діаметр		Відносна кількість, %	Усереднений коефіцієнт круглості K_c	Тип
пікс	мкм			
$d_e \leq 10$	$d_e \leq 385$	60,5	85	Округлі
$10 < d_e \leq 20$	$385 < d_e \leq 770$	27,3	70	Видовжені
$20 < d_e$	$770 < d_e$	12,2	75	Розвинені + об'єдані

5.3. Автоматизований аналіз ямок в'язкого відриву

Дослідження фізико-механічних закономірностей руйнування матеріалів і конструкцій неможливе без кількісного описування морфології їх зламів, форми та розмірів елементів мікрорельєфу. Використання таких підходів дозволяє автоматизувати процес сегментації та тривимірної реконструкції ямок в'язкого відриву, що підвищує точність і достовірність отриманих результатів [45-47].

Для виявлення та аналізу ямок відриву на поверхні руйнування матеріалу розроблено ряд методик, оснований на аналізі зображення поверхні [48]. При цьому використовують поєднання різних відомих алгоритмів для аналізу

зображення (зокрема, аналіз гістограми зображення, граничне перетворення, фільтрування, вейвлети, аналіз текстур). Незважаючи на ефективність, описані алгоритми мають недоліки. В більшості випадків використання таких алгоритмів вимагає емпіричного підбору їх параметрів до зображень певного типу. Це вносить у роботу алгоритму суб'єктивний фактор та не дозволяє оцінити ступінь можливих змін у результаті його роботи при зміні значень параметрів алгоритму.

Як показано в роботах [48, 50], кількісне оцінювання інформативних фрактографічних ознак зламів та структурних складових металу відкриває перспективу виявлення кореляційних зв'язків між ними та механічними характеристиками конструкційних матеріалів, що особливо важливо для аналізу пошкоджень. Пропоновані підходи дозволяють встановити закономірності механічної поведінки пор, утворених під час статичного деформування, які практично неможливо виявити іншими методами. Це дозволяє у рамках єдиної концепції систематизувати та чисельно охарактеризувати виявлені фрактодіагностичні закономірності.

5.3.1. Дослідження статичного розтягу та ДНП сплаву VT23

З використанням розробленої і неодноразово апробованої методики реалізації динамічного нерівноважного процесу (ДНП) за рахунок ударно-коливального навантаження [51, 52] випробування в даній роботі проводили на зразках із листового двофазного високоміцного сплаву VT23 товщиною 3 мм. На партії зразків із титанового сплаву VT23 з 48 штук послідовно відпрацьовано ряд режимів навантажування. Зразки досліджували за таких схем деформування:

1. Статичний розтяг до руйнування (СР).
2. Статичний розтяг зразка до рівня напружень $0,03\sigma_T$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня напружень на зразку $\sim\sigma_T$ ($\sigma_\Sigma = \sigma_{\text{стат}} + \sigma_{\text{імн}} = \sigma_T$) – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП 1).
3. Статичний розтяг зразка до рівня напружень $0,03\sigma_T$ – імпульсне силове підвантаження до сумарного рівня пластичної деформації на зразку $0,5...10\%$ – подальший статичний розтяг до руйнування зразка (ДНП 2).

У дослідах з реалізації обох видів ДНП руйнівне зусилля крихких проб було в межах 42...156 кН.

5.3.2. Алгоритм аналізу зображення

Руйнування титанового сплаву розглядали як локалізований процес деформування. При цьому на новоутворених поверхнях "відбилися" особливості його кінетики. Тому поверхня руйнування є "відбитком" граничного стану матеріалу, а особливості її морфології є проявами деформаційних процесів у матеріалі.

Вихідним для пропонованого алгоритму є зображення поверхні руйнування титанового сплаву VT23 у градаціях сірого кольору, отримане за допомогою електронного мікроскопа РЕМ 106И (рис. 5.18,а-в). Алгоритм містить дві частини – базову та аналітичну. Метою базової частини алгоритму є сегментація зображення на два сегменти: фон та об'єкти. Аналітична частина алгоритму призначена для оцінювання неоднозначності розпізнавання ділянок знайдених

об'єктів. Базовий алгоритм для обчислення параметрів об'єктів (ямок) за допомогою їх зображення містить операції фільтрування та граничного перетворення [53].

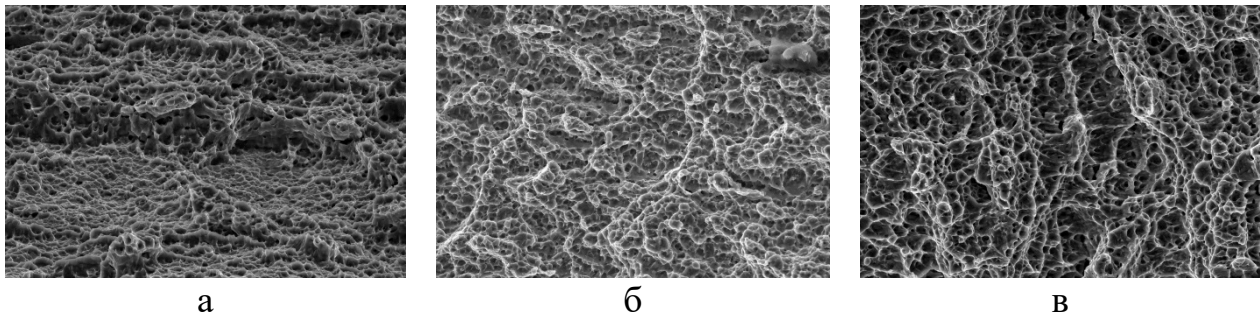


Рис. 5.18. Початкові зображення поверхонь зламу титанового сплаву ВТ23 при СР (а), ДНП1 (б), ДНП2 (в)

Візуальний аналіз поверхонь руйнування (рис. 5.18) дозволяє стверджувати, що вони утворені внаслідок зародження та злиття пор. При цьому форма та розміри пор є інформаційною ознакою, яку буде досліджено у даній роботі. Практична цінність такого підходу дозволить пов'язати структурну неоднорідність, сформовану у титановому сплаві за різних схем деформування, із механізмами та етапами розвитку пор [54].

Базова частина алгоритму [55] містить операції фільтрування та сегментації. Отримане в результаті вказаних перетворень бінарне зображення $i_b(x, y)$ з двома сегментами (білі об'єкти та чорний фон) містить інформацію про форму та площу об'єктів. З його допомогою можна обчислити кількість об'єктів, їх розміри та координати. Результати, отримані з використанням різних наборів значень важливих параметрів алгоритму, будуть дещо різними. Відповідно, ідентифіковані об'єкти матимуть дещо відмінні геометричні параметри.

Для виявлення та врахування впливу важливих параметрів алгоритму (границі порогування p_{th} та розміру вікна фільтра p_{fs}) на кінцевий результат використали підхід, який передбачає розпізнавання зображення при достатньо великій підмножині наборів значень параметрів базового алгоритму. При цьому результат розглядали як нечітку множину з функцією приналежності кожного її елемента (пікселя), яка дорівнює кількості наборів параметрів, що призвели до розпізнавання цього елемента як такого, що належить об'єктові.

Позначимо множину важливих параметрів алгоритму, які суттєво впливають на його роботу, як $A = \{P_1, P_2\}$. У нашому випадку P_1 відповідав параметру "розмір ядра фільтра Гауса", P_2 – параметру "межа граничного перетворення Бредлі". Припустимо, що значення кожного з параметрів P_i може змінюватися у діапазоні $[\pi_i^{min}, \pi_i^{max}]$ із кроком $\delta\pi_i$. Тоді $P = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ – конкретний набір значень параметрів, при яких отримано результуюче зображення.

Тоді множина всіх точок зображення, які належать об'єктам при даному наборі значень параметрів алгоритму:

$$E(P) = \{(x, y) \mid \chi_F(x, y, P) = 1\}, \quad (5.9)$$

де χ_F – характеристична функція, яка дорівнює 1, якщо піксель (x, y) розпізнано як частину об'єкта, і 0 – у протилежному випадку (аналогічно як у (3.14)).

Кожному набору значень параметрів алгоритму відповідає своя множина точок $E(P)$. Для підрахунку кількості розпізнавань кожної точки (x, y) як частини об'єкта для всіх досліджених K наборів значень використаємо акумуляторну функцію (3.15): $S(x, y) = \sum_{k=1}^K \chi_F(x, y, P_k)$.

Узагальнена блок-схема розрахунку акумуляторної функції $S(x, y)$ наведена на рис. 5.19. Накопичення значень функції $S(x, y)$ відбувається, доки не буде перебрано значення всіх змінних параметрів Π_i у діапазоні $[\pi_i^{min}, \pi_i^{max}]$ з кроком $\delta\pi_i$. На практиці перебирання можливих наборів значень параметрів виконували за допомогою вкладених циклів, коли цикл для перебирання значень певного параметра знаходиться в межах циклу перебирання значень іншого параметра.

Далі до функції $S(x, y)$ застосовували операцію розкриття математичної морфології. Це дозволило видалити малі незначущі об'єкти, зберігаючи великі об'єкти незмінними. В результаті отримали функцію $S_0(x, y)$. Вищі значення цієї функції відповідають частинам зображення, на яких край об'єкта розпізнавався частіше – при більшій кількості різних наборів значень параметрів. Крутість її схилів (рис. 5.20) на зображенні функції $S_0(x, y)$ характеризує розкид розпізнаних країв об'єктів.

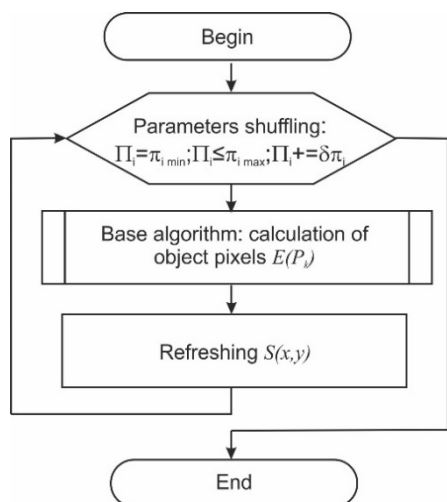


Рис. 5.19. Блок-схема аналізу зображення для різних наборів значень параметрів

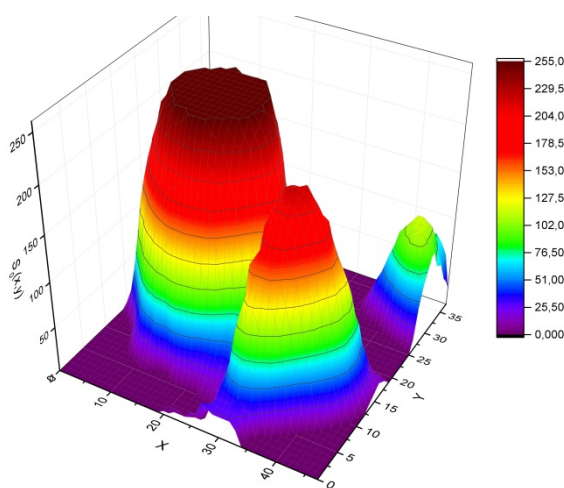


Рис. 5.20. Тривимірне подання функції $S_0(x, y)$ для фрагмента зображення на рис. 5.18, б

Після нормалізації значень функції $S_0(x, y)$ отримаємо нечітку множину $\tilde{C} = \{(x, y) | \mu_{\tilde{C}}(x, y)\}$ з функцією приналежності $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$:

$$\mu_{\tilde{C}}(x, y) = \frac{S_0(x, y)}{\sup(S_0)} \quad (5.10)$$

Нечітка множина \tilde{C} містить детальну інформацію про ступінь приналежності її точок об'єктам (пітингам), які розраховані при всіх розглянутих наборах значень параметрів алгоритму, і представляє "нечіткі об'єкти". Точки, які належать об'єктам з певною ймовірністю α , містить α -зріз множини $\tilde{C}(\alpha)$.

5.3.3. Результати аналізу зображень

Графічне подання α -зрізів при $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,3$ та $\alpha = 0,5$ приведено на рис. 5.21, а-і. Розпізнані об'єкти (ямки) на цих зображеннях представлені окремими оточеними фоном утвореннями. Ширина схилу такого об'єкта представляє розкид лінійних розмірів розпізнаних об'єктів, який викликаний зміною параметрів алгоритму. При $\alpha < 0,05$ (для розглянутого зображення) відбувається об'єднання суміжних об'єктів.

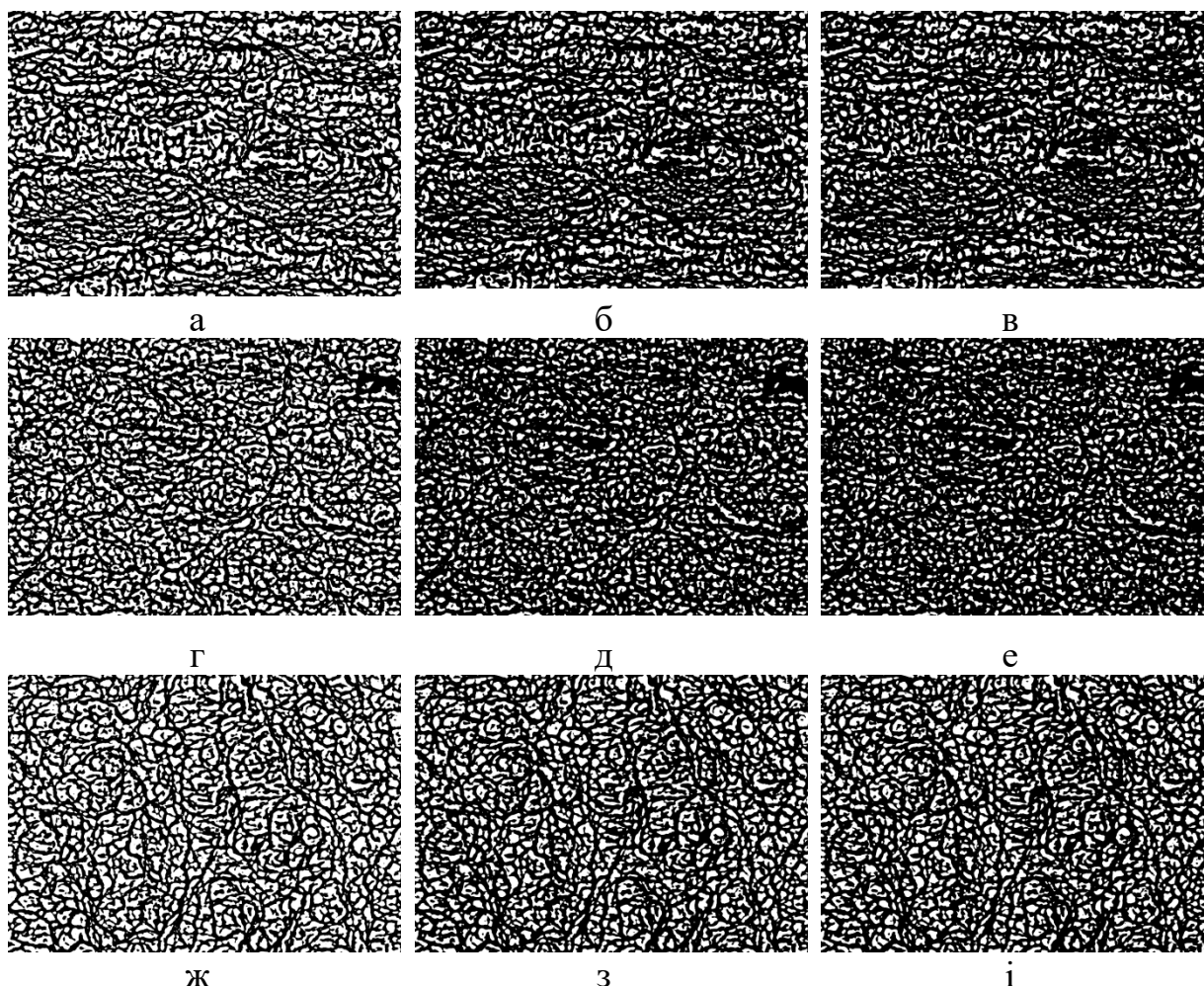


Рис. 5.21. Графічне подання α -зрізів нечіткої множини \tilde{C}) для зображень рис. 5.18,а (а-в), рис. 5.18,б (г-е) та рис. 5.18,в (ж-і) при $\alpha = 0,1$ (а,г,ж), $\alpha = 0,3$ (б,д,з) та $\alpha = 0,5$ (в,е,і)

При відносно високих значеннях α ($\alpha > 0,16$) зрізи міститимуть зони, які найстійкіше розпізнаються алгоритмом, але частина об'єктів втрачається. Емпіричним шляхом виявлено, що для дослідженої множини зображень оптимальним для виділення об'єктів є значення $0,06 \leq \alpha \leq 0,16$.

Досліджена поверхня руйнування має ямкову структуру, утворену внаслідок злиття множини мікропор. Локалізація та ідентифікування ямок на зображенні свідчить, що утворення пор супроводжувалось пластичним деформуванням перетинок між ними [56-58]. Проте вони є достатньо широкими для того, щоб можна було ідентифікувати кожен окрему ямку. Гребені відриву між порами мають матову нерівну поверхню, яка відрізняється за кольором на

різних ділянках зламу. Поверхня руйнування є нерівною, на бічних поверхнях великих ямок, окреслених гребенями відриву, розташовані дрібніші ямки.

Для виявлених на поверхні руйнування ямок обчислювали еквівалентний діаметр d_{ei} (діаметр кола з площею, яка дорівнює розпізній площі ямки). Щоб оцінити розміри розпізнаних об'єктів на вибраних α -зрізах, виділяли замкнені оточені фоном об'єкти. Діаграми їх розподілу для різних α приведено на рис. 5.22. При перевищенні межі $\alpha = 0,05$ зменшується кількість малих об'єктів (до 10 пікс) та зростає кількість великих об'єктів (більше 50 пікс). Це пов'язано з процесом "зрощування" суміжних об'єктів при низьких значеннях α . Також діаграма демонструє зміщення в сторону дрібних об'єктів при $\alpha = 0,03$.

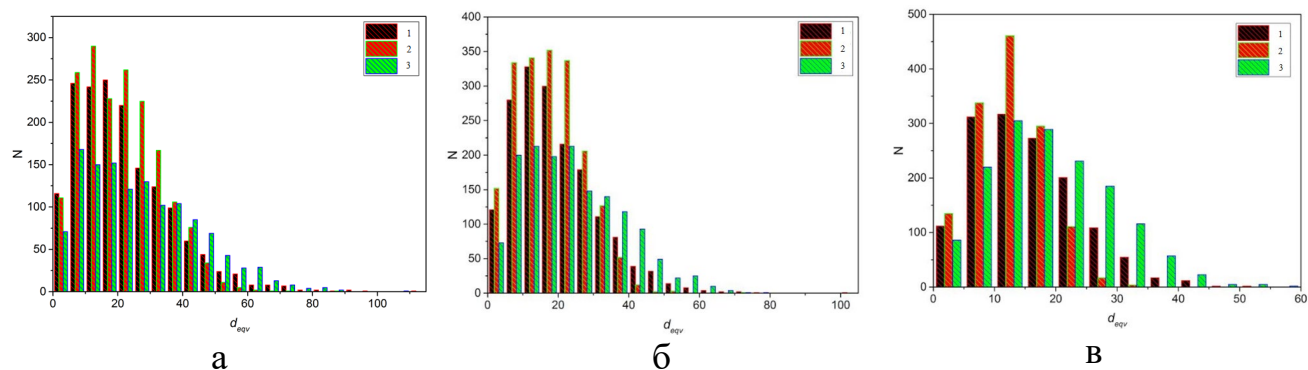


Рис. 5.22. Розподіли еквівалентних діаметрів d_{ei} ямок для аналізованих зразків при $\alpha = 0,1$ (а), $\alpha = 0,3$ (б) та $\alpha = 0,8$ (в); (1 – СР, 2 – ДНП1, 3 – ДНП2)

Ще однією характеристикою поверхні вкритої ямками в'язкого відриву є відносна площа пошкоджень a_r (3.5). Цей параметр характеризує площу ямок, розпізнаних при різних значеннях α , рис. 5.23. Слід зазначити, що графіки мають перегин у середній ділянці $\alpha \in [0,3 \dots 0,5]$.

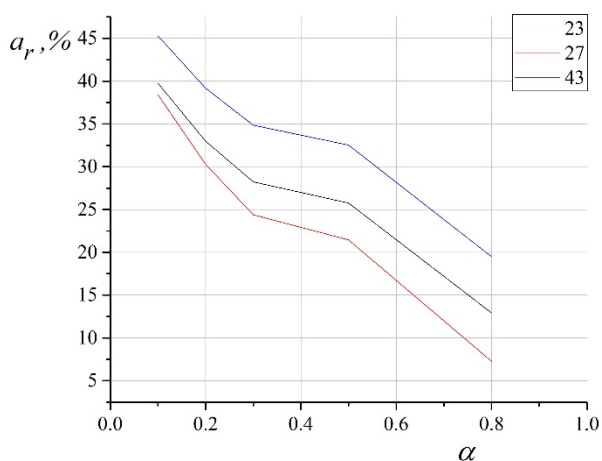


Рис. 5.23. Залежність відносної площі ямок a_r від значення величини зрізу α

Верхні частини графіка вказують, що при $\alpha = 0,1$ площа виявлених об'єктів є максимальною, проте у якості пор можуть бути розпізнані окремі ділянки міжпорових меж. При $\alpha = 0,8$ знижується кількість розпізнаних ямок, алгоритм перестає розрізняти частину з них внаслідок зростання частини міжпорового простору.

Найбільш інформативною є доволі широка полого ділянка графіка при $\alpha \in [0,3 \dots 0,5]$. У межах цієї ділянки вплив алгоритму на виявлені параметри ямок є незначним. Вважали, що саме ці умови є оптимальними для аналізу зображень поверхонь зламу, оскільки при цьому алгоритм стійко розпізнає ті частини зображення, які найочевидніше сприймаються за шукані об'єкти.

Таким чином, параметри виявлених пор залежать від значення зрізу α . α впливає на всі виявлені параметри, проте деякі фізичні закономірності матеріалу нечутливі до величини α . Зокрема графіки для всіх трьох зразків (рис. 5.23) зберігають рівновіддаленість a_r при різних α у більшій частині діапазону. Слід зазначити, що для ямок статично деформованого зразка площа ямок a_r була завжди меншою від цього параметра для зразків після ДНП. Значення a_r та a_p у межах ділянки $\alpha \in [0,3 \dots 0,5]$ подано у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Результати аналізу зображень поверхонь руйнування титанового сплаву ВТ23

Тип деформування	Площа ямок, a_r , %	Площа перетинок, a_p , %
СР	22,0 – 24,0	78,0...76,0
ДНП 1	26,0 – 28,0	74,0...72,0
ДНП 2	32,5 – 35,0	67,5...65,0

Статика. Кінетика деформування визначалася напружено-деформованим станом у шийці зразків. У зламі утворюються «округлі пори». Деформування відбувається шляхом потоншення міжпорових ділянок, при цьому виникають локалізовані тривісні деформації [57-59].

ДНП. Активну роль відіграє зароджена тріщина, що змінює механізм руйнування. Переважає механізм локалізації пластичного течіння [60]. Поширення тріщини сприяє релаксаційним процесам у її околі, що зумовлює формування подовгастих ямок. Тобто механізм ямковий, проте кінцевий розрив міжямкових меж відбувається за механізмом зсуву.

Такі особливості накопичення пор, вивчення їх кількісного розподілу та геометричної форми можна пояснити з позицій оцінювання поточної пошкодженості матеріалу, яким притаманні окремі стадії кривої накопичення дефектів, утворення пор та їх злиття.

На рис. 5.24, наведено залежності коефіцієнта круглості ямки K_c (5.8) від її еквівалентного діаметра. З використанням моделі лінійної регресії (оцінювання проводили методом найменших квадратів) отриману множину даних для кожного зображення було описано прямою виду $K_c = ad_e + b$ (k_{cc} – коефіцієнт нахилу, d_e – еквівалентний діаметр). Нахил цієї прямої до вертикальної осі описує параметр нахилу:

$$k_{cc} = \frac{1}{a} = \frac{dK_c}{dd_e}. \quad (5.11)$$

Цей параметр має фізичний зміст: більші значення відповідають випадку, коли ямки з різним діаметром мають схожу форму. Якщо згадана пряма починається з високих значень K_c (90 ... 100%) і характеризується високим

значенням k_{cc} , то це означає, що переважна більшість ямок на зображенні мають близьку до колової форму.

Виявлено, що для досліджених зображень параметр нахилу k_{cc} знаходиться у вузькому діапазоні. Малі ямки відриву мають близьку до округлої форму (рис. 5.24). Подальший розвиток та об'єднання ямок свідчить про тенденцію до орієнтації вздовж певного напрямку.

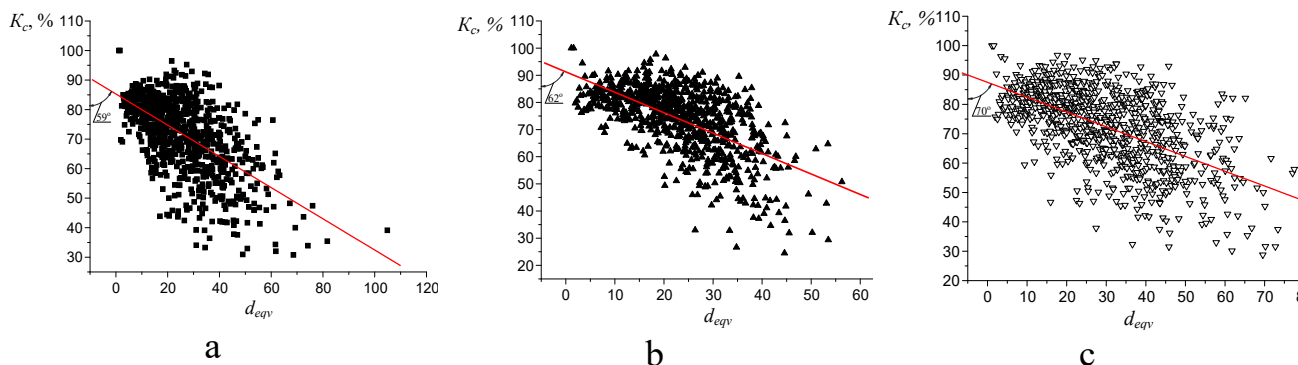


Рис. 5.24. Залежність параметра форми ямки K_c від її еквівалентного діаметра d_e при $\alpha = 0,1$: для статичного деформування (а), ДНП1(б) та ДНП2 (в)

Округлі ямки відриву утворювалися на ділянках структурної неоднорідності, зокрема в околі включень, що супроводжувалось накопиченням локальних деформацій та руйнуванням матеріалу. Укрупнення ямок пов'язане насамперед з переходом до об'ємного напруженого стану, що спричиняє підростання та коалесценцію дефектів з формуванням великих ямок [59]. Вважали, що зміна коефіцієнта круглості K_c свідчить про локалізацію деформування ямки на мікрорівні внаслідок підростання тріщини, утвореної внаслідок їх об'єднання. Виявили, що зі зростанням діаметра ямки коефіцієнт круглості K_c спадає від 90–95 % до 30...40 % (рис. 5.24).

Проведені дослідження дозволили описати форму та кількість ямок в'язкого відриву та оцінити вплив виду навантажування на їх формозміну. Вона є підґрунтям оцінювання напружено-деформованого стану в околі кожної окремої ямки. Імпульсні підвантаження на стадіях утворення і росту пор вносять істотні зміни в кінетику процесу накопичення пошкоджень, що, передусім, впливає на стадію злиття пор і на граничну пошкодженість матеріалу. Саме про це свідчать результати аналізу поверхні зразків після ДНП, у яких потоншуються перетинки між порами та зростає пористість.

5.3.4. Метод "локальних перерізів" відповідно до ГОСТ 21073.3-75

Ми порівняли результати, отримані за допомогою запропонованого алгоритму [55], з результатами вимірювань відповідно до чинних стандартів. Слід зауважити, що держстандарту для вимірювання розмірів ямок в'язкого відриву на даний час немає. Як найближчий по суті вибрано метод визначення середнього розміру зерна, описаний у діючому ГОСТ 21073.3-75 [61].

Метод полягає у визначенні середнього значення розміру зерна (у нашому випадку ямки відриву). Для визначення величини ямок запропонованим методом на поверхні вибирають не менше п'яти типових місць, на кожному місці

проводять не менше двох одиничних вимірів. Визначення величини зерна проводять при такому збільшенні, щоб у полі зору знаходилось 80...200 зерен. Для вимірювання використано лінії перетину у вигляді двох непаралельних прямих. Пряма перетинала не менше 10 ямок. Визначення величини ямок проводять підрахунком їх меж, які перетнула лінія перерізу.

На зображення (рис. 5.25,а) наносили перерізи, що перетинали ямки у межах визначеної довжини, після чого обчислювали середній розмір ямки за формулою:

$$h = L/n, \quad (5.12)$$

де L – довжина перерізу; n – кількість точок перетину із межами ямок.

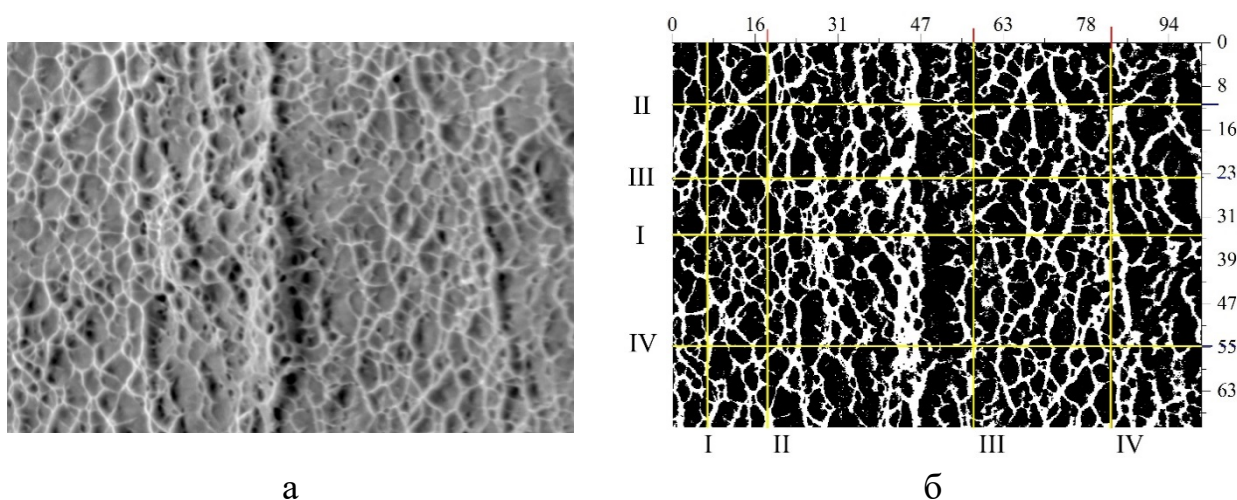


Рис. 5.25. Зображення поверхні руйнування титану ВТ22 (а); виявлені на ньому ямки відриву з нанесеними лініями горизонтальних та вертикальних перерізів (б)

Дані двомірних зрізів, проведених у різних зонах зображення (рис. 5.25,б), узагальнено у таблиці 5.5. Середні значення для вертикального напрямку становить 4,02 мкм, а для горизонтального – 3,66 мкм.

Таблиця 5.5. Параметри ямок в'язкого відриву (I, II, III, IV – номери перерізів, рис. 5.25,б)

Напрямок перерізу	Значення середнього розміру ямки у перерізах, мкм			
	I	II	III	IV
Вертикальний	3,32	4,99	4,10	3,67
Горизонтальний	3,58	4,55	3,45	3,04

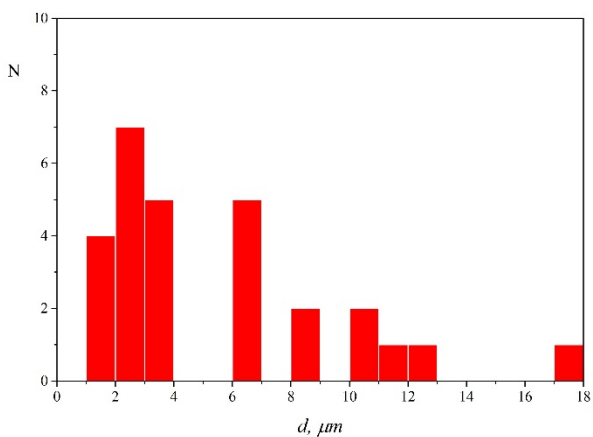
Аналіз отриманих значень розмірів ямок показує, що середній розмір (діаметр) ямок в'язкого відриву, обчислений за методом двовимірного перерізу, залежить від вибору ділянки. Отже, змінюючи місце аналізу ямок, ми впливаємо на кінцевий результат. Разом з тим слід відзначити, що розміри ямок, отримані у горизонтальній та вертикальній площинах, є досить близькими.

Результат, отриманий за допомогою методу розрахунку розмірів ямок за ГОСТ 21073.3-75 [61], порівнювали з результатами, отриманими запропонованим алгоритмом [55]. Порівняння методів виконували через аналіз

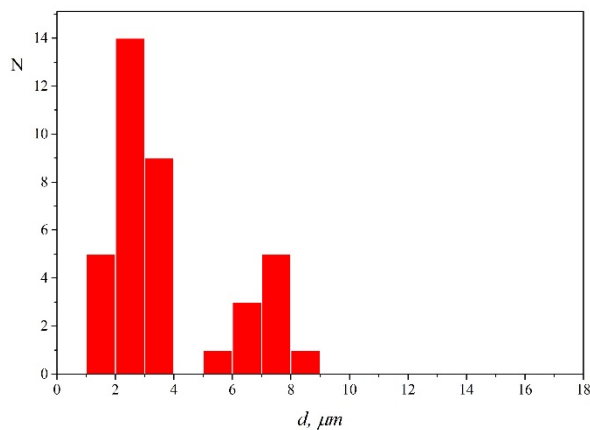
зображення поверхні руйнування титану ВТ22 (рис. 5.25). Для цього початкове зображення було оброблене за алгоритмом [55]. Результат виявлення ямок показано на рис. 5.25,б. Далі у зонах, які було вибрано для перерізу відповідно до ГОСТ 21073.3-75, з отриманого зображення було вирізано горизонтальну та вертикальну смуги шириною 200 пікселів (рис. 5.26).



а



б



в

Рис. 5.26. Горизонтальна та вертикальна смуги, вирізані з зображення (рис. 5.25) в околі перерізів для розрахунку розмірів ямок за допомогою запропонованого алгоритму (а); розподіл еквівалентних діаметрів ямок для горизонтальної (б) та вертикальної (в) смуг

У результаті вказаних перетворень та обчислень отримано такий середній еквівалентний діаметр ямок: а) для вертикальної смуги – $d_e = 5,0$ мкм; б) для горизонтальної смуги – $d_e = 3,8$ мкм. Гістограми розподілу еквівалентних діаметрів для горизонтальної та вертикальної смуг подано на рис. 5.26,б,в. Таким чином, результати, отримані обома методами, близькі за значеннями (див. табл. 5.5).

Оскільки методом за ГОСТ 21073.3-75 розміри обчислюють по лінії перерізу зразка (яка зазвичай зміщена до краю ямки), а запропонованим методом розраховують еквівалентний діаметр цілої ямки, то розроблений метод повинен давати дещо вищі значення діаметрів ямок. Таким чином, отримані результати для обох методів узгоджуються між собою.

5.4. Автоматизований метод дослідження форми та розмірів ямок на поверхні руйнування високоміцного титану на основі аналізу їх топологічних особливостей

Кількісне оцінювання параметрів ямок в'язкого відриву на фрактографічних зображеннях зламів відкриває перспективу встановлення кореляційних зв'язків між ними та статичною тріщиностійкістю конструкційних матеріалів, що особливо важливо для встановлення причин руйнування матеріалів і конструкцій [62].

Це особливо важливо за умов пластичного деформування, коли відбувається ініціювання та локалізація деформацій, а також при описі та інтерпретації поведінки матеріалів за складних умов деформування, зокрема за динамічного нерівноважного процесу (ДНП), коли "короткотривалий" вплив на структуру матеріалу може повністю змінити його властивості [63]. Використання методів комп'ютерного аналізу для вирішення подібних завдань дозволяє отримати принципово нову інформацію й уточнити фізичні закономірності деформування та руйнування матеріалів. Це дозволить встановити мікромеханічні параметри пор, утворених під час статичного та динамічного деформування, які важко виявити іншими методами.

5.4.1. Дослідження статичного розтягу та ДНП сплавів VT23 та VT23M

Хімічний склад сплаву VT23M такий же, як і сплаву VT23 (табл. 5.6). Але те, що його діапазон легування β -стабілізуючими елементами на 33% менший, суттєво впливає на покращення пластичних властивостей сплаву VT23M порівняно зі сплавом VT23M (див. табл. 5.7).

Таблиця 5.6. Хімічний склад титанових сплавів VT23 і VT23M

Fe	Cr	Mo	V	Ti	Al
0,5 - 0,8	1,0 - 1,4	1,8 - 2,5	4,3 - 5	86 - 89,3	4,4 - 6,3

Таблиця 5.7. Механічні властивості титанових сплавів VT23 і VT23M

Марка матеріалу	Механічні властивості		
	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
VT23	980-1180	1080-1280	15
VT23M	1000-1150	1080-1180	20

На партії зразків із титанових сплавів VT23 і VT23M послідовно відпрацьовано низку режимів навантажування. Зразки досліджували за таких схем деформування:

1. Статичний розтяг до руйнування (CP). (VT-23M та VT23)
2. Випробування на ударну в'язкість (VT22M):
 - у вихідному стані;
 - після ДНП.

Статичні випробування та реалізацію ДНП ударно-коливальним навантаженням [63, 64] проводили на зразках із листового двофазного високоміцного сплаву VT23 товщиною 3 мм. Руйнівне зусилля крихких проб

було в межах 42...156 кН. Ударну в'язкість визначали на плоских зразках товщиною 3 мм, шириною робочої ділянки 10 мм, відстанню між опорами 60 мм. Глибина надрізу становила 2 мм.

5.4.2. Алгоритм для аналізу зображення

Початковим для запропонованого алгоритму є зображення поверхні руйнування титанових сплавів ВТ23 та ВТ23М у градаціях сірого кольору, отримане за допомогою електронного мікроскопа РЕМ 106-И (рис. 5.27,а-г). Алгоритм містить дві частини – базову та аналітичну [65]. Метою базової частини алгоритму є виявлення зон зображення, які відповідають ямкам відриву. Аналітична частина алгоритму призначена для розрахунку кількісних параметрів знайдених ямок відриву.

Фрактографічне зображення зразка можна розглядати як поверхню, яку описує функція розподілу інтенсивності зображення $i_0(x, y)$. Топологічно на цій поверхні ямкам в'язкого відриву відповідають "западини" значень інтенсивності пікселів, а краям ямок – "хребти", що їх оточують.

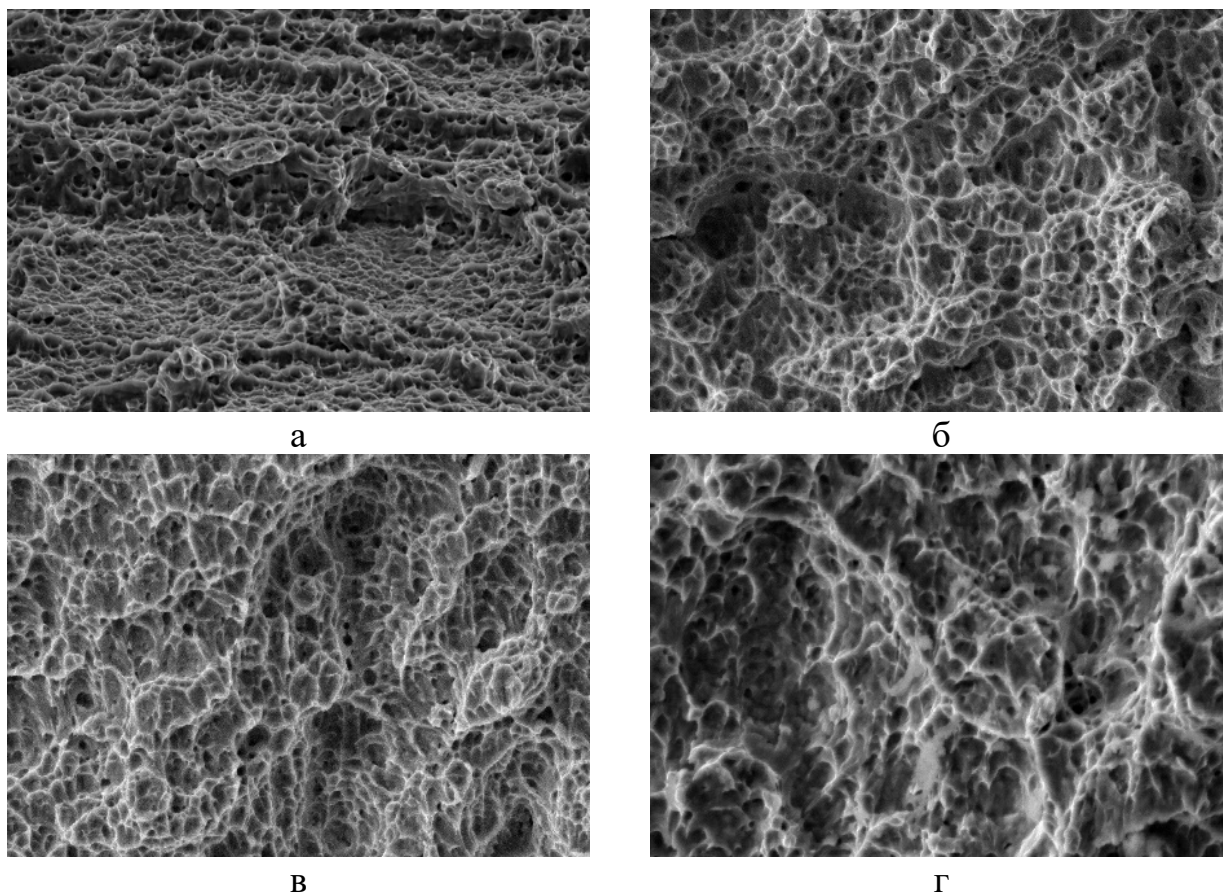


Рис. 5.27. Фрактограми поверхні руйнування зразків сплавів ВТ23 (а) та ВТ23М (б-г) за статичного (а,б) та ударного (в,г) навантаження

Для виявлення на зображенні ямок в'язкого відриву використали метод, оснований на пошуку їх країв. З цією метою обчислювали перепади інтенсивностей для різних ділянок зображення.

Спочатку, щоб усунути викиди функції $i_0(x, y)$, проводили її згладжування шляхом застосування фільтра Гауса (3.4):

$$i(x, y) = \Gamma[i_0(x, y)], \quad (5.13)$$

де Γ – оператор Гауса, визначений в околі точки (x, y) .

Це дозволяє усереднити значення інтенсивності пікселя за оточуючою ділянкою, надаючи при цьому перевагу існуючому значенню інтенсивності. Подальші дії проводили над відфільтрованим зображенням, представленим функцією $i(x, y)$.

Горизонтальний та вертикальний градієнти функції $i(x, y)$ дорівнюють:

$$G_x(x, y) = \frac{\partial i}{\partial x}, \quad G_y(x, y) = \frac{\partial i}{\partial y}. \quad (5.14)$$

Низькі значення градієнта відповідають вершинам та западинам функції $i(x, y)$. Для виділення вершин використали похідну від горизонтального та вертикального градієнта:

$$L_x = \frac{\partial G_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 i}{\partial x^2}, \quad L_y = \frac{\partial G_y}{\partial y} = \frac{\partial^2 i}{\partial y^2}. \quad (5.15)$$

Для оцінювання другої похідної в точці $i(x, y)$ використано оператор Лапласа:

$$L = \nabla^2 i = L_x + L_y = \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 i}{\partial y^2}. \quad (5.16)$$

Таким чином, краям ямок (максимумам функції $i(x, y)$) відповідатимуть мінімуми функції L . Для покращення виявлення хребтів функції $i(x, y)$ та для зменшення впливу шуму частинні похідні (3) розраховували на основі пікселів з певного околу розміром $(2k + 1) \times (2k + 1)$. З метою зниження обчислювальних затрат при розрахунку частинних похідних усували операцію ділення на відстань між пікселями.

$$L_x(x, y) \approx \sum_{n=-k}^k \sum_{m=1}^k i(x - m, y + n) + i(x + m, y + n) - 2i(x, y), \quad (5.17)$$

$$L_y(x, y) \approx \sum_{n=-k}^k \sum_{m=1}^k i(x + n, y - m) + i(x + n, y + m) - 2i(x, y).$$

На практиці виявлення хребтів функції $i(x, y)$ за виразами (5.17) проводили шляхом згортання початкового зображення з фільтрами, ядра яких зображені на рис. 5.28,а. У них білі ділянки мають коефіцієнти 6, а чорні -1. Отримані після застосування обох фільтрів зображення додавали відповідно до виразу (5.16). У результаті описаних перетворень отримали зображення, яке описується функцією:

$$i_L(x, y) = L[i(x, y)]. \quad (5.18)$$

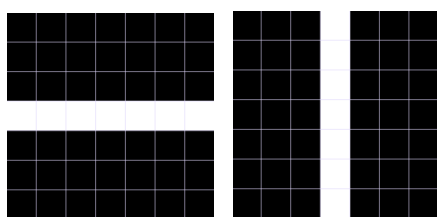


Рис. 5.28. Ядра фільтрів для виділення на зображенні ділянок, які відповідають хребтам функції $i(x, y)$

Для сегментації країв ямок проводили пороговування зображення $i_L(x, y)$ та скелетизацію отриманої мережі країв. На рис. 5.29 показано початкові зображення (рис. 5.27) з накладеними на них розпізнаними краями ямок. У результаті скелетизації отримано множину точок, які описують лінії розподілу між ямками. Щоб розширити цю границю, до скелета застосовували морфологічне перетворення дилації зі структурним елементом розміром 3×3 пікс.

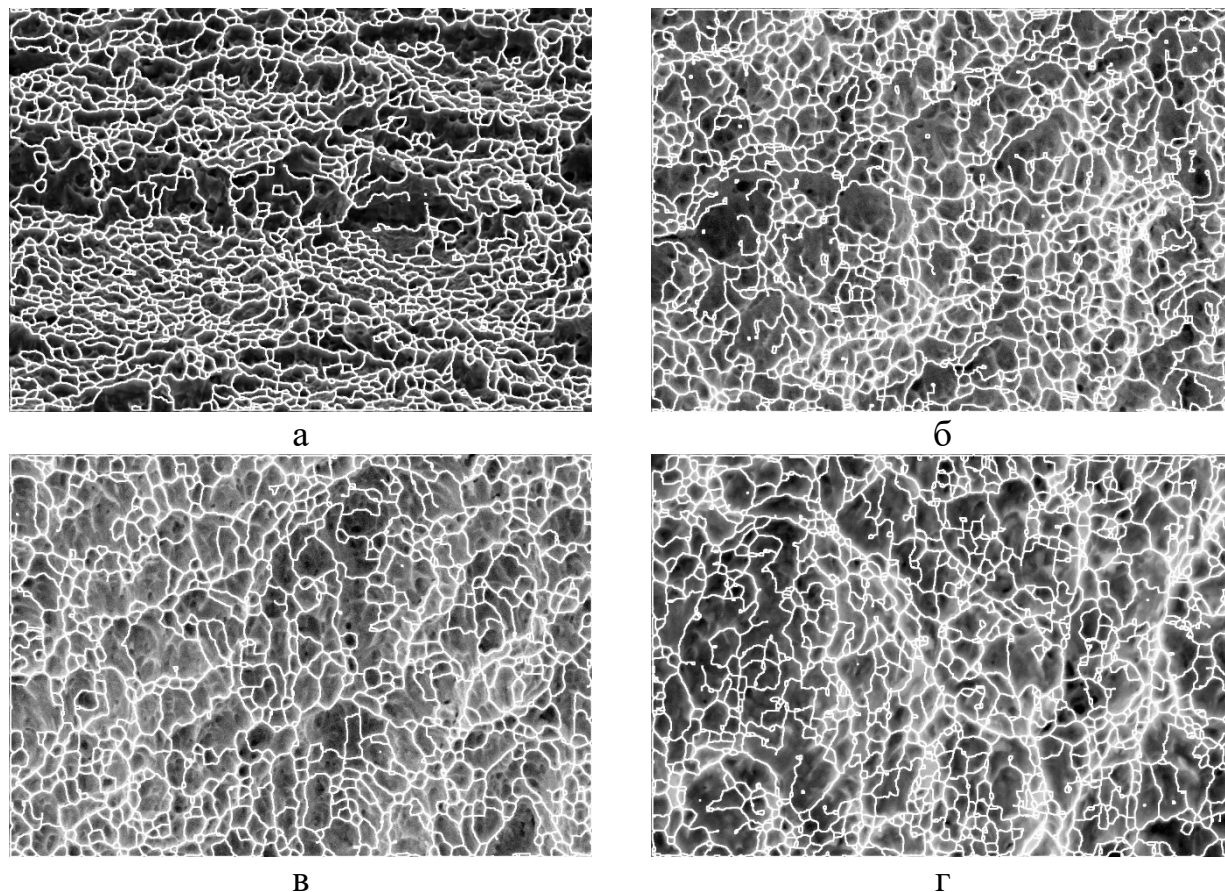


Рис. 5.29. Результат розпізнавання країв ямок в'язкого відриву на зображеннях рис. 5.27

Після цього виділили зв'язні області пікселів, оточених попередньо знайденими краями. Кожна з таких зв'язних областей представляє окремий знайдений об'єкт – ямку. Далі для кожного об'єкта-ямки обчислювали такі параметри:

- площу a_i (суму пікселів, які входять до складу об'єкта);
- коефіцієнт круглості K_c ;
- візуальну глибину t_i в одиницях інтенсивності зображення.

Для розрахунку візуальної глибини об'єкта t_i обчислювали середню інтенсивність краю об'єкта i_i^{br} та середню інтенсивність об'єкта-ямки i_i^{dm} :

$$i_i^{br} = \frac{\sum_{m=1}^{a_i^{br}} i_o(x, y)}{a_i^{br}}, \quad i_i^{dm} = \frac{\sum_{m=1}^{a_i} i_o(x, y)}{a_i}. \quad (5.19)$$

a_i^{br} – кількість пікселів, які формують край об'єкта.

Тоді візуальна глибина об'єкта в одиницях інтенсивності зображення дорівнює:

$$t_i = i_i^{br} - i_i^{dm}. \quad (5.20)$$

Для зображень з різною глибиною кольору інформативнішою є відносна візуальна глибина:

$$t_i^r = \frac{t_i}{i^{max}} = \frac{(i_i^{br} - i_i^{dm})}{i^{max}}, \quad (5.21)$$

де i^{max} – максимально можливе для глибини зображення $i_0(x, y)$ значення інтенсивності пікселя.

З подальшого аналізу вилучали дуже дрібні об'єкти та об'єкти, для яких візуальна глибина була дуже малою: $a_i < a^{min}$, $t_i < t^{min}$.

5.4.3. Результати аналізу поверхні в'язкого відриву за допомогою пропонуваного алгоритму

Досліджена поверхня руйнування має ямкову структуру, утворену внаслідок коалесценції мікропор та руйнування перетинок між ними. Формування пор супроводжувалося локалізованими деформаційними процесами на їх межах [66, 67]. Проте вони є достатньо чіткими, що дозволило ідентифікувати окремі ямки та оцінити їх параметри. На рис. 5.30, а-г показано гістограми розподілу еквівалентних діаметрів ямок для зображень (рис. 5.27).

Статичний розтяг

Сплав VT23. Максимальний масив ямок даної вибірки $N_{max} = 353$ шт. – це ямки розміром 1,5 мкм. Діапазон виявлених ямок від 0,5 мкм до 18,5 мкм. Тобто масив сформовано відносно великими округлими ямками зі слабо розвиненим рельєфом на дні у вигляді переважно світлих замкнених прожилок. Наявність у вибірці як великих, так і дрібних ямок може свідчити про неоднорідність структури матеріалу [68, 69].

Сплав VT23М. Ямки розміром 1,5 мкм утворили найбільший масив $N_{max} = 225$ шт. Діапазон виявлених ямок від 0,5 мкм до 14,0 мкм. Виявлено конгломерати ямок, розташованих на світліших гребенях, які вкриті дрібнішими ямками. Тобто сплаву VT23М притаманне зменшення діапазону утворених ямок та їх максимальних розмірів за статичного деформування та руйнування. Отримані результати можуть свідчити, що на 33% менший діапазон легування β -стабілізуючими елементами, притаманний даному матеріалу, впливає на еволюцію (швидкість накопичення й анігіляції, механізми зародження та схему перебудови) дефектної субструктури та об'єму мікропор.

Ударна в'язкість

Сплав VT23 (без ДНП). Встановлено, що ямок розміром 2,5 мкм було $N_{max} = 175$ шт. Основний діапазон виявлених ямок від 0,5 мкм до 9,5 мкм. Зламу притаманий волокнистий рельєф, за якого поверхня є менш розвиненою, "згладженою". Дрібні неглибокі рівновісні ямки формувалися в зонах з ослабленими зв'язками між структурними складовими. Перетинки між цими ямками сформовано за типовим в'язким механізмом.

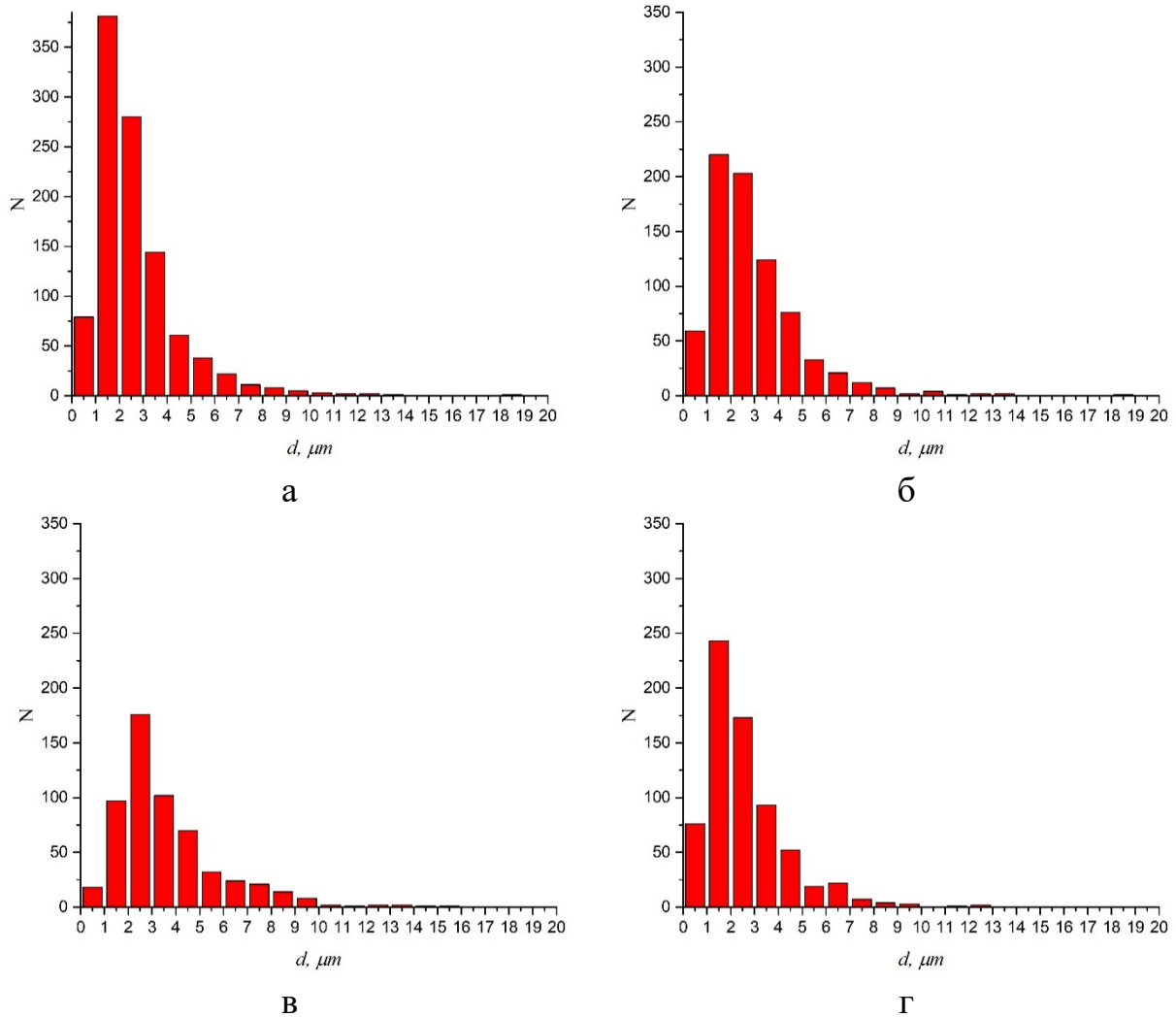


Рис. 5.30. Розподіли еквівалентних діаметрів d_e ямок для сплавів VT23 (а) та VT23М (б-г) за статичного (а,б) та ударного (в,г) навантаження

Сплав VT23 (з ДНП). Для даної схеми випробувань виявлено, що ямок розміром 1,5 мкм було найбільше: $N_{max} = 245$ шт. Діапазон виявлених ямок від 0,5 мкм до 9,5 мкм. Морфологічний аналіз поверхні вказує на значний вплив зсувних процесів на формування зламу [70]. Помітно зменшення розмірів ямок порівняно зі статичним руйнуванням та їх більшу неупорядкованість. Форма ямок коливається від округлої до подовгастої, що є наслідком проростання магістрального дефекту та стохастичного процесу об'єднання ямок. Перетинки між цими ділянками з ямками різної форми сформовано за типовим в'язким механізмом з утворенням виривів та деформованих ділянок поверхні зламу. Після реалізації ДНП кількість мікрodefektів у сплаві зростає. Це сприяє утворенню більшої кількості мікропор, проте їх розміри є меншими, ніж за статичного деформування. Значна густина пор впливає на збільшення енергозатрат на руйнування.

Слід зазначити, що під час деформування та руйнування ямки лише частково залежать від структурних параметрів матеріалу. Це пов'язано з тим, що під час виникнення та коалесценції мікропор вони змінюють локальний напружено-деформований стан матеріалу. Оскільки цей процес є випадковим, для ілюстрації цього ефекту побудовані гістограми розподілу ямок відриву. Зауважимо, що основним завданням було не лише встановити розміри ямок, але

й оцінити розподіл їх окремих груп у межах аналізованої площі для кожного дослідженого матеріалу та виду випробувань.

Форму та глибину ямок можна співставляти (за однакових схем випробування та отримання зображень) із в'язкістю матеріалу. Відомо, що глибокі конічні ямки притаманні руйнуванню дуже пластичних матеріалів. Тому припустили, що підвищення тріщиностійкості супроводжується збільшенням відносної глибини ямок та поверхні зламів. А якщо припустити, що глибина ямок пропорційна їх розміру, то можна стверджувати, що матеріал ВТ23М має кращі механічні властивості. Крім того, сплав ВТ23М є пластичнішим за високих швидкостей деформування та локалізації деформаційного процесу. На рис. 5.31 зображено гістограми розподілу ямок за їх візуальною глибиною.

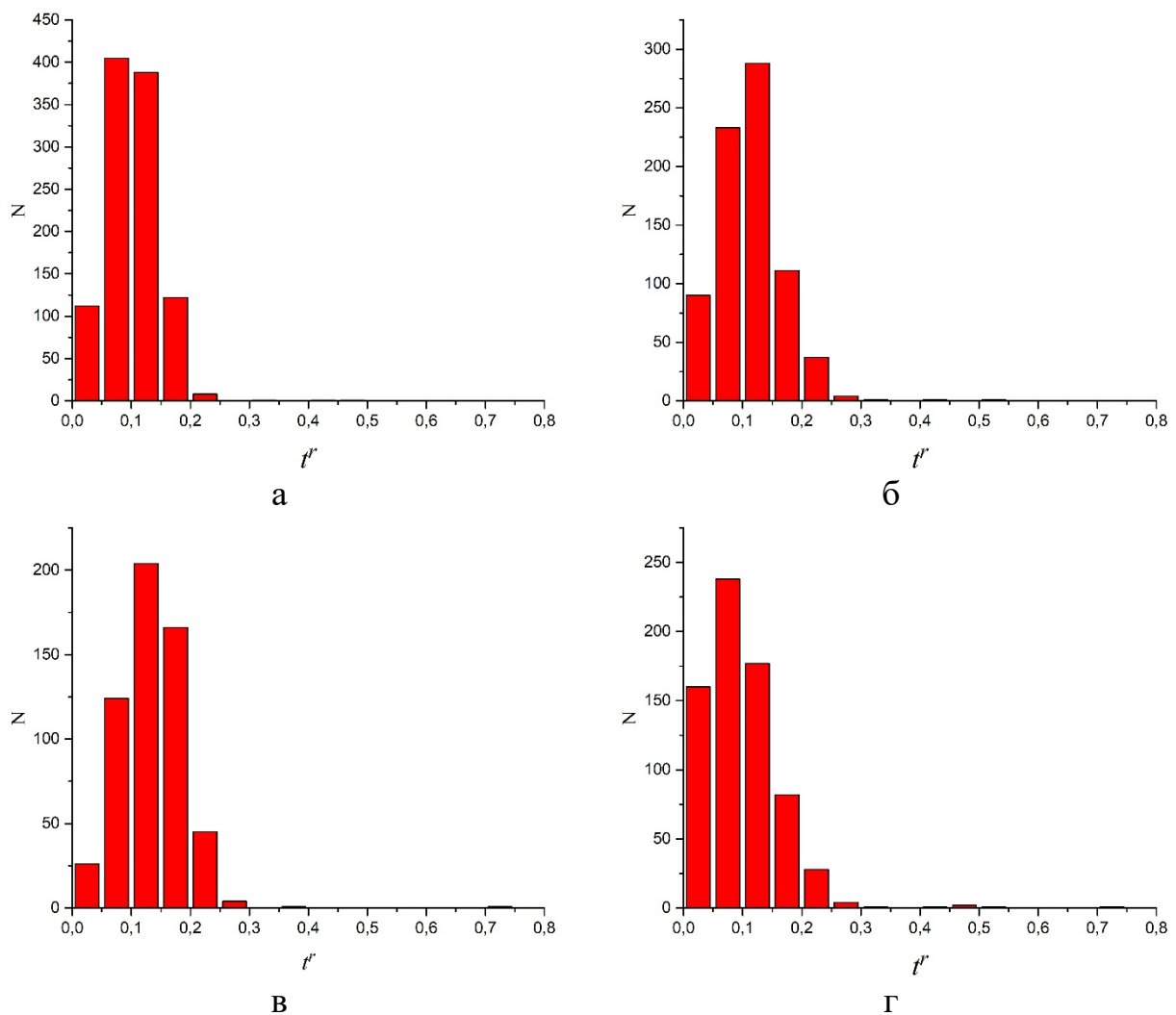


Рис. 5.31. Гістограма розподілу ямок за рівнем відносної глибини t_i^r для сплавів ВТ23 (а) та ВТ23М (б-г) за статичного (а,б) та ударного (в,г) навантаження

Статичний розтяг

Сплав ВТ23. Показано, максимальний масив ямок $N_{max} = 410$ шт – це ямки з величиною параметра $t_{max}^r = 0,075$ для даної вибірки $0 < t_{max}^r \leq 0,25$. Це свідчить про близькість за глибиною наявних у вибірці великих і дрібних ямок.

Сплав VT23M. Встановлено, що максимальний масив ямок $N_{max} = 280$ шт – це ямки з величиною параметра $t_{max}^r = 0,125$ для даної вибірки $0 < t_{max}^r \leq 0,35$. Це свідчить про те, що ці ямки мали іншу форму, ніж попередні.

Ударна в'язкість

Сплав VT23 (без ДНП). Встановлено, що максимальний масив ямок $N_{max} = 210$ шт. – це ямки з величиною параметра $t_{max}^r = 0,125$ для даної вибірки $0 < t_{max}^r \leq 0,30$.

Сплав VT23 (з ДНП). Встановлено, що максимальний масив ямок $N_{max} = 240$ шт. – це ямки з величиною параметра $t_{max}^r = 0,075$ для даної вибірки $0 < t_{max}^r \leq 0,30$.

Загалом аналізовані злами сформовано дрібними, вкрай дисперсними ямками, які розділені ділянками релаксації з мікроямковою будовою.

Ще однією характеристикою є відносна частка поверхні, вкритої ямками – a_r (3.5). Крім цього, визначали середній розмір ямки відповідно до [1]:

$$\bar{d} = \sqrt{S_d/S_i} \quad (5.22)$$

де $S_d = \sum_{i=0}^N a_i$ – сума площ всіх ямок відриву; $S_i = I_w I_h$ – площа зображення.

Значення відносних площ ямок a_r та перетинок a_b , а також інші параметри ямок в межах аналізованої ділянки, подано у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8. Кількісні результати аналізу зображень

Тип деформування		Відносна деформація, ε , %	\bar{d} , мкм	N , шт	Площа ямок, a_r , %	Площа перетинок, a_b , %
СР	VT23	17,40	2,84	1038	74,04	25,96
	VT23M	22,30	3,13	767	75,19	24,81
ДР	VT23M	–	3,75	571	80,22	19,78
	VT23M після ДНП	–	2,74	695	75,59	24,41

Форма ямок в'язкого відриву. Характер розвитку пошкоджень поверхні визначали за параметрами розташованих на ній ямок відриву [3, 49]. Емпірично встановлено, що для їх класифікації інформативним є коефіцієнт форми ямок K_c . Вважали, що значення коефіцієнта круглості K_c є параметром локалізації деформування ямки на мікрорівні внаслідок підростання тріщини, утвореної внаслідок їх об'єднання.

Побудовано точкові діаграми залежності параметра форми ямки K_c від її еквівалентного діаметра (рис. 5.32). Виявлено, що малі ямки відриву мають форму, близьку до круглої. Ямки більшого розміру починають витягуватися вздовж певного напрямку.

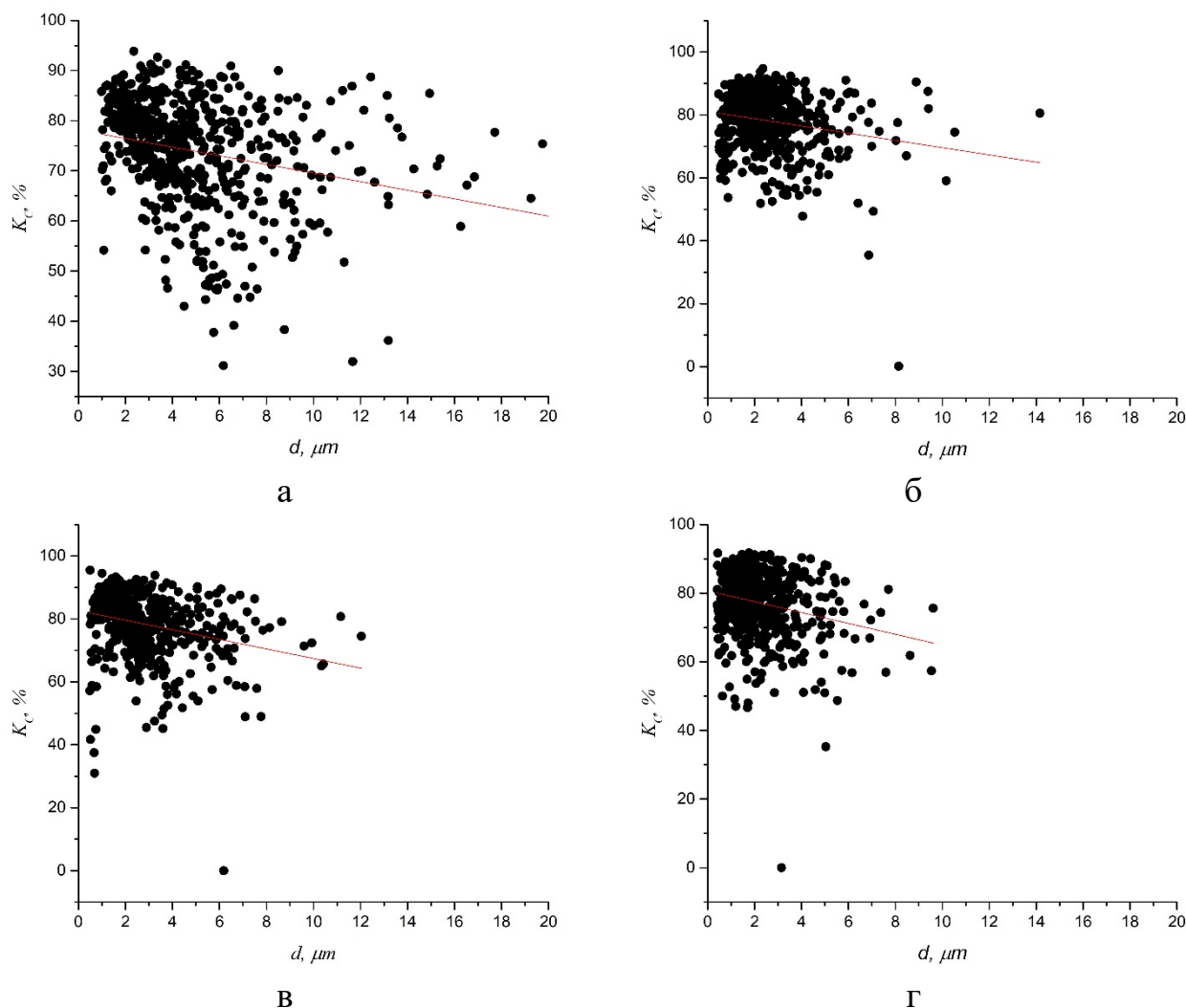


Рис. 5.32. Залежність параметра форми ямки K_c від її еквівалентного діаметра d_e для сплавів VT23 (а) та VT23М (б-г) за статичного (а,б) та ударного (в,г) навантаження. Наведено також прямі регресії, які описують отриману множину значень (5.11)

Статичний розтяг

Виявлено що титановий сплав VT23М має ямки дещо круглішої форми ніж сплав VT23. Це зумовлено особливістю технологічного процесу отримання матеріалу та перебігом процесу накопичення пошкоджень. Округлі ямки відриву утворювалися на ділянках структурної неоднорідності, зокрема в околі включень та на межах зерен, що супроводжувалося накопиченням локальних деформацій та руйнуванням матеріалу. Укрупнення ямок пов'язане насамперед з переходом до об'ємного напруженого стану, що спричиняє підростання та коалесценцію дефектів з формуванням великих ямок [71].

Ударна в'язкість

Сплав VT23М (без ДНП та з ДНП). Для обох випадків ударного руйнування матеріалу виявлено, що ямки мають крихітший вигляд. Проте помітно вплив пластичного течіння матеріалу. Деформовані контури ямок з гострими межами та їх деформація в напрямку процесу руйнування свідчить про змішаний (в'язко-крихкий) механізм формування дослідженої поверхні.

Особливістю об'єктів, які виявляє метод, є те, що вони оточені гребенями розподілу інтенсивності на вихідному зображенні. Запропонований метод враховує цю особливість і орієнтований на їх пошук, що дозволяє точніше виявити краї таких об'єктів на відміну від методів, орієнтованих на безпосередній аналіз інтенсивності пікселів зображення.

Встановлено, що титан VT23M мав кращі деформаційні властивості на макро- та мікрорівнях ніж VT23. Це підтверджено більшим розміром відносного параметра ямок відриву $\bar{d} = 3,13$ мкм (VT23M) та 2,84 мкм (VT23). ДНП спричиняє зменшення розміру та зростання кількості ямок відриву порівняно з початковим станом сплаву VT23M при випробуваннях на ударну в'язкість.

5.5. Дослідження поверхні руйнування титанового сплаву за допомогою згорткових нейронних мереж

5.5.1. Застосування нейромереж для діагностування поверхонь

Для неруйнівного візуального аналізу поверхонь широко використовують системи машинного зору. Вони спрямовані на розпізнавання візуальних шаблонів, характерних для дефектних та непошкоджених фрагментів поверхні. Промислове застосування таких систем вимагає від них надійності, точності та швидкості. Останні досягнення в області згорткових нейронних мереж та застосуванні графічних процесорів для виконання паралельних розрахунків забезпечують можливість практичного використання такого підходу в реальних виробничих умовах.

Веймер та інші [72] розробили метод ідентифікації загальних ознак зображення поверхні, реалізований на основі двошарової нейронної мережі. Ознаки зображення узагальнюються через поєднання результатів, отриманих за різних роздільних здатностей, з результатами статистичного аналізу сірого зображення. Принцип виявлення складається з двох головних частин. У навчальному режимі алгоритм використовує розмічену множину даних, на якій представлено як ділянки з дефектами, так і без дефектів. У подальшому класифікатор на основі нейромережі використовує навчальну вибірку даних для формування гіпотези (моделі).

У роботі [73] автори демонструють застосування глибокої згорткової нейромережі для автоматизованого виявлення дефектів на залізничних рейках. Для класифікації використано нейромережу з класичною згортковою структурою, запропонованою Ле-Куном та іншими [74]. Автори розробили три моделі нейромереж, які містять від 2 до 3 згорткових шарів та від 2 до 3 повнозв'язаних шарів з різною кількістю нейронів. Після кожного згорткового шару використовували узагальнюючий шар підвибірки. Зразки ділили на три класи. Перший містив рейки без дефектів, другий – з дефектами, третій – рейкові з'єднання. Застосуванням запропонованої нейромережі було досягнуто точності класифікації майже 92%.

Малекзаде зі співавторами [75] метод автоматизованого виявлення дефектів на обшивці літака, заснований на використанні глибоких нейромереж.

Зображення отримували шляхом безпосереднього огляду фюзеляжу. Для кожного зображення на основі показів досвідченого інспектора створювали бінарну маску, яка представляла пошкодження. З кожного зображення вибирали ділянки розміром 65×65 пікселів і окремо аналізували, відносячи її до одного з класів: "дефект" чи "норма". Автори використали згорткову нейромережі AlexNet [76] та VGG-F [77], попередньо навчені на базі зображень ImageNet. Пропонований алгоритм дозволив досягти точності в 96,37%, що забезпечило виявлення майже всіх дефектів фюзеляжу та суттєво зменшило робоче навантаження на працівників.

Танг та співавтори [78] розробили систему для виявлення дефектів поверхні дугового зварювання. Було використано згорткову нейромережу, яка містила сім шарів нейронів, серед яких три згорткових. Результати показали, що метод легко адаптується до нових видів дефектів та досягає точності 95,29%.

Алгоритм для виявлення дефектів поверхні сталейних пластин запропонували Тіан та Ксю [79]. Для цих цілей автори використали нейромережу на основі машини екстремального навчання (ELM) з єдиним шаром прихованих вузлів, у яких ваги, що з'єднують входи з прихованими вузлами, є випадково ініціалізованими й не уточнюваними. Точність виявлення дефектів на тестовій множині даних становила 90...94%. Процесорний час, необхідний для аналізу одного зображення, складав від 0,03 до 250 секунд.

Згорткову нейромережу для аналізу дефектів поверхні сталейних листів використали Жоу та колеги [80]. Розроблена модель містила сім шарів, з яких три – згорткових. Модель використали для класифікації дефектів на кілька класів: потертості, складки, включення, пітинги, подряпини та ін. Множину поверхневих дефектів отримали на виробничій лінії з виробництва гарячекатаної листової сталі. Модель навчали на різних навчальних зразках різного розміру, при різних гіперпараметрах нейромережі. Експерименти проводили з використанням open-source бібліотеки VLFeat's MatConvNet у поєднанні з бібліотекою NVIDIA cuDNN. Навчання проводили на звичайному ПК з графічним процесором NVIDIA GTX 970 та 4 Гб відеопам'яті. Модель досягла приблизно 99,9% точності класифікації при навчанні та приблизно 99% під час тестування.

5.5.2. Виявлення ямок відриву на поверхні титанового сплаву за допомогою нейромережі

Ми розробили метод [81] для виявлення на фрактограмах титанових сплавів ямок в'язкого відриву, оснований на використанні згорткової нейронної мережі. Для цього спроектовано та досліджено ряд моделей нейромереж із різним набором гіперпараметрів. Досліджено їх точність, швидкодію та вибрано оптимальну структуру нейромережі. Пропонована мережа містила два згорткових шари, два підвибіркових шари, та два повнозв'язних шари. Нейромережа класифікує пікселі на два класи: ямки та краї і видає імовірність приналежності кожного пікселя до одного з класів.

Для навчання нейромережі використали результат виявлення ямок за раніше розробленим алгоритмом [65]. В його основу покладено пошук країв ямок відриву. Він містить операції фільтрування набором фільтрів для виявлення

країв, адаптивне пороговання, скелетизацію, дилацію та виділення зв'язних областей. Кожен з цих кроків за практичного застосування потребує налаштування своїх параметрів. Використання навченої нейронної мережі дозволяє скоротити кількість параметрів, які потрібно налаштувати вручну, що спрощує процес аналізу зображень.

Навчальна вибірка нейронної мережі

На рис. 5.33,а показано фотозображення поверхні розриву титанового сплаву, отримане за допомогою електронного скануючого мікроскопа РЕМ-106И. На основі початкових зображень (рис. 5.33,а) та результатів виявлення ямок за алгоритмом [65] (рис. 5.33,б) формували навчальну вибірку для згорткової мережі.

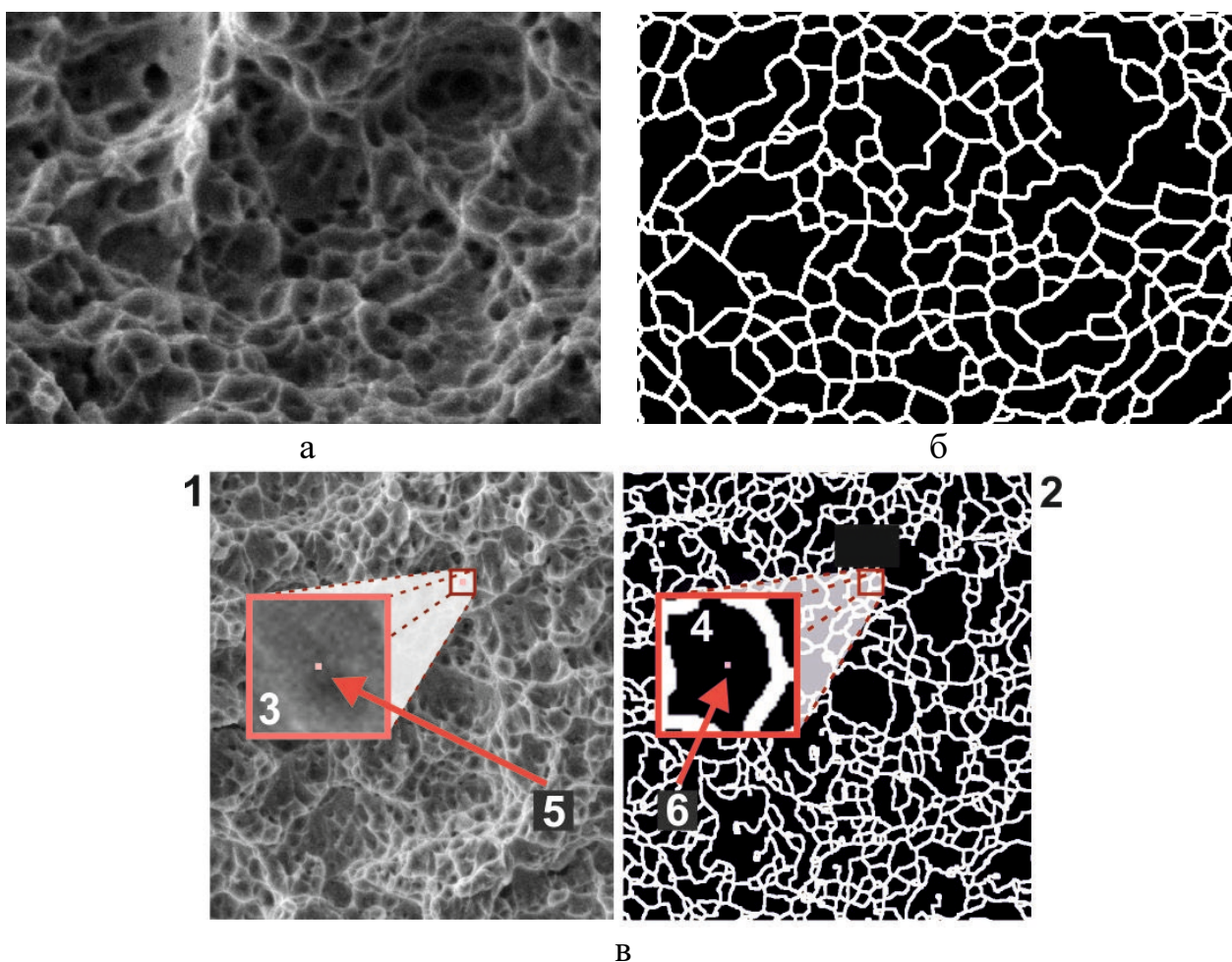


Рис. 5.33. (а) Ямки в'язкого відриву на поверхні зразка титанового сплаву VT23; (б) результат їх виявлення за допомогою алгоритму [65]; (в) схема, яка ілюструє принцип навчання нейромережі: (1) – навчальне зображення, (2) – зображення з мітками правильних відповідей, (3) – фрагмент навчального зображення розміром $2w_k + 1 \times 2w_k + 1$, який є елементом навчальної множини, (4) – фрагмент зображення з мітками, який за положенням і розмірам відповідає фрагменту (3), (5) – центральний піксель фрагмента (3), (6) – піксель, який містить мітку правильної відповіді для фрагмента (3)

Нехай початкове напівтонове зображення описує функція $i_o(x, y)$, а бінарне зображення з результатом – функція $i_s(x, y)$. Для кожного пікселя (x, y) початкового зображення розглядали квадратне вікно розміром $2w_k + 1 \times 2w_k + 1$ та координатами кутів $(x - w_k, y - w_k)$, $(x + w_k, y - w_k)$, $(x - w_k, y + w_k)$, $(x + w_k, y + w_k)$. Фрагмент початкового зображення $i_o(x, y)$, який потрапляв у це вікно, був одиничним навчальним зразком для нейронної мережі (рис. 5.33,в). Міткою правильної відповіді для такого фрагмента було значення $i_s(x, y)$. Таким чином, на вхід нейронної мережі подавали фрагмент початкового зображення з деяким центральним пікселем (x, y) , а на виході отримували результат – приналежність цього пікселя до одного з двох класів – "ямка" (мітка 0) чи "край" (мітка 1). Навчальна вибірка нейронної мережі, сформована на основі зображення $i_o(x, y)$ з розмірами $i_o^w \times i_o^h$, міститиме $(i_o^w - 2w_k) \cdot (i_o^h - 2w_k)$ зразків. Для зображення розміром 400×277 пікселів та $w_k = 15$ кількість навчальних зразків складає 91390. У загальному було сформовано навчальну вибірку обсягом понад пів мільйона зразків.

Архітектура згорткової нейронної мережі

Для виявлення ямок в'язкого відриву за зображеннями поверхні було спроектовано та досліджено 17 моделей згорткових нейронних мереж. Найвдаліші архітектури нейромереж наведено на рис. 5.34. Нейромережі реалізували за допомогою бібліотеки Keras [82] на основі засобів Theano та CUDA Toolkit [83]. CUDA – платформа для паралельних обчислень, розроблена компанією NVIDIA для розрахунків на основі графічних процесорів (GPU). Для навчання й тестування нейромережі використано робочу станцію з графічним процесором NVIDIA GeForce GT 630M.

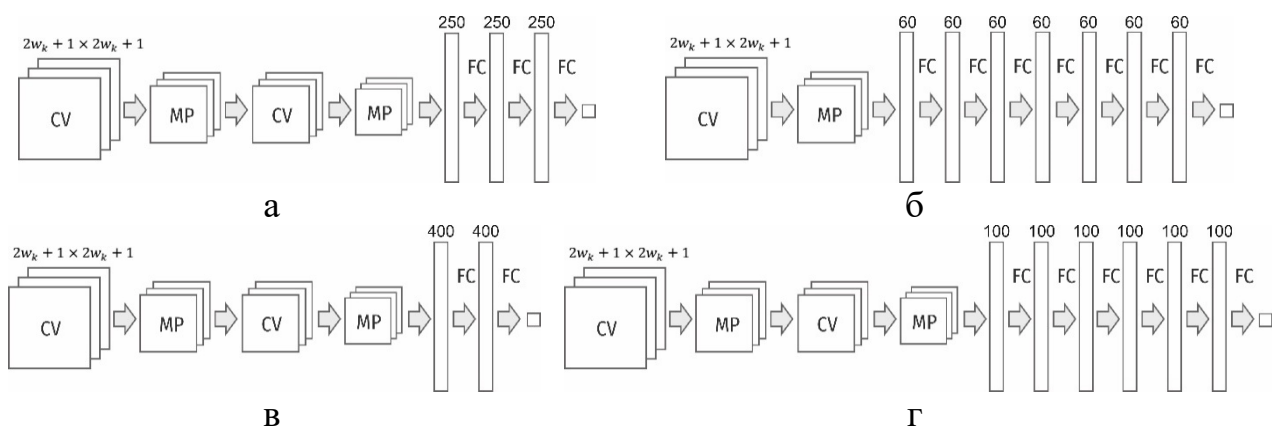


Рис. 5.34. Архітектури нейромереж для виявлення ямок в'язкого відриву. CV – згорткові шари, MP – макс-пулінгові шари, FC – повнозв'язні шари

У загальному структура цих мереж містить два блоки шарів: а) згорткові шари (у парі з підвибірковими) для виявлення просторових ознак, та б) повнозв'язні шари для узагальнення знайдених ознак. Вхідний шар у всіх моделях складався з $2w_k + 1 \times 2w_k + 1$ нейронів, а вихідний – з двох нейронів із функцією активації softmax. Перший з нейронів показує ймовірність того, що центральний піксель поданого на вхід фрагмента зображення належить класу "ямка", а другий – класу "край".

Таблиця 5.9. Структура та характеристики досліджених нейромереж. CV – згортковий шар (у дужках вказано кількість карт ознак та розмір ядра), MP – макс-пулінговий шар (у дужках вказано розмір вікна пулінга), FC – повнозв'язний шар (у дужках вказано кількість нейронів)

№	Опис моделі	W_k , пікс	Сер. тест. точність, %	Час діагност., с
1.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – CV(32×3×3) – FC(1024)	15	92,81	45
2.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – FC(250) – FC(250) – FC(250)	10	92,41	19
3.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – FC(100) – FC(100) – FC(100) – FC(100) – FC(100) – FC(100)	10	92,39	17
4.	CV(32×5×5) – MP(2×2) – CV(64×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – FC(1024)	15	92,23	61
5.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – FC(400) – FC(400)	10	92,11	12
6.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – FC(60) – FC(60) – FC(60) – FC(60) – FC(60) – FC(60)	10	92,08	8
7.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – FC(1024)	10	92,00	17
8.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – CV(32×3×3) – CV(32×3×3) – FC(1024)	10	91,91	24
9.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – FC(1024)	10	91,91	19
10.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – FC(200) – FC(200)	10	91,70	19
11.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – FC(100) – FC(100) – FC(100)	10	91,50	9
12.	CV(48×3×3) – MP(2×2) – FC(50) – FC(50) – FC(50) – FC(50) – FC(50) – FC(50) – FC(50) – FC(50)	10	91,44	11
13.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – FC(1024)	10	91,22	19
14.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – CV(20×3×3) – FC(400) – FC(400)	7	90,70	11
15.	CV(32×3×3) – MP(2×2) – CV(32×3×3) – CV(32×3×3) – CV(32×3×3) – FC(1024)	7	90,60	13
16.	CV(20×3×3) – MP(2×2) – CV(30×3×3) – MP(2×2) – FC(200) – FC(200)	7	89,95	7
17.	CV(20×5×5) – MP(4×4) – CV(32×3×3) – MP(4×4) – FC(1024)	15	85,21	18

Для нейронів прихованих згорткових шарів та узагальнюючих повнозв'язних шарів використовували лінійну функцію активації ReLU (Rectified Linear Unit). Вона може бути означена як $f(x) = \max(0, x)$. При попередньому аналізі зображень було досліджено точність нейромереж з функціями активації типу Sigmoid, Tanh та ReLU. Виявлено, що найкращу точність забезпечувала функція активації ReLU, тому в подальшому використовували лише її.

У ролі функції втрат використано категоріальну крос-ентропію. Якщо результат передбачення моделі $q(x)$, а правильний результат $p(x)$, то категоріальна крос-ентропія дорівнює $H(p, q) = -\sum_x p(x) \log(q(x))$. Крос-ентропія вимірює результативність моделі класифікації, вихід якої є ймовірнісним значенням у діапазоні від 0 до 1. Як метрику використали точність – долю правильних передбачень. Для навчання нейромережі використали оптимізатор Adam [84].

Досліджені моделі нейронних мереж відрізнялися кількістю та розміром згорткових та повнозв'язних шарів та розміром вхідного шару. Процес навчання зупиняли, якщо після 15 епох точність роботи на валідаційних даних не перевищувала максимальної досягнутої за попередній період точності.

Порівняння розроблених нейромереж

Головними критеріями вибору оптимальної архітектури нейромережі були: точність розпізнавання на тестових даних та час аналізу. Встановлено, що для дослідженого типу зображень використання більше двох згорткових шарів не приводить до суттєвого збільшення точності, але суттєво підвищує як час навчання, так і час аналізу зображення. Більше того, доволі ефективно працюють також нейромережі з одним згортковим шаром та достатньою кількістю карт ознак. Але в цьому випадку потрібен доволі глибокий блок повнозв'язних шарів. Потреба у малій кількості згорткових шарів говорить про те, що ознаки, які виділяє нейромережа для діагностики, є простими. Також виявлено, що ефективніше використовувати більшу кількість повнозв'язних шарів з меншим числом нейронів, ніж один повнозв'язний шар з великим числом нейронів. Це не тільки зменшує кількість навчальних параметрів нейромережі, але й знижує час її роботи. Точність діагностики при цьому залишається високою.

На рис. 5.35 показано результати усередненої точності a_t виявлення ямок на тестових зображеннях для досліджених нейромереж з різною кількістю навчальних параметрів P . Отримані результати свідчать, що більша кількість нейронів не є запорукою високої точності нейромережі. На рис. 5.35 можна виділити три групи нейромереж: А – прості, з малою кількістю параметрів та нижчою точністю; В – складніші, з більшою кількістю параметрів та високою точністю; С – найскладніші, з найбільшою кількістю параметрів та високою точністю. Найціннішими з практичної точки зору є нейромережі групи В, які поєднують простоту будови та точність діагностики.

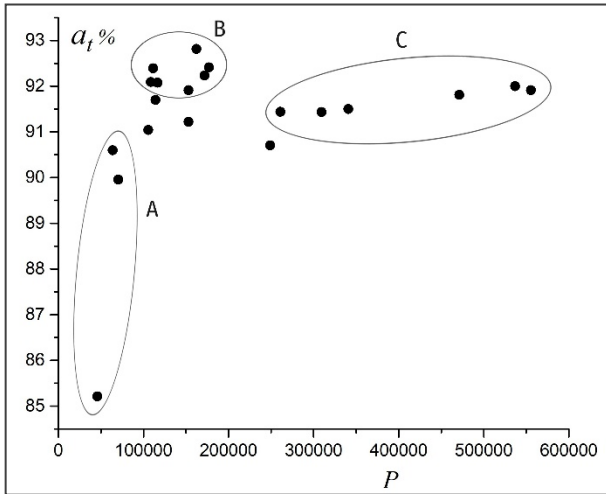


Рис. 5.35. Взаємозалежність між точністю a_t виявлення ямок та кількістю параметрів P нейромережі

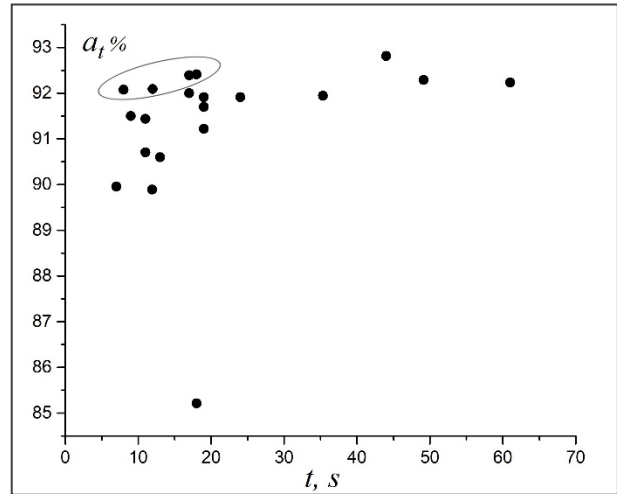


Рис. 5.36. Взаємозалежність між точністю a_t та тривалістю аналізу зображення t . Виділено нейромережі, зображені на рис. 5.34

На вхід нейромереж подавали фрагменти розміром $2w_k + 1 \times 2w_k + 1$ пікселів. Досліджено мережі при $w_k = 7$, $w_k = 10$ та $w_k = 15$. Виявлено, що для аналізованих зображень оптимальним є $w_k = 10$. При малому вікні ($w_k = 7$) точність діагностики є низькою. Велике вікно ($w_k = 15$) дозволяє досягти вищої точності, але її приріст дуже незначний порівняно з середнім вікном ($w_k = 10$).

Рис. 5.36 ілюструє залежність між точністю та часом діагностики досліджених нейромереж. З усіх архітектур нами виділено чотири, які поєднують хорошу швидкодію та точність діагностики. Саме їх структури приведено на рис. 5.34. Для подальшого практичного використання та аналізу ямок відриву титанового сплаву за фрактограмами вибрали нейромережу з архітектурою на рис. 5.34,в (таблиця 5.9, номер мережі 5). У середньому вона забезпечила точність діагностики на тестових даних 92,11%. Для цієї мережі $w_k = 10$, кількість навчальних параметрів 108622, час діагностики зображення розміром 400×277 пікселів – 12 сек (на вказаному раніше обладнанні). Мережу навчали протягом 77 епох.

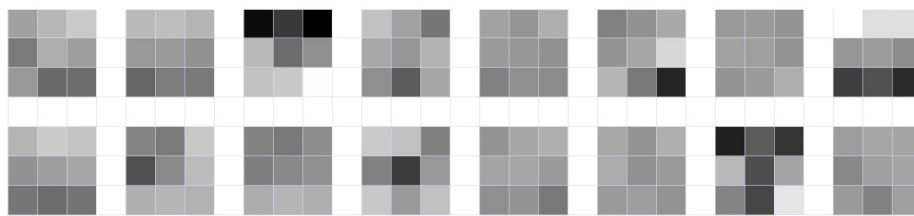


Рис. 5.37. Візуалізація ваг ядер навченої моделі. Чорна комірка представляє мінімальне значення ваги (-1.262), а біла – максимальне (1.010)

Візуалізація ваг 20 ядер навченої моделі (рис. 5.37) демонструє, що найбільший відгук вказаний згортковий шар даватиме для пікселів, які відповідають краям ямок. Тут представлені як ядра, що відповідають вертикальним/ горизонтальним перепадам яскравості, так і ядра з діагональним градієнтом.

5.5.3. Результати аналізу поверхні за допомогою згорткової нейромережі

На рис. 5.38,а показано отримані за допомогою електронного мікроскопа фрактограми поверхні розриву титанових сплавів ВТ23 та ВТ23М, а на рис. 5.38,б – результат діагностики за допомогою вибраної моделі нейромережі. Хоча при навчанні мережі використовували тільки дві мітки: 0 (належність ямці) та 1 (належність до краю), на виході для кожного пікселя отримується значення в межах діапазону $[0...1]$, яке показує імовірність приналежності до певного класу ("край", "ямка") відповідно до вибраної моделі нейромережі. Позначимо масив вихідних значень нейромережі для цілого зображення для класу "край", як $P_{cnn}(x, y)$. Візуалізація цього масиву подана на рис. 5.38,б.

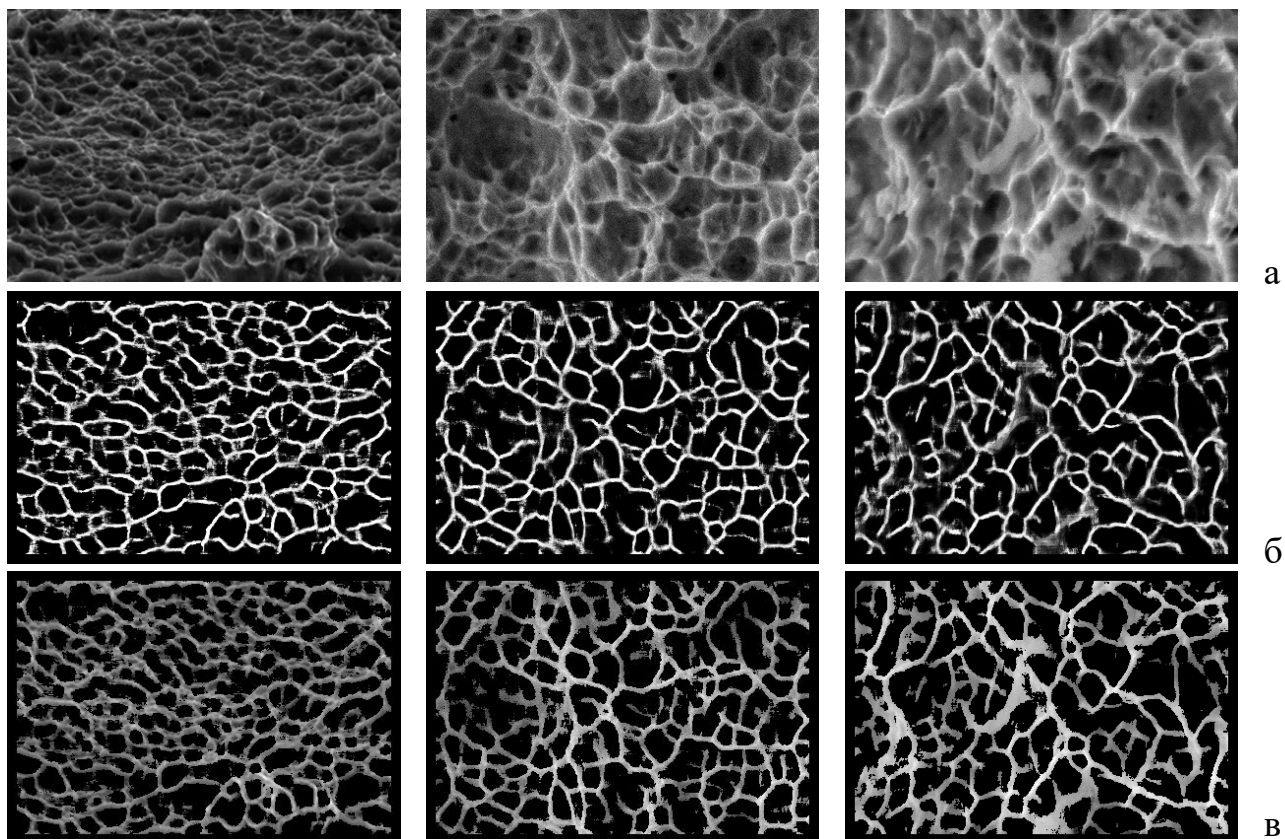


Рис. 5.38. (а) Фрактограми титанового сплаву ВТ23М (перше зображення) та ВТ23 (друге і третє зображення); (б) візуальне подання результату з виходу нейромережі для класу "край"; (в) результат виявлення ямок (чорні плями), накладений на фрактограми

Для прийняття однозначного рішення про приналежність пікселів до одного з класів потрібно вибрати певне граничне значення T . Пікселі, для яких $P_{cnn}(x, y) \leq T$, вважатимуться належними до класу "ямка", в протилежному випадку – до класу "край". Типова нормалізована гістограма розподілу значень $P_{cnn}(x, y)$ для одного з досліджених зображень подана на рис. 5.39. Близькі до 0 значення P_{cnn} відповідають пікселям, які з високою ймовірністю належать до класу "ямка". Близькі до 1 значення відповідають пікселям, які з високою ймовірністю належать класу "край". З гістограми видно, що два піки згруповані біля двох протилежних значень – 0 і 1. Це є ознакою успішної роботи нейромережі. Перший (більший) пік для $P_{cnn} = 0 \dots 0.15$ відповідає чітко

розпізнаному класу "ямка", а другий (менший), для $P_{cnn} = 0.85 \dots 1$ – чітко розпізнаному класу "край". Сумарно цим двом зонам належить понад 80% всіх пікселів зображення. Решта 20% пікселів розподілена у діапазоні $P_{cnn} = 0.15 \dots 0.85$. Таким чином, вибір границі T у цьому діапазоні несуттєво вплине на результат.

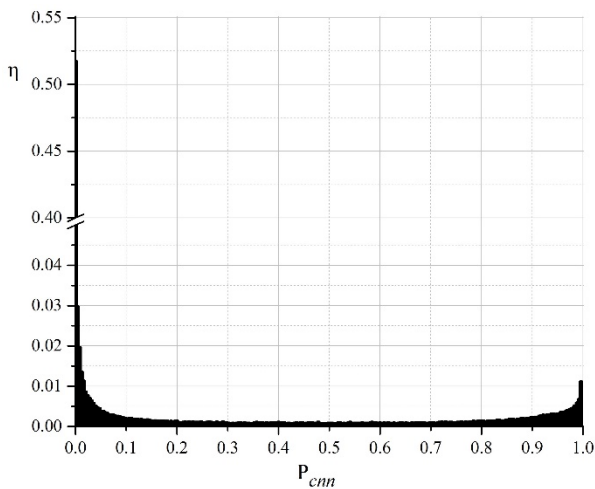


Рис. 5.39. Нормалізована гістограма розподілу значень $P_{cnn}(x, y)$. η – частка пікселів зображення, яким відповідає значення P_{cnn}

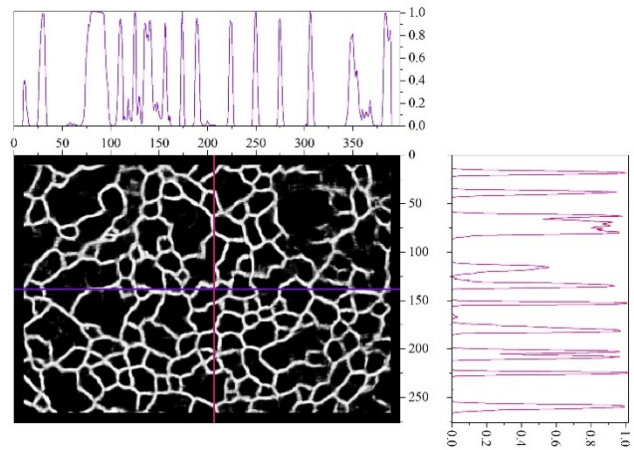


Рис. 5.40. Візуалізація масиву $P_{cnn}(x, y)$ і його перерізи у двох взаємоперпендикулярних напрямках

На рис. 5.40 показано візуальне подання масиву $P_{cnn}(x, y)$ для одного із зображень та приведено його перерізи вздовж двох координатних осей. Перерізи демонструють, що піки, які відповідають розпізнаним нейромережею краям ямок, мають високу крутизну. Це підтверджує висновок, що вибір границі у середньому діапазоні P_{cnn} незначно вплине на кінцевий результат. Також видно, що висота цих піків на перерізах різна, тому вибір T у верхньому діапазоні спричинить втрату деяких країв. У той же час навіть при дуже низьких значеннях $P_{cnn} < 0.1$ окремі ямки добре виділені, оскільки крутизна ліній перерізу висока.

Таким чином, вибір границі T у верхньому діапазоні значень ($P_{cnn} \geq 0.85$, див. рис. 5.39) приведе до виділення пікселів, які з високою імовірністю належать краям, але при цьому не всі краї можуть бути виявленими. Це може привести до "зливання" суміжних об'єктів – ямок. Вибір T у нижньому діапазоні ($P_{cnn} \leq 0.15$) забезпечить виділення пікселів, які з високою імовірністю належать ямкам. Так як специфікою даного завдання є дослідження саме ямок, то границю T вибирали у цьому нижньому діапазоні. Для дослідженої групи зображень використовували $T = 0.1$. Це відповідає відбору у клас "ямка" пікселів, для яких нейромережа обчислила імовірність понад 90% за цей клас.

На рис. 5.38,в приведено результати виявлення ямок, накладені на початкові зображення (для підвищення контрастності на початкових зображеннях збільшено яскравість). Експертною оцінкою встановлено, що навчена нейромережа добре виявляє зони зображення, які відповідають ямкам. Цікавою особливістю є те, що при візуальному аналізі результатів роботи виявлено, що часто нейромережа вирізняє ямки краще, ніж початковий метод, на основі якого

проводили її навчання. Найвірогідніше пояснення цього феномену в тому, що нейромережа вибраної архітектури виділяє 40 карт ознак, тоді як початковий метод [65] використовує лише два просторових фільтри (тому орієнтується лише на дві ознаки).

5.5.4. Порівняння результатів запропонованої нейромережі з результатами початкового алгоритму

Розроблена нейромережа виконує попиксельну обробку зображення, роблячи передбачення для кожного пікселя про його приналежність до одного з класів. Але практичну цінність представляє розрахунок параметрів ямок на зображенні: їх загальна площа, еквівалентний діаметр, кут нахилу тощо. Порівняння результатів, отриманих на основі запропонованої нейромережі, з результатами, отриманими за допомогою початкового алгоритму [65], показують їх високу схожість (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10. Порівняння результатів запропонованої нейромережі та методу [65]

Параметр	Відхилення результату розробленої нейромережі відносно результату методу [65]
Загальна площа ямок	< 4%
Кількість ямок	< 4%
Середній еквівалентний діаметр ямки	< 3%

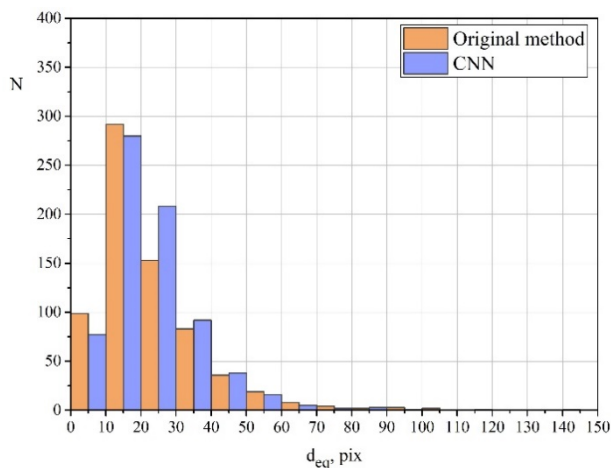


Рис. 5.41. Діаграма розподілу еквівалентних діаметрів, розрахованих за допомогою початкового методу [65] та за допомогою запропонованої CNN

На рис. 5.41 приведено діаграму розподілу еквівалентних діаметрів для одного з досліджених зображень, розрахованих за допомогою обох способів. Діаграма ілюструє кілька особливостей роботи запропонованого підходу порівняно з початковим методом:

- малих ямок нейромережа виявляє менше. Це можна пояснити тим, що старий метод орієнтований на пошук перепадів яскравості, тому на однорідних ділянках зображення інколи також хибно розпізнаються ямки;
- великих ямок нейромережа також виявляє менше. Це пояснюється більшою чутливістю нейромережі, яка враховує значно більше карт ознак. Внаслідок цього великі ямки стають розділеними на кілька менших;

- ямок середнього розміру нейромережа виявляє більше. Ймовірно, ця кількість зростає за рахунок розділу деяких великих ямок та об'єднання частини малих ямок.

Таким чином, експериментальні результати показують високу точність методу та свідчать про можливість його практичного застосування. Виявлено, що у загальному випадку нейромережа краще розпізнає шукані об'єкти, ніж початковий метод на основі набору фільтрів [65].

До розділу 1

1. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф. С. Домбровский, Л. К. Лещинский. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1995. – 197с.
2. Мазур Н.В. Повышение стойкости роликов МНЛЗ на основе результатов исследования и моделирования процессов при их изготовлении, восстановлении и эксплуатации автореф. дис. ... канд. техн. наук, Магнитогорск, 2009. – 20 с.
3. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів / П. В. Ясній, П. О. Марущак. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
4. Біщак Р. Т. Оцінювання зародження та розвитку пошкодженості в теплостійкій сталі за термоциклічного навантаження: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – 2010. – 21 с.
5. Розпорошена та локалізована пошкодженості теплостійких сталей / П. О. Марущак, Р. Т. Біщак, Д. Я. Баран. – Тернопіль: Лібра Терра, 2016. – 227 с.
6. Li T., Yang W. Critical linkages of coalescing microcracks under stress loading // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2002. – 25. – P. 499-508.
7. Feng X.Q., Li J.Y., Yu S.W. A simple method for calculating interaction of numerous microcracks and applications // *International Journal of Solids and Structures*. – 2003. – 40. – P. 447-464.
8. Kachanov M. Elastic solids with many cracks and related problems // *Advances in Applied Mechanics*. – 1993. – 30. – P. 259-445.
9. Kachanov M. On the problems of crack interactions and crack coalescence // *International Journal of Fracture*. – 2003. – 120(3). – P. 537-543.
10. Mauge C. and Kachanov M. Effective elastic properties of an anisotropic material with arbitrarily oriented interacting cracks // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1994. – 42. – P. 561-584.
11. Shen L.X. and Li J. Effective elastic moduli of plates with various distributions and sizes of cracks // *International Journal of Solids and Structures*. – 2004. – 41. – 7471-7492.
12. Mohan A., Poobal S. Crack detection using image processing: A critical review and analysis, *Alexandria Engineering Journal* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.020>.
13. Dhital D., Lee J.R. A fully non-contact ultrasonic propagation imaging system for closed surface crack evaluation // *Exp. Mech*. – 2012. – 52(8). – P. 111-1122.
14. Yong Hu, Chun-Xia Zhao. A local binary pattern based methods for pavement crack detection // *Journal of Pattern Recognition Research*. – 2010. – 1. – P. 140-147.
15. Ojala T., Pietikainen M., Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2002. – 24(7). – P. 971-987.
16. Zhang Yiyang The design of glass crack detection system based on image pre-processing technology // *Proceedings of information technology and artificial intelligence conference*. – 2014. – P. 39-42.
17. Ming Hao, Caifeng Lu, Guoqing Wang, Wei Wang An improved neuron segmentation model for crack detection – image segmentation model // *Cybernetics and Information Technologies*. – 2017. – 17(2). – P. 119-133.
18. Al-Kofahi K. A., Ali C., Sharie L. et al. Median-based robust algorithms for tracing neurons from noisy confocal microscope images // *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. – 2003. – 7(4). – P. 302-317.
19. Peng H., Long F., Myers G. Automatic 3D neuron tracing using all-path pruning // *Bioinformatics*. – 2011. – 27(13). – P. i239-i247.
20. Adhikari R.S., Moselhi O., Bagchi A. Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection // *Autom. Constr.* – 2014. – 39. – P. 180-194.

21. Gunaratne M., Amarasiri S., Nasser S. Investigation of automated and interactive crack measurement system, Tampa, Florida, 2008. – 106 p.
22. Syahrian M.N., Risma P., Dewi T. Vision-based pipe monitoring robot for crack detection using canny edge detection method as an image processing technique // *Kinetik*. – 2017. – 2(4). – P. 243-250.
23. Canny J. A Computational approach to edge detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1986. – 6. – P. 679-698.
24. Alam S.Y., Loukili A., Grondin F., Rozie're E. Use of the digital image correlation and acoustic emission technique to study the effect of structural size on cracking of reinforced concrete // *Eng. Fract. Mech.* – 2015. – 143. – P. 17-31.
25. Image analysis of microscopic crack patterns applied to thermal fatigue heat-checking of high temperature tool steels / S. Le Roux, F. Medjedoub, G. Dour, F. Rézaï-Aria // *Micron*. – 2013. – 44. – P. 347–358.
26. Le Roux S., Rézaï-Aria F. Topological and metric properties of microscopic crack patterns: application to thermal fatigue of high temperature tool steels // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2013. – 46. – P. 295-301.
27. Jong Pil Yun, SungHoo Choi, Boyeul Seo, Chang Hyun Park, Sang Woo Kim Defects Detection of Billet Surface Using Optimized Gabor Filters // *Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
28. Arena A., Piane C.D., Sarout J. A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: Application to micro-cracks description in rocks // *Computers & Geosciences*. – 2014. – 66. – P. 106-120.
29. Hampel U., Maas H.-G. Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2009. – 64. – P. 345-350.
30. Tien Sy Nguyen, Manuel Avila, Begot Stephane Automatic detection and classification of defect on road pavement using anisotropy measure // *17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009)*, Glasgow, Scotland, August 24-28, 2009.
31. Roli F. Measure of texture anisotropy for crack detection on textured surfaces // *Electronics Letters*. – 1996 – 32. – P. 1274-127.
32. Lins R.G., Givigi S. N. Automatic crack detection and measurement based on image analysis // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2016. – 65(3). – P. 583-590.
33. Rabaha M., Elhattab A., Fayad A. Automatic concrete cracks detection and mapping of terrestrial laser scan data // *NRIAG J. Astron. Geophys.* – 2013. – 2 (2). – P. 250-255.
34. Analysis of SEM digital images to quantify crack network pattern area in chromium electrodeposits / M. Vidal, M. Ostra, N. Imaz, E. Garcia-Lecina, C. Ubide // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – 285. – P. 289-297.
35. Hassani A., Tehrani H.G. Crack detection and classification in asphalt pavement using image processing // *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*. – 2008. – P. 891-896.
36. Лазерна ударно-хвильова дія на матеріали: Монографія / Ю.М. Нікіфоров, Б.П. Ковалюк – Тернопіль: ТНТУ. – 2015. – 272 с.
37. Fractographic analysis of surface and failure mechanisms of nanotitanium after laser shock-wave treatment / P. Maruschak, A. Menou, M. Chausov, V. Mocharskyi // *Key Engineering Materials*. – 2014. – 592-593 – P. 346-349.
38. Эффект повышения коррозионной стойкости стали 15Х13МФ при облучении лазером в режиме генерации ударных волн / В.А. Янушкевич, Ю.Н. Никифоров, М.М. Нищенко, Б.П. Ковалюк, В.Б. Гладь, В.С. Мочарский // *Перспективные материалы*. – №6. – 2012. – С. 60-65.
39. Laser shock peening induced surface nanocrystallization and martensite transformation in austenitic stainless steel / L. Zhou, W. He, S. Luo, C. Long, C. Wang, X. Nie, G. He, et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – 655. – P. 66-70.
40. Petan L., Ocaña J. L., Grum J. Influence of laser shock peening pulse density and spot size on the surface integrity of X2NiCoMo18-9-5 maraging steel // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – 307, Part A. – P. 262-270.

41. Celen S., Efeoglu C., Ozden H. Pulsed laser-induced micro-pits: As bone stabilizers // *Physics Procedia*. – 2011. – 12(PART 2). – P. 245-251.
42. Çelen S., Ozden H. Laser-induced novel patterns: As smart strain actuators for new-age dental implant surfaces // *Elsevier Applied Surface Science*. – 2012. – 263. – P. 579-585.
43. Çelen S. A novel strain energy density algorithm for laser induced micro-hollows // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2015. – 70. – P. 45-50.
44. Thomas T. R. *Rough Surfaces*, Imperial College Press: London, 2nd edition, 1999, ISBN 1-86094-100-1.
45. Luk F., Huynh V., North W. Measurement of surface roughness by a machine vision system // *Journal of Physics E-Scientific Instruments*. – 1989. – 22. – P. 977-980.
46. Younis M. A. Online surface roughness measurements using image processing towards an adaptive control // *Computers Industrial Engineering*. – 1998. – 35(1-2). – P. 49-52.
47. Wong P.L., Li K.Y. In-process roughness measurement on moving surfaces // *Optics and Laser Technology*. – 1999. – 31. – P. 543-548.
48. Tuceryan M. and Jain A. K. *Texture analysis. handbook pattern recognition and computer vision*, World Scientific, Singapore, 1993. – P. 235-276.
49. Randen T., Husøy J. H. Filtering for texture classification: A comparative study // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1999. – 21(4). – P. 291-310.
50. Haralick R., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification // *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*. – 1973. – 3. – P. 610-621.
51. Grigoriev A.Ya., Chizhik S.A., Myshkin N.K. Texture classification of engineering surfaces with nanoscale roughness // *Int. J. Mach. Tools Manufact.* – 1998. – 38(5-6). – P. 119-724.
52. Choi K.Y., Grigoriev A. Ya., Myshkin N.K. Analysis of tribochemical surface damage by image processing (analysis of tribochemical damages) // *Tribology Letters*. – 2002. – 13(2). – P. 125-129.
53. Jianbo Zhang *Detection and monitoring of wear using imaging methods* // Dissertation to obtain the doctor's degree at the University of Twente, Netherlands, 2006. – 158 p.
54. Zitova B., Flusser J. Image registration methods: A survey // *Image and Vision Computing*. – 2003. – 21(11). – P. 977-1000.
55. Lihong Li, Qingbin An An in-depth study of tool wear monitoring technique based on image segmentation and texture analysis // *Measurement*. – 2016. – 79. – P. 44-52.
56. Feliciano F.F., Leta F.R., Mainier F.B. Texture digital analysis for corrosion monitoring // *Corrosion Science*. – 2015. – 93. – P. 138-147.
57. Evaluation of wear in rolling contact tests by means of 2D image analysis / I. Bodini, C. Petrogalli, M. Faccoli, M. Lancini, S. Pasinetti, G. Sansoni, F. Docchio, A. Mazzù // *Wear*, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.023>.
58. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear / T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Kłodowski, D.Yu. Pimenov // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – 88. – P. 100-110.
59. Ferreira A., Giraldo G. Convolutional neural network approaches to granite tiles classification // *Expert Systems With Applications*. – 2017. – 84. – P. 1-11.
60. On comparing colour spaces from a performance perspective: Application to automated classification of polished natural stones / F. Bianconi, R. Bello, A. Fernández, & E. González // *In New trends in image analysis and processing. In Lecture notes in computer science: Vol. 9281 Genoa, Italy: Springer, 2015. – P. 71-78.*
61. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показанием датчиков деформаций интегрального типа, Новосибирск: Наука, 2004. – 207 с.
62. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Сызранцева К.В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа, Новосибирск: Наука, 2004. – 188 с.
63. Игнатович С.Р., Карускевич М.В. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов, Нац. авиац. ун-т. – Киев: НАУ, 2014. – 259 с.

64. Розенберг А.Ю. Методы экспериментальной оценки нагруженности и долговечности зубчатых колес с помощью гальванических медных датчиков циклических деформаций: дис. ... канд. техн. наук: Курган, 1985. – 223 с.
65. Котельников А.П. Диагностика усталости металлоконструкций кранов датчиками деформации интегрального типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук: Курган, 2003. – 16 с.
66. Голофаст С.Л. Методология оценки нагруженности и усталости металлоконструкций и элементов приводов датчиками деформации интегрального типа: автореферат дис. ... докт. техн. наук: Ижевск, 2004. – 35 с.
67. Сызранцев В.Н., Голофаст Л., Маленков А.И. Методы экспериментального исследования зубчатых передач с помощью датчиков деформаций интегрального типа: Учеб, пособие, Курган: КМИ, 1995. – 86 с.
68. Патент 2212638 (Россия), С2 7G 01 L 1/00, 1/22. Способ определения концентрации напряжений в деталях машин / Сызранцев В.Н., Троценко Д.А., Котельников А.П., Антипов Г. - № 2001124675/28; Заявлено 06.09.2001; Опубликовано 20.09.2003 Бюл. № 28.
69. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий, Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 285 с.
70. Образование самоподобных структур на фольгах монокристаллов алюминия $\{100\}\langle 001\rangle$ при циклическом растяжении / П.В. Кузнецов, И.В. Петракова, Ю.Г. Гордиенко, Е.Э. Засимчук, В.Л. Карбовский // Физическая мезомеханика. – 2007. – 10(6). – С. 33-42.
71. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. Структурно-механические особенности пластической деформации фольг монокристаллов алюминия, наклеенных на плоские образцы алюминиевого сплава при несвободном циклическом растяжении // Физическая мезомеханика. – 2008. – 11(6). – С. 102-114.
72. Cherepanov G.P. On the theory of thermal stresses in a thin film on a ceramic substrate // J. Appl. Phys. – 1994. – 75(2). – P. 844-849.
73. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Петракова И.В. О роли неустойчивости Гринфелда при формировании твидовой структуры на поверхности кристаллов алюминия при циклическом растяжении // Физическая мезомеханика. – 2010. – 13(1). – С.11-21.
74. Сызранцев В.Н. Синтез зацеплений цилиндрических передач с локализованным контактом: дис. ... докт. техн. наук, Курган, 1989. - 429 с.
75. Сызранцев В.Н., Добрынько Л.В. Методы прогнозирования долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа: Учеб, пособие, Курган: КМИ, 1993. – 104 с.
76. Диагностика усталости несущих систем и элементов транспортных машин с помощью датчиков деформаций интегрального типа / В.И. Сызранцев, С.Л. Голофаст, А.И. Маленков, К.В. Колпакова: Учеб. пособие. – Курган: КГУ, 1996. – 87 с.
77. Богомоллов О.В. Диагностика нагруженности и ресурса роторов насосных агрегатов по показаниям датчиков деформаций интегрального типа: автореферат диссертации ... кандидата технических наук. – Тюмень, 2007. – 14 с.
78. Змызгова Т.Р. Математические модели и алгоритмы компьютерной обработки цифровых изображений реакции датчиков деформации интегрального типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 21 с.
79. Москвин П.В. Разработка методики прогнозирования остаточного ресурса сварных металлоконструкций с использованием датчиков деформации интегрального типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2007. – 21 с.
80. Слесарев Е.И. Совершенствование методов оценки усталостной поврежденности и ресурса деталей машин с помощью датчиков деформаций интегрального типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2005. – 22 с.
81. Сызранцева К.В. Методическое и программное обеспечение измерения напряжений в деталях машин датчиками деформации интегрального типа: дис. .канд. техн. наук / К.В. Сызранцева. Курган, 1998. – 154 с.

82. Кузнецов П.В., Панин В.Е., Шрайбер Ю. Фрактальная размерность как характеристика стадий деформации на мезоуровне при циклическом и активном нагружении // *Материаловедение*. – 2000. – №10. – С. 23-29.
83. Fatigue gage utilizing surface roughening of aluminum foil / Y. Nagase, Y. Sawaki, F. Moritake and H. Yoshida // *J. Eng. Mater. Technol.* – 117(1). – P. 56-61.
84. Scott, W. R., U.S. Patent, Color displaying fatigue sensor, Patent №. 4,015,465, 1977.
85. Tensidyne Corp., (1986), U.S. Patent, Device for Monitoring Fatigue Life, Patent № 4,590,804.
86. Kitaoka S. and Ono Y. Biaxial stress measurement by electrodeposited copper foil with circular holes // *Strain*. – 2006. – 42. – P. 49-56.
87. Ono Y., Kitaoka S. Cyclic stress measurement method using grain size and occurrence rate of grown grains in electrodeposited copper foil // *Strain*. – 2011. – V. 47. – Iss. 2. – P. 154–161.
88. Ono Y., Morito S. Effect of ambient temperature on stress measurement method using copper foil // *Strain*. – 2014. – 50(4). – 4. – P. 292–300.
89. A. Kato Stress measurement by copper electroplating aided by a personal computer // *Experimental Mechanics*. – 1987. – 27(2). – P. 132–137.
90. Sugiura M. and Seika M. An application of computer image-processing and filmy replica technique to the copper electroplating method of stress analysis // *Experimental Techniques*. – 1994. – 18. – P. 33-36.
91. Панин С.В., Любутин П.С., Титков В.В. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации, Отв. ред. А.А. Светлаков, Томск: Издательство СО РАН, 2017. – 324 с.
92. Патент 2372604 С1 (Россия) Автономный комплекс сбора информации об усталостных изменениях конструкций / О.Н. Кузяков, В.Н. Сызранцев, А.М. Марголин. - № 2008112513/28; Заявлено 31.03.2008; Опубликовано 10.11.2009. Бюл. № 31.
93. El Sodani S. M. Profilometric analysis of fractures // *Metallography*. – 1978. – 11. – P. 246-336.
94. Broek D. The role of inclusions in ductile fracture and fracture toughness // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1973. – 5(1). – P. 55-56.
95. Rogers H.C. The tensile fracture of ductile metals // *AIME Trans.* – 1960. – 218. – P. 498-506.
96. Thompson A.W. Ductile fracture topography: Geometrical contributions and effects of hydrogen // *Metallurgical Transactions A*. – 1979. – Vol. 10(6). – P. 727-731.
97. Thompson A.W. The relation between changes in ductility and in ductile fracture topography: Control by microvoid nucleation // *Acta Metallurgica*. – 1983. – Vol. 31(10). – P. 1517-1523.
98. Thompson A.W., Ashby M.F. Fracture surface micro-roughness // *Scripta Metallurgica*. – 1984. – 18(2). – P. 127-130.
99. Widgery D.J., Knott J.F. Method for quantitative study of inclusions taking part in ductile fracture process // *Metal Science*. – 1978. – Vol. 12(1). – P. 8-11.
100. Deformation behavior and plastic instabilities of ultrafine-grained titanium / D. Jia, Y. M. Wang, K. T. Ramesh, E. Ma, Y. T. Zhu, and R. Z. Valiev // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – 79. – P. 611-613.
101. Modelling and characterization of ductile fracture surface in Al-Si alloys by means of Voronoi tessellation / A. Kruglova, M. Roland, S. Diebels, T. Dahmen, P. Slusallek, F. Mücklich // *Materials Characterization*. – 2017. – 131. – P. 1-11.
102. Dutta S., Das A., Barat K., Roy H. Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. – 2012. – 45(5). – P. 1140-115.
103. Schwalbe K.-H., Backfisch W. Correlation between fracture toughness, tensile properties, fracture morphology and microstructure of a high-strength steel / *Proc. of Int. conf «ICF4», Waterloo, Canada, June 19-24, 1977.* – P. 73-78.
104. Schwalbe K.-H. On the influence of microstructure on crack propagation mechanisms and fracture toughness of metallic materials // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1977. – 9(4). – P. 795-832.

105. Anastasia Kruglova, Michael Roland, Stefan Diebels, Tim Dahmen, Philipp Slusallek, Frank Mücklich. Modelling and characterization of ductile fracture surface in Al-Si alloys by means of Voronoi tessellation // *Materials Characterization*. – 2017. – 131. – P. 1-11.
106. Relationship of grain size and deformation mechanism to the fracture behavior in high strength–high ductility nanostructured austenitic stainless steel / R.D.K. Misra, X.L. Wan, V.S.A. Challa, M.C. Somani, L.E. Murr // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – 626. – P. 41-50.
107. Murphy T.F., Lindsley B. Metallographic Analysis of PM Fracture Surfaces // *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials-2007*, compiled by J. Engquist and T.F. Murphy, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 2007, Part 11. – P. 1-15.
108. Three dimensional (3D) characterization and modeling of porosity in powder metallurgy (P/M) steels / N. Chawla, J.J. Williams, X. Deng, and C. McClimon // *International Journal of Powder Metallurgy*. – 2009. – 45. – P. 19-27.
109. Komenda J., Maroli B. and Hoglund L. Recognition of patterns on fracture surfaces by automatic image analysis // *Image Anal Stereol.* – 2002. – 21. – P. 207-213.
110. Kolednik O., Scherer S., Schwarzbock P., Werth P. Quantitative fractography by means of a new digital image analysis system, in ECF13, Amsterdam, 2000, P. 1-7.
111. Bastidas-Rodriguez M.X., Prieto-Ortiz F.A., Espejo E. Fractographic classification in metallic materials by using computer vision // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – 59. – P. 237-252.
112. Fractographic classification in metallic materials by using 3D processing and computer vision techniques / M. X. Bastidas-Rodríguez, F.A. Prieto-Ortíz, É. Espejo-Mora // *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing.)*. – 2016. – 25(43). – P. 83-96.
113. Samik Dutta, Arpan Das, Kaustav Barat, Himadri Roy Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis // *Measurement*. – 2012. – 45. – P. 1140-1150.

До розділу 2

1. Биргер И.А. Техническая диагностика, М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Богомолов А.М., Твердохлебов В. А. Диагностика сложных систем, Київ.: Наук. думка, 1974. – 128 с.
3. Домников И.Ф. Техническая диагностика машин, М.: Моск. рабочий, 1978. – 152 с.
4. Сызранцев В.Н. Диагностика остаточного ресурса несущих элементов металлоконструкций машин // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 2005. – № 6. – С. 25–30.
5. Yasniy P., Maruschak P., Konovalenko I., et al. Multiple cracks on continuous caster rolls surface: a three-dimensional view // *Proc. of the 4-th International conference "Processing and Structure of Materials"*. Palic, Serbia, 2010. – P. 7-12.
6. P. Yasniy, I. Konovalenko, P. Maruschak Investigation into the geometrical parameters of a thermal fatigue crack pattern, WSEAS Int. Conference «New aspects of engineering mechanics, structures and engineering geology», Heraklion, Crete Island, Greece, 2008. – P. 61-66.
7. Автоматизований аналіз пошкоджень тріщинами поверхні конструкційних елементів // П.В. Ясній, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак // *Фіз.-хім. механіка матеріалів* – 2008. – №6. – С. 83 - 88
8. Марущак П.О., Коноваленко І.В., Біщак Р.Т. Діагностування стану поверхні металургійного обладнання // *Праці міжн. наук. конф. «Математичні проблеми технічної механіки»*, Дніпродзержинськ. – ДДТУ – 2009. – С. 167-169.
9. Ясній П.В., Марущак П.О. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів.- Тернопіль, Джура, 2009. – 232 с.
10. Деградація поверхні ролика МБЛЗ під час експлуатації / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Д.Я. Баран, В.В. Шишкін // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2006. – 11(3). – С.10-16.

11. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоёв конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий, Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2008. – 286 с.
12. Коноваленко І.В., Марущак П.О. Автоматизований аналіз множинного розтріскування нанопокриву за інтегральними параметрами // Фіз-хім. механіка мат-в. – 2012. – №4. – С. 80-88.
13. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел / П.С. Любутин, С.В. Панин // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – 47(6). – С. 158–164.
14. Исследование процесса усталости в сплаве Д16АТ при помощи нанопрофилометра / С.Р. Игнатович, С.С. Юцкевич, В.И. Закиев, Ю.Н. Майстренко // Вестн. двигателестроения. – 2008. – № 3 – С. 99–101.
15. Игнатович С.Р., Шмаров В.Н., Закиев И.М., Закиев В.И. Профилометр для контроля микро/нано топографии поверхности методом оптической интерферометрии / Нанотехнологии: Сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи - 2008, Харьков: ХФТИ, 2008. – Т.1. – С. 202–205.
16. Тріщиностійкість матеріалів і конструкцій: біметалеві ролики машин безперервного лиття заготовок / П.О. Марущак, Р.Т. Бішак. – Тернопіль: Лібра Терра, 2016. – 172 с.
17. Zr⁺ ion beam surface irradiation for improving fatigue durability of 12Cr1MoV and 30CrMnSiNi2 structural steels / S. Panin, I. Vlasov, V. Sergeev, etc. // Acta Metallurgica Slovaca. – 2014. – 20. – № 1. – P. 60–70.
18. Панин В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоёв конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий / В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 286 с.
19. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2012. – 57. – P. 43–48.
20. Maruschak P., Gliha V., Konovalenko I., Vuherer T., Panin S. Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters // Materials and technology. – 2012. – 46(5). – P. 525-529.
21. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики структурно-неоднородных сред / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.Е. Егорушкин // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 4. – С. 8–29.
22. Segmentation and statistical processing of geometric and spatial data on selforganized surface relief of statically deformed aluminum alloy / I. Lytvynenko, P. Maruschak, S. Lupenko, S. Panin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – 770. – P. 288–293.
23. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов: монография / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, К.: НАУ, 2014. – 260 с.
24. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М.В. Карускевич, Т.П. Маслак, Е.Ю. Корчук и др. // Пробл. прочности. – 2008. – № 6 (396). –С. 128-135.
25. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / M. Karuskevich, O. Karuskevich, T. Maslak, S. Shchepak // International Journal of Fatigue. – 2012. –№ 39. – P. 116-121.
26. Орієнтаційна залежність утомленості кристалітів алюмінієвого сплаву / О.І. Радченко, М.В. Карускевич, О.Ю. Корчук // Вісник НАУ. – 2002. – № 2 (13). – С. 146-151.
27. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев, 2004. – 133 с.

28. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Пробл. прочности. – 1983. – №2. – С. 6–10.
29. Закиев И.М. Применение бесконтактного 3D профилометра «Micron-beta» для точного определения износа // Проблемы трения и износа. – 2010. – № 52. – С. 192–198.
30. Контроль качества поверхности деталей с использованием бесконтактного профилометра [Текст] / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – Вып. 8 (34). – С. 20–22.
31. Интерференционный профилометр для контроля топографии поверхности материалов с нанометровым разрешением / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, С.С. Юцкевич, и др. // Праці Міжнародної НТК "Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування", (Тернопіль, 21–24 вересня 2009 р.). – Тернопіль: Терн. держ. техн. університет, 2009. – С. 175–179.
32. Toughness and failure of heat resistant steel before and after hydrogenation / P.V. Yasniy, I.B. Okipnyi, P.O. Maruschak, R.T. Bishchak, A.P. Sorochak // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2011. – 56. – P. 63-67.
33. Deep microrelief measurement and stereo photography in scanning electron microscopy / D.A. Sakseev, E.M. Ershenko, S.V. Baryshev, A.V. Bobyl', D.V. Agafonov // Technical Physics. – 2011. – 56(1). – P. 127-131.
34. Вплив експлуатаційних факторів на деформування і руйнування корпусних реакторних сталей / П.В. Ясній, І. Б. Окіпний, В. Б. Гуцайлук, Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. – 184 с.
35. Окіпний І.Б. Вплив попереднього комбінованого розтягу на крихке руйнування сталі корпусу реактора: автореф. дис ... канд. техн. наук: Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя.– Тернопіль, 2007. – 20 с.
36. Ріст тріщин в біматеріалі роликів МБЛЗ: вплив форми циклу навантажування і мікромеханізми руйнування / П.В. Ясній, В.Б. Гладь, П.О. Марущак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, ДДМА, 2005. – С. 560-564.
37. Вплив температури на статичну та циклічну тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф / П.О. Марущак, Д.Я. Баран // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - 2008. – №6 (124). – Ч.2. – С. 165-170.
38. Yasniy P., Maruschak P., Hlado V. (2005). Effect of temperature, frequency and loading waveform on fatigue crack growth in bimaterial of the roll for continuous casting machines. Int. Sci. Conf. Progressives Technologies and Materials, Poland, Rzeszow, 2005. – P. 91-92.
39. Ясній П.В., Марущак П.О. методика визначення коефіцієнту інтенсивності напружень для призматичного біметалевого зразка із бічною тріщиною // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2004. – № 30 (Технічні науки). – С. 35-41.
40. Ясній П. В., Марущак П. О. Вплив температури на швидкість росту тріщини у матеріалі покриття біметалевого ролика МБЛЗ // Машинознавство. – 2004. – №2. – С. 3-9.
41. Особливості деформування і руйнування пластичних матеріалів при ударно-коливальному навантаженні / М.Г. Чаусов, П.О. Марущак, А.П. Пилипенко, В.Б. Березін. – Тернопіль: ТЗОВ «Терно-граф», 2018. – 288 с.
42. Методика поліпшення пластичних властивостей листових двофазних високоміцних титанових сплавів за рахунок ударно-коливального навантаження: науково-методичні рекомендації для підприємств України з проектування та виробництва сільськогосподарської техніки / М.Г. Чаусов, А.П. Пилипенко, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2017. – 48 с.

43. Нові методи покращення механічних властивостей титанових сплавів захисного спорядження / М.Г. Чаусов, П.О. Марущак, А.П. Пилипенко // Мат-ли Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 22-24 травня 2018р. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – С. 72-73.

До розділу 3

1. О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах / С.Г. Псахье, В.В. Ружич, Е.В. Шилько и др. // Письма в журнал техн. физики. – 2005. – 31(16). – С. 80-87.
2. Persson A., Hogmark S., Bergström J. Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies // J. Mat. Proc. Tech. – 2004. – 152(2). – P. 228-236.
3. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, Т.Ф. Елсукова, А.Г. Иванчин // Изв. вузов. Физика. – 1982. – № 6. – С. 5-27.
4. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения, Новосибирск: Наука. 1990. – 255 с.
5. Панин В.Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов // Изв. вузов. Физика. – 1995. – № 11. – С. 6-25.
6. Лихачев В.А., Малыгин Г.А. Изменение плотности цинка при периодических теплосменах // Физ. мет. и металловед. – 1961. – 12(3). – С. 365-371.
7. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Трансляционно-ротационная модель сплошной среды, учитывающая структурные уровни деформации и разрушения // Изв. вузов. Сер. Физика. – 1984. – № 6. – С. 45-50.
8. Макаров П.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р. Моделирование неоднородной пластической деформации с учетом зарождения локализованных пластических сдвигов на границах раздела // Физическая мезомеханика. – 2001. – 4(5). – С. 29-39.
9. Романова В.А., Балохонов Р.Р., Карпенко Н.И. Моделирование механического поведения материалов с учетом трехмерной внутренней структуры // Физическая мезомеханика. – 2004. – 7(2). – С. 71-79.
10. Brezinova J., Viňáš J., Maruschak P.O. et. al. Sustainable renovation within metallurgical production. – RAM-Verlag. – 2017. – 215 p.
11. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. Recommendation ITU-R BT.709-6 (06/2015).
12. Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image // Journal of Graphics Tools. – 2007. – 12(2). – P. 13-21.
13. David A. Forsyth, Jean Ponce. Computer Vision: A Modern Approach, 2-nd edition, Pearson, 2012. – 761 p.
14. Computer analysis of surface cracks in structural elements / P. V. Yasnii, P. O. Marushchak, I. V. Konovalenko and R. T. Bishchak // Materials Science. – 2008. – 44(6). – P. 833-839.
15. A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou et al // Proc of the International symposium "Operational research and applications" ISORAP 2013, Marrakech, Morocco (May 08-10), 2013. – P. 678-684.
16. Nobuyuki O. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics. – 1979. – Smc-9(1). – P. 62-66.

17. Kittler J., Illingworth J., Föglein J. Threshold selection based on a simple image statistic // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. – 1985. – 30(2). – P. 125-147.
18. Konovalenko I.V., Maruschak P.O. Error analysis of algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2011. – 47(4). – P. 49-57.
19. Multiple cracks on continuous caster rolls surface: a three-dimensional view / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko, et al. // *Proc of the 4th International conference processing and structure of materials proceeding*. – Palic, Serbia, 2010. – P. 7-12.
20. Marushchak P.O., Konovalenko I.V. Computer evaluation of the depth of thermomechanical fatigue cracks according to their length // *Materials Science*. – 2012. – 48(1). – P. 54-64.
21. Марущак П.О., Коноваленко І.В., Біщак Р.Т. Діагностування стану поверхні металургійного обладнання // *Праці міжн. наук. конф. «Математичні проблеми технічної механіки»*, Дніпродзержинськ. – ДДТУ. – 2009. – С. 167-169.
22. Diagnostics of thermal fatigue cracks on continuous caster rolls surface / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko, R. Bishchak // *Mechanika*. – 2011. – 17(3). – P. 251-254.
23. Dmitriev A.I., Psakhie S.G. Computer-aided study of surface influence on behavior of solids under deformation // *Proc. of the 6th Int. Conf. Mesomechanics, Patras Greece, (June 1-4), 2004*. – P. 144 - 148.
24. Needleman A. Computational mechanics at the mesoscale // *Acta Mater*. – 2000. – 48. – P. 105-124.
25. Konovalenko I., Maruschak P. Computer analysis of digital images with quasiperiodical structure // *Proc. of the Int. Conf. TCSET 2012 - Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (February 21-24), 2012, Lviv-Slavske*. – P. 419.
26. Патент 40788 UA, МПК G01N 25/72. Спосіб оцінки пошкодженості поверхні тріщинами термовтоми / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак (Україна) - опубл. 27.04.2009.
27. Li V.C., Wu H.C. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites // *J. Applied Mech. Review*. – 1992. – 45. – P. 390-398.
28. Belhachmi Z., Bucur D. Stability and uniqueness for the crack identification problem // *SIAM J. Control Optim*. – 2007. – 46. – P. 253-273.
29. Kirsch A., Ritter S. A linear sampling method for inverse scattering from an open arc // *Inverse Problems*. – 2000. – 16. – P. 89-105.
30. Rondi L. A variational approach to the reconstruction of cracks by boundary measurements // *J. Math. Pures Appl*. – 2007. – 87. – P. 324-342.
31. Nishimura N., Kobayashi S. A boundary integral equation method for an inverse problem related to crack detection // *Int. J. Numer. Meth. Eng*. – 1991. – 32. – P. 1371-1387.
32. Balokhonov R.R., Romanova V.A., Schmauder S. Numerical simulation of intermittent yielding at the macro and mesolevels // *Comput. Mat. Sci*. – 2005. – 32. – P. 261-267.
33. Konovalenko I.V., Maruschak P.O. Automated method for studying the deformation behavior of a material damaged by a thermal fatigue crack network // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2013. – 49(3). – P. 243-249.
34. Barbarosic C., Toader A.-M. Optimization of bodies with locally periodic microstructure // *Mech. of Adv. Mat. and Struct*. – 2012. – 19(4). – P. 290-301.
35. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Egorushkin V.E. Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media // *Mechanics of Solids*. – 2010. – 45. – P. 501-518.
36. Kushch V.I., Shmegeera S.V., Sevostianov I. SIF statistics in micro cracked solid: Effect of crack density, orientation and clustering // *International Journal of Engineering Science*. – 2009. – 47. – P. 192-208.
37. Caiulo A., Kachanov M. On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials // *International Journal of Fracture*. – 2010. – 164. – P. 155-158.

38. Panin V.E., Goldstein R.V., Panin S.V. Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid // *International Journal of Fracture*. – 2008. – 150. – P. 37-53.
39. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. I. Образцы с отверстиями различного диаметра / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков // *Дефектоскопия*. – 2011. – №9. – С. 49-61.
40. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа, Новосибирск: Наука, 2004. – 206 с.
41. Panin V.E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 1998. – 30. – P. 1-11.
42. Quantitative analysis of a network of thermal-fatigue cracks on the surface of a material / P.O. Marushchak, I.V. Konovalenko, S.V. Panin, et al // *Materials Science*. – 2015. – 50(6). – 805-816.
43. Bornert M., Brémand F., Doumalin P. et al Assessment of digital image correlation measurement errors: Methodology and results // *Experimental Mechanics*. – 2009. – 49. – P. 353-370.
44. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning, Springer, 2006. – 738 p.
45. Konovalenko I.V., Pastukh O.A., Marushchak P.O. Using fuzzy sets to estimate the geometric parameters of surface damage // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2016. – 52(4). – P. 319-327.
46. Mordeson J.N., Nair P.S. Fuzzy mathematics: An introduction for engineers and scientists. Second edition, Springer, 2001. – 314 p.
47. Buckley J.J., Eslami E. Fuzzy plane geometry I: Points and lines // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1997. – 86. – P. 179-187.

До розділу 4

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
2. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // *Физическая мезомеханика*. – 1998. – Т.1. – №1. – С. 5–22
3. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики // *Физическая мезомеханика*. 2000. – Т 3. – №6. – С. 5–36.
4. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // *Физическая мезомеханика*. 1999. – Т.2. – №6. – С. 5–23.
5. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // *Физическая мезомеханика*. –2001. – Т.4. – №3. – С. 5–22.
6. Мезомеханика границы раздела в материалах с поверхностным упрочнением и покрытиями / Панин С.В., Смолин И.Ю., Балохонов Р.Р. и др. // *Изв. вузов. Физика*. – 1999. – № 3. – С. 4–24.
7. Панин А.В. Масштабные уровни деформации в поверхностных слоях нагруженных твердых тел и тонких пленках: Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук, Томск: ИФПМ СО РАН, 2006. – 37 с.
8. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // *Theor. and Appl. Fract. Mech*. – 2012. – 57. – P. 43–48.
9. Panin V.E., Goldstein R.V., Panin S.V. Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid // *Int. J. of Fracture*. – 2008. – 150. – P. 37–53.

10. Zhu Z., German S., Brilakis I. Visual retrieval of concrete crack properties for automated post-earthquake structural safety evaluation // *Automation in Construction*. – 2011. – 20(7). – P. 874–883.
11. Hassani A. and Ghasemzadeh Tehrani H. Crack detection and classification in asphalt pavement using image processing // *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*. – 2008. – P. 891–896.
12. Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні / О.З. Студент, Б.П. Русин, Б.В. Кисіль та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2003. – № 1. – С. 22–28.
13. Коноваленко І.В., Марущак П.О. Автоматизований аналіз множинного розтріскування нанопокриву за інтегральними параметрами // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2012. – №4. – С. 80–88.
14. Деформация и разрушение образцов сталей 12Х1МФ и 25Х1М1Ф с наноструктурным покрытием при циклическом растяжении и знакопеременном изгибе / П.В. Ясний, П.О. Марущак, С.В. Панин и др. // *IV Всероссийская конф. по наноматериалам “НАНО–2011” (1–4 марта)*. – М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2011. – С. 452.
15. Иерархические уровни деформирования теплостойкой стали с множественными дефектами / Панин С. В., Марущак П. О., Любутин П. С. // *Тез. докл. Межд. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (5–9 сентября)*. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2011. – С. 73–75.
16. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) / В.П. Сергеев, В.П. Яновский, Ю.Н. Параев и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – 7, Спец. вып. 2. – С. 333–336.
17. Increase of plasticity of maraging steels by means of ion beam nanostructuring of surface layer / O.V. Sergeev, M.V. Fedorischeva, V.P. Sergeev et al. // *10th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (September 19–24)*. – Tomsk, 2010. – P. 342–344.
18. Yasniy P., Konovalenko I., Maruschak P. Investigation into the geometrical parameters of a thermal fatigue crack pattern // *WSEAS Int. Conf. “New aspects of engineering mechanics, structures and engineering geology”*. – Greece, Heraklion, Crete Island, 2008. – P. 61–66.
19. Автоматизований аналіз поверхневих тріщин у конструкційних елементах / П.В. Ясний, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Бищак // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – № 6. – С. 83–88.
20. Analysis of brittle coating fragmentation under uniaxial tension for Weibull strength distributions/ J. Andersons, U.A. Handge, I.M. Sokolov, A. Blumen // *Eur. Phys. J. B*. – 2000. – 17. – P. 261–268.
21. Li V.C. and Wu H. C. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites // *J. Applied Mech. Review*. – 1992. – 45. – P. 390–398.
22. Zhu Y. T., Liao X. Z., and Wu X. L. Deformation twinning in nanocrystalline materials // *Progress in Mat. Sci*. – 2012. – 57 (1). – P. 1–62.
23. Evaluation of hardening of plastically deformed steels / P. Yasniy, V. Hlado, P. Maruschak, D. Baran // *Proc. of the 13–th Int. Conf. “Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures” (July 1–6)*. – Greece: Alexandroupolis, 2007. – P. 147–148.
24. Maruschak P.O., Konovalenko I.V., Bishchak R.T. Effect of thermal fatigue cracks on brittle-ductile deformation and failure of CBCM roller surface layers // *Metallurgist*. – 2012. – 56. – P.30–36.
25. Исследование локальных смещений материала, поврежденного сеткой трещин термической усталости / П.О. Марущак, Р.Т. Бищак, С.В. Панин, П.С. Любутин // *Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. “Современные проблемы машиноведения”, научные чтения посв. 115–летию со дня рождения П. О. Сухого, (28–29 октября)*. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. – С. 59–60.
26. Konovalenko I.V., Marushchak P.O. Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2011. – 47. – P. 360–367.

27. Andersons J., Tarasov S., and Leterrier Y. Evaluation of thin film adhesion to a compliant substrate by the analysis of progressive buckling in the fragmentation test // *Thin Solid Films*. – 2009. – 517 (6). – P. 2007–2011.
28. Литвиненко Я.В., Марущак П.О. Анализ состояния поверхности модифицированного нанотитана с применением математической модели циклического случайного процесса // *Автометрия*. – 2013. – 49(2). – 68–75
29. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P.O. Maruschak, S.V. Panin, S.R. Ignatovich, I.M. Zakiev, I.V. Konovalenko, I.V. Lytvynenko, V.P. Sergeev // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.- 2012.- №57.- С. 43-48.
30. Lytvynenko I.V., Lupenko S.A., Marushchak P.O. Analysis of multiple cracking of nanocoating as a cyclic random process // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2013. – 49(2). – P. 68-75.
31. Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack–network parameters / P. Maruschak, V. Gliha, I. Konovalenko et al. // *Materiali in Tehnologije*. – 2012. – 46. – P. 525–529.
32. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review / C. S. Montross, T. Wei, L. Ye et al. // *Int. J. of Fatigue*. – 2002. – 24 (10). – P. 1021–1036.
33. Morphology of periodical structures on surface of steel 15Kh13MF after the nanosecond laser irradiation accompanied by generation of shock waves / P. O. Maruschak, V. S. Mocharskyi, I. M. Zakiev, Yu. M. Nikiforov // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Oxide Materials for Electronic Engng (September 3–7)*. – Lviv, 2012. – P. 192–193.
34. A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou et al // *Proc. of the Int. Symposium "Operational Research and Applications" (May 08–10)*. – Morocco: Marrakech. – 2013. – P. 678–684.
35. Марущак П. О., Коноваленко И. В. Измерение деформации материалов путем анализа цифровых изображений поверхности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2010. – 76. – № 6. – С. 55–61.
36. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich et al. // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2012. – 57. – P. 43–48.
37. Konovalenko I. V. and Marushchak P. O. Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2011. – 47. – P. 360–367.
38. Sobel Irwin. An Isotropic 3x3 Image Gradient Operator
<https://www.researchgate.net/publication/239398674>
39. Experimental study of the surface of steel 15Kh13MF after the nanosecond laser shock processing / P. Maruschak, I. Zakiev, V. Mocharsky, Y. Nikiforov // *Solid State Phenomena*. – 2013. – 200. – P. 60–65.
40. Зміцнення поверхневого шару теплостійких сталей лазерною ударно–хвильовою обробкою / П. О. Марущак, Ю. М. Нікіфоров, Б. П. Ковалюк, В. Б. Гладь // *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля*. – 2008. – № 7 (125). – С. 197–201.
41. Морфология поверхности стали после ударно–волновой лазерной обработки / П.О. Марущак, В.Б. Гладь, Ю.Н. Никифоров и др. // *Нанорозмірні системи. Будова, властивості, технології: тези конференції НАНСИС–2007 (21–23 листопада)*. – К.: Ін-т металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 2007. – С. 267.
42. Lu W. Research on residual stress drops on material surface by laser shock processing // *Advanced Materials Research*. – 2012. – 460. – P. 420–423.
43. Марущак П.О., Сорочак А.П., Мочарский В.С. Фрактографический анализ поверхности и механизмов разрушения стали 15X13МФ после лазерной ударно-волновой обработки // *Вестник машиностроения*. – 2013. – №4. – С. 50–53.

44. Комп'ютерний аналіз морфології впорядкованого рельєфу поверхні сталі 15X13МФ після імпульсного оброблення лазером / Марущак П.О., Коноваленко І.В., Мочарський В.С., Сорочак А.П., Рабик Б.І. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. –2013 – №6 – сс.79-86.
45. Масштабные уровни деформации и разрушения теплостойких сталей./ Марущак П.О., Панин С.В., Студент А.З., Овечкин Б.Б. // Томск: Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета, 2013. – 236 с.
46. Марущак П.О., Коноваленко І.В. Вимірювання неоднорідних полів переміщень поверхні матеріалу та розкриття вершини тріщини за аналізом цифрових зображень // Машинознавство. – 2008. – №12. – С. 18–21.
47. Карускевич М.В. Методологія визначення відпрацювання ресурсу літальних апаратів за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків-свідків: автореферат... докт. техн. наук. – К.: Нац. авіац. ун-т, 2012. – 40 с.
48. Игнатович С.Р., Карускевич М.В. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов. – К.: Изд-во Нац. авиаци. ун-та, 2014. – 259 с.
49. Лебедев А.А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – К.: Из-во Ин-та проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – 2004. – 133 с.
50. Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading / M.G. Chausov, V.B. Berezin, A.P. Pylypenko, V.B. Hutsaylyuk // J. Strain Anal. Eng. Des. – 2015. – 50(1). – P. 61–72.
51. Romanova V.A., Balokhonov R.R., Emelyanova O.S. On the role of internal interfaces in the development of mesoscale surface roughness in loaded materials // Physical Mesomechanics. – 2011. – 14. – P. 159–166.
52. Алгоритм з самоналаштуванням для розпізнавання на зображенні каркасу сітки пошкоджень поверхні / І.В. Коноваленко, П.О. Марущак // Матеріали XIII міжн. конф. "Контроль і управління в складних системах" (3–6 жовтня). – Вінниця, ВНТУ – 2016. – С. 66–68.
53. Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R.Ya. Kosarevych, O.Z. Student, L.M. Svirs'ka, B.P. Rusyn, H.M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – 48. – P. 474–481.
54. Ясній П.В., Марущак П.О. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Вид-во "Джура", 2009. – 231 с.
55. Марущак П.О., Біщак Р.Т., Баран Д.Я. Розпорошена та локалізована пошкодженості теплостійких сталей. – Тернопіль: Вид-во "Лібра Терра", 2016. – 227 с.
56. Software tools for the analysis of the self-organizing material surface after deformation for the problems of its segmentation and statistical processing / I.V. Lytvynenko, P.O. Maruschak, S.A. Lupenko, Yu.I. Hats, A. Menou // Proc. of the VI-th Int. Symp. «Aircraft Materials» (May 11–13), Agadir, Morocco. – 2016. – P. 138–139.
57. Karuskevich M., Karuskevich O., Maslak T., Schepak S. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage // International Journal of Fatigue. – 2012. – 39. – P. 116–121.
58. Ignatovich S. R. Monitoring of the fatigue of D16AT alloy according to the characteristics of deformation surface pattern // Materials Science. – 2012. – 47. – P. 636–643.
59. Two-dimensional rectangular and three-dimensional rhombic grids created by self-organization of random nanoextrusions / Gordienko Y. G., Gontareva R. G., Schreiber J. S., Zasimchuk E. E. and Zasimchuk I. K. // Adv. Eng. Mater. – 2006. – 8. – P. 957–960.
60. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief / M.V. Karuskevich, E.Yu. Korchuk, A.S. Yakushenko, T.P. Maslak // Strength of Materials. – 2008. – 40. – P. 693–698.
61. Derevyagina L.S., Panin V.E., Gordienko A.I. Self-organization of plastic shears in localized deformation macrobands in the neck of high-strength polycrystals, its role in material fracture under uniaxial tension // Physical Mesomechanics. – 2008. – 11(1–2). – P. 51–62.

62. Automated diagnostics of damage of aluminum alloy under conditions of high-cycle fatigue./ P. Maruschak, I. Konovalenko, M. Karuskevich, V. Gliha, T. Vuherer // *Materiali in tehnologije*. – 2013. – 47(3). – P. 357–361.
63. Yasnii P.V., Konovalenko I.V., Marushchak P.O. Automated evaluation of strain fields by the coordinate–grid method // *Materials Science*. – 2009. – 45. – P. 291–298.
64. Kabaldin Yu.G., Murav'yev S.N. Information models of self-organization and fatigue damage of metallic materials // *Russian Engineering Research*. – 2007. – 27. – №8. – P. 513–518.
65. Karuskevich M. V. Aircraft life prediction by the parameters of foil sensors and skin surface // *Вестник двигателестроения*. – 2006. – № 3. – С. 88–92.
66. Карускевич М.В. Сенсор усталости авиационных конструкций // *Вестник НТУУ «КПИ» Машиностроение*. – К.: НТУУ «КПИ». – 2011. – № 63. – С. 196–198.
67. Карускевич М.В. Вплив режимів навантажування на еволюцію параметрів деформаційного рельєфу при циклічному навантажуванні // *Вісник інженерної академії України*. – 2011. – № 2. – С. 163–168.
68. Karuskevich M.V. Fatigue life prediction by the structurally sensitive damage indicator // *Вісник НАУ*. – 2012. – № 1. – P. 139–143.
69. Карускевич М.В. Фольговый структурно-чувствительный сенсор усталости // *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. – 2011. – Спец випуск. Частина 2. – С. 131 – 136.
70. Карускевич М.В., Корчук О.Ю. Діагностичні параметри втоми монокристалів // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2005. – Вип. 10 (26). – С. 79–83.
71. Karuskevich M.V., Hayday H.V., Maslak T.P. Sensitivity of single-crystal foil fatigue indicators // *Вісник НАУ*. – 2006. – № 3. – С. 53–56.
72. Структурна пошкоджуваність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження / М.В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак, В.М. Пантелєєв // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56). – С. 110–114.
73. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов: монография/ С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич. –К.: НАУ, 2014. – 260 с.
74. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / M.Karuskevich, O.Karuskevich, T. Maslak, S.Shchepak // *International Journal of Fatigue*. – 2012. –№ 39. – P. 116–121.
75. Структурна пошкоджуваність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження / М.В. Карускевич, Е.Ю. Корчук, Т.П. Маслак, В.М. Пантелєєв // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56). – С. 110–114.
76. Automated evaluation of the kinetics of damage accumulation on the surface of a fatigue sensor based on the analysis of strain relief parameters / I.V. Konovalenko, M.V. Karuskevich, P.O. Marushchak, S.R. Ignatovitch // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2014. – 50(4). – P. 354–362.
77. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating / P.O. Maruschak, S.V. Panin, S.R. Ignatovich, et al // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2012. – 57. – P. 43–48.
78. Park J.–H., Myung M.S., Kim Y.–J. Tensile and high cycle fatigue test of Al–3% Ti thin film // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2008. – 147 (2). – P. 561–569.
79. Multiple cracks on continuous caster rolls surface: a three–dimensional view / P. Yasnii, P. Maruschak, I. Konovalenko, V. Gliha, T. Vuherer, R. Bishchak // *4-th International conference processing and structure of materials proceeding*. – Palic, Serbia, 2010. – P. 7–12.
80. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures/ *Artificial Intelligence Center, Comm. ACM*. – 1972. – 15. – №1. – P. 11–15.
81. Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа / С.В. Панин, П.С. Любутин, М.В. Бурков, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк, В.П. Кузнецов // *Вычислительные технологии*. – 2014. – Т. 19. – №3. – С. 103-118.

82. Aluminum foil based fatigue sensor for structural health monitoring of carbon fiber composites / M. Burkov, S. Panin, P. Lyubutin, A. Eremin, P. Maruschak, A. Menou // *Procedia Technology*. – 2015. – 19. – P. 307-312.
83. Karuskevych M.V., Zhuravel' I.M., Maslak T.P. Application of fractal geometry to the problems of prediction of the residual service life of aircraft structures // *Materials Science*. – 2012. – 47. – P. 621–626.
84. Some insights into the remote strain versus fatigue life relationship / H. Alush, Y. Katz, M.B. Maros, L. Tóth // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2004. – 157–158. – P. 16–22.

До розділу 5

1. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. М.: МИСиС, 2007. – 264 с.
2. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
3. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. – 230 с.
4. Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений. М.: Техносфера, 2010. – 416 с.
5. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
6. Zhong, Q. P., Zhao, Z. H., Zhang, Z. Development of "Fractography" and research of fracture micromechanism // *Journal of Mechanical Strength*, 2005. – 27(3). – P. 358–370.
7. Azevedo C.R.F., Marques E.R. Three-dimensional analysis of fracture, corrosion and wear surfaces // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – 17(1). – P. 286 – 300.
8. M.X. Bastidas-Rodríguez, F.A. Prieto-Ortiz, E. Espejo Fractographic classification in metallic materials by using computer vision // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – 59. – P. 237–252.
9. Измерение 2D и 3D-морфологии вязких изломов конструкционных сталей: диссертация ... кандидата технических наук / Ле Хай Нинь, Национальный исследовательский технологический университет. М.: "МИСиС". – 2015. – 155 с.
10. Панин С.В., Любутин П.С., Титков В.В. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации. Томск: Издательство СО РАН, 2017. – 324 с.
11. B. Zitova and J. Flusser. Image registration methods: A survey // *Image and Vision Computing*. – 2003. – 21(11). – P. 977–1000.
12. Defects detection of billet surface using optimized gabor filters / Jong Pil Yun, SungHoo Choi, Boyeul Seo, Chang Hyun Park, Sang Woo Kim // *Proceedings of the 17-th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6–11, 2008.
13. Analysis of SEM digital images to quantify crack network pattern area in chromium electrodeposits / M. Vidal, M. Ostra, N. Imaz, E. Garcia-Lecina, C. Ubide // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – 285. – P. 289–297.
14. Hassani A., Ghasemzadeh Tehrani H. Crack detection and classification in asphalt pavement using image processing // *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*. – 2008. – P. 891–896.
15. Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis / Samik Dutta, Arpan Das, Kaustav Barat, Himadri Roy // *Measurement*. – 2012. – 45. – P. 1140–1150.
16. Yong Hu, Chun-Xia Zhao A Local Binary Pattern Based Methods for Pavement Crack Detection // *Journal of Pattern Recognition Research*. – 2010. – 1. – P. 140–147.
17. Коноваленко И.В., Марущак П.О., Окипный И.Б. Автоматизированный анализ рельефа поверхности разрушения псевдостереометрическим методом // *Вестник машиностроения*. – 2013. – №5. – С.22–24.

18. Ясній П.В., Окіпний І.Б., Гуцайлюк В.Б. Вплив експлуатаційних факторів на деформування і руйнування корпусних реакторних сталей, Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. – 184 с.
19. Crack tip strain localisation on mechanics of fracture of heat resistant steel after hydrogenation / P.V. Yasniy, I.B. Okipnyi, P.O. Maruschak, S.V. Panin, I.V. Konovalenko // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2013. – 63–64. – P. 63–68.
20. Deep microrelief measurement and stereo photography in scanning electron microscopy / D.A.Sakseev, E.M. Ershenko, S.V. Baryshev et. al. // Technical Physics. – 2011. – 56(1). – P. 127–131.
21. Информационная система фотограмметрического моделирования микрообъектов для биологических исследований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ходжер Т.А. – Иркутск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2008. –17 с.
22. Roskosz S., Cybo J., Cwajna J. Properties of sialon ceramics evaluated by means of multifractal, surface stereometry and quantitative fractography techniques // Materials Characterization. – 2009. – 60. – P. 1151-1157.
23. Wendt U., Stiebe–Lange K., Smid M. On the influence of imaging conditions and algorithms on the quantification of surface topography // Journal of Microscopy. – 2002. – 207. – P. 169–179.
24. Reconstruction of surface topographies by scanning electron microscopy for application in fracture research / J. Stampfl, S. Scherer, M. Gruber, O. Kolednik // Applied Physics A: Materials Science & Processing. – 1996. – 63(4). – P. 341–346.
25. Crack tip strain localisation on mechanics of fracture of heat resistant steel after hydrogenation / P.V. Yasniy, I.B. Okipnyi, P.O. Maruschak, S.V. Panin, I.V. Konovalenko // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2013. – 63–64. – P. 63–68.
26. Панин В.Е. Пластическая деформация и разрушение твердых тел как эволюция потери их сдвиговой устойчивости на разных масштабных уровнях // Вопросы материаловедения. – 2002. – № 1. – С. 34–50.
27. Ясній П.В., Марущак П.О. Влияние температуры на микромеханизмы усталостного разрушения биматериала 15X13МФл/25X1М1Фл // Материалы международной научно–технической конференции "Механика неоднородных деформируемых тел: методы, модели, решения" (1–8 октября), Севастополь. – ОрелГТУ. – 2004. – С.73–75.
28. Циклічна тріщиностійкість біматеріалу 15X13МФл/25X1М1Фл / Марущак П.О. // Збірник праць I Міжнародної науково-технічної конференції “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин”, (4–7 жовтня), Тернопіль. – ТДТУ. – 2004. – С. 249–253.
29. Regularities in macro– and micromechanisms of fatigue crack growth in a bimetal of continuous caster rolls / P.O. Maruschak, A.P. Sorochak, A. Menou, O.V. Maruschak // Case Studies in Engineering Failure Analysis. – 2013. – 1(2). – P. 165–170.
30. Вплив частоти та форми циклу навантажування на високотемпературну циклічну тріщиностійкість біматеріалу. Автореферат дис...канд. техн. наук / Марущак П.О. – Тернопіль. – 2004. – ТНТУ ім. І. Пулюя. – 20 с.
31. Автоматизированный метод стереометрического исследования механизмов усталостного разрушения / П.О. Марущак, И.В. Коноваленко, Е.В. Марущак, А.П. Сорочак // Металлург. – 2014. – № 1. – С. 63–67.
32. Degradation of steels used in gas main pipelines during their 40–year operation. / N. M. Nykyforchyn, O.T. Tsyurul'nyk, D.Yu. Petryna, and M.I. Hredil' // Streng. Mater. – 2009. – 41(5). – P. 501–505.
33. Study of main gas pipeline steel strain hardening after prolonged operation. / P.O. Marushchak, Yu.V. Salo, R.T. Bishchak, L.Ya. Poberezhnyi // Khim. Neftegaz. Mashinostr. – 2014. – No. 1 – P. 40–42.
34. Александров Ю.В., Кузьбожев А.С., Агинея Р.В. Ресурсные испытания длительно эксплуатируемых трубопроводов, СПб.: «Недра», 2011. – 304 с.

35. Алимов С.В. Оценка технического состояния и определение сроков безопасной эксплуатации трубопроводов / С.В. Алимов, Б.Н. Антипов, А.В. Захаров, А.Н. Кузнецов // Газовая промышленность. – 2009. – №1. – С. 24-25.
36. Pokhmurs'kyi A.Yu., Rusyn B.P., Obukh Yu.V. Evaluation of the influence of pit-like defects on the strength of D16T sheet alloy // Mat. Sci. – 2012. – 48(1). – P. 101–105.
37. Марукович Е.И. Дистанционная дефектоскопия контурных поверхностей / Е.И. Марукович, А.П. Марков, О.Ю. Бондарев. – Минск: Белорусская наука, 2011. – 330 с.
38. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования, Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2006. – 279 с.
39. Computer analysis of surface cracks in structural elements. / P.V. Yasnii, P.O. Marushchak, I.V. Konovalenko, R.T. Bishchak // Mat. Sci. – 2008. – 44(6). – P. 833–839.
40. Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters / P. Maruschak, V. Gliha, I. Konovalenko, et al. // Materiali in Tehnologije. – 2012. – 46. – P. 525–529.
41. Коноваленко І.В., Марущак П.О., Біщак Р.Т. Автоматизоване оцінювання пошкодженості поверхні магістрального газопроводу корозійними пітингами // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – №4. – С.70-76.
42. Novel images of the evolution of stress corrosion cracks from corrosion pits / D.A. Horner, B.J. Connolly, S. Zhou, L. Crocker, A. Turnbull // Corrosion Science. – 2011. – 53(11). – P. 3466–3485.
43. Похмурський А.Ю. Діагностика тонколистового прокату, ураженого корозійними пітингами та визначення їх впливу на міцність // Автореферат дис...канд. техн. наук. – Львів. – 2012. – ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 16 с.
44. Марущак П.О., Коноваленко І.В. Измерение деформации материалов путем анализа цифровых изображений поверхности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – 76. – №6. – С. 55–61.
45. Image segmentation based on the evaluation of the tendency of image elements to form cluster with the help of point field characteristics / R.J. Kosarevych, B.P. Rusyn, V.V. Korniy, T.I. Kerod // Cybenetics and System Analysis. – 2015. – 51. – P. 704–713.
46. Reconstruction and quantitative analysis of metallic surface with pits based on improved stereo image matching method / B.P. Rusyn, Ya.Yu. Varetskyi, Yu.V. Lysak, A.Yu. Pokhmurskyi // Materials Science. – 2011. – 42. – 255–263.
47. Bastidas-Rodríguez M. X., Prieto-Ortiz F. A., Espejo E. Fractographic classification in metallic materials by using computer vision // Eng. Fail. Anal. – 2016. – 59. – P. 237–252.
48. Computer analysis of characteristic elements of fractographic images / R.Ya. Kosarevych, O.Z. Student, L.M. Svir's'ka, B.P. Rusyn, H.M. Nykyforchyn // Mat. Sci. – 2013. – 48(4). – P. 474–481.
49. Ohashi M. Extreme value analysis of ductile fracture surface by dimpled rupture associated with fracture behavior of tensile specimens // Journ. of Mat. Sci. – 2007. – 42. – P. 9877–9887.
50. Measurement of nonuniformity of fracture in structural steels with heterogeneous structure / A.V. Kudrya, E.A. Sokolovskaya, V.A. Trachenko, Le Hai Ning, S. V. Skorodumov, K. B. Papina // Metal Sci. and Heat Treat. – 2015. – 57. – P. 190–196.
51. Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko // Eng. Fail. Anal. – 2013. – 35. – P. 636–644.
52. Enhancing plasticity of high-strength titanium alloys VT 22 under impact-oscillatory loading / M. Chausov, P. Maruschak, A. Pylypenko, L. Markashova // Philosophical Magazine. – 2017. – 97. – P. 389–399.
53. Methods and some results of automated analysis of ductile failure mechanisms of titanium alloy VT-22 / P. Maruschak, I. Konovalenko, O. Prentkovskis, M. Chausov, A. Pylypenko // Proc. Eng. – 2016. – 134. – P. 475–480.
54. Damage and fracture of heat resistance steel under cyclic thermal loading / P. Yasniy, P. Maruschak, R. Bishchak, V. Hlado, A. Pylypenko // Theoret. and Appl. Fract. Mech. – 2009. – 52 (1). – P. 22–25.

55. Коноваленко І.В., Марущак П.О. Використання властивостей нечітких множин для комп'ютерного аналізу форми та розмірів ямок відриву// Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2017. – Т. 53(4). – С. 112–121.
56. Ghajar R., Mirone G., Keshavarz A. Ductile failure of X100 pipeline steel – experiments and fractography // *Materials & Design*. – 2013. – 43. – P. 513–25.
57. Strnadel B., Jonšta Z. Distribution of dimple sizes on the fracture surface of spheroidized steel in the transition region // *Engin. Fract. Mech.* – 1994. – 48.– P. 863–871.
58. Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, A. Menou, J. Brezinová // *Mat. Sci. Forum.* – 2014. – 782. – 279–283.
59. Benzerga A.A. Micromechanics of coalescence in ductile fracture // *Journ. of Mech. and Phys.of Solids.* – 2002. – 50. – P. 1331–1362.
60. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металлоконструкций в процессе наработки, Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. – К.: 2004. – 133с.
61. ГОСТ 21073.3–75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен, Москва. – 29 с.
62. Methods and some results of automated analysis of ductile failure mechanisms of titanium alloy VT–22 / P. Maruschak, I. Konovalenko, O. Prentkovskis, M. Chausov, A. Pylypenko // *Proc. Eng.* – 2016. – 134. – P. 475–480.
63. Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys / M.G. Chausov, P.O. Maruschak, V. Hutsaylyuk, L. Śnieżek, A.P. Pylypenko // *Vacuum.* – 2018. – 147. – P. 51–57.
64. Structural self–organization of titanium alloys under impulse force action / M.G. Chausov, P.O. Maruschak, A.P. Pylypenko, V.B. Berezin, O. Prentkovskis // *Materials Testing.* – 2018. – 59(6). – P. 567–569.
65. Konovalenko I., Maruschak P., Prentkovskis O. Automated method for fractographic analysis of shape and size of dimples on fracture surface of high–strength titanium alloys // *Metals.* – 2018. – 8, 161; doi:10.3390/met8030161.
66. Bastidas-Rodriguez M.X., Prieto-Ortiz F.A., Espejo E. Fractographic classification in metallic materials by using computer vision // *Eng. Fail. Anal.* – 2016. – 59. – P. 237–252.
67. Image segmentation based on the evaluation of the tendency of image elements to form clusters with the help of point field characteristics / R.J. Kosarevych, B.P. Rusyn, V.V. Korniy, T.I. Kerod // *Cybernetics and Systems Analysis.* – 2015. – 51(5). – P. 704–713.
68. Konovalenko I.V., Marushchak P.O., Bishchak R.T. Automated estimation of damage to the surface of gas main by corrosion pittings // *Materials Science.* – 2014. – 49. – 493–500.
69. Ohashi M. Extreme value analysis of ductile fracture surface by dimpled rupture associated with fracture behavior of tensile specimens // *Journ. of Mat. Sci.* – 2007. – 42. – P. 9877–9887.
70. Fractographic analysis of surface and failure mechanisms of nanotitanium after laser shock–wave treatment / P. Maruschak, A. Menou, M. Chausov, V. Mocharskyi // *Key Engineering Materials.* – 2014. – 592–593. – P. 346–349.
71. Faleskog J., Gao X., Shih C.F. Cell model for nonlinear fracture analysis. Micromechanics calibration // *Int. J. Fract.* – 1998. – 89. – P. 355–373.
72. Learning defect classifiers for textured surfaces using neural networks and statistical feature representations / D. Weimer, H. Thamer, B. Scholz–Reiter // *Procedia CIRP.* – 2013. – 7. – P. 347–352.
73. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects / S. Faghieh–Roohi, S.Hajizadeh, A. Nunez, R. Babuska, and B. De Schutter // *Proceedings of the 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2016), Vancouver, Canada.* – 2016. – P. 2584–2589.
74. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, and L. D. Jackel // *Neural Computation.* – 1989. – 1(4). – P. 541–551.

75. Aircraft fuselage defect detection using deep neural networks / T. Malekzadeh, M. Abdollahzadeh, H. Nejati, N. Cheung // CoRR, abs, 2017. – 1712.09213.
76. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // Advances in neural information processing systems. – 2012. – P. 1097–1105.
77. Return of the devil in the details: Delving deep into convolutional nets / K. Chatfield, K. Simonyan, A. Vedaldi, and A. Zisserman // arXiv preprint arXiv:1405.3531, 2014.
78. An online surface defects detection system for AWAM based on deep learning / Shangyong Tang, Guilan Wang, Haiou Zhang, Rui Wang // Proceedings of the 28-th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2017. – C. 1965-1981.
79. Siyang Tian and Ke Xu An algorithm for surface defect identification of steel plates based on genetic algorithm and extreme learning machine // Metals. – 2017. – 7, 311; doi:10.3390/met7080311.
80. Classification of surface defects on steel sheet using convolutional neural networks / Shiyang Zhou, Youping Chen, Dailin Zhang, Jingming Xie, Yunfei Zhou // Materials and technology. – 2017. – 51(1). – P. 123–131.
81. Виявлення, розпізнавання та обчислення параметрів ямок відриву на фрактограмах металевих матеріалів з використанням згорткової нейронної мережі / Коноваленко І.В., Марущак П.О., Побережний Л.Я., Сорочак А.П. // Мат-ли VI Міжнародної науково-практичної конференції "Структурна релаксація у твердих тілах" (22-24 травня 2018 р., Вінниця), ТОВ "Нілан-ЛТД". – С. 32-35.
82. Antonio Gulli, Sujit Pal. Deep Learning with Keras. Packt publishing: Birmingham–Mumbai.– 2017.
83. CUDA Zone. Available online: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone> (accessed on 22 April 2018).
84. A Method for Stochastic Optimization. / Diederik Kingma, Jimmy Ba. Adam// Published as a conference paper at ICLR 2015. arXiv:1412.6980v8.



Коноваленко Ігор Володимирович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Напрями наукових досліджень – обробка та розпізнавання зображень, методи статистичного опрацювання даних, цифрова обробка сигналів, моделювання даних, методи машинного навчання. У цій книзі вказані підходи застосовано до фотографічних та фрактографічних зображень поверхонь руйнування різних матеріалів. Розроблено алгоритми для виявлення на зображеннях зон пошкодження та обчислення їх кількісних параметрів.

Є автором і співавтором понад 200 наукових та навчально-методичних праць.



Марущак Павло Орестович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Напрями наукових досліджень – автоматизовані методи технічного діагностування пошкодженості матеріалів і конструкцій, фрактографічний аналіз, прогнозування залишкового ресурсу транспортних систем.

Розвинув оптико-цифрові методи контролю дефектності матеріалів, які розглянуто як одну з ланок технічної діагностики і прогнозування поведінки матеріалів та конструкційних елементів. Особлива увага надається вивченню морфології поверхонь руйнування матеріалів та її чисельній інтерпретації.

Є автором і співавтором понад 400 наукових та навчально-методичних праць.

Наукове видання

Коноваленко Ігор Володимирович,
Марущак Павло Орестович

НОВІ ОПТИКО-ЦИФРОВІ МЕТОДИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

МОНОГРАФІЯ

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 12,7. Тираж 300 прим. Зам. № 3096.

Видавництво Тернопільського національного технічного університету
імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11

Друк ФОП Паляниця В.А.

Свідоцтво ДК № 4870 від 20.03.2015

м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.

тел. (0352) 528-777



5654576 21321 533455

534547657568
675756756756
7867876889
7878678789789
87798797
7867886976
78979878978