

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

На правах рукопису

ДАНИЛЮК
Ірина Михайлівна

УДК 620.178.3

**ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНІСТІЙКОСТІ ЕКСПЛУАТОВАНОЇ
СТАЛІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ**

Спеціальність: 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Марущак Павло Орестович,
доктор технічних наук, професор,

Тернопіль – 2015

Зміст

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ РОЗПОРОШЕНИМИ ТА ЛОКАЛІЗОВАНИМИ ДЕФЕКТАМИ	3
1.1. Вплив деформаційних процесів на зародження та коалесценцію дефектів.....	10
1.2. Вплив структурної неоднорідності матеріалів на їх міцність та тріщиностійкість.....	15
1.3. Критерії опису циклічної тріщиностійкості матеріалів.....	22
1.4. Використання методів нелінійної механіки руйнування для оцінювання тріщиностійкості трубних сталей.....	29
Висновки	34
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОГО НАПРАЦЮВАННЯ НА ПОШКОДЖЕНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 17Г1С	
2.1. Інтроскопічні дослідження пошкодженості та деградаційні прояви у сталі 17Г1С.....	35
2.2. Зразки для випробувань на міцність та втому.....	37
2.3. Методика побудови повних діаграм статичного деформування.....	39
2.4. Методика аналізу поверхні із корозійними пітингами.....	44
Висновки	50
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ТРИВАЛОГО НАПРАЦЮВАННЯ НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ ТА НАКОПИЧЕННЯ РОЗПОРОШЕНИХ ПОШКОДЖЕНЬ	
3.1. Пошкодженість та механізми деградації поверхні сталі магістрального газопроводу.....	52
3.2. Мезо- та мікромеханізми деформування експлуатованого	

матеріалу.....	56
3.3. Твердість і мікротвердість металу експлуатованого трубопроводу.....	66
Висновки	69
РОЗДІЛ 4 ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛУ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ	
4.1. Дослідження множинних корозійних дефектів.....	70
4.2. Оцінювання деформаційних процесів за штучними мітками.....	72
4.3. Мікромеханізми втомного руйнування труби.....	82
Висновки	94
РОЗДІЛ 5. ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЗИЧНОЇ МЕЗОМЕХАНІКИ ТА НЕЛІНІЙНОЇ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ	
5.1. Взаємозв'язок деформаційних властивостей та параметрів циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С	95
5.2. Деформаційні підходи до оцінювання руйнування матеріалу магістрального газопроводу.....	106
5.3. Інженерний підхід до оцінювання динамічної тріщиностійкості труби магістрального газопроводу.....	109
Висновки.....	111
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115
ДОДАТКИ.....	132

ВСТУП

Актуальність теми. Циклічна тріщиностійкість сталей магістральних газопроводів – одна з найважливіших механічних характеристик, які визначають їх роботоздатність. Однак тривала експлуатація трубопроводів спричиняє зміни структури і деградацію властивостей металу внаслідок впливу напружень і корозійно-наводнювальних середовищ. У металі відбуваються процеси мікродеформування, накопичення локальних мікронапружень та розвиваються дефекти, зокрема мікротріщини. Для запобігання непередбаченого руйнування магістральних газопроводів та достовірного оцінювання їх залишкового ресурсу необхідно враховувати властивості матеріалу після тривалого напруження, що вимагає комплексного підходу до дослідження його фізико-механічних характеристик.

Вплив наводнювання та експлуатаційного навантаження на кінетику накопичення пошкоджень та циклічну тріщиностійкість сталей магістральних трубопроводів досліджено у працях О.Є. Андрейківа, Є.І. Крижанівського, А.Я. Красовського, Г.М. Никифорчина, Л.С. Шлапака, О.М. Карпаша, М.О. Карпаша, О.Т. Цирульника, Л.Я. Побережного, О.В. Ліванової, А.Г. Гумерова, Ю.В. Банахевича, А.Я. Середницького, І.В. Ориняка, Т.С. Єсієва, Д.Ю. Петрини. та ін. Виявлено основні закономірності зародження, коалесценції та поширення втомних тріщин і розроблено методологічні підходи до оцінювання технічного стану і підвищення достовірності прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів. Зазначені результати лише частково враховують особливості механізмів деформування матеріалу на різних масштабних рівнях. В працях Р.В. Агінея, З.Т. Галіулліна, В.В. Панасюка, С.В. Паніна, В.Р. Скальського, М.Г. Чаусова, В.В. Харионовського, В.М. Чувильдєєва досліджено основні механізми деформування матеріалів на макро- і мікрорівнях. Проте не достатньо вивчено вплив структурно-механічних дефектів на закономірності деформування та руйнування металу тривало експлуатованих труб. З іншого

боку, тривала експлуатація трубних сталей зумовлює вичерпування пластичності та окрихчення матеріалів, тому використання деформаційних підходів механіки руйнування для оцінювання їх технічного стану повинно розкривати нові можливості у вивченні механізмів руйнування на стадії росту втомних тріщин.

Таким чином, актуальною задачею є поглиблене дослідження закономірностей експлуатаційної деградації сталей газопроводів з урахуванням розвитку в них пошкодженості та його впливу на деформаційні параметри поширення втомних тріщин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, що складають основу дисертації, отримані здобувачем як виконавцем держбюджетних тем «Діагностування та коалесценція тріщинуватих дисипативних структур на основі підходів мезомеханіки» (№ держреєстрації 0112U008076, 2013), «Розвиток наукових основ підвищення міцності і тріщиностійкості нанопокриттів з урахуванням зон локалізації деформацій» (№ держреєстрації 0114U007178, 2014), які виконувались у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України впродовж 2013-2014 років. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у встановленні основних закономірностей пошкоджуваності, деформування і руйнування сталі 17Г1С у вихідному та експлуатованому станах та оцінюванні за деформаційними підходами тримкості магістральних газопроводів із тріщиноподібними дефектами.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити форму та мікромеханізми формування корозійних пошкоджень (пітингів) на поверхні експлуатованої труби та запропонувати автоматизований метод їх кількісного оцінювання;

- встановити основні закономірності деформування та руйнування розтягуванням сталі 17Г1С у вихідному та експлуатаційно деградованому станах;

- оцінити тріщиностійкість сталі 17Г1С труби із застосуванням оптико-цифрового аналізу зображення поверхні зразка та використанням штучних сенсорних міток, інтенсивності деформації зсуву та кута розкриття вершини тріщини;

- обґрунтувати стадійність поширення тріщини у трубній сталі 17Г1С та розробити рекомендації щодо використання деформаційних підходів для аналізу механізмів поширення втомної тріщини на мікро-, мезо- та макрорівнях.

- запропонувати інженерні методи оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби магістрального газопроводу, які враховують вплив розсіяних в об'ємі металу структурно-механічних пошкоджень.

Об'єкт дослідження - пошкодженість трубної сталі.

Предмет дослідження – міцність та тріщиностійкість сталі 17Г1С з урахуванням впливу експлуатаційного напручування.

Методи дослідження – теоретичні підходи механіки деформівного твердого тіла, сучасні експериментальні методи механіки руйнування, металографічний, фрактографічний та автоматизований цифровий аналізи пошкодженості сталі.

Наукова новизна одержаних результатів:

- досліджено форму, розміри та мікромеханізми формування корозійних пошкоджень на поверхні експлуатованої труби, що дало можливість запропонувати автоматизований метод кількісного оцінювання одиночних та об'єднаних корозійних пітингів;

- встановлено основні закономірності деформування та руйнування розтягуванням сталі 17Г1С у вихідному та експлуатаційно деградованому

станах. Виявлено, що за 40 років напрацювання границя плинності сталі 17Г1С зросла на 9 %, границя міцності на 22 % та відношення границі міцності до границі плинності з 1,35 до 1,56;

– вперше оцінено тріщиностійкість сталі 17Г1С труби із застосуванням оптико-цифрового аналізу зображення поверхні зразка та використанням штучних сенсорних міток, визначенням інтенсивності деформації зсуву та використанням методу кута розкриття вершини тріщини (*crack tip opening angle* – СТОА);

– розроблені рекомендації щодо використання низки деформаційних параметрів циклічної тріщиностійкості для аналізу механізмів поширення втомної тріщини у трубній сталі 17Г1С на мікро-, мезо- та макрорівнях.

– запропоновано інженерні методи оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби магістрального газопроводу, які дозволяють врахувати вплив розпорошених структурно-механічних пошкоджень.

Практичне значення одержаних результатів.

Визначено характеристики механічної поведінки матеріалу тривало експлуатованого магістрального газопроводу, які можуть бути використані для розрахунків міцності та тримкості конструкції нафтогазового комплексу.

Результати дисертації, в частині пропонованих підходів оцінювання впливу розпорошеної пошкодженості на деградацію механічних властивостей ферито-перлітних сталей, використовуються при дослідженнях міцності та тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів у філії УМГ «Прикарпаттятрансгаз», дов. №353/16-02.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить:

- розроблення методики експериментальних досліджень та оцінювання пошкодженості поверхні магістрального газопроводу із множинними корозійними дефектами;
- розроблення методик оцінювання стану поверхні з округлим дефектом, пошкодженої корозійними ураженнями із втомною тріщиною;
- виявлення основних закономірностей пошкодженості сталі 17Г1С на макро-, мезо- та мікрорівнях після тривалого напруження та дослідження деформування і руйнування матеріалу за статичного та циклічного навантажень;
- урахування впливу пошкодженості трубної сталі 17Г1С з множинними розпорошеними мікрodefekтами, на параметри міцності та тріщиностійкості матеріалу за деформаційними підходами.

Постановку задач, аналіз та трактування результатів, формулювання наукових висновків та рекомендацій проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на XVI науковій конференції ТНТУ (Тернопіль, 2012); III Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, 2012); Международных научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2014); VIII Российской научно-технической конференции "Механика ресурс и диагностика материалов и конструкций" (Екатеринбург, 2014); III Всероссийской конференции "Деформирование и разрушение структурно - неоднородных сред и конструкций", посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова (Новосибирск, 2014), 5-й Міжнародній конференції "Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій" (Львів, 2014); XII Міжнародній конференції "Проблеми корозії та протикорозійного захисту

конструкційних матеріалів" (Львів, 2014); International conference «Advances in Micromechanics of Materials» (Rzeszow, Poland, 2014).

В цілому робота доповідалась і обговорювалась на розширеному тематичному семінарі Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» та семінарі семінару відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 18 друкованих працях, з них 8 – статей у фахових наукових журналах і збірниках, внесених до переліку ВАК України, 5 – статей у міжнародних журналах внесених до бази Scopus, 5 – праць у збірниках праць вітчизняних та міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 132 сторінки, в т. ч. 69 рисунків, 13 таблиць та список використаних літературних джерел із 145 найменувань.

РОЗДІЛ 1

ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ З РОЗПОРОШЕНИМИ ТА ЛОКАЛІЗОВАНИМИ ДЕФЕКТАМИ

1.1. Вплив деформаційних процесів на зародження та коалесценцію дефектів

Відомо [1, 2], що міцність і пластичність конструкційних матеріалів є взаємопов'язаними величинами, що дозволяє систематизувати їх у вигляді узагальнюючого графіка, рис.1.1.

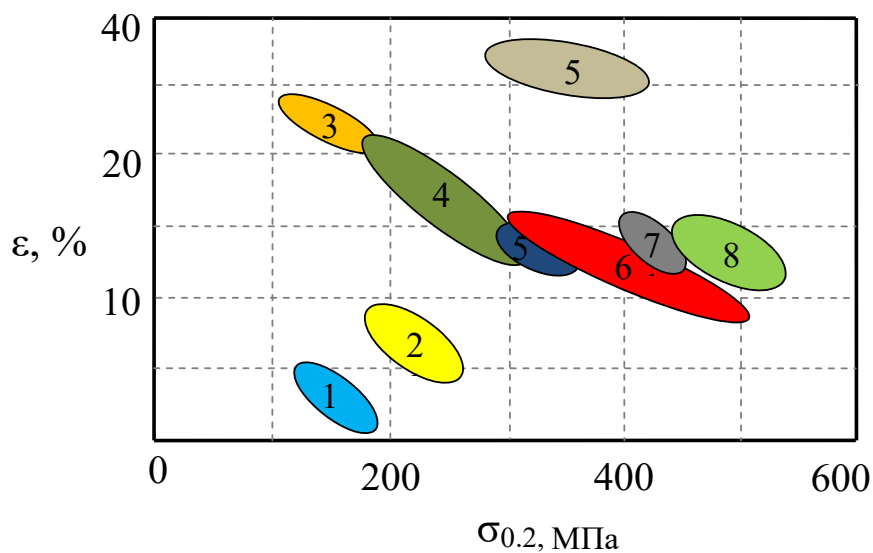


Рис. 1.1. Взаємозв'язок параметрів міцності і пластичності металів: 1 – магнієві сплави; 2 – алюмінієві сплави; 3 – сталі після глибокого витягування; 4 – сталі після обробки «гартування-відпуск»; 5 – двофазні сталі; 6 – мікролеговані сталі; 7 – низьколеговані сталі; 8 – нержавккі сталі.

Пошкодженість матеріалу можна записати як функцію дефектів у площі поперечного перерізу [3]:

$$D = 1 - \frac{A_{eff}}{A_0},$$

де A_0 , A_{eff} – початкова та ефективна площі поперечного перерізу.

Це рівняння дозволяє урахувати вплив мікроструктури на пошкодженість матеріалу, рис. 1.2.

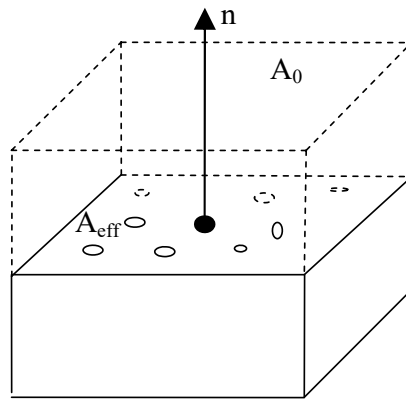


Рис. 1.2. Елементарний об'єм матеріалу: відмінність між номінальною та пошкодженою площами

Вперше кінетичні рівняння пошкодженості були запропоновані Л.М. Качановим та Ю.М. Работновим [4, 5]:

$$d\omega/dt = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon^*},$$

де ε' та ε^* - біжуче та граничне значення пластичного розпушування.

Відомо значну кількість параметрів пошкодженості матеріалів, які враховують накопичення пошкоджень у матеріалі, один із них введено *Мак Клінтоком* [6]. Його було запропоновано за результатами фрактографічних досліджень поверхні руйнування матеріалів:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \eta d\varepsilon_p,$$

Проте він може спричиняти значні похибки, на стадії передруйнування, за граничних значень деформації.

Відоме рівняння накопичення пошкоджень С.А. Шестерикова [7]:

$$\frac{dD}{dK} = B_3 \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^{n_3},$$

Широко вживане рівняння Райса-Трейсі, яке дозволя врахувати зміцнення матеріалу та підростання мікропор під час деформування матеріалу [8]:

$$\int_1^2 0,283 \exp \left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_{eq}} \right) d\varepsilon_{eq}^p = \ln(R/R_0)$$

Стан 1 відповідає формуванню пор в околі включень, а стан 2 – руйнуванню. Слід відзначити, що кількість пор описано опосередковано за допомогою залежності R/R_0 , тобто відношення початкового радіусу пор до біжучого. Критерій пошкодженості за Райсом-Трејсі буде мати вигляд [8]:

$$D = \frac{1}{1.65\varepsilon_0} \int \exp(1,5\eta) d\varepsilon_p,$$

Ці підходи було розвинуто у працях Ж. Россел'є, зокрема він запропонував модель деформування пошкодженого матеріалу [9]:

$$\Sigma_1 + k(\sigma_{eq} - \sigma_0) = \sigma_c,$$

Σ_1 - значення максимальних головних напружень; σ_c – граничні напруження; k – параметр напрямку навантажування.

Враховуючи відстань між мікропорами та їх радіус було сформульовано критерій граничного стану матеріалу [9]:

$$\frac{R/l}{R_0/l_0} = \left(\frac{R/l}{R_0/l_0} \right)_c$$

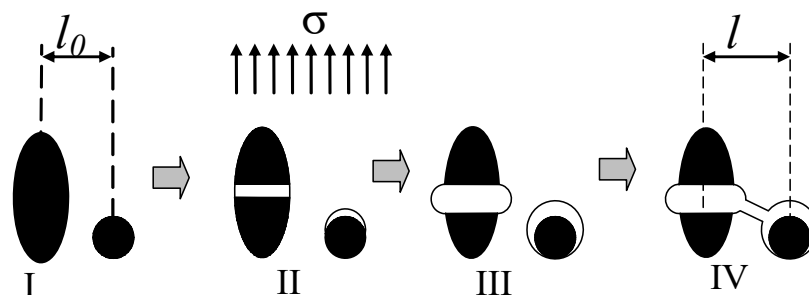


Рис. 1.3. Стадійність розтріскування включень: I – початковий стан; II – зародження пор; III – підростання пор; IV - злиття пор.

Відомо значну кількість параметрів пошкодженості матеріалів, які враховують накопичення пошкоджень у матеріалі, один з них запропоновано Норрісом [10]:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \frac{1}{1 + c_N p} d\varepsilon_p,$$

та Л. Леметром [11]:

$$\frac{dD}{dK} = B_4 \left(\frac{\sigma}{1 - D} \right) D^{n_4} \frac{1}{(1 - D)^\gamma}$$

Окремий клас пошкоджень обумовлений неоднорідністю пружних властивостей матеріалу, які можуть описувати деградацію матеріалу за зміною модуля пружності тривалого напруження [12]:

$$D_0 = 1 - \left(\frac{E'}{E_0} \right),$$

E_0 - модуль пружності матеріалу у вихідному стані.

Над даний час поширені методи оптичного контролю стану матеріалу за зміною форми зерен, рис. 1.4. Зокрема за параметром форми Φ [13]:

$$\Phi_0 = \frac{\sum L}{\sum A},$$

де $\sum L$ та $\sum A$ – довжина границь зерен у межах аналізованої площі A ;

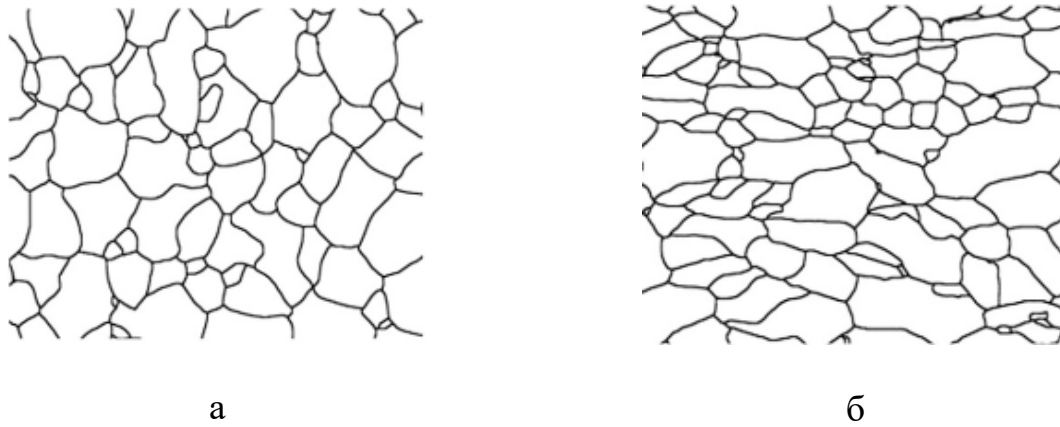


Рис. 1.4. Типові зображення мікроструктури матеріалу у початковому стані ($\Phi = \Phi_0$, $D = 0$) та підданого деформуванню $\Phi_0 < \Phi < \Phi_f$, $D = 1$ [13].

Порівняльним параметром може бути приведений фактор форми, рис. 1.5.

$$D_r = \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_f - \Phi_0},$$

де Φ_f - граничне значення параметру форми зерен

Отже, якщо $\Phi = \Phi_0$, $D = 0$, матеріал є непошкодженим (у початковому стані);

якщо $\Phi = \Phi_f$, $D = 1$, матеріал руйнується;

якщо $\Phi_0 < \Phi < \Phi_f$, $D = 1$, матеріал у стані накопичення пошкоджень.

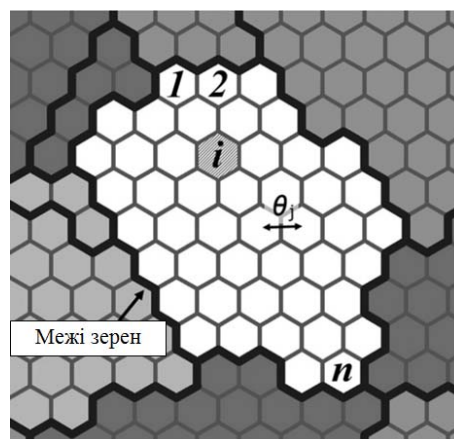


Рис. 1.5. Схематичне зображення структури матеріалу

Параметр GAM показує розорієнтацію зерен [14]:

$$GAM = \left(\sum_{k=1}^N (\beta_k A_k) \right) / \sum_{k=1}^N A_k,$$

де N – кількість зерен у аналізованій області; A^k – кількість зерен; β – кількість розорієнтацій.

Одним з підходів даного напрямку є метод повних діаграм, який дозволяє оцінити тріщиностійкість матеріалу за спадними ділянками повних діаграм рис. 1.6:

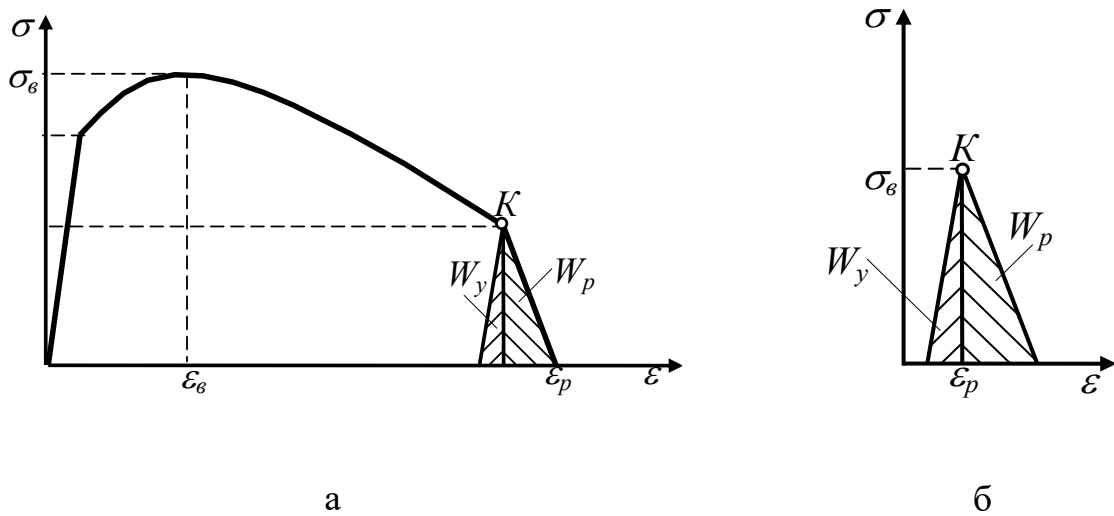


Рис. 1.6. Повні діаграми деформування пластичного (а) та крихкого (б) матеріалів

За параметрами повної діаграми деформування оцінюють граничні пошкодження металу, які описують ріст стійкої макротріщини відриву [15]. Експериментально підтверджено стадійний характер процесу розриву, формування і росту макротріщини за деформування пластичних матеріалів [16].

1.2. Вплив структурної неоднорідності матеріалів на їх міцність та тріщиностійкість

Вираз для опису напружень, деформацій та переміщень у околі вершини тріщини було запропоновано Лехнітським, Сіхом [17] та ін. Використовуючи

цей вираз можна виявити взаємозв'язок між енергоємністю руйнування, розкриттям тріщини (COD) та переміщеннями зсуву (CSD) у вершині тріщини, рис. 1.7:

$$COD = 4(2)^{1/4} \frac{(a_{11}a_{22})^{1/4}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} + \sqrt{\frac{a_{22}}{2a_{11}}} \right)^{1/4} \sqrt{G_1} \sqrt{r},$$

$$CSD = \left[4(2)^{1/4} \sqrt{\frac{a_{11}}{\pi}} \left(\frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} + \sqrt{\frac{a_{22}}{2a_{11}}} \right)^{1/4} \right] \sqrt{G_1} \sqrt{r},$$

де G_I і G_{II} - це місцеві швидкості вивільнення енергії в режимі I та II відповідно, a_{ij} - константи матеріалу.

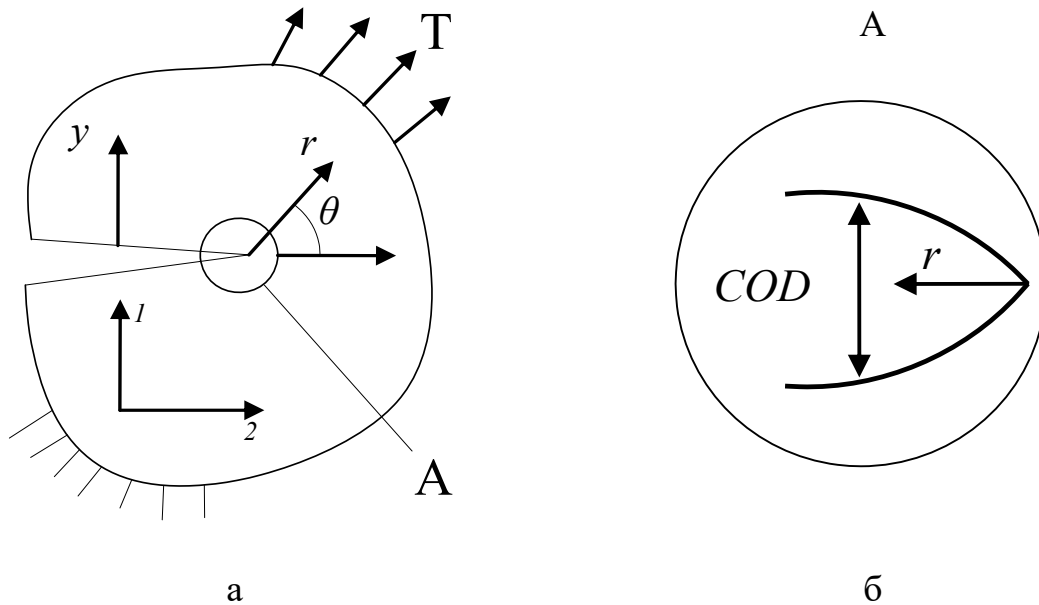


Рис. 1.7. Деформівне тверде тіло з тріщиною – а та COD у вершині тріщино подібного дефекту - б

Проте, деформаційні процеси, що відбуваються у полікристалічних тілах мають певні особливості, зокрема на межах конгломератів зерен екструдують дискретні острівці матеріалу.

Густина потоку дефектів J поверхневих деформаційних структур пов'язана з локальною кривизною і градієнтом внутрішніх напружень [18]:

$$J = \frac{b_1 - b_2}{4\pi} \chi(s, t) b(s, t) \left(\ln \frac{2L}{r} - 1 \right) - \nabla f,$$

де b - вектор бінормалі в локальній системі координат; t - дотична; L - довжина області інтерфейсу (в нашому випадку інтерфейсу між субзернами); s - поточне значення довжини області; r - поточна координата в полосі локалізованої деформації, $r < L$; χ - зміна кривизни локальної області, зумовлена внутрішнім навантаженням; b_1 і b_2 - модулі «вектору Бюргера» об'ємної трансляційної і приповерхневої або ротаційної несумісності відповідно; ∇f - градієнтна частина потоку, зумовлена сторонніми джерелами.

Поверхні матеріалу набувають клітинного вигляду, рис. 1.8. Така клітинна структура добре обґрунтована теоретично [19] та підтверджується періодичним розподілом напружень вздовж навантажених різнорідних середовищ нормальними та дотичними напруженнями [20].

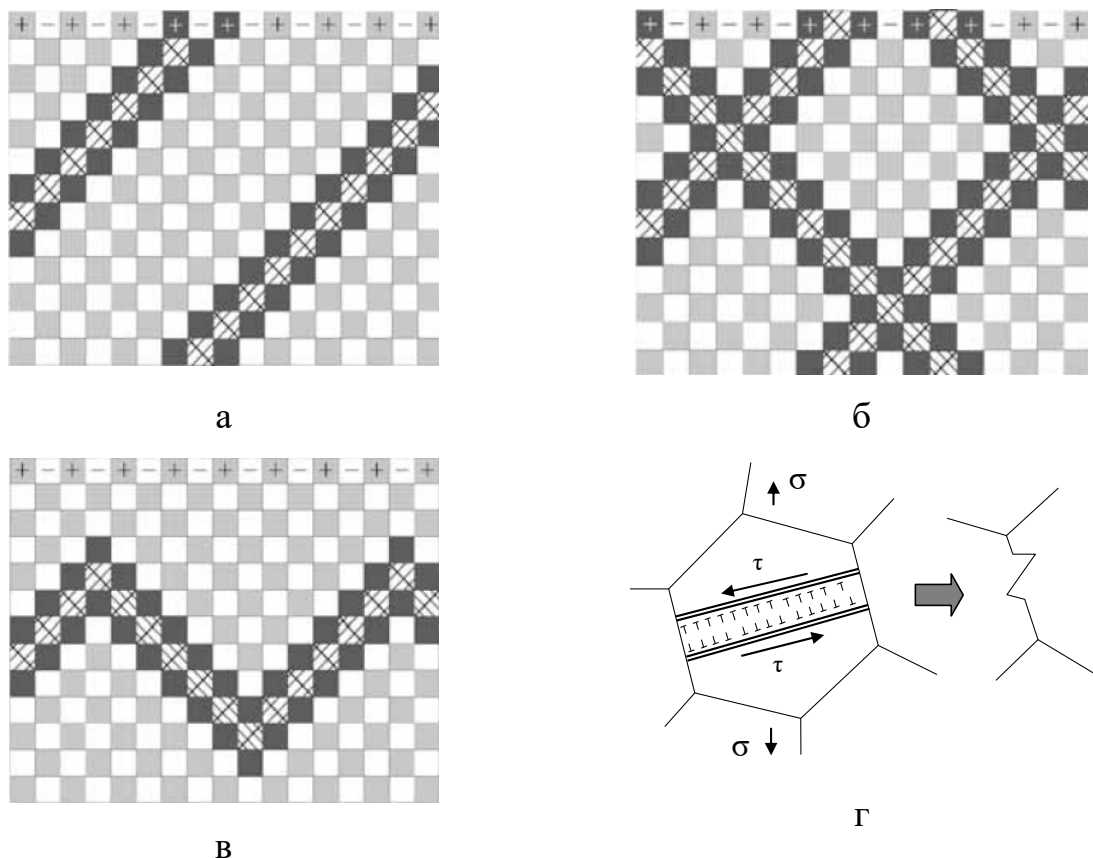


Рис. 1.8. Схеми поширення мезосмуг у поверхневому шарі матеріалу у вигляді «шахової дошки» а- зсув вздовж одного напрямку; б, в- зсуви у двох напрямках; г – формування екструзій на межах зерен

Нормальні напруження розтягу формують екструзії на межах структурних елементів, а дотичні напруження утворюють поперечні стінки між ними, рис. 1.8.

При цьому схему розподілу деформацій на межах структурних елементів подано на рис. 1.9.

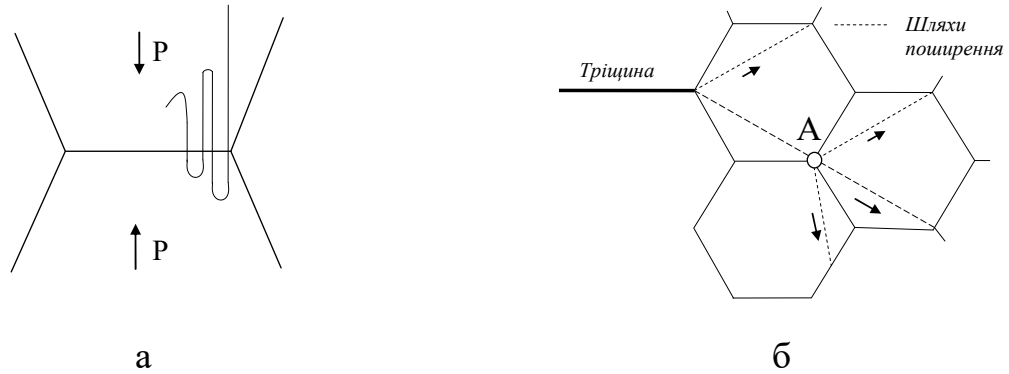


Рис. 1.9. Схема розподілу локальних напружень на межі зерен – а та поширення тріщини в полікристалічному тілі - б з можливими напрямками гілкування

Відомо, що довжину хвилі λ модуляції поверхневих структур у напруженому твердому тілі можна оцінити за лінійним наближенням нестабільності Гринфелда [22-24]:

$$\lambda \geq \lambda_c = \frac{\pi E_c}{M \sigma_f^2},$$

де λ_c – граничне значення довжини хвилі модуляції; E_c та σ_f – поверхневі напруження та натяг поверхневого шару

При оцінюванні пластичного течіння поверхневих шарів повинні бути враховані наступні початкові і граничні умови [18-24]:

- деформований матеріал є нерівноважним нелінійним середовищем, структура якого характеризується наявністю атомних кластерів різних конфігурацій. Їх стохастичний розподіл можна описати в рамках польової теорії дефектів;

- пластична деформація кластерних систем відбувається шляхом поширення нелінійних хвиль, зв'язаних з локальною перебудовою

електронних орбіталей атомних кластерів різних конфігурацій. Цей процес відбувається без збільшення густини вихідних атомних кластерів і в першому наближенні розглядається як бездисипативний.

- розвиток пластичного течіння локалізований в шарі з двома межами – поверхневим шаром і його інтерфейсом з підшаром;

- інтерфейс «поверхневий шар - підшар» має «шаховий» розподіл стискальних і розтягуючих нормальних напружень. Пластичне течіння може розвинути лише у «клітинах» нормальних напружень розтягу із сформованою кластерною структурою. «Клітини» стискальних нормальних напружень є пружно деформованими й генерують зустрічні поля напружень, зумовлюючи деформаційне зміцнення і зміну траєкторії нелінійних хвиль пластичної формозміни у «клітинах» нормальних напружень розтягу.

В рамках даних початкових і граничних умов безрозмірні величини потоку J і густини атомних кластерів α (з розривом вектора зміщень u) можуть бути записані наступними хвильовими рівняннями [25, 26]:

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} J_\mu^\alpha = -\frac{\partial \ln u_\mu}{\partial t}, \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{\mu\chi\delta} \frac{\partial J_\delta^\alpha}{\partial x_\chi} = -\frac{\partial \alpha_\mu^\alpha}{\partial t}, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \alpha_\mu^\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{\mu\chi\delta} \frac{\partial \alpha_\delta^\alpha}{\partial x_\chi} = \frac{1}{\tilde{c}^2} \frac{\partial J_\mu^\alpha}{\partial t} + \sigma_\mu^\alpha - P_\mu^\beta \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}, \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial v_\mu}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_\mu^\alpha}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial P_v^\beta}{\partial x_\alpha} \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}, \quad (1.5)$$

де $v_\mu = \frac{\partial \ln u_\mu}{\partial t}$ - швидкість пружної деформації середовища з дефектами;

$\sigma_\mu^\alpha = \frac{\partial \ln u_\nu}{\partial x_\beta} \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}$ - пружне навантаження в такому середовищі; c і $\tilde{c}$ —

відповідно швидкість звуку і швидкість поширення фронту пластичного

збурення; $P_\mu^\alpha(x, t)$ — пластична частина дисторсії; $\varepsilon_{\mu\chi\delta}$ - символ Леві-Чевіти; $C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}$ — пружні сталі.

Рівняння (1.1)-(1.5) мають наступне значення: (1.1) - рівняння неперервності середовища з дефектами, з якого випливає, що джерелом пластичного потоку є швидкість перебудови дефектів; (1.2) - умова подібності пластичної деформації; принципово важливо, що зміна густини середовища з часом визначається в даному випадку не div , а rot потоку; (1.3) - умова неперервності дефектів, яка відображає відсутність зарядів вихрової компоненти поля пластичної деформації ($\alpha_\chi^\beta = \varepsilon_{\chi\mu\nu} \partial_\mu P_\nu^\beta$); (1.4) - основне рівняння для середовища з пластичним течінням; (1.5) - рівняння квазіпружної рівноваги. Воно являє собою відоме в континуальній механіці рівняння, проте, крім пружної деформації враховує у правій частині пластичні деформації [27, 28]. В полікристалах ефект каналювання локальних структурних деформацій відбувається на межах зерен, зумовлюючи відомий механізм зернограничного проковзування. Процеси проковзування на межах зерен, зароджуються в трійних стиках зерен, формуючи локалізовані концентратори, рис. 1.10:

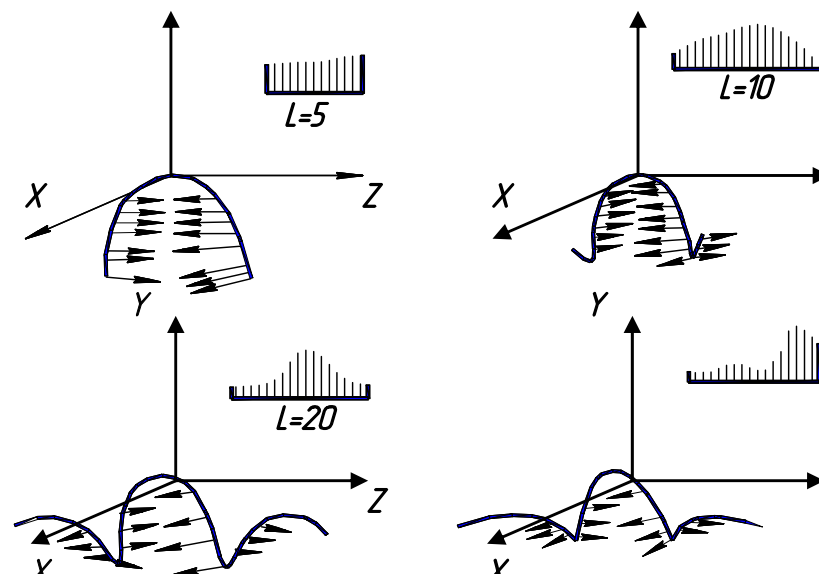


Рис. 1.10. Залежність швидкості деформації і форми деформованої області від її довжини [29, 30]

Отже, загальна деформація зразка є сумою парціальних внесків деформації окремих ділянок. Це свідчить, про те, що в зонах локалізації дійсно зосереджено всі прирости пластичної деформації зразка $\delta\varepsilon$, які можна описати [31] як

$$\partial\varepsilon \approx \frac{\delta L}{L} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{xx_i}^{magl}}{L} \approx N \langle \varepsilon_{xx} \rangle \frac{l}{L},$$

де N - кількість активних ділянок локалізованого потоку (зон локалізації); $\varepsilon_{xx_i}^{mag}$ - амплітуда складової тензора пластичної деформації; ε_{xx} - деформація ділянки; $\langle \varepsilon \rangle l$ - середнє видовження у межах ділянки; L - довжина зразка, за умови $Nl < L$.

Слід відмітити, що зони макроскопічної локалізації деформування, у свою чергу, мають складну структуру: лінії ковзання орієнтовані за кількома системами, сформовані мезосмути. Фізична мезомеханіка дозволяє розглянути деформівне тіло як багаторівневу ієрархічну систему, у якій процеси локальної втрати стійкості є взаємопов'язаними і відбуваються на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях.

1.3. Критерії опису циклічної тріщиностійкості матеріалів

Врахування циклічної зміни навантаження є складною задачею, її точний розв'язок поки що відсутній. Складність побудови розв'язку вказаної задачі пов'язана із наступними чинниками:

- реверсивне навантаження призводить до виникнення залишкових стискаючих напружень в околі вістря тріщини;
- циклічне пластичне деформування в околі вістря тріщини істотно впливає на напружено – деформівний стан у зв'язку з процесами зміцнення та знеміцнення;

- при циклічному навантаженні в додатній частині циклу настає закриття тріщини, тобто під час розвантаження протилежні береги тріщини контактують, і це також істотно впливає на напружено – деформівний стан конструкційного елемента або зразка із тріщиною.

У випадку, коли розмір пластичної зони істотно менший від довжини тріщини, для визначення напружень за її межами формально можуть бути використані співвідношення лінійної теорії пружності. Численні експериментальні дослідження виявили кореляцію між швидкістю росту втомної тріщин (РВТ) і розмахом ΔK або максимальним КІН циклу K_{max} ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$), де K_{min} - мінімальний КІН циклу.

Закономірності зміни швидкості росту втомних тріщин можна подати в подвійних логарифмічних координатах у вигляді S – кривої, як функція росту втомної тріщини від коефіцієнту інтенсивності напружень K_{max} або ΔK [32, 33]. Діаграма умовно поділяється на три ділянки, їх особливості і значення достатньо висвітлені в літературі. Перша ділянка діаграми характеризується великим кутом нахилу, в зв'язку з чим малопридатна для оцінки довговічності конструкцій, внаслідок ймовірності великих помилок в оцінці росту втомних тріщин.

Третя ділянка критичного росту швидкості відрізняється різким її збільшенням, тому для оцінки живучості конструкцій, тобто часу стабільного росту тріщини, використовують другу ділянку ДРВТ.

Відомо велика кількість залежностей апроксимуючих лінійну ділянку діаграми росту втомних тріщин, але внаслідок відсутності значних переваг, будь – якої з них, а також завдяки простоті, в більшості випадків використовують залежність Періса.

Періс та Ердоган запропонували залежність da/dN від ΔK у вигляді ступеневої функції із заміною ступеня 4 на n [32, 33]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

де C , n – константи матеріалу

Елбером були враховані вплив пластичної зони у вершині тріщини, а також явище закриття тріщини в кожному циклі навантаження, та запропоновано другу ділянку кінетичної діаграми втомного руйнування описати залежністю:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n$$

де K_{eff} - ефективний розмах КІН в циклі навантаження, що обчислюється як

$$K_{eff} = K_{max} - K_{op}$$

де K_{max}, K_{op} - відповідно КІН при максимальному навантаженні та в момент розкриття тріщини в циклі.

Існує велика кількість експериментальних даних, побудовані відповідні аналітичні залежності для оцінки значень тріщиностійкості в широкому діапазоні зміни швидкості навантаження. [32] Руйнування металевих матеріалів завжди супроводжується утворенням у вершині втомної тріщини пластичних зон. При плоскому напруженому стані (в'язке руйнування) утворюються дві пластичні зони: сильнодеформована мікрозона h_{yh} та слабodeформована h_y .

При циклічному навантаженні утворення біля вершини втомної тріщини двох пластичних зон (циклічної h_{yh} та монотонної h_y), пов'язане з циклом розтягу і стиску, а локальний напружений стан впливає лише на розміри пластичних зон. Тому у випадку втомних зломів h_y/h_{yh} не є постійною величиною, а залежить від K_{max} і ΔK . Особливості поведінки полів напружень і деформацій біля вершини тріщини можна отримати з аналізу форми і розмірів пластичної зони.

Пропонуються різноманітні рішення для радіуса r_p пластичної зони, вони ґрунтуються на концепції номосштабної текучості, яка є шуканою величиною у вигляді функцій прикладених напружень, довжини тріщини і параметрів діаграми деформування, рис. 1.11:

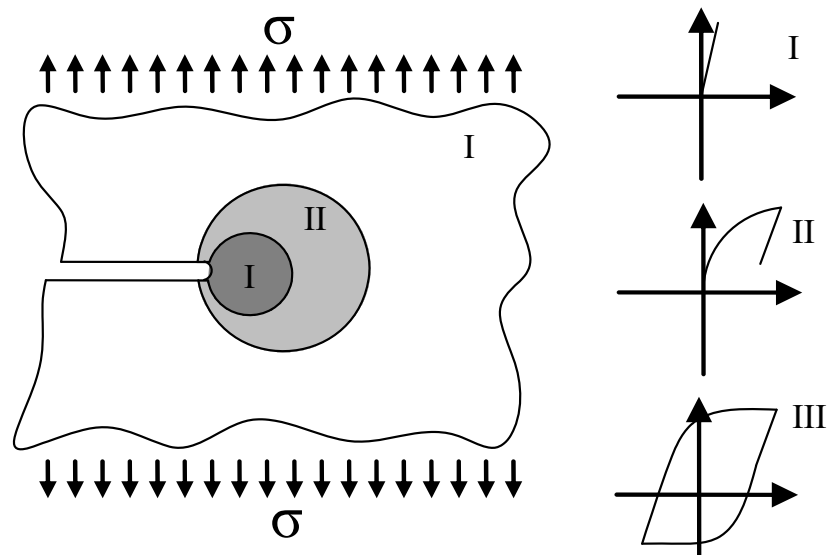


Рис. 1.11. Схема зон локалізації деформацій у вершині втомної тріщини: I – пружна зона; II - монотонна пластична зона; III - зона циклічного пластичного деформування.

Оцінка r_p на основі підходу Ірвіна:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K}{\tau_r} \right)^2,$$

де K – величина КІН.

Форма пластичної зони може бути розрахована шляхом підстановки складових пружних напружень в одну з умов текучості.

Так, прийнявши останнє припущення в формі рівняння Губера- Мізеса одержимо [34, 35]:

$$r_p(\theta) = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\tau_r} \right)^2 \left[3 + \sin^2 \frac{\theta}{2} - \frac{9}{4} \sin^2 \theta - 4\nu(1-\nu) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right],$$

де θ - полярний кут локальної системи координат (r, θ) з центром в вершині тріщини; ν - коефіцієнт Пуассона. Ця залежність може бути використана для оцінки форми пластичної зони в умовах плоскої деформації, а при $\nu=0$ - в умовах плоского напруженого стану.

Параметр Зенера [36, 37] може бути використаний для оцінювання активності накопичення смуг ковзання на межах структурних елементів, рис. 1.12.

$$P_{ZP} = \gamma_{net}^{p*} \left(1 + K_z' \frac{\sigma_{GB}^{n*}}{\sigma_y} \right),$$

де $\gamma_{net}^{p*} = \max(n_i \varepsilon_{ij}^p m_j)$ - максимальна пластична деформація зсуву у перерізі структурного елемента; GB – усереднені пікові напруження прикладені нормально до межі зерна; K_z – стала матеріалу.

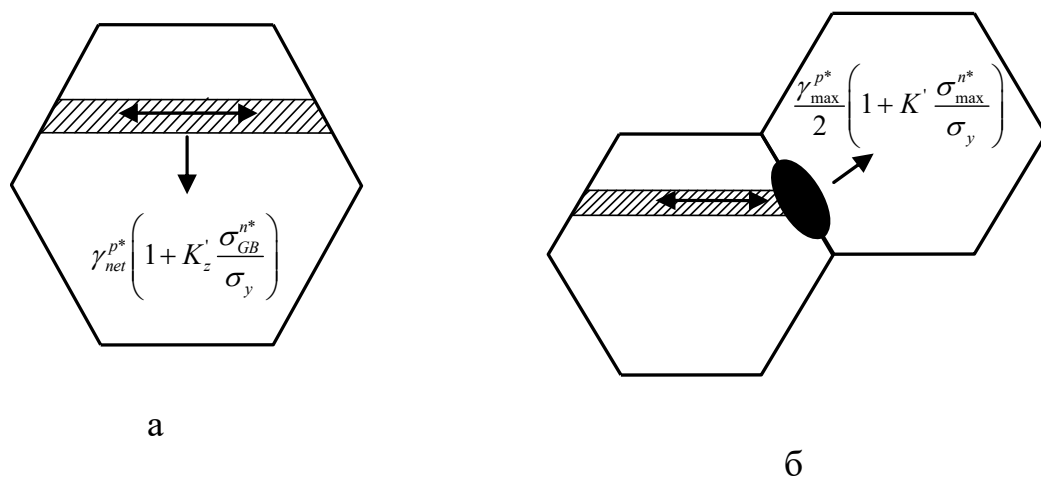


Рис. 1.12. Параметри індикатора втоми (ФИПС) з сукупним впливом пластичного деформування за зсувних та нормальних напружень: інтенсивний зсув вздовж лінії ковзання – а та взаємодії смуги ковзання та межі зерна

Критерій руйнування при пружнопластичному деформуванні в умовах плоскої деформації формулюється таким чином:

$$J \geq J_{IC}$$

Парапуре та Ванерґеє запропонували наступну залежність між J – інтегралом та величиною розкриття тріщини δ [38]:

$$J = M \sigma_{02} \delta$$

де M - коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометричних параметрів зразка;

Pandey та Banerjee [38, 39] запропонували зв'язок між розкриттям вершини тріщини (COD) та J – інтегралом:

$$COD = J / M \sigma_T$$

де M - ступінь підвищення напруження текучості біля вершини тріщини порівняно із границею текучості матеріалу;

Хоча рівняння Періса широко використовується для визначення тріщиностійкості матеріалів воно не враховує величину асиметрії циклу навантаження. Для врахування даного фактора Форманом [40] було запропоновано наступну формулу:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C(\Delta K_I)^n}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K}$$

Відома формула Черепанова [41], яка також враховує величину асиметрії циклу навантаження:

$$\frac{dl}{dN} = -\beta \left(\frac{K_{I \max}^2 - K_{I \min}^2}{K_c^2} + \ln \frac{K_c^2 - K_{I \min}^2}{K_c^2 - K_{I \max}^2} \right)$$

В роботі [42] наведена формула Берсома, яка однаково добре описує ріст втомних тріщин для матеріалів із різними модулями пружності:

$$\frac{dl}{dN} = D \Delta G_I$$

де ΔG_I - розмах величин енергій які витрачаються на ріст тріщини на одиницю довжини;

Величина енергії на просування тріщини, пов'язана наступним співвідношенням із розкриттям тріщини δ та межею текучості матеріалу σ_T :

$$\Delta G_I = \delta_T \sigma_T \text{ та } \Delta G_I = (\Delta \delta) \sigma_T$$

Із врахуванням цього, формула набуде вигляду:

$$\frac{dl}{dN} = D(\Delta \delta) \sigma_T$$

Таким чином, швидкість росту втомної тріщини залежить від розкриття тріщини та межі текучості матеріалу.

Існує також значна кількість емпіричних та напівемпіричних законів росту втомної тріщини при циклічному навантаженні, які враховують вплив асиметрії, їх аналіз здійснено в [43]. Броек та Счіве встановили емпіричний закон у вигляді залежності:

$$\frac{d_2 l}{dn} = B_1 \left(\frac{\Delta K}{1 - R} \right)^3 \exp(-B_2 \cdot R)$$

де $\Delta K = 2K_a$ - діапазон КІН;

$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ - параметр, що враховує асиметрію циклічності напружень; B_1 і B_2 -

константи матеріалу;

Форман та ін. [40] запропонували залежність:

$$\frac{d_2 l}{dn} = \frac{B_1 (\Delta K)^3}{(1 - K) \cdot K_a - \Delta K}$$

де K_a - критичне значення КІН, для якого має місце постійний ріст тріщини при розтягуючих напруженнях циклу навантаження.

Ердоган пропонує свій закон поширення втомної тріщини. Його рівняння можна представити наступним чином:

$$\frac{d_2 l}{dn} = B_n \cdot K_{\max}^{X_1} \cdot K^{X_2}$$

де K - максимальне значення коефіцієнту інтенсивності напружень; B_n, X_1, X_2 - константи матеріалу;

Міллер та Труп отримали добре узгодження із експериментальними даними для виразу:

$$\frac{d_2 l}{dn} = B_S \cdot K_{\max}^{\phi}$$

де B_S, ϕ - також константи матеріалу;

Це привело до розробки багатьох підходів, найбільш перспективним та перевіреним з яких є урвхування швидкості виділення енергії та її математичний показник – незалежний від шляху обходу J - інтеграл [41].

$$J = \int_{\Gamma} \left(W n_1 - T_m \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) ds$$

де W - розподіл енергії деформації; n_1 - складова x_1 розміщена по нормалі до контуру Γ ; $T_m = \sigma_{mk} n_k$ - зусилля навантаження; u_m - складова переміщення;

На основі даного критерію можна записати рівняння циклічної витрати енергії за цикл навантаження:

$$\Delta J = \int_{\Gamma} \left(\Delta W n_1 - \Delta T_m \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) ds$$

Від критерію ΔJ легко перейти до рівняння подібного Перисівському [45]:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta J)^n$$

де C та n перехідні параметри;

Представлені закони росту тріщини, враховують асиметрію навантаження, дають задовільне узгодження з експериментальними даними в певному діапазоні швидкості росту втомних тріщин, та для певних типів матеріалів. Але ні один з них не враховує граничного значення, а відповідно не може бути використаний для визначення умов граничного підростання дефекту.

1.4. Використання методів нелінійної механіки руйнування для оцінювання тріщиностійкості трубних сталей

Однією з основних проблем при проектуванні та експлуатації газопроводів залишаються тріщини, які можуть поширюватись як у вихідному, так і у експлуатованому металі. Тому важливо розробити підходи експлуатаційного та лабораторного оцінювання стану труби. Відомо низку праць [46-50], які рекомендують кут розкриття вершини тріщини як результат методу прямого вимірювання та параметр оцінювання стану конструкції за наявності експлуатаційних дефектів, рис. 1.13.

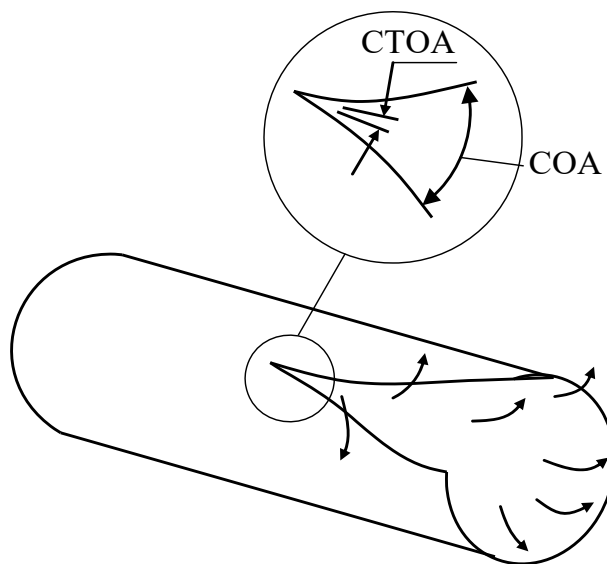


Рис. 1.13. Руйнування газопроводу та схема вимірювання СТОА [50]

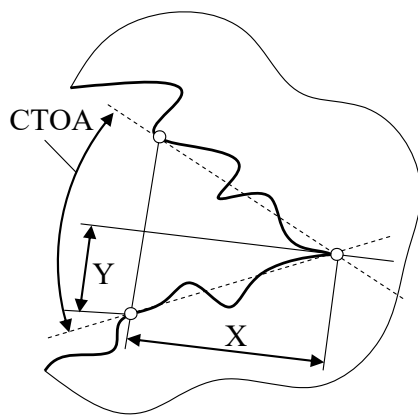
Існують методи прямого оцінювання тріщиностійкості матеріалу магістральних газопроводів, які можливі з використанням параметрів нелінійної механіки руйнування, зокрема кута розкриття вершини тріщини, рис. 1.3. Критерій руйнування матеріалу труби можна записати наступним чином:

$$CTOA_c > CTOA_{\max},$$

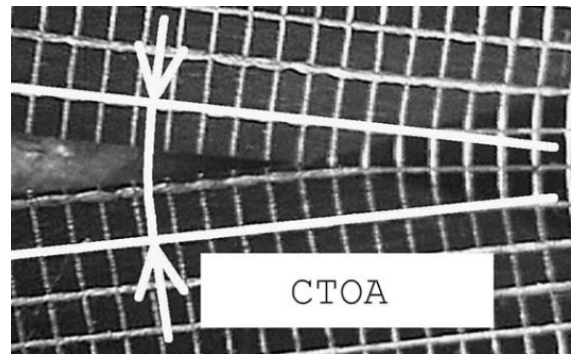
де $CTOA_{max}$ – максимальне значення усталеного кута розкриття вершини тріщини.

Для вимірювання параметрів кута розкриття тріщини як правило, проводять фотозйомку поверхні з дефектом, рис. 1.14, після чого [51, 52]:

- шукають вершину тріщини;
- вибирають базові точки по обидва боки вершини;
- з'єднують базові точки із вершиною тріщини;
- вимірюють значення кута розкриття вершини.



а



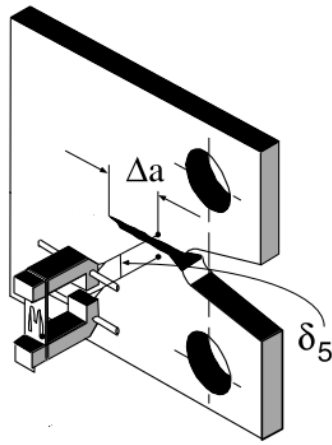
б

Рис. 1.14. Схема – а та приклад – б вимірювання кута розкриття вершини тріщини (CTOA)

Кут розкриття вершини тріщини CTOA тісно пов'язаний із розкриттям CTOD [52]:

$$CTOA = 2 \tan^{-1} \left(\frac{CTOD}{2d} \right),$$

де d – відстань від вершини тріщини до точки вимірювання



СТОА мав аналітичний зв'язок
із рокриттям вершини тріщини

δ_5

$$CTOA = d\delta_5 / \Delta a$$

Рис. 1.15. Схема вимірювання розкриття
вершини тріщини δ_5

Підхід на основі перерахування полів векторів переміщень у в карти деформації поверхні (surface mapping деформації), розвинто в групі проф. М. Саттона. Зокрема, було запропоновано критерій оцінювання інтенсивності деформації [53, 54] при розкритті тріщини, рис. 1.16.

$$COD_{2D} = \left[(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 \right]^{1/2},$$

Δu , Δv – компоненти відносного зміщення, вздовж та поперек фронту тріщини відповідно.

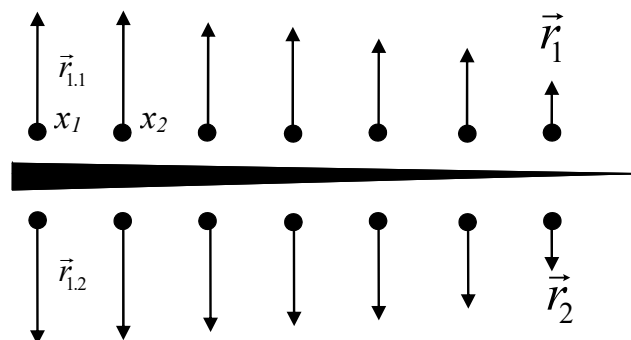


Рис. 1.16. Схема способу обчислення розкриття вершини тріщини (Панін С.В., Любутін П.С.)

Координати точок початку векторів відрізняються лише за y , отже розкриття тріщини для координат x_1 та x_2 можна записати

$$\delta_i = \Delta x_{i,1} - \Delta x_{i,2},$$

Таким чином, середньоарифметичне розкриття тріщини можна записати у вигляді [55, 56]:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{i,1} - \Delta x_{i,2}}{n}$$

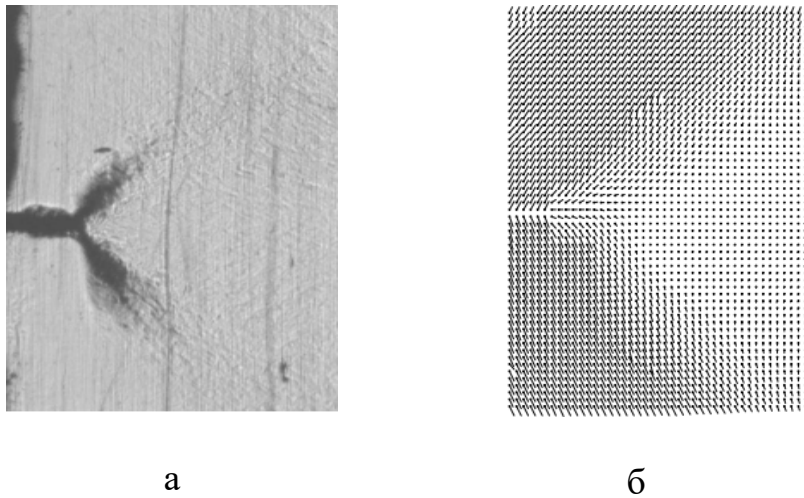


Рис. 1.17. Зображення поверхні – а та поле переміщень - б

Знаючи швидкість розтягу зразка і час між одержаннями зображень та враховуючи, що $\varepsilon_{xy} = 0$, рис. 1.17, можна обчислити інтенсивність деформації зсуву γ за формулою [57, 59]:

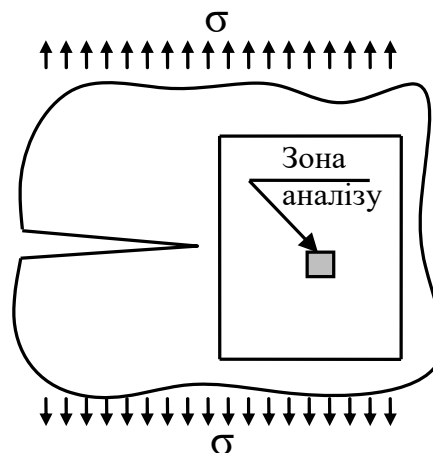


Рис. 1.18. Схема вимірювання та розрахунку кута розкриття вершини тріщини (СТОА)

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2},$$

Кут розкриття вершини тріщини СТОА можна визначити за допомогою кореляційного аналізу, рис. 1.19.

$$CTOA_i = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{2r_1} (du_i - dl_i) \cdot n_i \right),$$

За наявності стійких смуг ковзання в матеріалі можуть зароджуватись втомні тріщини. Деякі автори стверджують, що стійкі смуги ковзання мають певну дислокаційну структуру [60]. Зародженню тріщин передують утворення поверхневого пошкодженого шару, деградація структури матеріалу.

Висновки

1. Проаналізовано механізми деформування твердих тіл на основі підходів теорії пластичності та фізики міцності матеріалів. Механічні властивості матеріалу (макрорівень) залежать від структурних факторів матеріалу: розміру зерна, субзерна, його орієнтації (мікрорівень). Лише використання багаторівневого підходу до опису процесів деформування дозволить побудувати узагальнену фізичну модель поведінки матеріалу.

2. Незважаючи на значну кількість праць, присвячених проблемам деградації, накопичення розпорошених та локалізованих пошкоджень на матеріали магістральних газопроводів, відомі лише окремі дослідження урахування впливу розпорошених структурно-механічних дефектів на параметри оцінювання тріщиностійкості нелінійної механіки руйнування.

3. Потребують подальшого дослідження та узагальнення механізми впливу структури матеріалу на розпорошені пошкодження з урахуванням різних напрямків вирізання зразків, а також вплив параметрів деформації розпушування на деформаційні залежності.

4. Потребують детального вивчення основні механізми розвитку дефектів на мікрорівні і їх вплив на макрозакономірності деформування твердого тіла. Вирішення цієї проблеми можливе за умови використання підходів мезомеханіки матеріалів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОГО НАПРАЦЮВАННЯ НА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ТА РУЙНУВАННЯ СТАЛІ 17Г1С

2.1. Інтроскопічні дослідження пошкодженості та деградаційні прояви у сталі 17Г1С

Близько половини магістральних газопроводів України експлуатуються понад 30 років, а близько чверті – понад 40 років. Високі вимоги до цілісності та ефективності роботи таких технічних систем вимагають підвищення точності оцінювання їх характеристик після довготривалого напрацювання [62-64].

Відомо, що структура визначає механічні властивості матеріалів трубопровідних систем. Зміна розмірів зерен, накопичення структурних пошкоджень на їх межах, накопичення водню в околі включень змінює характеристики матеріалу, його стійкість до статичних та динамічних навантажень [65, 66]. Саме тому важливо встановити основні закономірності структурної деградації матеріалу та зміни фізико-механічних властивостей.

Особливу увагу, слід приділити впливу наводнювання, оскільки водень сприяє розвитку пошкоджуваності, зокрема зародженню і росту мікротріщин. Відомо, що вміст залишкового водню в експлуатованому металі трубопроводу вищий, ніж у вихідному матеріалі. У низці праць [67-69] за результатами оцінювання водневої проникності сталей та кінетики десорбції водню доведено, що циклічне напрацювання збільшує інтенсивність пасткування водню та енергію його зв'язування в пастках, що зумовлює вищу дефектність експлуатованого металу [70].

Крім того, відомі праці, у яких виявлено неоднозначний вплив структурних дефектів на деформаційні властивості матеріалів газо- и нафтопроводів. У ряді випадків підвищення пластичності фіксувалось

внаслідок розкриття множинних дефектів орієнтованих перпендикулярно до ліній навантажування матеріалу [63, 64]. Інтерес до цих явищ зумовлений специфікою структури матеріалів після тривалої експлуатації, коли дуже чітко проявляється анізотропія матеріалу в повздовжньому і поперечному напрямках. Саме у такому матеріалі відбуваються незворотні зміни внаслідок збільшення питомої частки меж зерен, спричиняючи зміну деформаційних властивостей на мікро-, мезо-, і макрорівнях. Саме тому, структура та властивості експлуатованого матеріалу значно відрізняється від вихідної.

Інтроскопічні дослідження. Зразки труб магістрального газопроводу в початковому стані і після 40 років експлуатаційного напруження досліджували за допомогою магніто-оптичної інтроскопії в діапазоні частот від 8 до 60 кГц, при накладенні постійних однорідних магнітних полів від 0 до 25 Е. Встановлено значну зміну характеру динамічної дефектної структури, виявлену в зразках за допомогою індуктора нормального поля амплітудою 40 Е і частотою 8 кГц. На всіх досліджених зразках не виявлено лінійні дефекти типу тріщин. Проте, на початковому зразку спостерігали дефектну ділянку, яка не зникала навіть за порівняно великих значень підмагнічуючого поля (рис. 2.1).

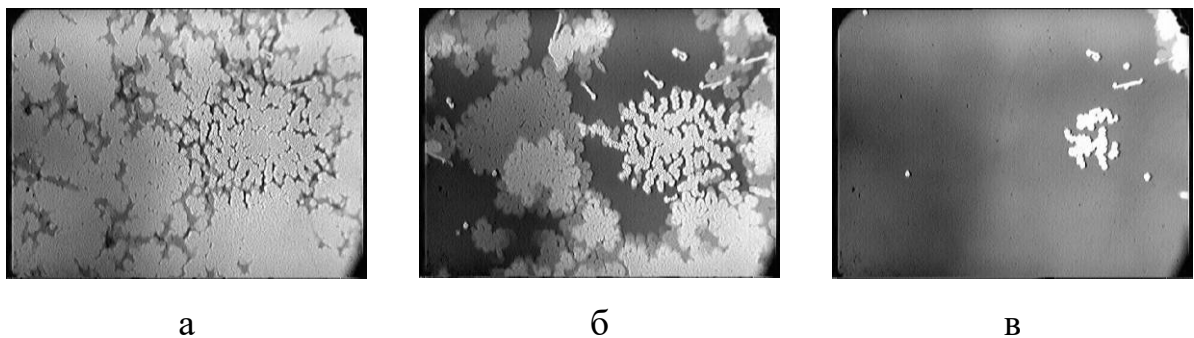


Рис. 2.1. Вид магніто-оптичного відображення дефекту на вихідному зразку труби за різних значень підмагнічуючого поля: а - 15 Е, б - 17 Е, в - 19 Е

Збільшення поля підмагнічування спричиняє зміни динамічної доменної структури [71]. Виникає локалізована ділянка нестійкої дрібної

квазілабіринтної структури. При цьому, для деградованого матеріалу необхідне більше підмагнічуюче поле для порушення динамічної нестабільності. У полі 20 Е вихідний зразок вже знаходиться в насиченому стані, тоді як в 40-річному зразку ще спостерігали динамічну доменну структуру (рис. 2.2). Це свідчить про істотну відмінність поверхневих магнітних властивостей досліджених зразків.

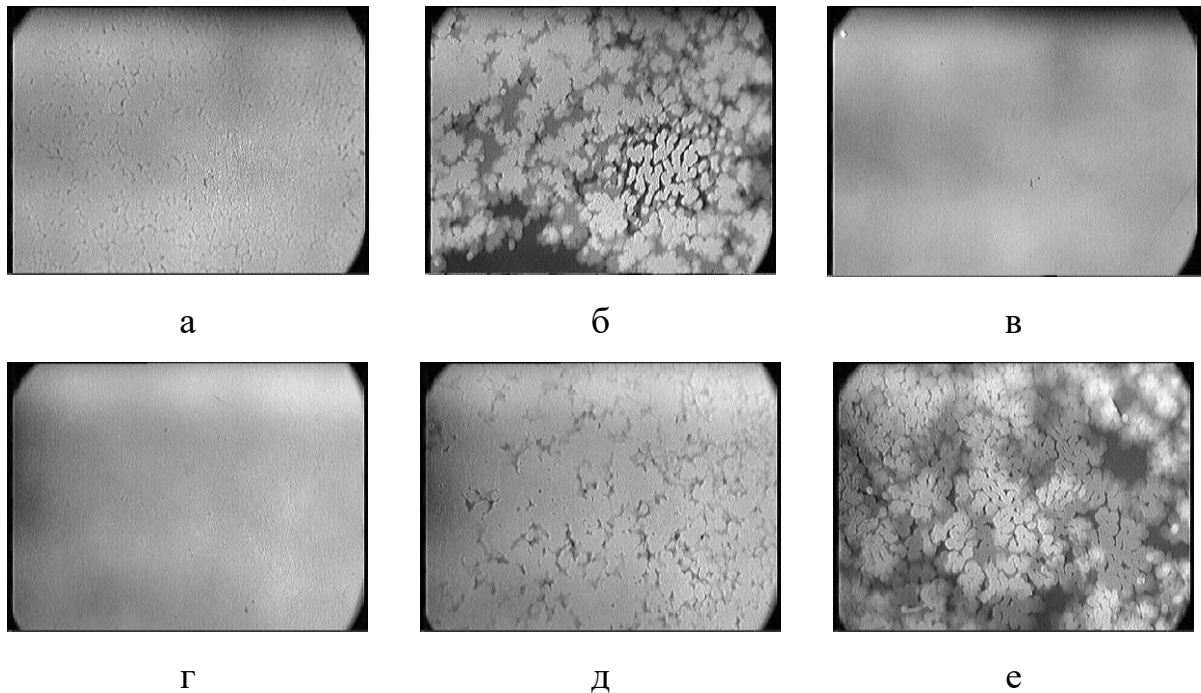


Рис. 2.2. Магніто-оптичні образи поверхневої доменної структури на зразках трубопровідної сталі за різних значень підмагнічуючого поля: а - 15 Е, б - 17 Е, в - 19 Е

2.2. Зразки для випробувань на міцність та втому

Досліджували фрагмент магістрального газопроводу «Київ – Захід України - 1» (КЗУ-1) після сорока років експлуатації в землі. Газопровід має діаметр 1020 мм, з товщиною стінки 10 мм та гумово-бітумне ізоляційне покриття. Порушення ізоляції, спричинило утворення корозійних пошкоджень на зовнішній поверхні труб у вигляді плям, виразок і каверн різної величини і глибини, внаслідок взаємодії металу труби з середовищем.

Відсутність ізоляції на аналізованій ділянці магістрального газопроводу «Київ – Захід України - 1» з сталі 17Г1С за ТУ №1-150-67, зумовила утворення чисельних корозійних пошкоджень зовнішньої поверхні. При дослідженні циклічної тріщиностійкості використовували призматичні зразки із центральним отвором-концентратором, рис. 2.3. Для оцінювання механічних характеристик сталі 17Г1С використовувались гладкі циліндричні зразки з діаметром робочої частини 5 мм (рис. 2.4). Всі зразки виготовляли з труби магістрального газопроводу «Київ-Захід України - 1».

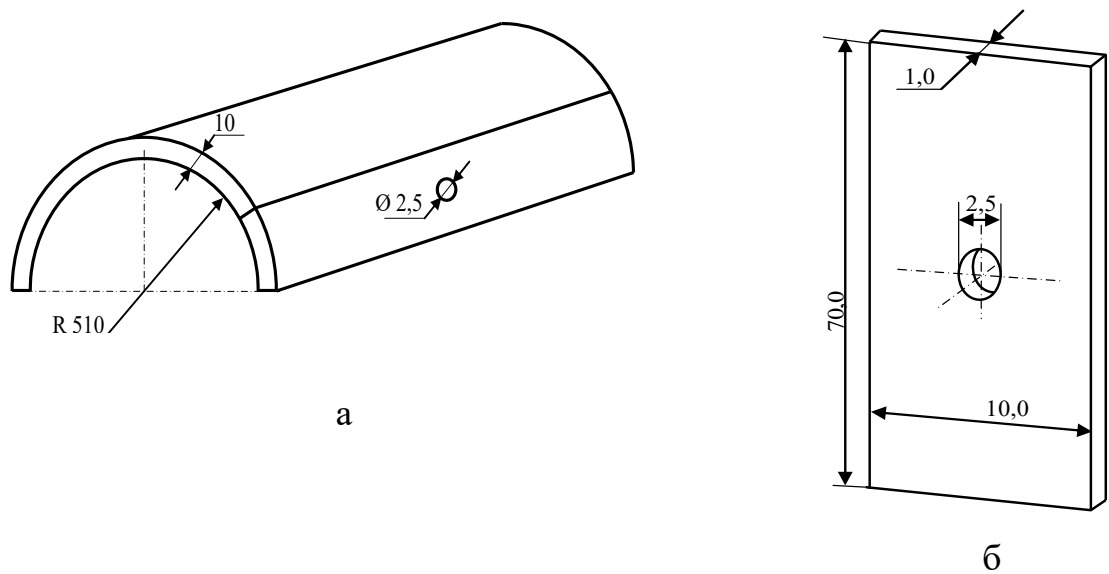


Рис. 2.3. Схема вирізання плоских зразків з фрагменту магістрального газопроводу

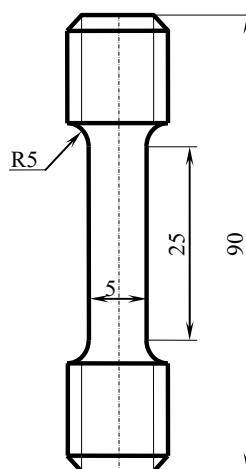


Рис. 2.4. Зразок із сталі 17Г1С для випробувань на статичний розтяг

Циліндричні зразки виготовляли у повідковому патроні, базування здійснювалося в центрових отворах на торцях. Формування робочої ділянки зразка та нарізання гвинтової поверхні різьби проводилося різцем за одне встановлення. Наступним етапом у підготовці зразків було шліфування та полірування. Полірування робочої ділянки зразка та галтелей проводилося пастою ГОІ та повстним кругом. На завершальному етапі проводили полірування з використанням трьох різновидів алмазної паст: грубої, середньої та дрібної дисперсності до рівня шорсткості Ra 0,05. Виготовлення лабораторних зразків виконували із забезпеченням мінімального впливу технологічних факторів на зміну механічних характеристик металу в місцях обробки.

Таблиця 2.1

Хімічний склад сталі 17Г1С

Вміст хімічних елементів 17Г1С, %								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
0.15 0.2	0.4	1.15	до	до	до	до	до	до 0.3
	0.6	1.6	0.3	0.04	0.035	0.3	0.008	

Таблиця 2.2

Механічні властивості металу труб магістральних газопроводів за
нормативними документами

Нормативний документ	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	δ , %	ψ , %	E, ГПа
	850	600	0,7	17	56	1,84
ГОСТ 19282-73, не нижче за	510	345	-	23	-	-
ТУ 1104-138100-357-02-96, не нижче за	588	441	не більше 0,9	20	-	-

Відомо, механічні властивості сталі 17Г1С, після тривалої напрацювання, істотно відрізняються від вихідного матеріалу, табл. 2.1. Точність виготовлення зразків та чистота їх поверхні відповідали вимогам, що приведені в регламентуючому документі [72]. Відхилення діаметра робочої частини зразка становило $\pm 0,03$ мм. Досліджували металографічні шліфи вирізані з труби, у радіальному та осьовому напрямках із зовнішнього та внутрішнього шарів.

2.3. Методика побудови повних діаграм статичного деформування

Циліндричні зразки діаметром 5,0 мм розтягували за умов рівноважного деформування на випробувальній установці ZD-100Pu з комп'ютеризованою вимірювальною системою до стадії, що передує утворенню макротріщини.

За параметрами спадаючих ділянок повних діаграм деформування визначали значення характеристик тріщиностійкості матеріалу, а вплив експлуатаційного напрацювання на тріщиностійкість матеріалу у процесі експлуатації визначали за різницею параметра тріщиностійкості визначеного для вихідних зразків і значеннями параметрів тріщиностійкості матеріалу для зразків, що піддавалися деградаційним процесам. Досліджували вплив тривалого (40 років) напрацювання на процеси деформування і кінетику руйнування сталі 17Г1С.

Конструкція установки схематично наведена на рис. 2.5. Установка містить рухому 1 і нерухому 2 траверси, з'єднані з ними захоплювачі 3,4, зразок 5, пристрій для забезпечення змінної жорсткості навантажувальної системи 6 і комп'ютеризовану вимірювальну систему 7 для проведення і обробки результатів випробувань. КВС складається із наступних складових: комп'ютер Pentium - 4, з операційною системою Windows 2000 NT 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 повздовжньої деформації, екстензометр для вимірювання поперечної деформації і програмного забезпечення Specimen, FastReg. Випробування всіх матеріалів проведені на описаній установці при 18 вимірюваннях за секунду. Маса її рухомих частин складає 1350 кг.

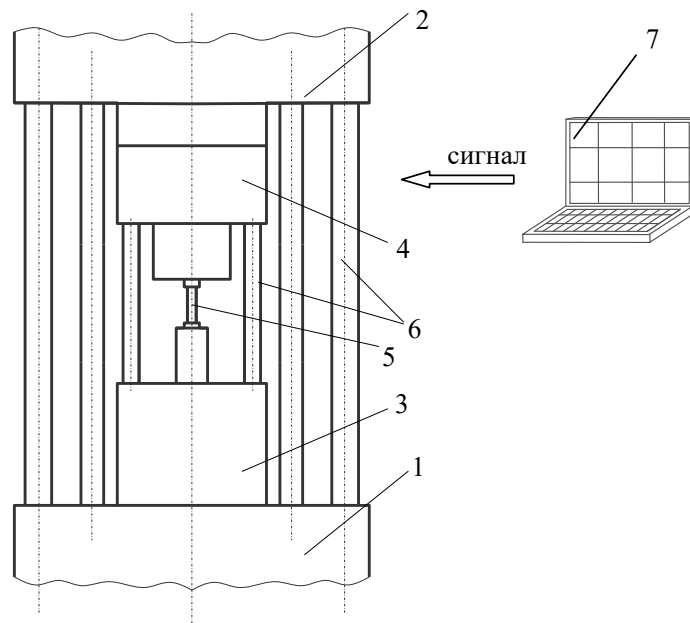


Рис. 2.5. Схема випробувальної установки.

Програмне забезпечення Specimen, випробувальної установки виконувало такі основні функції:

- створення нового експерименту;
- виклик старого експерименту;
- зміну конфігурації експерименту (вибір каналів, встановлення параметрів каналів, повздовжньої і поперечної бази зразка, написи для виведених графіків);
- увімкнення режиму опитування каналів з індикацією показів будь-яких вибраних каналів у фізичній розмірності;
- встановлення нуля каналів;

- запуск реєстрації показів вибраних каналів із заданою дискретністю записів на диск;
- відображення в процесі реєстрації первинної діаграми деформування в координатах: навантаження (P , кН), подовження (Δl , мм);
- зупинка реєстрації;
- після закінчення реєстрації (або виклику старого експерименту) виведення графіків.

Дані з текстового файлу реєстрації експортовали в Excel, Origin або інший пакет для подальшої обробки.

Вимірювальна система для проведення і обробки результатів випробувань дозволяла в реальному масштабі часу при виведенні на монітор комп'ютера будувати графік навантаження (P) – видовження (Δl) з частотою вимірювань до 18 вим/сек. При цьому наперед призначається усереднення результатів випробувань в межах 1...50 отриманих експериментальних точок.

Під час ремонтних робіт з труби було вирізано фрагмент, рис. 2.6 з метою оцінювання пошкодженості металу повздожнього та поперечного напрямків вирізання, рис. 2.6.

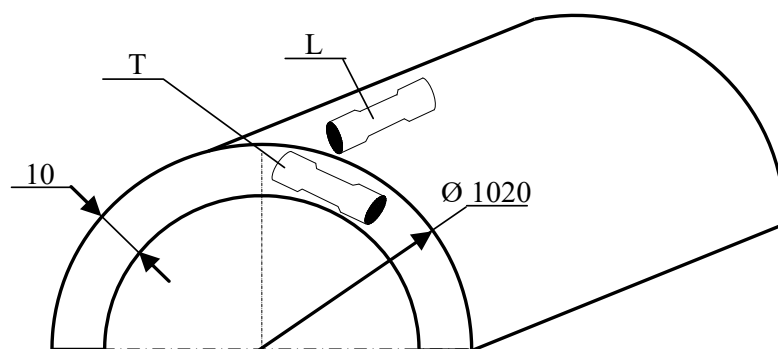


Рис. 2.6. Схема вирізання зразків поперечного та повздожнього розташування з дослідженого фрагменту труби експлуатованого газопроводу «Київ – Захід України - 1»

Кінетику накопичення розсіяних пошкоджень у експлуатованому матеріалі (для різних напрямків вирізання) при статичному навантаженні описували за методом повних діаграм, визначаючи значення деформації розпушення матеріалу ε_p , де в якості основного параметру прийнято поточне значення коефіцієнта поперечної деформації.

Деформація розпушення матеріалу [73]:

$$\varepsilon_p = [1 - 2\mu(\varepsilon)]\varepsilon, \quad (2.1)$$

де $\mu(\varepsilon)$ - поточне значення коефіцієнта поперечної деформації.

За параметрами спадаючих ділянок повних діаграм деформування визначали питому роботу руйнування A_p [73, 74], яка має прямий і достатньо чіткий зв'язок з граничною пошкодженістю матеріалу, і параметром тріщиностійкості K_λ [74].

$$A_p = \frac{F_K \cdot \Delta l_p}{S_K^2}, \quad (2.2)$$

де F_K - площа поверхні руйнування; Δl_p - видовження зразка на стадії росту макротріщини; S_K - опір матеріалу відриву [75]

$$K_\lambda = \sqrt{S_0 A_p E}, \quad (2.3)$$

$$K_\lambda = \sqrt{S_K \overline{\Delta l_p} E}, \quad (2.4)$$

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.

2.4. Методика аналізу поверхні із корозійними пітингами

Досліджували поверхню труби магістрального газопроводу пошкоджену корозійними мікродефектами. Аналізували орієнтацію та форму сітки тріщин "в плані", тобто форму поверхневих ямок корозії та їх комплексів, що утворюються на поверхні труби.

Для дослідження основних закономірностей множинного корозійного ямкоутворення труби магістрального газопроводу використовували автоматизований аналіз цифрових фотозображень [76-82].

Алгоритм аналізу зображення має ряд параметрів, які впливають на результат його роботи, тому важливо оцінити їх вплив на отримані показники пошкоджуваності поверхні. Розглянемо головні з них.

Формалізація завдань автоматизованої класифікації. Оптико-цифровий контроль є важливим методом технічної діагностики, оскільки дозволяє здійснювати контроль дефектності поверхонь матеріалів і конструкцій, незалежно, або в поєднанні з іншими методами. У даній роботі, під дефектометричним аналізом розуміли розпізнавання і визначення геометричних параметрів і розмірів дефектів. Дослідження корозійних ямкових утворень є важливим технічним завданням, оскільки дозволило систематизувати і накопичувати інформацію про стан ушкоджень, виконувати порівняльний аналіз контрольних ділянок поверхні. Запропонований в даній роботі підхід містить окремі етапи розпізнавання та дефектометрії груп пітингів, а також параметрів окремих корозійних ямок.

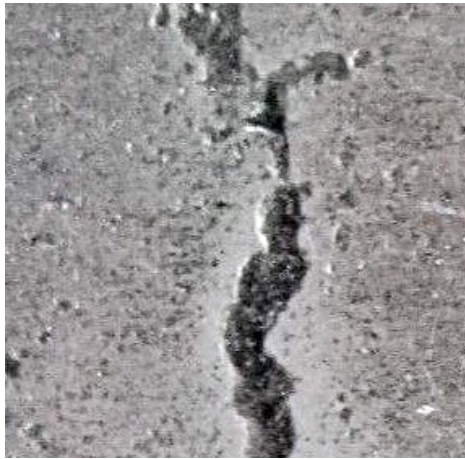
Така стадійність розгляду дефектів спрямована на вирішення двох основних завдань автоматизованої діагностики, зокрема:

- забезпечення повноти аналізу - зниження кількості помилково «розпізнаних» об'єктів;
- забезпечення максимальної точності - мінімізація похибок розпізнавання форми і розмірів об'єктів аналізу (пітингів).

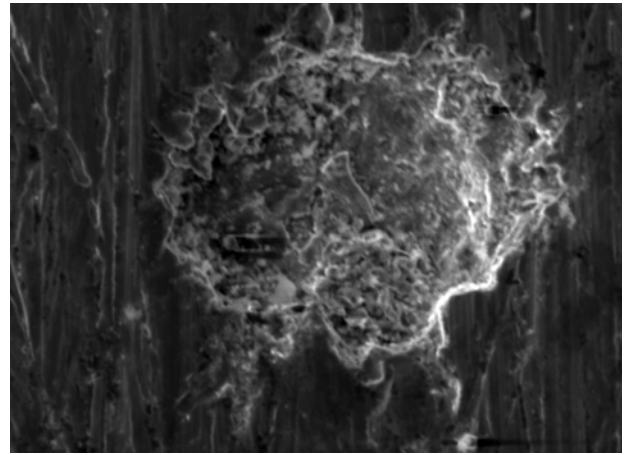
Пропонований в даній роботі підхід є сукупністю логічно пов'язаних підходів і методів обробки зображень, які забезпечують такі функції [76, 78]:

- розпізнавання;
- визначення розмірів дефектів;
- узагальнення та збереження результатів у табличному або графічному вигляді.

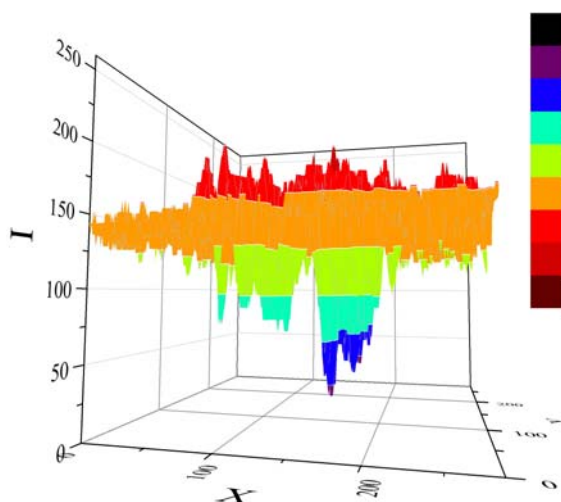
Аналіз експлуатаційних пітингів. Оптичне зображення. Для аналізу використовували зображення пошкодженої поверхні в градаціях сірого кольору, рис. 2,7а.



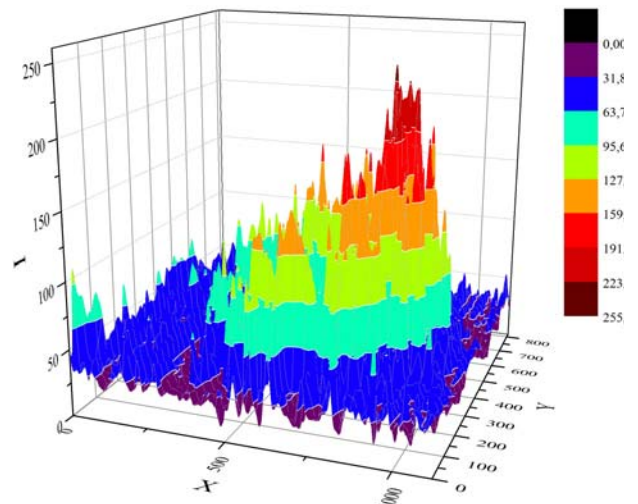
а



б



в



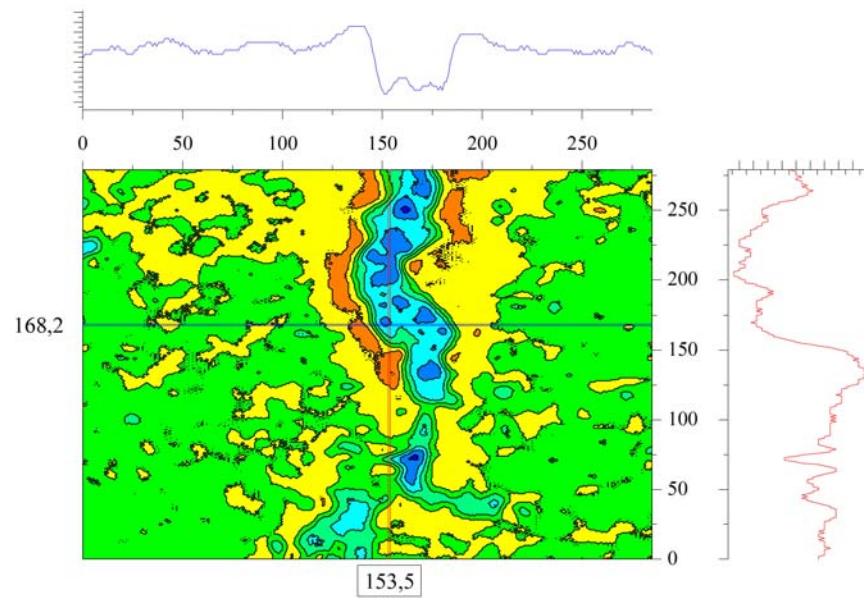
г

Рис. 2.7. Зображення і тривимірний розподіл яскравості на поверхні з множинними пітингами для оптичного – а, в та РЕМ – зображень – б, г

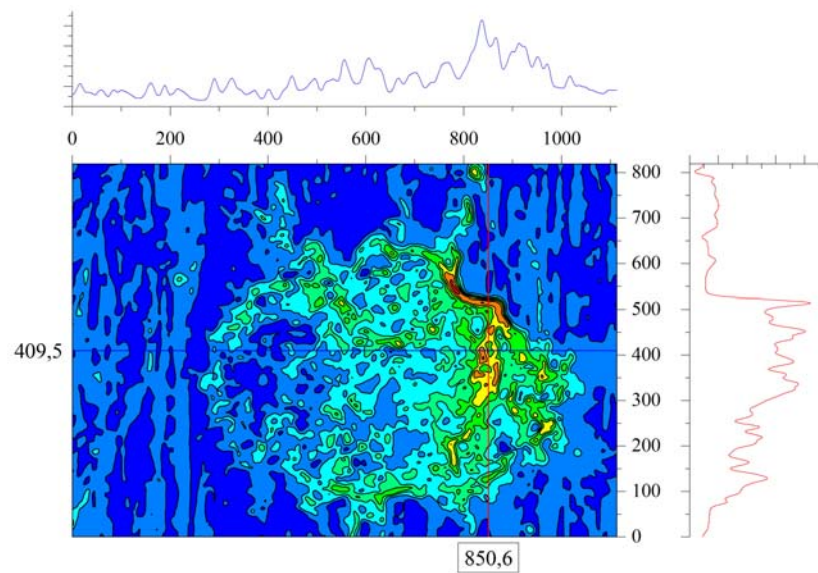
Такий вид зображення дозволяє характеризувати стан поверхні, пошкодженої пітингами, оскільки є двовимірним відображенням поверхні з дефектними утвореннями, отриманими при певному рівні освітлення.

Оскільки пітинги є заглибленнями в матеріалі і містять темні продукти корозійного процесу, рис. 2.7а, то на оптичних зображеннях вони виглядають як затемнені області, що чітко видимі на фоні неушкодженої поверхні [77]. Це створює передумови для застосування оптичного методу аналізу поверхні шляхом виділення на зображенні двох класів текстур. При цьому пітингам відповідають ділянки з темною текстурою, а непошкодженій поверхні - зі світлою.

Найбільш наочно ці особливості ілюструє тривимірний розподіл яскравості оптичного зображення поверхні з множинними пітингами. На зображенні (рис. 2.7, в) пітинги відповідають западинам, на поверхні розподілу яскравості зображення. Це також підтверджується графіком двовимірного перетину ділянки пошкодженої поверхні. На рис. 2.7 показано топографію поверхні розподілу яскравості зображення (рис. 2.7а, в) з вертикальним і горизонтальним перерізами у зоні пітингів. Перерізи показують, що в зоні пітингів спостерігали значне зниження яскравості зображення. Таким чином, зображення, отримані за допомогою оптичного мікроскопу, можуть бути використані для аналізу пошкодженої пітингами поверхні матеріалу і розпізнавання геометричних властивостей пошкоджень (координат, площі). Використовуючи розроблений в попередніх працях [78, 79] алгоритм і ґрунтуючись на припущенні, що суміжні точки, яскравість яких належить одного діапазону, відображають об'єкт одного класу (пітинг або фон), проводили сегментацію зображення [79]. При цьому отримували два кластери пікселів, відповідних фону і розпізнаним об'єктам - пітингам. Оскільки пітинги на розглянутих темплетях мають достатньо чіткі межі й є ідентичними за фізичним походженням, такий підхід дозволяє виявити їх геометричне положення на зображенні.



а



б

Рис. 2.8 Топографія поверхні пітингу оптичного зображення (а) і РЕМ – зображення (б).

Особливості оптичного підходу до отримання зображень, дещо ускладнюють його використання, створюючи підвищені вимоги до вибору освітлення. За невеликого освітлення яскравість пошкоджених і непошкоджених ділянок буде співмірною (близькою за значенням), а пітинг буде зливатися з фоном і не буде виявлений. Одною з основних переваг

оптичного способу є можливість неруйнівного аналізу значних за площею поверхонь.

РЕМ - зображення отримували у високому вакуумі, шляхом скануванням пошкодженої поверхні електронним пучком в режимі відбитих електронів. Даному методу притаманний більший діапазон яскравості системи "поверхня-пітинг", що є наслідком його технологічної чутливості до наявності оксидів, наявних на дні корозійних ямок, рис. 2.9а.

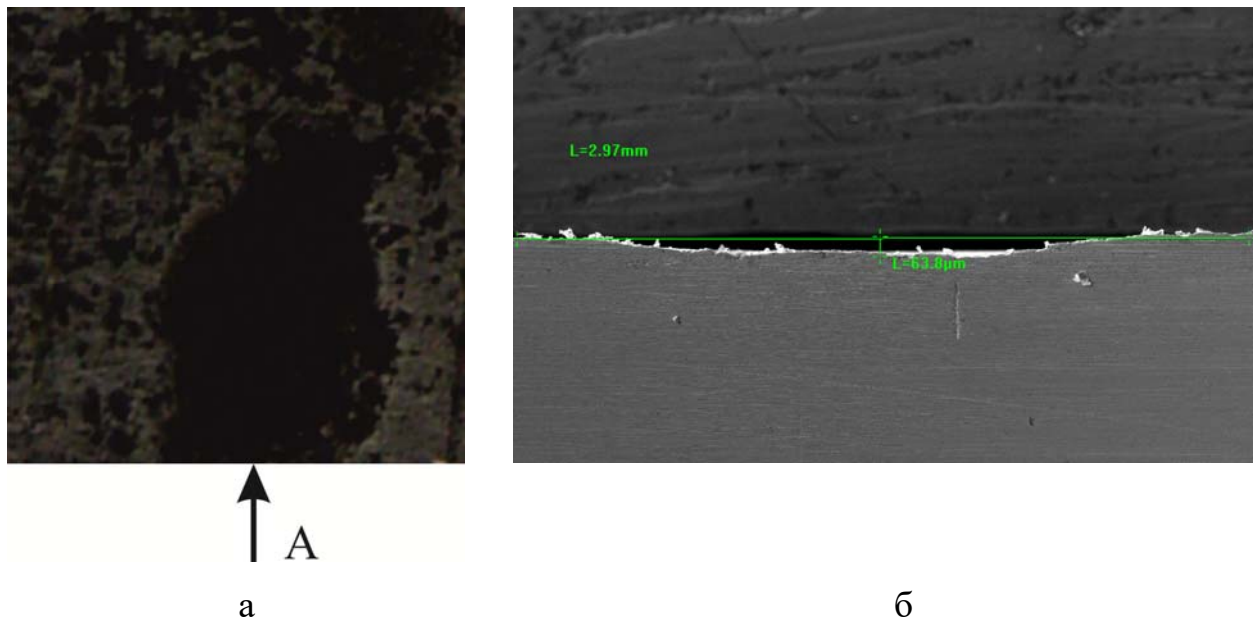


Рис. 2.9. Оптичне зображення пітингу (а) і його профіль у напрямку А (б)

Зображення, отримані цим способом, мають розкид яскравості між ділянкою фону і пітингу (рис. 2.7, б, г). Враховуючи особливості отримання зображень цього виду, необхідно відзначити, що пітингам відповідали яскраві ділянки, а фону - темні. Топографічне зображення (рис. 2.8, а, б) також демонструє велику яскравість в зоні пітинга. Дуже часто пошкоджені ділянки на РЕМ-зображеннях мають неоднорідний розподіл яскравості, на відміну від оптичних зображень, де розподіл яскравості фону, і пітингів є досить однорідним. Це створює певні передумови використання методу кластеризації зображення шляхом текстурного аналізу, хоча в цілому, ускладнює операцію сегментації зображення на фон і об'єкт.

Особливістю зображень цього виду в розглянутому випадку є те, що об'єкт фрактографічного аналізу - пітинг заповнений продуктами корозії, яка є своєрідним «маркером», для виявлення його на досліджуваній поверхні. У разі ж коли пітинг, або його частину, не вкрито корозійним шаром, існує ймовірність того, що відповідна ділянка «зіллється» з фоном і не буде розпізнана. Для розпізнавання положення пітингу на зображеннях використовували алгоритм, що містить послідовні кроки вирівнювання освітлення, фільтрації та сегментації зображення [77-79]. З метою оцінки можливості його використання на оптичних зображеннях, провели порівняння картин розподілу яскравості зображення в зоні пітингу з його реальним профілем по глибині. Для цього, виготовили дослідні зразки шляхом зфрезерування частини пітингу.

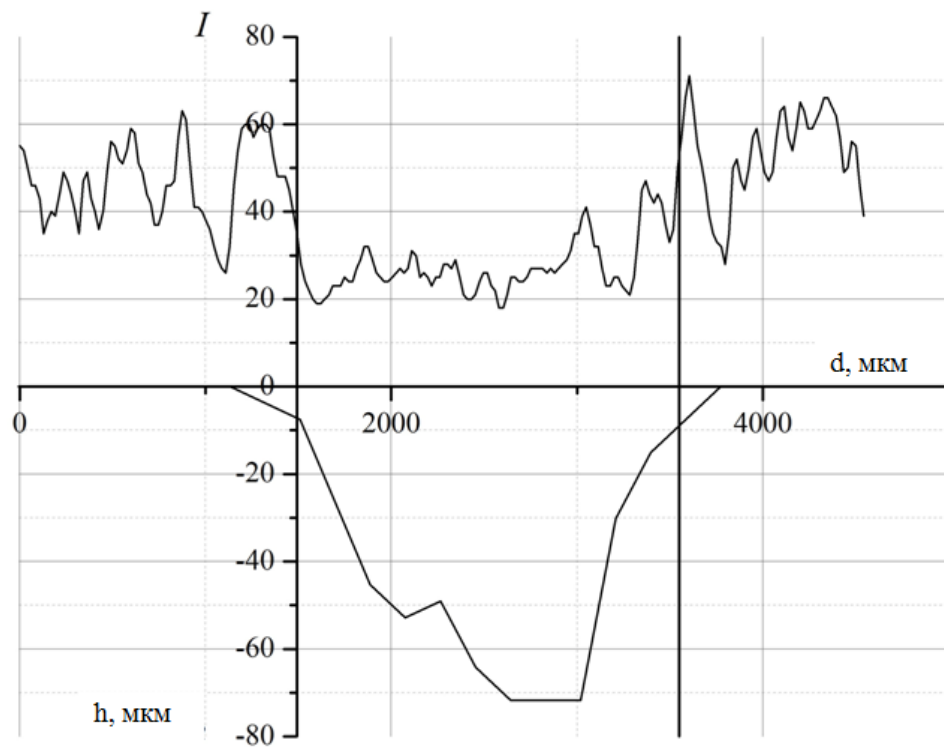


Рис. 2.10. Переріз яскравості зображення (рис. 2.9, а) вздовж нижнього краю пітингу (верхня крива) і геометричний профіль пітингу (нижня крива)

На рис. 2.9, а показано частково сфрезерований пітинг, а на рис. 2.9, б - зображення його перерізу, отримане за допомогою електронного

мікроскопу. Порівняльний аналіз кривих розподілу яскравості в зонах пітингів з відповідними кривими зміни глибини довів, що зони стрімкого зниження яскравості відповідають краям пітингових пошкоджень (рис. 2.10). Дві вертикальні прямі на рис. 2.10 вказують края пітингу, ідентифіковані за допомогою раніше розробленого алгоритму [76, 78]. Необхідно відзначити, що всі досліджені пітинги мали параболічну форму фронту, з гладкими краями. Дно пітингів полого, без ознак тріщиноутворення. Глибина дна рівномірна, що підтверджується пошаровим фрезеруванням і вимірюванням в різних його точках. На нашу думку, отримані результати і пропонувані підходи можуть бути використані при дослідженні фізичних закономірностей виникнення дефектів даного типу.

Висновки

1. Розроблено методику, яка дозволяє забезпечити циклічне деформування зразків з коловим концентратором та вибір оптимальних режимів освітлення та фотозйомки. Створено відповідне програмне забезпечення та апаратну частину.
2. Запропоновано ряд алгоритмів обробки експериментальних даних з метою оцінювання кінетики накопичення пор у деформованій теплостійкій сталі.
3. Вдосконалено методику оцінювання морфології утворення корозійних пітингів на поверхні магістрального газопроводу, що ґрунтується на обробці цифрового зображення. Для автоматизації аналізу поверхні труби із корозійними пітингами розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє діагностувати його технічний стан за кількістю і формою дефектів, відносною часткою поверхневого пошкодження.
4. Запропоновано ряд нових методів оцінювання структурної деградації пластично деформованої теплостійкої сталі за зміною деформівного стану зовнішньої поверхні.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ТРИВАЛОГО НАПРАЦЮВАННЯ НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ ТА НАКОПИЧЕННЯ РОЗПОРОШЕНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

3.1. Пошкодженість та механізми деградації поверхні сталі магістрального газопроводу

Формалізація завдань автоматизованої класифікації. Оптико-цифровий контроль є важливим методом технічної діагностики, оскільки дозволяє здійснювати контроль дефектності поверхонь матеріалів і конструкцій, незалежно, або в поєднанні з іншими методами. У даній роботі, під дефектометричним аналізом розуміли розпізнавання і визначення геометричних параметрів і розмірів дефектів. Дослідження корозійних ямкових утворень є важливим технічним завданням, оскільки дозволяє систематизувати і накопичувати інформацію про стан пошкоджень, виконувати порівняльний аналіз контрольних ділянок поверхні. Пропонований в даній роботі підхід містить окремі етапи розпізнавання та дефектометрії груп пітингів, а також параметрів окремих корозійних ямок, рис. 3.1.

Аналіз експлуатаційних пітингів. Оптичне зображення.

У місцях контакту металу труби з корозійним середовищем, під ізоляцією відбувається підкислення середовища, що сприяє зниженню поверхневої енергії і прискорює руйнування пасивної плівки. Найбільш активними елементами ґрунтових електrolітів є галоїдний іон хлору Cl^- і адсорбований водень. Для аналізу використовували зображення пошкодженої поверхні в градаціях сірого кольору.

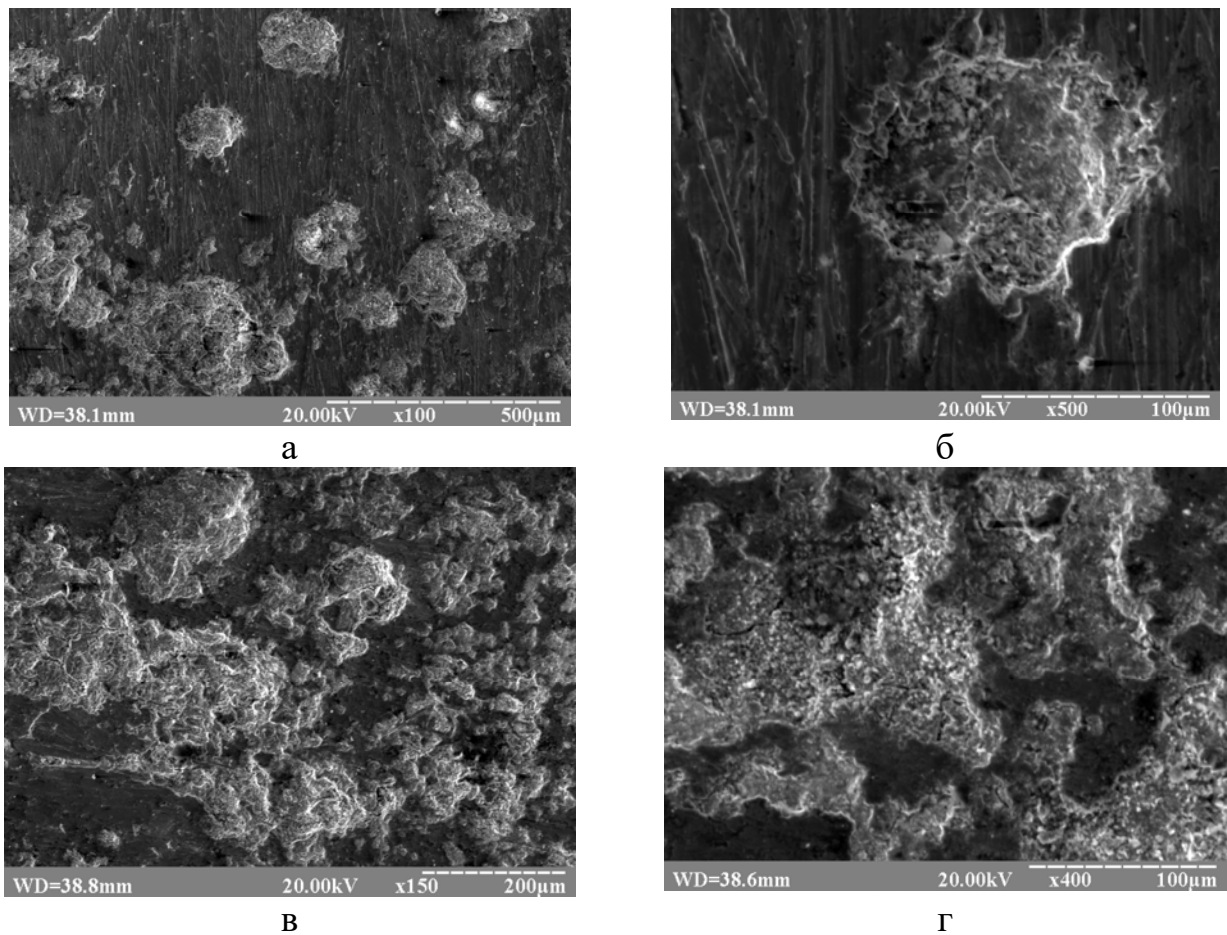


Рис. 3.1. Корозійні виразки виявлені на зовнішній поверхні газопроводу після 40 років напрацювання

В результаті мікропластичної деформацій на локальних ділянках матеріалу труби відбувається дестабілізація внутрішнього енергетичного стану, і зростає чутливість до концентраторів напружень під дією водню. При цьому циклічне напрацювання знижує пластичність деформованого металу, збільшуючи тим самим схильність до корозійного розтріскування при впливі воденьмістких середовищ.

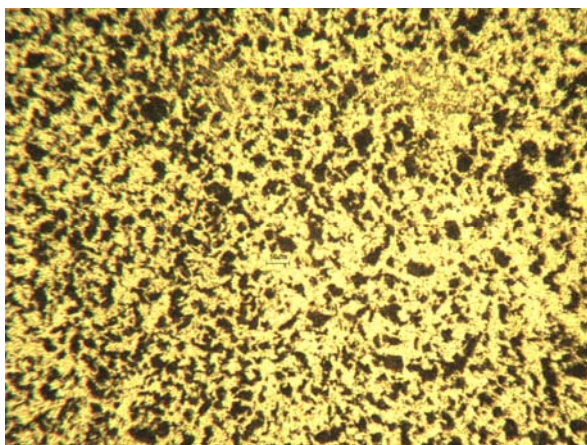
Метал труби має ферито-перлітну структуру. Темплетам вирізаным в осьовому напрямку притаманна яскраво виражена пошкодженість ферито-перлітної структури, рис. 3.2а.б. На шліфах виявлено часткове знеуглецювання перлітних зерен. Виявлено численні дефекти орієнтовані вздовж прокатування у вигляді розшарувань утворені внаслідок наводнювання металу. Ці дефекти називають водневим розшарування та водневим розтріскуванням. Очевидно тріщини зароджувались на межах

зерен, а поширювались під дією напружень, за механізмом стрес – корозії [62]. Відомо, що саме локалізація процесів деградації між волокнами вальцювання виявлена на рис. 3.2в спричиняє суттєве зниження ударної в'язкості експлуатованих газопроводів [84].

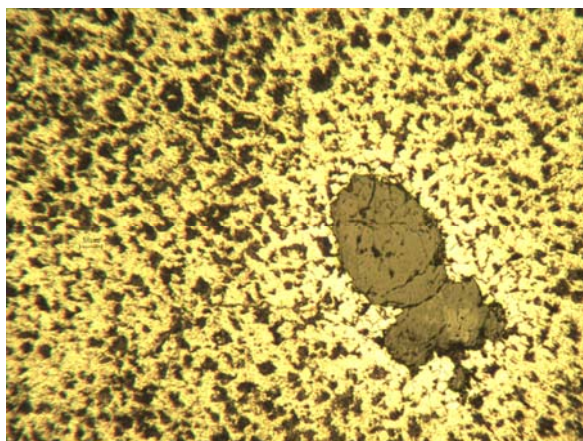
На нашу думку, вказані дефекти свідчать про перенапруження дослідженої ділянки (можливо внаслідок локального просідання ґрунту), а ріст внутрішніх напружень зумовив локалізацію структурних пошкоджень та їх об'єднання у напрямку перпендикулярному максимальним розтягуючим напруженням. Зміна густини пошкоджень в металі, супроводжувалась зміною їх геометрії, розмірів та просторової орієнтації, що обумовила зміну мікротвердості поверхневих шарів [85, 86]. Однією з основних причин виникнення вказаних дефектів є пошкодження і втрата адгезії покриття труби, яке зумовило проникнення ґрунтової води до поверхні труби. Атомарний водень проникав у метал і накопичувався у мікропорах, структурних дефектах, рис. 3.2в. Паралельно розвивалось знеуглецювання металу внаслідок блокування атомів вуглецю атомами водню, знижуючи пластичність матеріалу [87].

В результаті проведених досліджень виявлено основні закономірності деградаційних процесів протягом тривалого напруження:

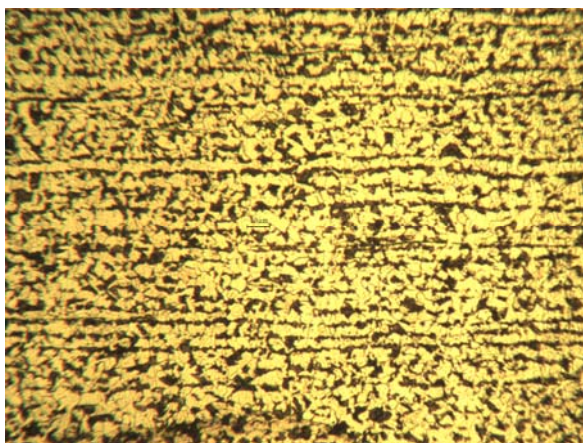
- зниження рухомості дислокацій внаслідок зростання рівня внутрішніх мікрореформацій матеріалу, місця яких є локальними пастками накопичення водню;
- накопичення дефектів структури та окрихчення внаслідок наводнювання;
- деформаційні розпорошені дефекти та мікротріщини;



а



б

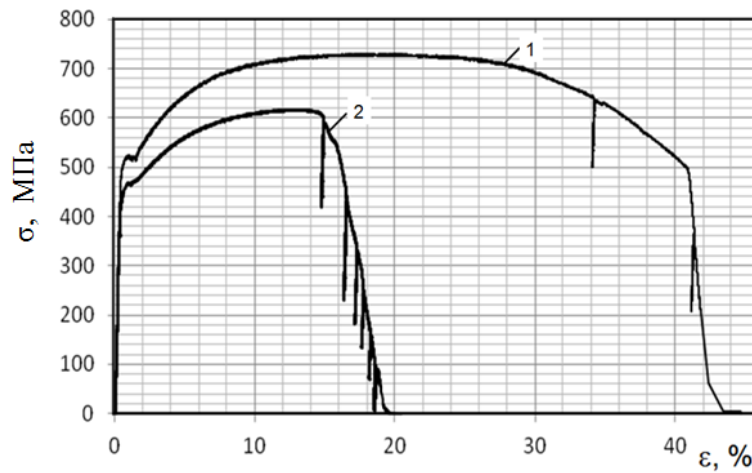


в

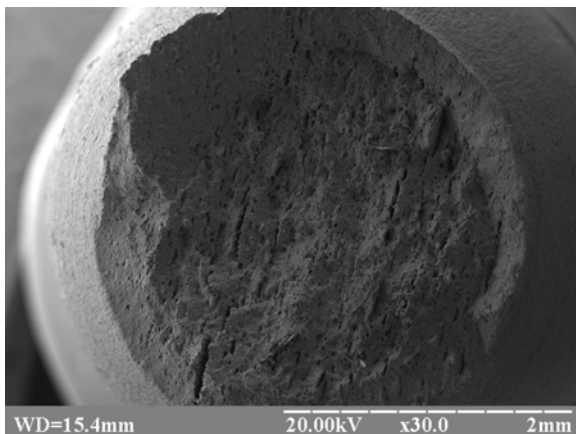
Рис. 3.2. Мікроструктура газопроводу після 40-ка років експлуатації ($\times 200$): а,б – у поперечному напрямку та вздовж осі труби – в; (зовнішня поверхня – а; внутрішня поверхня – б)

Метод повних діаграм деформування є ефективним для оцінювання впливу напрямку вирізання зразків на кінетику накопичення пошкоджень і деформаційні властивості матеріалу за статичного розтягу, рис. 3.3а.

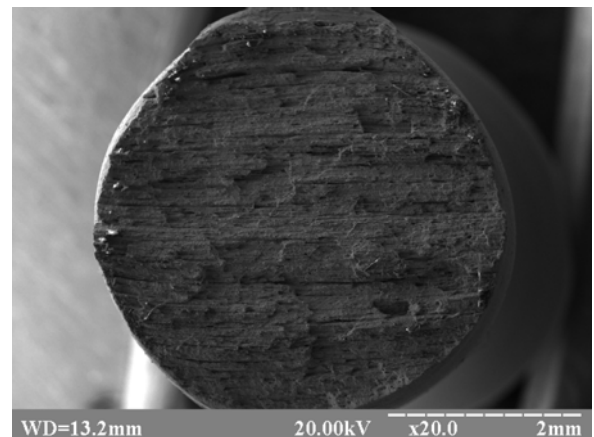
Виявлено, що зразкам вирізаним у повздовжньому напрямку притаманна чітко видима ділянка текучості.



а



б



в

Рис. 3.3. Повні діаграми статичного розтягу експлуатованої сталі 17Г1С - а у повздовжньому (1) та поперечному (2) напрямках вирізання після сорока років експлуатації в землі та макрозлам зразків вирізаних у повздовжньому - б та поперечному - в напрямку.

Відомо, що тривале напруження конструкції спричиняє зміну кінетики накопичення пошкоджень у матеріалі конструкції та її деформаційних властивостей, а рівень структурно-механічної пошкодженості матеріалу, безпосередньо впливає на закономірності руйнування матеріалів, рис. 3.3б,в.

Приведені дані свідчать про те, що у процесі напрацювання змінюється густина матеріалу. Однозначно можна стверджувати, що експлуатаційна деградація, насамперед наводнювання, збільшує ступінь розпушення матеріалу, внаслідок чого виявлено істотні відмінності деформаційних властивостей, рис. 3.4а. Помітно, що якісно кінетика процесу накопичення пошкоджень зразків (розпушування) за різного ступеня деформацій є подібною для незначних деформацій, коли процеси деформування локалізовані в околі структурних утворень (макрорівень), зокрема відмінність деформації розпушування зразків за малих деформацій ($\varepsilon = 8 \%$) становила 2% , проте вже за деформації $\varepsilon = 20 - 16 \%$.

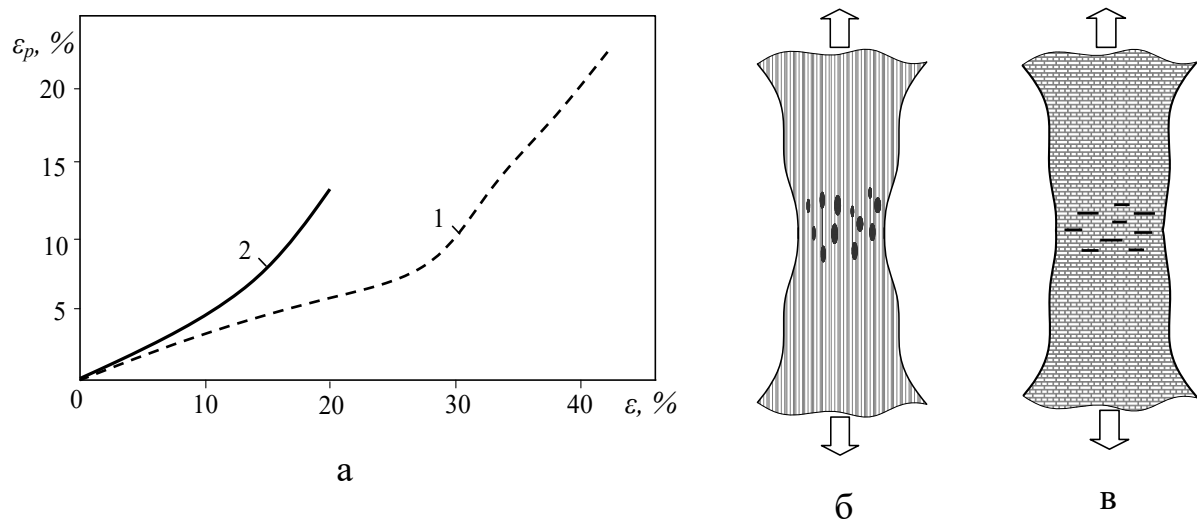


Рис. 3.4. Залежність деформації розпушення від залишкової деформації зразка - а та схема деформаційної поведінки зразків вирізаних у повздовжньому (б) та поперечному (в) напрямку з експлуатованої труби.

Для зразків поздовжнього напрямку вирізання $\varepsilon_k = 42 \%$, значення деформації розпушення $\varepsilon_p = 27 \%$. Для зразків поперечного напрямку вирізання значення максимальної відносної деформації $\varepsilon_k = 20 \%$, а деформація розпушення становить $\varepsilon_p = 13\%$.

Проте помітно, що зразки повздовжнього напрямку вирізання мають кращі деформаційні властивості, рис. 3.4б Менша міцність і пластичність зразків поперечного напрямку вирізання пов'язана з процесами попереднього

наводнювання та множинними розшаруваннями структури внутрішніх шарів матеріалу, рис. 3.4в. Вказані дефекти ускладнюють залучення мезооб'ємів матеріалу до процесу пластичного деформування, що підтверджується низьким значенням залишкової деформації. Значні відмінності спостерігали також в нахилах спадних ділянок діаграм деформування, що свідчить про значну відмінність механізмів макроруйнування.

Макроаналіз зламів зразків вирізних у різних напрямках виявив чітку залежність деформаційних властивостей матеріалу від їх кристалографічної орієнтації. Саме цими параметрами можна пояснити відмінність діаграм руйнування сталі вирізаної у різних напрямках труби.

Виявлено, що для зразків *повздовжнього напрямку вирізання*, наявність ропорошеної пошкодженості спричиняє інтенсифікацію ямкового відриву. Поверхня зламу зразків з експлуатованої сталі 17Г1С вкрита густою мережею глибоких, великих за розміром ямок, поєднаних із численними розшаруваннями, які пов'язані з розвитком пошкодженості ще протягом експлуатації.

Для зразків *поперчного напрямку вирізання* експериментально зафіксовано наявність «композитної» структури зламу у вигляді мікро- і макровиступів. Таким чином, вплив водню на структуру полягає у виникненні в металі газопроводу множини станів, кожен з яких має свої механічні властивості (відмінні від початкових).

Зразки поперечного напрямку вирізання мають значно менший кут нахилу спадної ділянки діаграми. Виявлено, що експлуатована сталь має значні відмінності міцнісних властивостей у різних напрямках, проте вони є вищими за вихідний стан матеріалу, табл. 3.1. На нашу думку, це зумовлене, вичерпуванням пластичності матеріалу газопроводу протягом напрацювання. Крім того виявлено, що зростає відносне видовження матеріалу вирізаного вздовж труби, що зумовлено розкриттям множинних дефектів пошкодженого матеріалу. Поперечний напрям вирізання навпаки має понижене відносне

видовження, яке зумовлене окрихченням матеріалу і квазікрихкими зсувними механізмами руйнування в околі структурних дефектів.

Табл. 3.1

Характеристики сталі 17Г1С труби газопроводу «Київ – Захід України - 1»
у вихідному стані та після 40 років експлуатації

Характеристики	Умовна межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Умовна межа міцності, σ_B , МПа	Відносне видовження, ε , %
Нова труба (сертифікат 162/3-69)	420-435	580-590	23,5-26,0
Метал повздовжнього напрямку вирізання	460	720	44,0
Метал поперечного напрямку вирізання	520	620	20,0

3.2. Мезо- та мікромеханізми деформування експлуатованого матеріалу

Відмінність механізмів деформування зразків вирізаних у повздовжньому та поперечному напрямках полягає також у тому, що:

Мікрорівень.

- для *повздовжнього напрямку вирізання* металографічний та фрактографічний аналізи дозволили виявити у цьому випадку два мікромеханізми руйнування – початковий в’язкий (ямковий) і у центральній частині зразка і подальший зсувний – у периферійній, рис. 3.5а. Несуцільності (пори) утворюються в місцях скупчення перлітних колоній. Деформування відбулось пластично і пов’язане з процесами течіння матриці матеріалу і супутніми їм процесами розпушення матеріалу вцілому.

- для *поперечного напрямку вирізання* аналіз зламів показав більшу кількість вторинних мікротріщин і розшарувань в експлуатованих сталях порівняно з трубою запасу, зокрема, в околі розшарувань є ознаки крихкого руйнування, рис. 3.5г. Очевидно, в умовах неоднорідного напруженого стану на розмноження і переміщення дислокацій істотно впливають всі неоднорідності (оскільки деформація поширюється не в ідеальному монокристалічному матеріалі, а в реальному матеріалі, її прояви відбиваються і локалізуються на структурних дефектах). Таким чином, мікронеоднорідність руйнування пов'язана з процесами деформування окрихченої воднем матриці матеріалу і супутніми їм процесами зсуву і відриву матеріалу в околі дефектів. Проведені фізико-механічні дослідження з використанням трансмісійної електронної мікроскопії дозволяють припустити, що деформація такого матеріалу пов'язана з утворенням впорядкованих структур у вигляді об'ємно-пов'язаних, на різних масштабних рівнях, локалізованих «композитних» утворень.

Мезорівень.

- для *повздовжнього напрямку вирізання*. Із зростанням рівня деформації зразка окремі мезосмути зміцнюються, деформування триває у суміжних смугах, утворюючи ділянки впорядкованого мезорельєфу. Із зростанням деформування збільшується інтенсивність руйнування початкової смугової фрагментованої мезосубструктури та локальне знеміцнення макросмуг локалізованого течіння, рис. 3.5б. У зразку формується симетрична шийка, вкрита мезосмугами деформування. Це сприяє перерозподілу лінійних і зсувних компонент деформування. Смути пластичного деформування зорієнтовані в напрямку прикладання зусилля. У зонах локальної концентрації напружень помітні тріщиноподібні розшарування із розвинутим криволінійним фронтом.

Поширення пластичних зсувів від межі в об'єм зерна супроводжується виникненням вихрового руху в пружно-деформованому матеріалі, необхідного для акомодатії деформації сусідніх областей. У зсуви і повороти

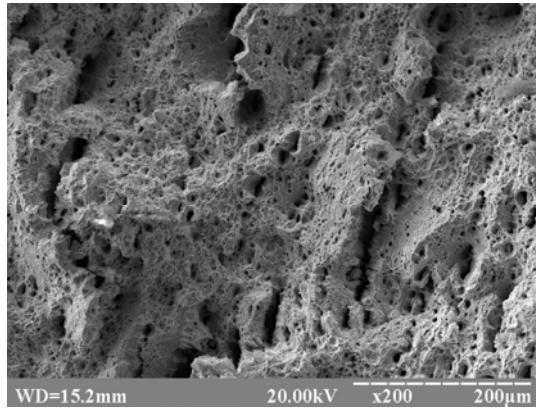
на мезорівні залучаються як окремі зерна, включення і т.д., так і цілі фрагменти, що спричиняє утворення сітки смуг локалізованого деформування.

- *Для поперечного напрямку вирізання.* Вид бічної поверхні свідчить про крихке руйнування, рис. 3.5г. Водночас наявність множинних тріщин, свідчить про часткову релаксацію напружень під час деформування. Показано, що в результаті концентрації напружень в околі мікротріщин перші пластичні зсуви зароджуються при середніх напруженнях істотно нижчих макроскопічної межі текучості та області локалізації формуються в основному до виходу кривої навантаження на стадію деформаційного зміцнення. Ці ж висновки підтверджуються розрахунками [89], проведеними для керамік з різним ступенем пористості в умовах стиснення. Джерелами концентрації локальних напружень в цьому випадку є межі «пора-основний матеріал».

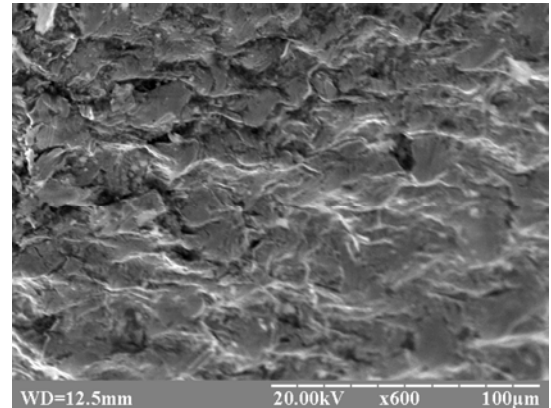
Очевидно деформація матеріалу на цьому мезомасштабному рівні не здатна релаксувати наростаючі напруження - відбувається перехід на більший масштабний рівень. Відразу після зародження тріщина поширювалася прямолінійно, в площині перпендикулярній напрямку максимальних розтягуючих напружень.

Макрорівень. Для *повздовжнього напрямку вирізання* напрацювання спричиняє зростання кількості концентраторів напружень. Зростання макродеформації супроводжується насиченням матеріалу мікро- і мезодефектами, при цьому розпушення спричинене зародженням дефектів змінюється розпушенням за рахунок зростання їх розмірів, злиття окремих мікропор і мікротріщин, рис. 3.5г. Локалізація і концентрація пор за збільшення деформації супроводжується їх злиттям і утворенням зародкової макротріщини.

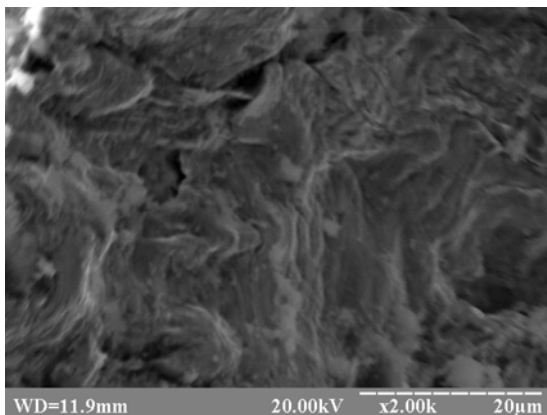
- *для поперечного напрямку вирізання* виявлено суттєве зниження деформаційних властивостей сталі, які дали підстави вважати, що їх причиною є розвинута дефектність металу стінки труби, рис. 3.5е.



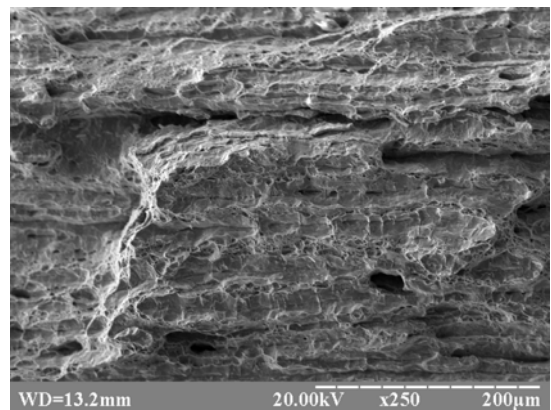
а



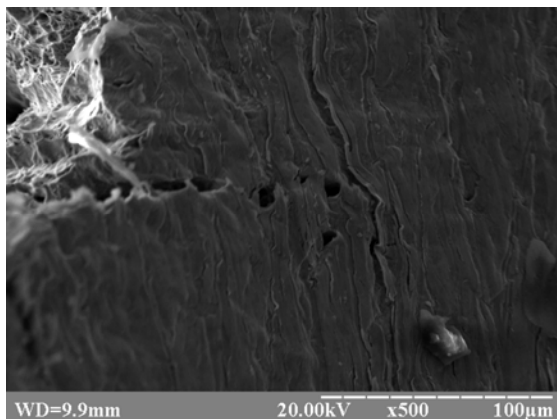
б



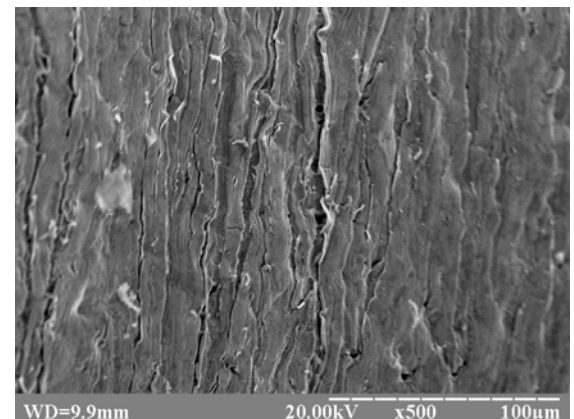
в



г



д



е

Рис. 3.5. Поверхні руйнування – а,г та бічні поверхні в, г, е, д зразків експлуатованої сталі 17Г1С - а у повздовжньому (а-в) та поперечному (г-е) напрямку вирізання після сорока років експлуатації

Особливо показовим, при цьому є відмінність процесів деформування у повздовжньому та поперечному напрямках, яка відбиває не тільки його низьку

здатність пластично деформуватися, але і інтенсивне злиття (переважно мікросколюванням) мікротріщин. Мікромеханізми руйнування у цьому випадку визначаються здатністю матеріалу чинити опір напруженням зсуву та відриву. Слід підкреслити, що зміна напрямку вирізки спричинила появу додаткових механізмів руйнування у зв'язку із просуванням макротріщини у двох площинах труби (осьовому та радіальному).

Слід відзначити низку особливостей деформування сталі 17Г1С, зокрема текучість матеріалу вирізаного у поперечному напрямку значно нижча, ніж у повздовжньому, що свідчить про відсутність єдиного механізму руйнування матеріалу при поширенні тріщини.

Робота руйнування зразків вирізаних у радіальному напрямку є значно нижчою ніж для зразків повздовжнього напрямку. З точки зору механізмів руйнування для цих зразків спостерігали наявність поперечного зсуву, який є значно менш енергоємним, ніж чистий відрив.

Відомо, що в квазістатичних процесах деформування можна виділити кілька рівнів деформування і руйнування, що дозволяє описати синергетичну нестійкість процесу деформування. Якщо розглядати процес старту тріщини з урахуванням концепції структурних рівнів слід вказати на послідовність еволюції втрати зсувної стійкості матеріалу. При цьому, мікрорівень представлений зернами і субзернами матеріалу, мезорівень - конгломератами зерен, а макрорівень розглядає зразок як квазіоднорідне середовище. Мезорівень в даному випадку реалізований зсувами конгломератів зерен, які викликають зародження і коалесценцію мікропор і перехід процесу руйнування на макрорівень. Згідно з принципами фізичної мезомеханіки, пластичне деформування відбувається шляхом ряду послідовних перетворень, які є в зонах концентрації мікронапруг [89]. При цьому, структура матеріалів робить істотний вплив на розвиток процесів пластичного деформування і руйнування матеріалів. На відміну від пружних властивостей, які є структурно не чутливі, пластичні та міцності властивості дуже чутливі до зміни структури матеріалу.

Таким чином, неоднорідність матеріалів в розглянутих нами випадках, проявляється різнобічно. З одного боку - у вигляді значної відмінності механічних характеристик структурних елементів мезорівня: модулів пружності, меж плинності та інших характеристик, що визначають той чи інший аспект механічної поведінки матеріалу під навантаженням. А з іншого боку - опосередковано, шляхом ускладнення деформаційної поведінки середовища усереднені відображає неоднорідність будови на мікрорівні.

Присутність водню в стінці труби діючого газопроводу може призводити до експлуатаційного окрихчення, навіть у тому випадку, коли його концентрація не перевищує гранично допустимого значення. Це пов'язано з тим, що водень, завдяки високій дифузійній рухливості в металах, перерозподіляється в структурі металу під дією полів пружних напружень, утворюючи скупчення у найбільш напружених ділянках. Тим самим, збільшується ймовірність поро- і тріщиноутворення.

За даними роботи [88-92] існує дві основні причини, які підвищують деформаційні властивості матеріалу без його руйнування, а відповідно і статичну міцність. Це, насамперед, утворення субструктури з розвиненими межами, яка здатна гальмувати поширення тріщини і зростання разорієнтації меж структурних елементів. Отримані в даній роботі результати дозволяють кількісно оцінити вплив водню на механізми деформування і руйнування сталі газопроводу після тривалої експлуатації. Показано можливість урахування впливу механізмів деформування і пороутворення на закономірності руйнування трубної сталі, табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Механізми деформування та руйнування експлуатованої сталі 17Г1С
після сорока років експлуатації

Напрямок вирізання	Переважаючі механізми деформування	Механізми руйнування
Вздовж труби (L)	Неоднорідні мікропластичні деформації, локалізовані у межах окремих зерен, зумовлені структурною пошкодженістю та попереднім пороутворенням у вихідній структурі. Накопичення і коалесценція деформаційних дефектів відбувається до зміни ступеня стиснення пластичних деформацій.	Руйнування за в'язко-пластичним механізмом. Спостерігали ділянки оторочені в'язкими межами В'язкий відрив матеріалу у макроплощині нормальній до осі навантажування, водночас ділянки зсувних деформацій відносно незначні.
Поперек труби (T)	Залучення до деформування значних ділянок елементів внутрішньої структури, розташованих між дефектами. Значна неоднорідність деформування «композитної структури» у повздовжньому та поперечному напрямках.	В'язко-крихкий механізм з наявністю значного градієнту пластичної деформації по перерізу зразка на макрорівні Поверхня руйнування має ступінчастий вигляд. Руйнування відбулось за схемою «зсув + поворот».

Особливості морфології поверхонь руйнування сталі магістрального газопроводу після тривалого напрацювання, табл. 3.2, можна пояснити, враховуючи мікроструктурні процеси, які відбуваються при наводнюванні. Одним з основних процесів, як відомо, є накопичення водню в матеріалі. Мікроструктурні дослідження свідчать, що найбільш типовими місцями внутрізеренного накопичення водню є поверхні карбідів і неметалевих включень. Це зумовлено дифузією водню до поверхонь розділу «карбід-матриця» і «включення-матриця». При цьому активно розвивається ослаблення меж зерен і зміна орієнтації навантаження полікристалу призводить до отриманих в даній роботі результатів.

3.3. Твердість і мікротвердість металу експлуатованого трубопроводу

У початковому стані мікротвердість сталі 17Г1С становила 1200 МПа. Для деградованої труби величина мікротвердості (H_μ) з віддаленням від внутрішньої поверхні труби монотонно зростає від 1150 МПа, з виходом на "насичення" при 1700 МПа. Очевидно, в мікрооб'ємах матеріалу відбувається закріплення дислокацій, зумовлене стрес-корозійним впливом. Твердість експлуатованого матеріалу також підвищується в порівнянні з вихідним станом. Дані зміни твердості наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Твердість сталі 17Г1С труби газопроводу в початковому стані
і після 40 років експлуатації

Відносна товщина стінки (при аналізі від внутрішньої поверхні)	Твердість, HRB		
	$0,1h$, мм	$0,5h$, мм	h , мм
Нова труба (сертифікат 162/3-69)	79		
Труба після напрацювання	89	91	88

Отримані результати дають підставу вважати, що експлуатаційна деградація металу магістрального газопроводу після тривалого напруження проявляється не тільки в деформаційному старінні, але й в інтенсивному розвитку пошкоджуваності (дефектності) на мікро- і субмікрорівнях. Це підтверджено зміною механічних властивостей металу в результаті тривалої експлуатації: підвищенням твердості і мікротвердості, а також підвищенням міцності, при одночасному збільшенні відносного видовження [91, 92].

Отримані результати добре узгоджуються з даними магнітооптичної інтроскопії. Так, в матеріалі після тривалого експлуатаційного напруження виникають значні пружні напруження, які під час магнітопружної взаємодії спричиняють істотну зміну магнітної анізотропії і, тобто намагніченості в приповерхневих шарах.

Саме ці параметри є визначальними при виникненні доменної структури та формування її динаміки (див. розд. 2). Отримані фізичні закономірності підтверджуються відносною зміною механічних властивостей сталі 17Г1С [2]:

$$\lambda_{\varphi} = [(\varphi^0 - \varphi^{\text{deg}}) / \varphi^0] \times 100\%,$$

де φ^0 , φ^{deg} – відносна зміна властивостей матеріалу на прикладі зміни відносного звуження в початковому стані і після експлуатації. Узагальнені дані деградації матеріалу труби, у відносних координатах для різних механічних властивостей показані на рис. 3.6.

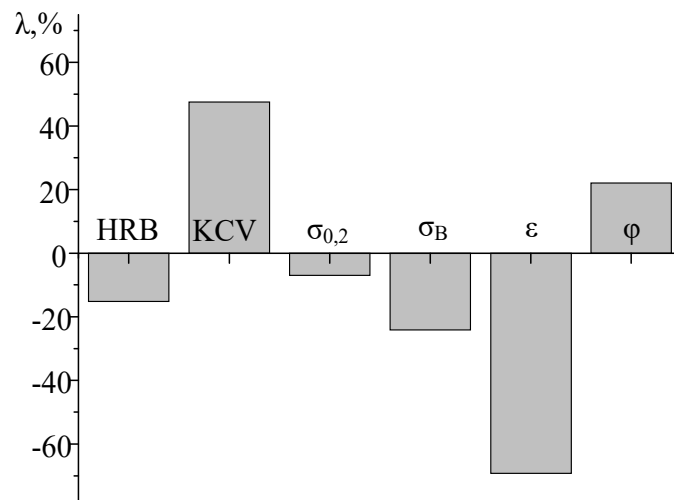


Рис. 3.6. Деградація механічних властивостей сталі 17Г1С після 40 років експлуатації

Таким чином, однією з основних причин зниження деформаційних властивостей стали газопроводу після тривалого напрацювання є неомогенний розподіл пошкоджень в матеріалі, викликаний вичерпуванням пластичності і зміцненням стінки труби.

При цьому, однією з причин ініціювання руйнування магістральних газопроводів може бути локалізована нестабільність деформаційного процесу, зумовлена наявністю структурних дефектів на мікро- або мезорівні [95], виявлених в даній роботі.

Висновки

Досліджено основні закономірності зміни механічних властивостей металу магістрального газопроводу, де поряд зі стандартними механічними методами досліджень, використовувалися спеціальні більш чутливі до структурної деградації методи неруйнівного контролю, такі як магнітооптична вихрострумова інтроскопія.

Отримані результати дозволяють розглядати зниження опірності тривало експлуатованих металів труб магістральних газопроводів крихкому

руйнуванню і корозії, як результат накопичення розсіяних пошкоджень, зумовлених структурною деградацією.

Розглянуто основні закономірності аналізу корозійних пітингів, що забезпечують їх виявлення і автоматичне вимірювання, на зображеннях, отриманих різними методами. Розглянуто особливості розподілу яскравості на фотозображеннях поверхонь з дефектами, отриманих за допомогою оптичного та електронного мікроскопів. Проведено топографічний аналіз ідентифікованих пітингів.

Проведено порівняльний аналіз розподілу яскравості системи "пітинг-поверхня" з геометричними параметрами пітингу, визначеними методом прямого виміру в перерізі розглянутої ділянки поверхні. Виявлено, задовільне узгодження цих параметрів, що створює передумови їх використання для розпізнавання положення пітингів на зображеннях.

З урахуванням отриманих закономірностей проаналізовані ділянки поверхні та проведено аналіз розпізнаних об'єктів, з урахуванням їх еквівалентних діаметрів.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ТРИЩИНОСТІКОСТІ МАТЕРІАЛУ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

4.1. Дослідження множинних корозійних дефектів

Необхідність забезпечення надійного діагностування технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу високотехнологічного устаткування, зумовлює необхідність застосування оптико-цифрових методів та розробку нових алгоритмів аналізу стану поверхні із втомними пошкодженнями [96]. Одним із завдань, які при цьому вирішують, є збільшення кількості контрольованих параметрів оцінювання пошкоженості [97]. Розвиток алгоритмів автоматизованого аналізу поверхні та урахування його структурно-механічних особливостей дозволяють підвищити ефективність функціонування алгоритмів [98].

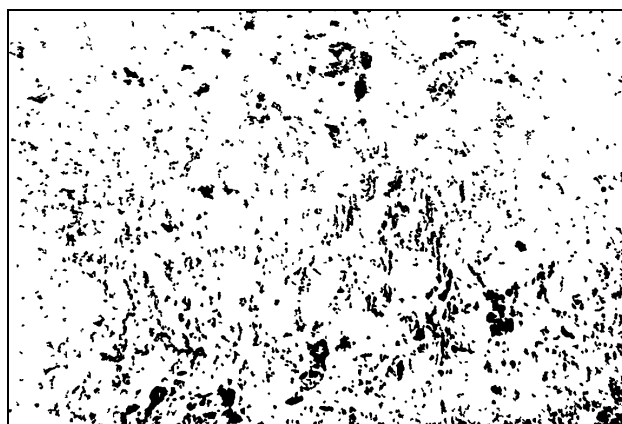
Відомо низку праць про підходи автоматизованого оцінювання стану поверхні та проектування сенсорів втоми [97]. Зокрема теоретико-експериментальні підходи, які сприяють ефективнішій реалізації фізичних принципів та методів автоматизованої обробки даних одержаних за аналізом деформаційного поверхневого рельєфу [99]. Їх основою є використання структурно-ієрархічного підходу, який забезпечує встановлення стадійності накопичення пошкоджень [100].

Розроблення сучасних діагностичних підходів автоматизованого аналізу, прогнозування деформаційної поведінки та руйнування матеріалів після тривалого експлуатаційного напруження є важливою науковою задачею. При цьому, для коректного опису поведінки матеріалу важливо встановити взаємозв'язок між локальними морфоструктурними проявами та фізичними передумовами їх самоузгодженого формування. Саме це, дозволяє оцінити неоднорідність напружено-деформованого стану системи, сприяє інтенсифікації технічного діагностування стану аналізованої поверхні,

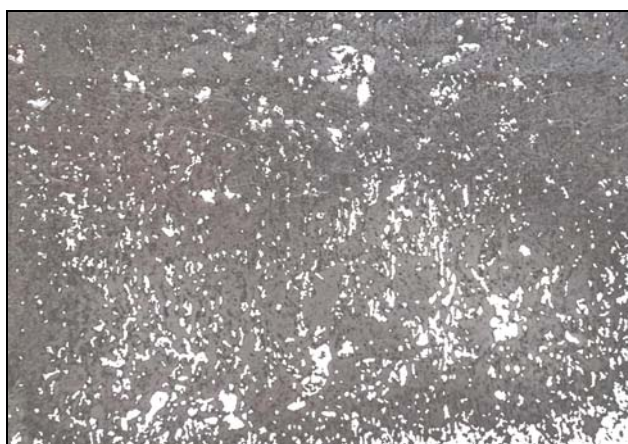
підвищує рівень достовірності аналізу. Актуальним є створення підходів багатопараметричного контролю, які ґрунтуються на кореляційних зв'язках діагностованих параметрів і їх формалізації. Підвищення чутливості та забезпечення точності встановлення стану матеріалу залишаються, при цьому, визначальними [97]. Проте, підвищення ступеня формалізації збільшує спеціалізацію методів і, відповідно, звужує межі його застосування. Тому, можливі протиріччя між ступенем формалізації методу і його універсальністю, які слід враховувати та мінімізовувати. На рис. 4.1, а показано зображення поверхні труби магістрального газопроводу "Київ - Захід України - 1" (КЗУ-1) після сорока років експлуатації в землі, рис. 4.1а.



а



б



в

Рис. 4.1. Фрагмент поверхні, пошкодженої пітингами (а), результат використання алгоритму розпізнання (б), і суміщення результатів розпізнання на вихідному зображенні (в)

Метою є створення нового методу автоматизованого оптико-цифрового контролю поверхневих пошкоджень та розроблення на його основі математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення. Для отримання кількісних параметрів, запропонований алгоритм застосовували до зображення пошкодженої ділянки, отриманого за допомогою цифрової фотокамери. За результатами застосування алгоритму, отримані зображення поділено два кластери «пікселів – фон» і «розпізнаний об'єкт» (рис. 4.1, б). Кожен з таких об'єктів, оточений з усіх боків фоном і є окремою корозійною ямкою (пітингом), або шумовим артефактом, обумовленим фізичними особливостями зображення. Таким чином, отриманий масив об'єктів, для кожного з яких розраховані площа F_i і координати центру мас об'єкту. Площу F_i визначали як загальну кількість всіх пікселів, що сформували об'єкт. На підставі розрахунку значень площі кожного об'єкту, визначали еквівалентний діаметр d_i кола, рівного за площею аналізованому дефекту.

Виявлено, що серед загальної кількості пошкоджень переважають дрібні пітинги (з еквівалентним діаметром до 5 пікс), частка яких для розглянутого зображення становить 68,92 %. Частка пітингів середнього розміру (діаметром до 13 пікс) становить 26,16 %. У той же час кількість великих пітингів (з діаметром більше 13 пікс) не перевищувала 4,92 % (рис. 4.2).

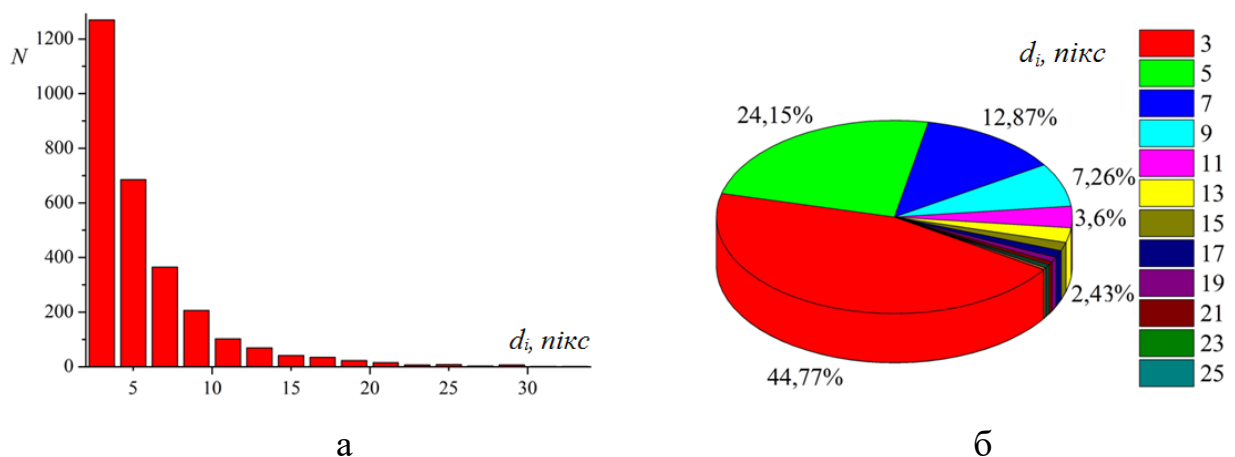


Рис. 4.2. Гістограма розподілу розпізнаних об'єктів за їх еквівалентними діаметрами (а), і відносна частка об'єктів різних діаметрів в їх загальній сукупності (б)

При цьому, необхідно зазначити, що загальна кількість дрібних пітингів, може бути дещо завищеною, за рахунок наявності шумових елементів, які виникають в результаті специфіки зображення і його обробки. Великих пітингів не багато, при цьому, в основному вони є результатом об'єднання декількох менших окремих дефектів. «Злиття» окремих пітингів супроводжувалося змінами їх форми, а також формуванням спільного геометричного центру мас єдиного корозійного осередку. У процесі розвитку дефектів відбувалась еволюція форми «об'єданого» пітингу, з відповідною морфологічною перебудовою його складових [101].

Щоб визначити ступінь наближення форми корозійних плям до колової, для кожного розпізнаного об'єкту розраховували коефіцієнт округлості [101]. Цей коефіцієнт приймає значення від 1% до 100% і показує, скільки пікселів розпізнаного об'єкта знаходяться всередині кола, з центром в центрі мас об'єкту з еквівалентним діаметром. Виявлено, що малі пітинги близькі до округлої форми (рис. 4.3). Об'єднання сусідніх дефектів призводить до збільшення різноманіття форм дефектів. У цьому випадку опис колом, як параметром форми, не завжди виправданий. Однак слід зазначити, що переважна більшість досліджених у даній роботі пітингів, описувались колом, з високим ступенем достовірності. Для зображення на рис. 4.3 коефіцієнт округлості $K_c = 70 \%$ мали 81,4 % розпізнаних об'єктів.

Подальший розвиток і об'єднання пітингів свідчить про певну тенденцію до розвиненої поверхні конгломератів об'єднаних пітингів, згладжування крайових ефектів та набуття певної орієнтації, рис. 4.3.

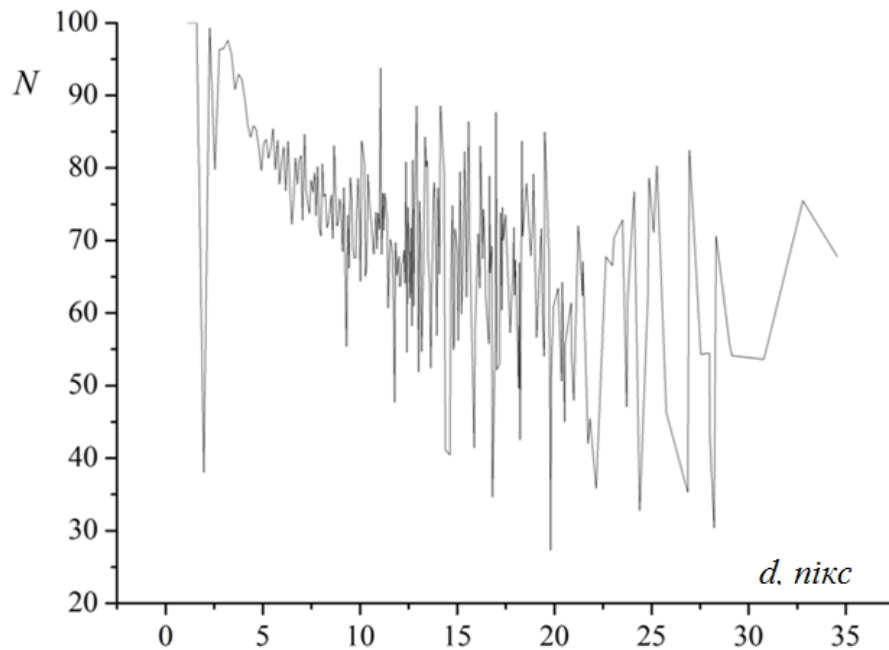


Рис. 4.3. Зміна коефіцієнту округлості K_c для об'єктів різної площі

З літератури [100-102], відомо, що пітинги мають упорядкований (стадійний) механізм розвитку, тому пропоновані підходи дозволяють прогнозувати процес їх підростання. Крім того, оскільки пітинги є одним з основних джерел надходження атомарного водню в метал труби і місцями можливого зародження тріщиноподібних мікрodefektів, їх ідентифікація дозволить спланувати ремонтні заходи.

Відомо, що внутрішньотрубна діагностика інтелектуальними дефектоскопічними снарядами є основним методом оцінювання технічного стану магістральних трубопроводів, достовірність якого постійно підвищується [103]. Однак, поряд з ним використовують також ряд додаткових методів: ручне сканування ультразвуковими установками, магнітопорошкові методи, напівавтоматичне сканування спеціальними зовнішніми дефектоскопами та ін. [104, 105].

Розробка додаткового методу автоматичної дефектометрії дозволяє отримати додаткові дані про стан поверхні [106]. Вони можуть бути використані для доповнення або верифікації даних внутрішньотрубного діагностування, а також при визначенні ділянок відбраковування і переізоляції труб. Крім того, пропонований підхід може бути успішно

використаний для діагностики технічного стану `трубопроводів меншого діаметру, де внутрішньотрубна діагностика є ускладненою, або неможливою.

В даному підрозділі, за допомогою оригінального методу, оцінено форму та кількісні показники множинного корозійного пошкодження зовнішньої поверхні тривало експлуатованого магістрального газопроводу, запропоновано діагностичну інтерпретацію аналізованих показників.

4.2. Оцінювання деформаційних процесів за штучними мітками

З фрагменту труби електроіскровим методом вирізали плоскі зразки розміром $70 \times 10 \times 1$ мм. Перед проведенням втомних випробувань у зразках виготовляли (висвердлювали) центральний отвір діаметром 2,4 мм. Випробування на циклічний розтяг проводили на сервогідравлічній випробувальній машини Biss UTM 150. У процесі втомних випробувань пошкодженість поверхні оцінювали оптико-цифровим методом за параметрами деформаційного рельєфу. Стан поверхні протягом випробувань фіксували фотоапаратом Canon EOS 550D.

На поверхню досліджуваного зразка шліфуванням наносили штучні мітки, які мають форму, близьку до лінійної, рис. 4.4.а. При деформуванні зумовленому циклічним навантаженням та підростанням тріщини (А), збільшенням пластичної зони у її вершині (Б), мітки (В) змінюють свій нахил. Для зон зразка вздовж напрямку поширення тріщини, нахил маркерів різний. Для виявлення зміни напрямку штучних поверхневих міток досліджену зону зразка розділяли на 4 зони (рис. 4.4.б). Кожну з виділених зон аналізували для п'яти точок оптико-цифрового контролю.

При цьому, припускали, що основним актом пластичного течіння в металах є механізм «зсув + поворот» [111]. Це спричиняє виникнення дисипативних мезоструктур і формування пластичних зсувів в околі концентратора. Руйнування матеріалу в околі вершини тріщини та її

підростання є кінцевим етапом циклічного деформаційного процесу на макрорівні, який полягає у втраті зсувної стійкості мезофрагментів.

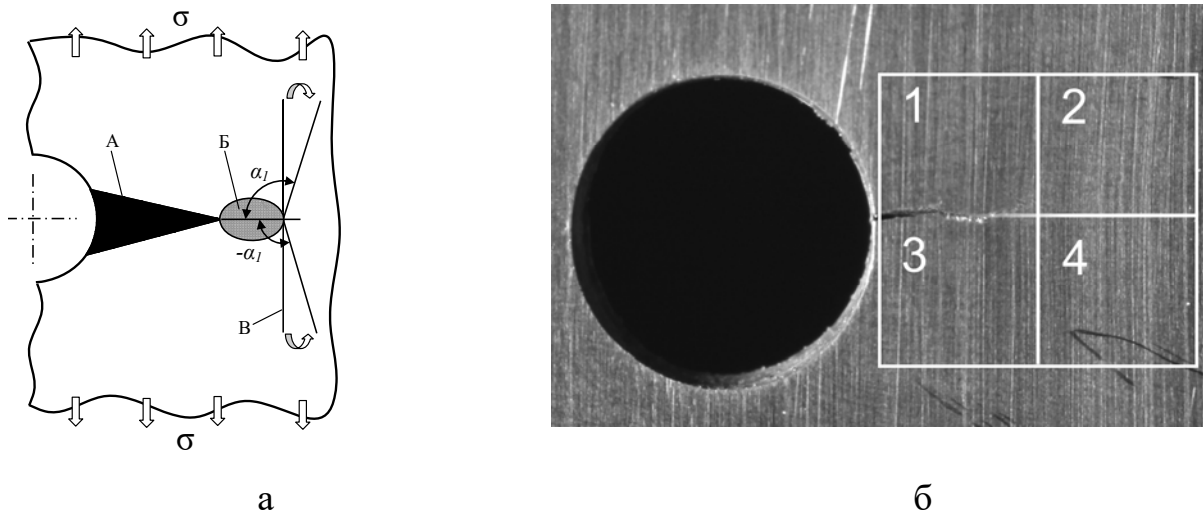


Рис. 4.4. Схема вимірювання кута спотворення міток – а та досліджені зони зразка зі штучними поверхневими мітками - б: А – тріщина; Б – пластична зона; В - мітка

Досліджено процеси деформаційної поведінки полікристалу (сталі 17Г1С) за умов циклічного напруження. Проаналізовано вплив умов навантаження на локальні параметри пошкодженості на мезорівні, формування пластичних зсувів протягом циклічного пластичного деформування. При проведенні аналізу кожної зони зображення було визначено переважаючі кути нахилу штучних поверхневих міток. Алгоритм аналізу зображення містить операції інвертування, бінарного перетворення та визначення переважаючого кута нахилу виявлених міток за допомогою перетворення Хафа.

Вхідним для аналізу було цифрове зображення поверхні в градаціях сірого кольору $I_0(x, y)$, де x – індекс стовпчика, $x = \overline{1, m}$; y – індекс рядка зображення, $y = \overline{1, n}$; $I_0(x, y) = \overline{0, 255}$.

Для виявлення на зображенні I_0 поверхневих міток проводили сегментацію шляхом бінарного перетворення. В результаті цього отримали монохромне зображення $I_B(x, y)$, у якому яскравість кожної точки становила

$$I_B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } I_0(x, y) > B \\ 0, & \text{при } I_0(x, y) \leq B \end{cases} \quad (4.1)$$

На рис. 4.5, а-ж показано початкові та монохромні зображення штучних поверхневих міток для зони II дослідженого зразка.

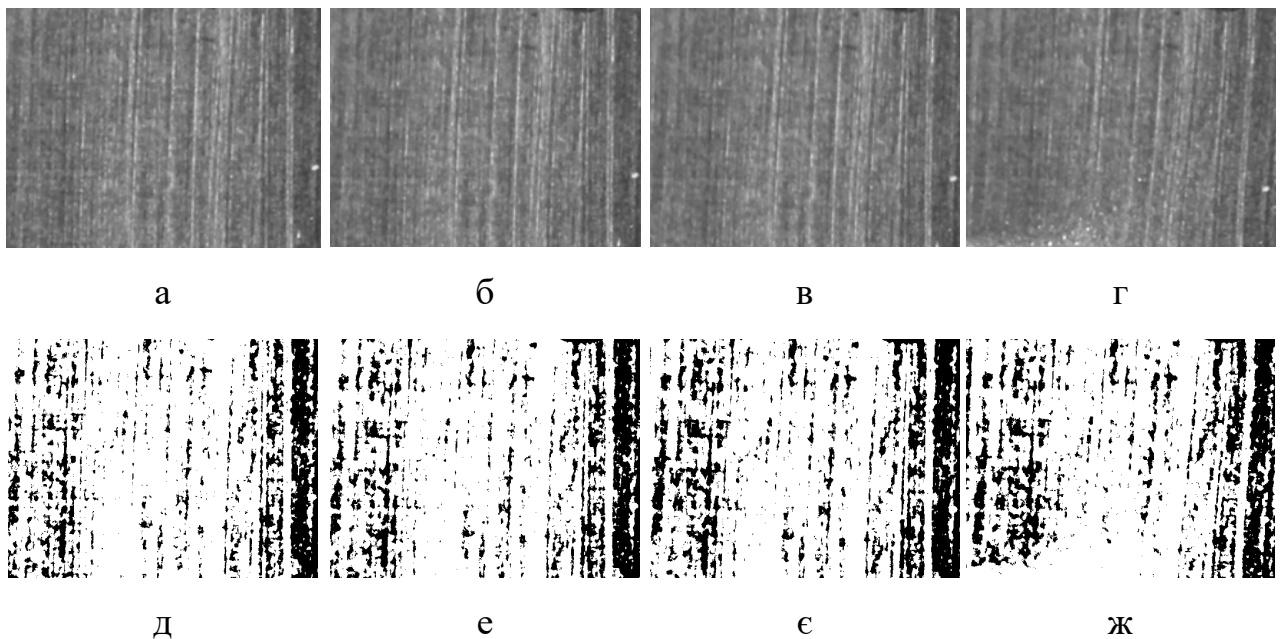


Рис. 4.5. Цифрові фото поверхні зони 2 з штучними поверхневими маркерами в точках оптико-цифрового контролю (а-г) та їх монохромне подання (д-ж)

Для виявлення переважаючого кута нахилу до отриманого монохромного зображення I_B застосовували перетворення Хафа, яке полягає у відображенні зображення на параметричний простір прямих [13]. Припустимо, що множина прямих на площині задана параметричним рівнянням

$$h(\theta, \rho, x, y) = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - \rho, \quad (4.2)$$

де (x, y) – параметричний простір зображення; (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 приймали $\Delta\theta = 0,5^\circ$, $\Delta\rho = 1$ пікс). Кожній комірці фазового простору відповідає акумулятор з певною кількістю інформативних точок на зображенні. Умову належності точки $I_B(x, y)$ зображення I до прямої h , заданої коміркою параметричного простору $S(\theta, \rho)$ приймали таку:

$$r(x, y, \theta, \rho) = \begin{cases} 1, & \text{при } d(I_B(x, y), h(\theta, \rho, x, y)) \leq d_{\lim}, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (4.3)$$

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

Таким чином, функція перетворення Хафа має вигляд:

$$H(S(\theta, \rho)) = \sum r(x, y, \theta, \rho). \quad (4.4)$$

Результати аналізу. За фізичну основу методу прийнято концепцію багаторівневого опису, згідно з якою на мезорівні у матеріалі з тріщиною виникають трансляційно - ротаційні зсуви. Кількісний аналіз акумуляторів у параметричному просторі дозволив знайти на зображенні прямі з найбільшою кількістю інформативних точок. Зони, в якій 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 зображень (рис. 4.6, д-ж) показано на рис. 4.6, а-г.

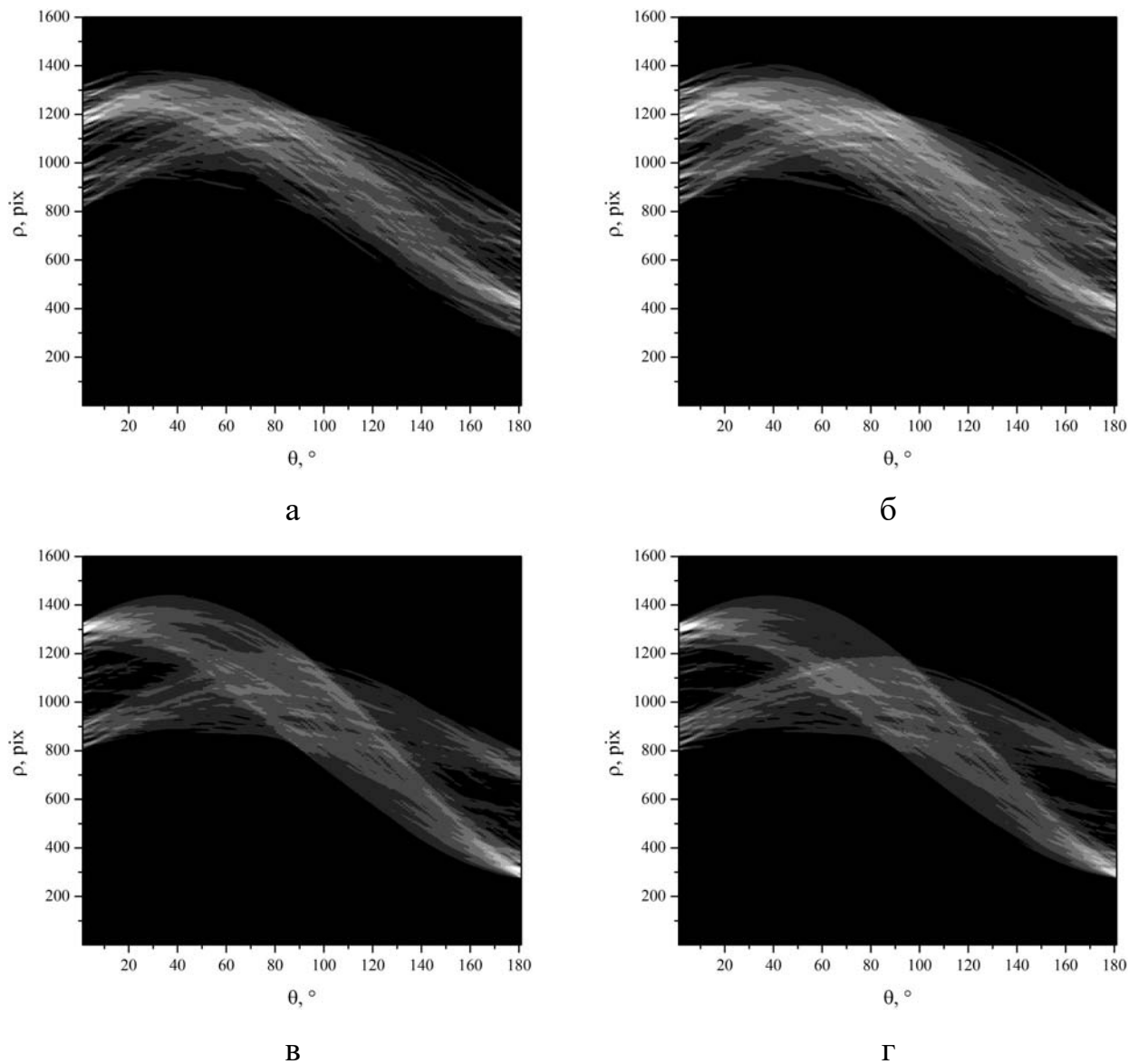


Рис. 4.6. Вигляд функції перетворення Хафа для зображень (рис. 4.5, д-ж)

Зони максимальних значень функції $H(S(\theta, \rho))$ (найсвітліші зони на рис. 4.6) відповідають комбінаціям параметрів (θ, ρ) , які формують пряму, що проходить через найбільшу кількість точок зображення. Наявність кількох невеликих пікових зон (рис. 4.6, а) означає, що зображення містить кілька добре виражених прямих. Розмивання зон високих значень функції

$H(S(\theta, \rho))$ вказує на те, що прямі лінії на зображенні менше виражені. Їх зміщення вздовж осі θ виявляє зміну кута нахилу прямих на зображенні.

Пропонований підхід дозволив розраховувати вплив деформаційних процесів на положення та геометричні параметри маркерних ліній, нанесених на поверхню дослідженого зразка. Із зростанням їх розорієнтації відбувається зростання функції перетворення Хафа, яке є свідченням локалізованих деформаційних процесів у матеріалі. На підставі результатів не тільки визначили величину накопичених у матеріалі пошкоджень, але й оцінили характер їх розподілу у різних ділянках контролю зразка, за даними обробки цифрових зображень аналізованої поверхні. Крім того, забезпечено можливість проведення декількох вимірів у різних контрольних ділянках зокрема суміжних до концентраторів та тріщин.

Оцінювання геометричних параметрів отвору. Для дослідження форми отвору використовували його цифрові зображення (рис. 4.7, а-г).

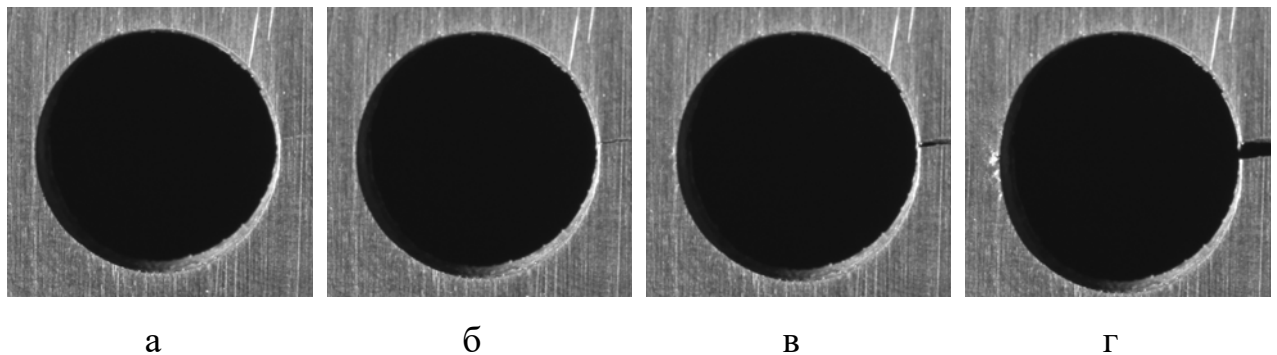


Рис. 4.7. Цифрові зображення отвору для різних точок оптико-цифрового контролю за напрацювання 36135; 38138; 40145; 42152 циклів.

До вхідних зображень застосовували бінарне перетворення (4.1) і аналізували найбільший знайдений зв'язний об'єкт. З цією метою розраховували його площу (кількість пікселів, які входять до його складу) та координати центру мас. За обчисленим значенням площі розраховували еквівалентний діаметр d_i кола з такою ж площею.

Щоб виявити ступінь наближення форми отвору до колової, розраховували його коефіцієнт круглості [113]. Він приймає значення від 1% до 100% і показує, скільки пікселів розпізнаного об'єкта знаходяться всередині кола з центром у центрі мас об'єкта та еквівалентним діаметром d_i .

Виявлено, що еквівалентний діаметр змінювався від 2,4 мм ненавантаженого зразка до 2,51 мм для останньої точки оптико-цифрового контролю. Коефіцієнт округлості при цьому знизився від 99,6 % до 97,6 %.

Навність отвору (концентратора напружень), зародження і підростання втомної тріщини, зумовлює виникнення полів сингулярності напружень і деформацій і їх подальшу локалізацію, рис. 4.8б. Вона пов'язана із двома аспектами – концентрацією деформацій у вершині втомної тріщини та в околі концентратора, при цьому, матеріал не втрачає тримкої здатності, рис. 4.8б. Узагальнюючи експериментальні дані виявлено, що у пластичних матеріалах на стадіях деформування, які передують виникненню тріщин оптичні властивості зон локалізації визначаються полем пошкоджень, що склалося у матеріалі, а основною причиною його виникнення є процес циклічного деформування.

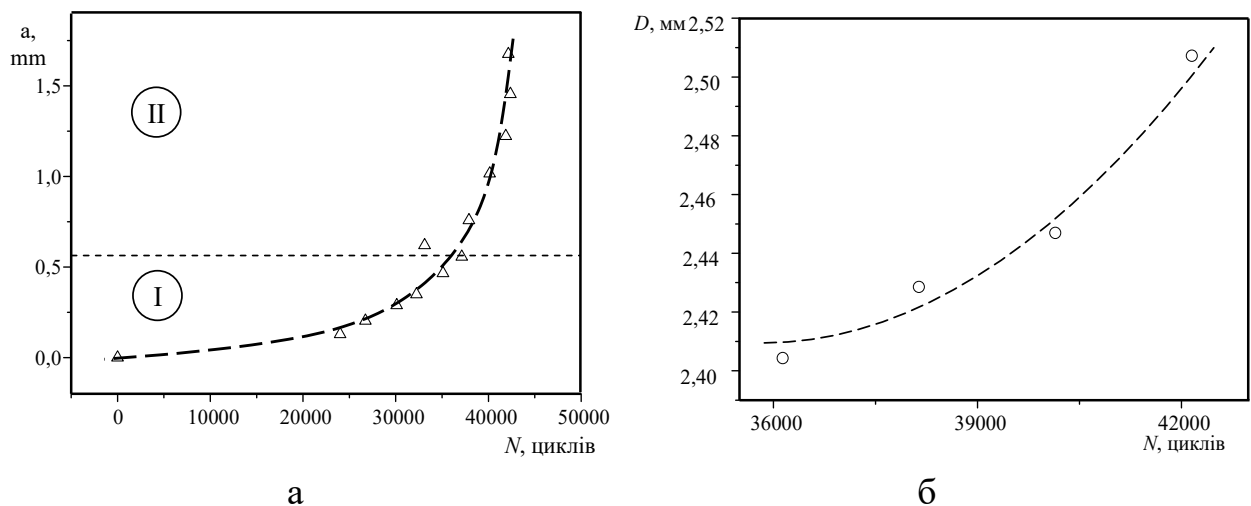


Рис. 4.8. Залежність довжини тріщини від кількості циклів навантажування – а та зміна форми концентратора від циклічного напруцювання – б;

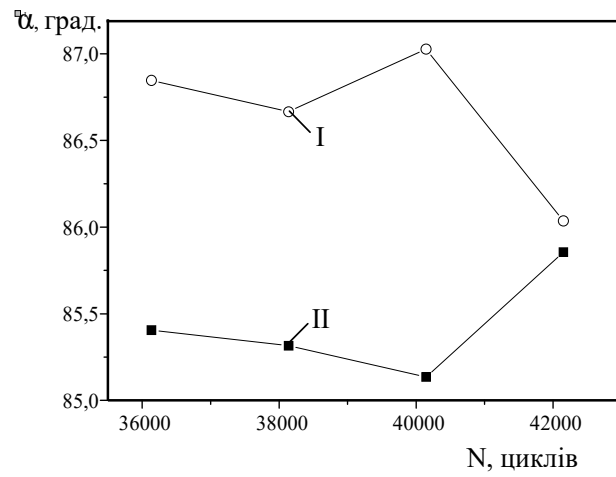
I – ділянка зародження та усталеного росту тріщини; II – ділянка докритичного підростання.

Аналіз закономірностей зміни кутів повертання маркерних міток в околі концентратора при випробуваннях на циклічну тріщиностійкість, дозволяє стверджувати, що вони схожі за формою і мають «дзеркальний» вигляд, рис. 4.9а, б. Це свідчить про те, що у всіх досліджених діагностичних зонах метод описує єдині фізичні закономірності, що ще раз доводить обґрунтованість застосування пропонованого підходу.

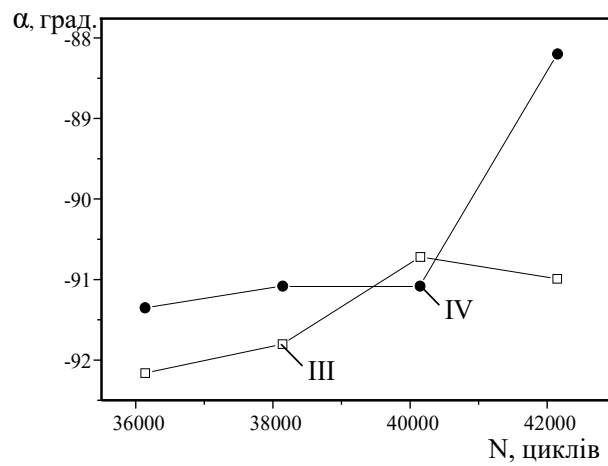
Отримані діаграми нелінійні, з незначним піковим зростанням при напрацюванні 40000 циклів, рис. 4.9а, б. Цей пік зумовлений локалізацією зсувів у смугах пластичного течіння і градієнтом деформацій у межах аналізованої поверхні зображення. Крім того, після цього піку діаграми мають спадну гілку з поступовим зменшенням кута повороту маркера в аналізованій зоні. Чергування на кривих лінійних ділянок пластичного течіння різної інтенсивності, свідчить про поступове накопичення мікроушкоджень в процесі деформування і проростання тріщини, внаслідок чого значна частина напружень на аналізованій ділянці релаксує, що і відбивається на формі діаграми.

Вивчення спектру розорієнтації маркерів протягом циклічного напрацювання зразків довело, рис. 4.9а, б, що основним фактором зміни орієнтації маркерів є вплив пластичної зони, що виникла біля вершини втомної тріщини. Спектр спотворення маркерних міток зумовлений механізмами зсуву та повороту мезоструктурних елементів (конгломератів зерен), а загальна зміна орієнтації маркера становила від 0,5 до 4,0%.

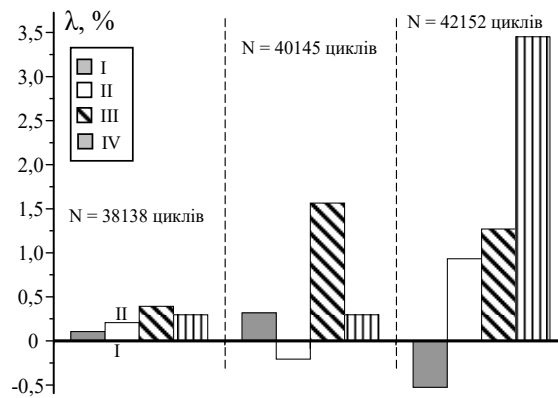
Отримані результати довели, що дані кількох смуг-маркерів можуть бути успішно використані для визначення пошкодженості досліджених матеріалів, якщо їх узагальнити шляхом використання формального критерію пошкодженості як відхилення від початкового стану – λ , рис. 4.9 в. Добре видно зростання відхилення маркера від початкової орієнтації із підростанням тріщини для всіх досліджених зон зразка.



а



б



в

Рис. 4.9. Абсолютні а, б та відносні значення кутів нахилу сенсорних міток у контрольних зонах зразка, (див рис. 4.1а) за циклічного напруження.

Визначення параметрів оптико-цифрового контролю узгоджується із підходами фізичної мезомеханіки [10], що дозволяє отримати узагальнюючу

картину процесу деформування та руйнування матеріалу у околі концентратора, яка задовольняє граничним, початковим та фізичним умовам, та дозволяє отримати узагальнені закономірності деформування та руйнування сталі 17Г1С.

Однією із переваг є фізична обґрунтованість розрахункових значень пошкодженості отриманих на підставі даних різних методів оптико – цифрового контролю і т.д. Це підтвердило принципову можливість розробки критеріїв оцінювання стану матеріалу за умови концентрації напружень. Ще однією перевагою пропонованих підходів є те, що вони дозволяють встановити взаємозв'язок між кількома параметрами пошкодженості. За такого підходу, забезпечується можливість контролю стану магістрального газопроводу та визначення термінів проведення ремонтів «за фактичним станом». Обчислення кількох параметрів пошкодженості у межах єдиного математичного алгоритму дозволяє забезпечити точність і достовірність одержаної діагностичної інформації.

4.3. Мікромеханізми втомного руйнування труби

Експлуатація за призначеним ресурсом передбачає реалізацію принципу безпечного ресурсу (safe life), експлуатація за технічним станом реалізується при проектуванні магістрального газопроводу за принципами безпечного руйнування (fail safe) і допустимого пошкодження (damage tolerance).

Застосування внутрішньотрубних інтелектуальних поршнів для діагностики стану стінки труби дозволяє достовірно виявити поверхневі дефекти, в тому числі пітинги і втомні тріщини. Це є передумовою для створення методів прогнозування втомної довговічності, а також оцінки допустимого ушкодження за технічним станом.

Розвиток багатомасштабних моделей накопичення пошкоджень на макро -, мезо - і мікрорівнях, зокрема в умовах циклічного навантаження матеріалів елементів конструкцій тривалої експлуатації дозволяє врахувати

пошкодженість матеріалу накопичену протягом експлуатації і сформулювати параметри оцінювання процесів деформування на різних масштабних рівнях. За наявності в матеріалі тріщиноподібних дефектів це забезпечує можливість аналізу процесів накопичення пошкоджень біля вершини тріщини та обліку наявної сингулярності напружень і деформацій.

Відомо, що поверхневі шари і внутрішні межі розділу мають важливе значення у створенні концентраторів напружень при навантаженні зразка. Накопичено великий обсяг експериментальних даних і проведені дослідні роботи, що стосуються впливу стану поверхні на фізико-механічні властивості металевих матеріалів. Було показано, що поверхневий шар, є ослабленим за своєю природою, залучається до процесу пластичного течіння раніше, ніж сердцевина матеріалу. Отже, поверхневий шар зазнає більшої деформації, ніж у середньому по зразку. При прокатці труб магістральних газопроводів, ці процеси також є, що зумовлює необхідність оцінювання циклічної довговічності різних шарів труби магістрального газопроводу.

Метою даного підрозділу є встановлення закономірностей циклічного деформування і руйнування сталі 17Г1С, на різних структурних і масштабних рівнях, що широко застосовується в газотранспортному комплексі.

За умов циклічного навантаження визначальним для довговічності до зародження і поширення тріщин є структурний стан сталі і характеристики міцності і пластичності матеріалу. Експериментально отримано показники живучості сталі зовнішньої ($N_f = 42$ тис. циклів) і внутрішньої $N_f = 35$ тис. циклів) поверхонь труби магістрального газопроводу, табл. 4.1. Циклічне деформування матеріалу призводить до виникнення дисипативних мезоструктур і деформування матеріалу. Зародження втомного дефекту є кінцевою стадією деформування матеріалу, коли відбувається глобальна втрата зсувної стійкості на макрорівні і починається ріст магістральної втомної тріщини [116].

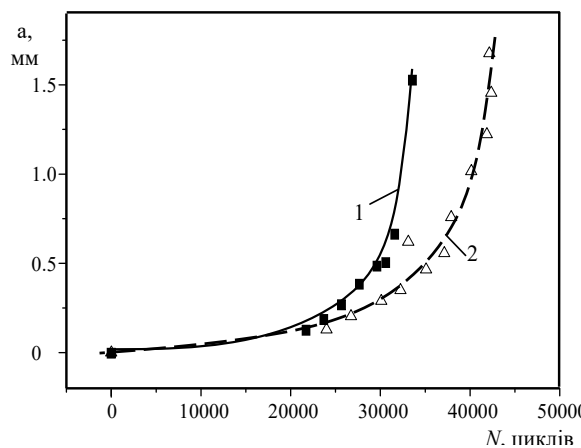
Таблиця 4.1

Циклічна довговічність зразків сталі 17Г1С

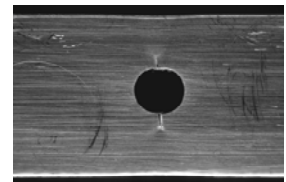
Довговічність зразка, тис. циклів	Місце вирізання	
	Зовнішня поверхня	Внутрішня
N_f	42	35

Розглянемо період росту втомної тріщини в матеріалі труби, рис. 4.10. Зміни швидкості росту тріщини в сталі 17Г1С вирізаних із зовнішнього і внутрішнього шарів труби описуються залежностями одного типу і відповідають стабільній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування.

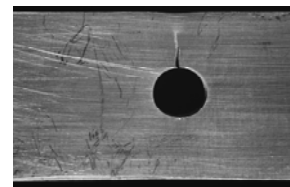
При цьому довговічність сталі внутрішнього шару є на 20% нижчою ніж зовнішнього, рис. 4.10а. Отриманий ефект можна пояснити інтенсивнішою експлуатаційною деградацією металу ближче до внутрішньої поверхні труби, через її наводнювання в результаті електрохімічної взаємодії сталі з агресивними складниками транспортованого газу. При довжині тріщини $a = 0,1$ мм довговічність матеріалу з різних шарів є практично однаковою.



а



б



в

Рис. 4.10. Залежність довжини тріщини від циклічного напруження сталі 17Г1С зовнішнього (1) та внутрішнього (2) шарів.

Зростання тріщини, і особливо зародження симетричної тріщини з іншого боку концентратора, рис. 4.10а, б призводять до значної відмінності

схеми навантаження зразка. Зроблено спробу застосувати комплексний підхід дослідження деформації і руйнування на підставі методів фізичної мезомеханіки та механіки руйнування [115].

На поверхнях зразків з різних шарів вирізання на стадії зародження односторонньої тріщини ($a = 0,1$ мм) на бічній поверхні плоского зразка формувалась зона локалізації деформації. Кінетика її розвитку безпосередньо пов'язана з механізмами взаємодії втомної тріщини і «смугастої», одноорієнтованої структури сталі 17Г1С. Структура дослідженої сталі мала вигляд феритних і перлітних шарів, розташованих у «шаховому» порядку, що зумовило значну анізотропію властивостей в повздовжньому і поперечному напрямках. Встановлено, що пластичні деформації, певною мірою, «придушуються» такою «композитною» структурою трубної сталі.

Підростання тріщини ($0,1 \text{ мм} < a < 0,5 \text{ мм}$) зумовлює збільшення локальних пластичних деформацій, що перекривають значну кількість «шарів» ферито-перлітної структури. За таких умов у матеріалі виникають розшарування на межах ферито-перлітної структури зумовлені неоднорідністю їх пластичного течіння.

Для «довгих» тріщин (одно- та двобічної), рис. 4.11а, б конфігурації зон локалізації деформації при $a > 0,5$ мм були схожими, симетричність у розподілі напружень в зонах макролокалізації мала «двопелюсткову» форму аж до руйнування. Як наслідок, на макрорівні зразок руйнувався відривом під впливом нормальних напружень розтягу, рис. 4.11в, г, про що свідчать поля векторів переміщень рис. 4.11, б.

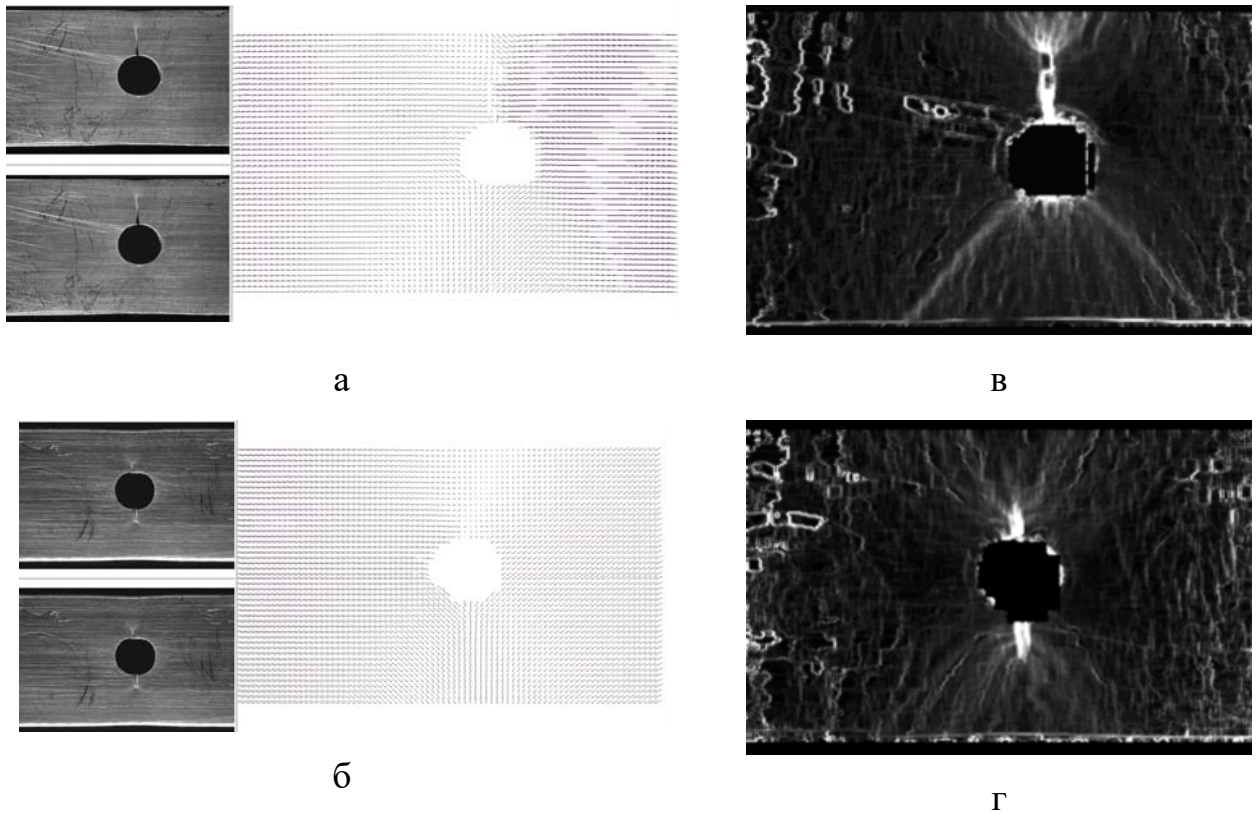


Рис. 4.11. Поля зсувів і розподіл пластичної деформації одnobічної - а, в та двобічної - б, г втомних тріщин.

Необхідно враховувати, що в зонах концентраторів напружень і тріщин, при номінальних напруженнях що не перевищують межу текучості, як правило, мало місце циклічне пружно-пластичне деформування матеріалів. Руйнування зразків відбулось в наслідок їх малоциклової втоми, при цьому можна відзначити кілька основних стадій втомного руйнування, які ми пов'язуємо зі зміною геометрії пластичної зони, табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Стадійність руйнування сталі 17Г1С для різних шарів вирізання
з магістральної труби

Стадій- ність	Схема втомного руйнування	
	Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня
Стадія 1	До активного опору зовнішньому силовому впливу залучено лише невеличку зону у вершині тріщини, спостерігали придушення деформацій у об'ємі матеріалу на мікрорівні, а поширення втомної тріщини відбувається за схемою «зсув + поворот».	Однобічне підростання втомної тріщини із активним накопиченням пошкоджень на поверхні отвору-концентратора з протилежного напрямку поширення втомної тріщини боку. Спостерігали деформування та зростання шорсткості поверхні біля контуру, де у подальшому зароджується мікротріщина.
Стадія 2	«Пелюстки» розташовані з внутрішніх боків отвору змінюють свою форму. Якщо у вершині втомної тріщини пластична зона має чітку форму, то з протилежного боку отвору, вона є розмитою. Це свідчить, про те, що у смугах локалізованої деформації зберігається максимальна величина	З боку макротріщини виникає пластична зона без видимих смуг деформацій. Підростає мікротріщина з іншого боку отвору, що й визначає зміну напружено-деформованого стану зразка. При подальшому циклічному навантаженні відбувається розширення області пластичного деформування із зростанням кількості смуг та їх

	інтенсивності деформації зсуву, що визначає траєкторію та механізми поширення втомної тріщини.	розмірів.
Стадія 3	Чіткість форми пластичної зони у вершині тріщини є більш виразною, з протилежного боку помітно смуги локалізованої пластичності. Максимальну концентрацію напружень та найбільшу інтенсивність деформацій зосереджено в околі вершини втомної тріщини.	Формування чітко виражених пластичних зон у формі «вусів» у кожній з вершин втомних тріщин.

Морфологія зламу. Механізми руйнування всіх зразків за своєю фізико-механічною природою є подібними. Слід зазначити, що зони зламу всіх досліджених зразків були перпендикулярні до осі розтягу, а їх розмір залежав від ступеня стиснення поперечної деформації (вздовж фронту тріщини) [115].

Макрозлам мав квазікрихкий, нерегулярний макроборозенковий рельєф, що нагадував лускоподібний, рис. 4.11а. Це підтверджує, те, що в момент зародження тріщини утворились дві системи ковзання в вершині тріщини, а старт і підростання тріщини відбулися за схемою «зсув + поворот» [115].

Мікрорівень. У локальних обсягах металу спостерігаються типові втомні борозенки. Прискорене зростання втомної тріщини характеризується переходом від лускатого рельєфу, рис. 4.11б до змішаного крихко-пластичного, при якому на поверхні руйнування помітні розшарування, рис. 4.11в.

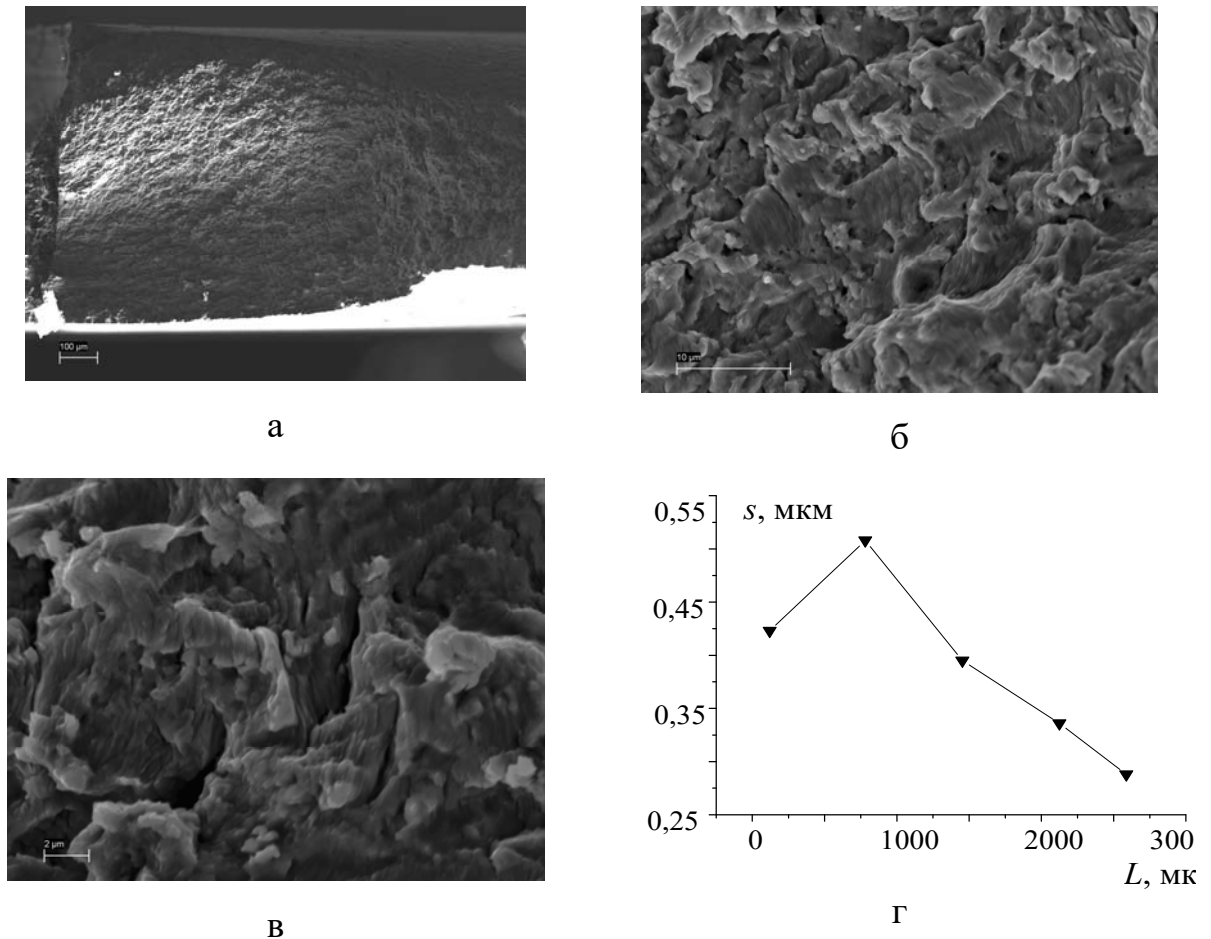


Рис. 4.11. Макро- (а) і мікрофрактограма (б, в) і крок борозенок втоми вздовж фронту тріщини в зразку сталі 17Г1С, вирізаному з зовнішньої поверхні труби.

Макрозлам, має квазікрихкий вигляд, поширення тріщини відбувалось з формуванням борозенок втоми. Враховуючи нелінійність деформування матеріалу в зонах пластичних деформацій, можна висловити припущення, що мають місце процеси самоорганізації системи на мезо- і мікрорівнях [116, 117, 123]. На ступінь стиснення деформації впливає довжина тріщини, зі збільшенням якої напружений стан змінюється від плоского до об'ємного напруженого стану, що відбилося в наявності макроутяжини на поверхні зразка.

Мікрорівень. У локальних обсягах металу спостерігаються типові втомні борозенки, а зі збільшенням довжини тріщини механізм, як і в попередньому випадку змішаний, рис. 4.12б, в.

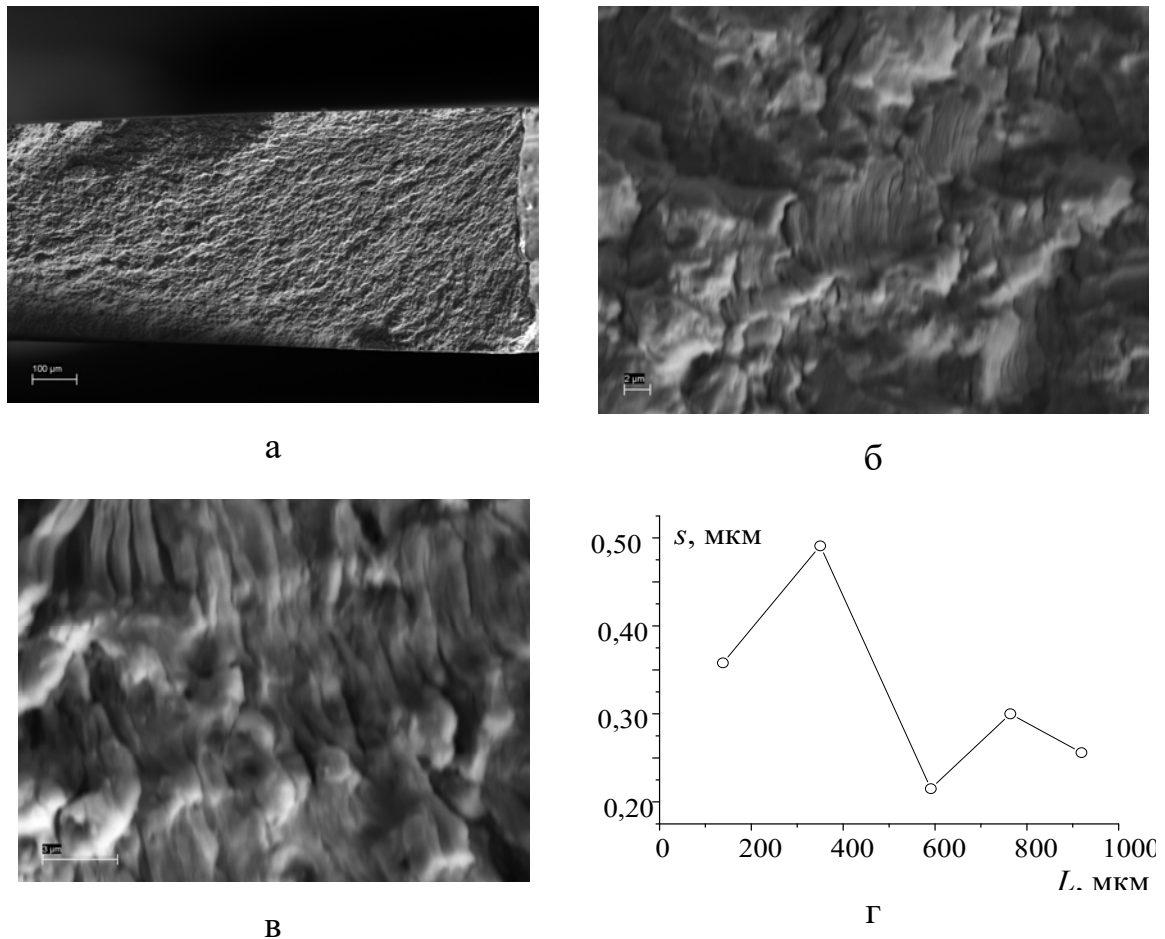


Рис. 4.12. Макро- (а) і мікрофрактограма (б, в) і крок борозенок втоми вздовж фронту тріщини в зразку сталі 17Г1С, вирізаному з внутрішньої поверхні труби.

В узагальненому вигляді виявлені закономірності можна записати у наступному вигляді:

- Зона старту тріщини з поверхні концентратора (І) - втомна тріщина зародилась в напрямку, перпендикулярному напрямку дії максимальних головних напружень, за допомогою зсувно-ротаційних процесів в конгломератах зерен.

- Зона стійкого підростання (ІІ) - поверхня руйнування грубша. Орієнтації борозенок втоми нерегулярною, фронт їх утворення на окремих ділянках, значно відхиляється від напрямку росту магістральної тріщини. Ширина борозенок втоми є неусталеною. При цьому характер рельєфу вказує на значні локальні пластичні деформації і розриви матеріалу між суміжними

ділянками неоднорідного розвитку втомної тріщини. Якщо її розвиток блокується пластичними деформаціями на мікро- і мезомасштабному рівнях, то зразки руйнуються за схемою нормального відриву під дією нормальних напружень розтягу. При придушенні деформації в об'ємі матеріалу на мікро- і мезомасштабному рівнях, руйнування відбувалось за схемою зсуву під дією дотичних напружень.

- Зона значних пластичних деформацій і доломіт (III) - борозенки втоми в цій зоні чергуються зі слідами вузького відриву матеріалу. Дослідження рельєфу поверхні руйнування вказують на терасний характер руйнування. Зростання тріщини відбувається послідовним об'єднанням терас, в результаті чого утворюються гребені або рубці. Це підтверджується зниженням їх кроку, а також відбивається на їх формі, практично всі вони мають деформований фронт [123].

Досліджували крок втомних борозенок вздовж фронту зламу зразків. Слід підкреслити, що кінетика зміни кроку борозенок втоми (мікрорівень) відрізняється від кінетики росту втомної тріщини (макрорівень), швидкість якої зі збільшенням довжини зростає. Таким чином, в даному випадку борозки втоми не можуть бути використані для кількісного оцінювання тріщиностійкості матеріалу. Такі фізичні аномалії свідчать про те, що крім борозенок втоми мали місце й інші, переважно в'язкі механізми руйнування. Саме їх вплив на морфологію зламу і не дозволяє використовувати борозенки втоми в якості чисельного параметра оцінки тріщиностійкості сталі 17Г1С.

Висновки

Виявлено й кількісно описано основні закономірності процесу втомного росту тріщин у зразках сталі 17Г1С на різних макромасштабних рівнях при наявності локалізації пластичних деформацій у вершині тріщини.

Отримані фрактографічні дані свідчать про те, що перехід визначального впливу деформування і руйнування від меншого структурного рівня до

більшого має впорядкований характер. Кількісно показано, що збільшення довжини втомної тріщини супроводжується збільшенням розміру пластичної деформації біля її вершини, що обумовлює перехід від квазікрихкого руйнування до втомного, з утворенням втомних борозенок. Зона передруйнування утворена за квазікрихким механізмом.

Запропоновано методи оптико-цифрового контролю стану сталі 17Г1С, які дозволяють одночасно обчислити кілька параметрів пошкодженості. Розроблено алгоритм ідентифікації пошкоджень поверхні матеріалу із концентратором напружень на основі узагальненого ієрархічного підходу та штучно нанесених міток-маркерів.

На основі розрахунку величини питомої зміни орієнтації міток розвинуто спосіб оцінювання зміни пошкодженості полікрісталічних матеріалів, що ґрунтується на визначенні ступенів викривлення маркерів при взаємодії із втомними тріщинами та деформаційними полями у їх вершинах.

Створено алгоритм та реалізовано комп'ютерну програму оцінювання накопичених пошкоджень, що пов'язує зміну оптико-цифрових властивостей матеріалу з зародженням та поширенням втомних дефектів.

РОЗДІЛ 5

ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФІЗИЧНОЇ МЕЗОМЕХАНІКИ ТА НЕЛІНІЙНОЇ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

5.1. Взаємозв'язок деформаційних властивостей та параметрів циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С

Оптично-цифровий контроль є одним з найефективніших методів неруйнівного контролю для визначення дефектів різних типів, зокрема: корозійних, втомних тощо [125-127]. Цей метод дослідження широко застосовують у виробництві, відновленні та експлуатації конструкцій, руйнування яких спричиняє важкі техногенні наслідки. Одним з напрямків розвитку таких підходів є оцінювання параметрів деформаційного рельєфу металів. Існує тісний кореляційний зв'язок між станом поверхневого шару та основою матеріалу [128]. Отже поверхню металів розглядали як «індикатор» накопиченого втомного пошкодження. Цю властивість використовували для оцінювання втомного пошкодження конструкційних елементів, виготовлення зразків-свідків, сенсорів втоми, або так званих «давачів деформацій інтегрального типу» [130].

Відомо низку праць [131-135], які обґрунтовують використання подібних підходів у нафтогазовому комплексі та доводять можливість моніторингу стану обладнання і можливість прогнозування залишкового ресурсу. Відомо два основних принципи оцінювання технічного стану матеріалів і конструкцій, зокрема на основі закладеного проектного ресурсу або фактичного напрацювання [136]. Експлуатація в межах призначеного ресурсу ґрунтується на принципі гарантованої безпечної експлуатації. А за фактичним станом можлива, лише у разі оцінювання допустимих пошкоджень і прогнозування «безпечної» тривалості експлуатації [131--135].

Проте, питання прогнозування зародження та кінетики поширення втомних тріщин, є актуальними для обох вказаних підходів. Тому створення

методів оптично-цифрового контролю пошкодженості конструктивних елементів з втомними тріщинами за параметрами деформаційного стану поверхні є актуальними. В основі цих підходів є висока вірогідність виникнення локальних пошкоджень в околі концентраторів напружень і використання їх як інформативних ознак для прогнозування кінетики поширення втомних тріщин. Параметри деформаційного рельєфу використовували як характеристики матеріалу, які еволюціонують внаслідок процесу циклічного навантажування і віддзеркалюють локалізацію деформаційних процесів.

Існує низка фізичних передумов виникнення деформаційного рельєфу, зокрема завдяки його самовпорядкованому формуванню. Одним з найвідоміших є ефект «шахової дошки», що полягає у впорядкованому розподілі напружень і деформацій в поверхневих шарах і на структурних межах твердих тіл під впливом зовнішніх полів (механічних, теплових, електричних). Це фізичне явище пов'язане з неоднорідністю деформації двох з'єднаних різнорідних матеріалів і виникає в будь-яких багаторівневих системах: на межі поділу «поверхневий шар – об'єм матеріалу», «покриття - основа», в багатошарових тонкоплівкових матеріалах, на межах зерен у полікристалах [135-140].

Алгоритми оцінювання розвитку деформаційних процесів у матеріалах дали змогу виміряти та обчислити кількісні характеристики цифрових зображень, здійснювати над ними математичні та логічні операції. Проте, через відмінність різних матеріалів за структурою та необхідність урахування випадковості деформаційного відгуку матеріалу на силовий вплив виникає потреба в доопрацюванні відомих та розвитку нових підходів оптично-цифрового контролю [135]. Важливо встановити фізичні закономірності накопичення пошкоджень, які мають універсальний характер та визначити такі параметри, які достовірно віддзеркалюють і характеризують процеси, що супроводжують структурно-механічні зміни.

Метою даного розділу є апробація та інженерне використання алгоритму оптико-цифрового підходу для аналізу втомних пошкоджень в околі колоподібного концентратора напружень.

Однією з найвагоміших причин руйнування магістральних газопроводів вважають незворотні зміни структури і властивостей металу внаслідок впливу комплексу фізико-механічних чинників, наводнювання [132]. Оцінювання деградації властивостей матеріалів – одне з найважливіших завдань технічного діагностування [133]. Для цього необхідно розробити методи та фізично обґрунтувати параметри для оцінювання накопичених пошкоджень та вичерпування пластичності матеріалу [134]. Це передбачає визначення фізико-механічних властивостей матеріалу конструкції у вихідному і деградованому станах, встановлення кінетики і закономірностей накопичення пошкоджень та виявлення зони максимальної пошкодженості матеріалу і виникнення макродефектів [135].

На розробку такого комплексного оцінювання, з врахуванням впливу циклування на механізми накопичення пошкоджень у сталі 17Г1С та обґрунтуванням параметрів, найчутливіших до деградації, націлені проведені дослідження.

Зразки навантажували циклічним розтягом за розмаху напружень $\Delta\sigma = 250$ МПа, на сервогідравлічній випробувальній установці Biss UTM 150 за асиметрії циклу навантажування $R = 0,1$. Протягом втомних випробувань фотографували поверхню зразка в околі концентратора фотоапаратом Canon D550.

Загальну циклічну довговічність зразка ($N = 1,43 \cdot 10^6$ циклів) умовно ділили на два етапи діагностування:

- попереднього циклічного деформування, впродовж цього періоду на поверхні зразка не виявлено структурно-механічних та оптико-цифрових змін ($N_I = 1,03 \cdot 10^6$ циклів);

- ідентифікація втомної тріщини та дефектометричного контролю, під час якої фіксували зміни стану поверхні, зародження та ріст втомної тріщини ($N_2 = 4 \cdot 10^4$ циклів);

Наведені дані стосуються саме другого етапу діагностичного контролю. Під час шліфування, на зразок наносили повздовжньо орієнтовану систему рисок, яку використали як мітки оцінювання зміни стану поверхні. За зміною їх геометрії та орієнтації контролювали зсувні процеси на поверхні зразка в околі концентратора напружень під час інкубаційного втомного пошкодження та за поширення короткої тріщини. Орієнтацію деформаційного рельєфу кількісно оцінювали за цифровими зображеннями одержаними з допомогою оптичного мікроскопу МБС-10.

Низка відомих результатів дозволяє стверджувати, що є єдині підходи оцінювання взаємозв'язку між деформуванням та руйнуванням [135-140]. Вони можуть бути узагальнені кількома принципами:

- певне співвідношення параметрів зовнішнього навантажування (напруження, гранична деформація тощо) визначає макроскопічну втрату стійкості внаслідок течіння;
- кожному етапу деформування властиві пластичні зсувні та ротаційні зміщення;
- статистичні параметри полів деформацій дозволяють описати масштабно-інваріантні закономірності самоорганізації деформаційного процесу.

Впорядковане рельєфоутворення в околі досліджуваного концентратора є неоднорідним і складним процесом, якому властиві самовпорядкованість і значні групові та індивідуальні варіації. Математичний опис дав змогу достовірно кількісно його оцінити, і розробити достовірні методи визначення інваріантних інформаційних ознак [136].

Вхідними даними для математичного оброблення є оптично-цифрове зображення впорядкованого рельєфу поверхні. Помітно, що сенсорні мітки на поверхні досліджуваного зразка є лінійними. При цьому, відомо, що

деформаційні ознаки на поверхні циклічно деформованого матеріалу є зсувного, або ротаційного походження. Це дозволило припустити, що циклічне напруження буде змінювати нахил сенсорних міток, або спотворювати їх геометрію. Подібні ознаки спостерігали на поверхні алюмінієвих сенсорів під час оцінювання пошкодженості авіаконструкцій [5.1]. Важливою є також можливість використання сенсорів для оцінювання стану конструктивних елементів пошкоджених втомними тріщинами. Поверхню зразка в околі концентратора умовно поділили на чотири інформативні ділянки. Аналізували зміну орієнтації міток протягом циклічного напруження, рис. 5.1,а. Кінетику руйнування матеріалу оцінювали за значенням кута розкриття вершини тріщини (СТОА), який є одним з деформаційних параметрів механіки руйнування, рис. 5.1б.

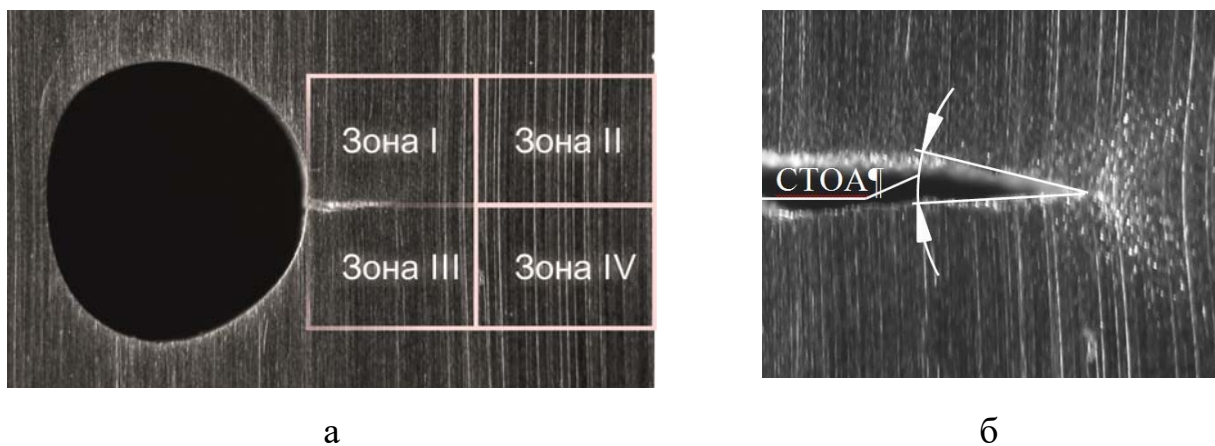


Рис. 5.1. Досліджені ділянки зразка зі штучними поверхневими мітками – а та вимірювання СТОА – б

Кожну зону (рис. 5.1,а) аналізували у п'яти точках оптико-цифрового контролю. Алгоритм аналізу зображення полягає у застосуванні операції інвертування, бінарного перетворення та визначення переважаючого кута нахилу виявлених прямолінійних міток за допомогою перетворення Хафа.

Вхідним для аналізу було цифрове зображення поверхні зразка з повздовжніми мітками, в градаціях сірого кольору $I_0(x,y)$, де x – індекс

стовпчика, $x = \overline{1, m}$; y – індекс рядка зображення, $y = \overline{1, n}$; $I_0(x, y) = \overline{0, 255}$, див. розд. 4, ф-ли 4.1-4.4.

На рис. 5.2 показано початкові (а-д) та монохромні (е-к) зображення штучних поверхневих міток в межах зони II дослідженого зразка. Помітно зростання відхилення міток від вертикальної осі протягом напрацювання.

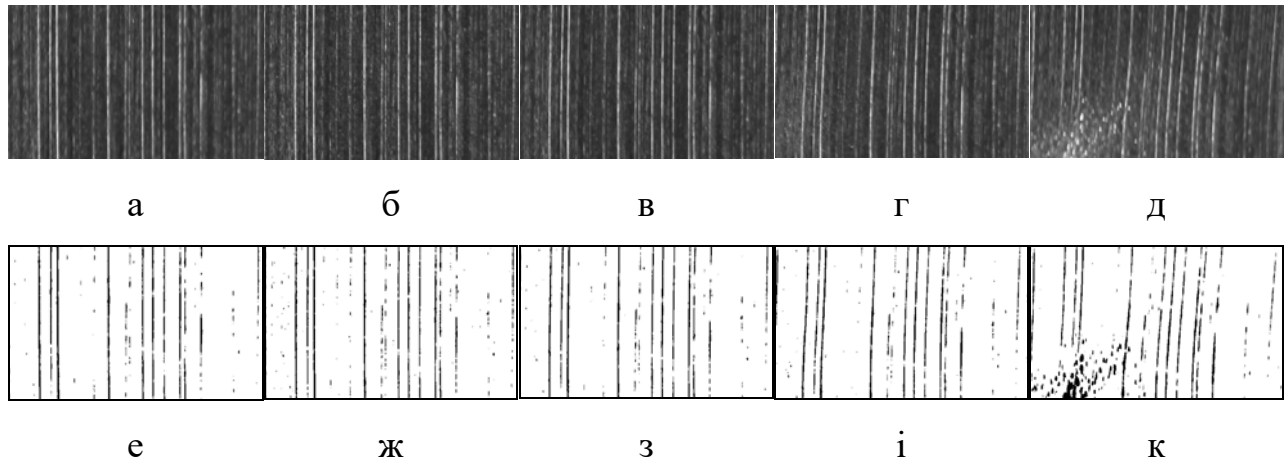


Рис. 5.2. Цифрові фото поверхні в зоні II з поверхневими мітками в точках оптико-цифрового контролю (а-д) та їх монохромне подання (е-к).

Для обчислення значення переважаючого кута нахилу міток, до отриманих монохромних зображень I_B застосовували перетворення Хафа, шляхом відображення I_B на параметричний простір прямих [135]. Нехай сімейство прямих на площині задане параметричним рівнянням

$$h(\theta, \rho, x, y) = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - \rho, \quad (5.2)$$

де (x, y) – параметричний простір зображення; (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 під час аналізу

зображень приймали $\Delta\theta = 0,5^\circ$, $\Delta\rho = 1$ пікс). Дискретні величини $\Delta\theta$ та $\Delta\rho$ впливають на точність визначення параметрів θ та ρ у рівнянні (5.2). В результаті попереднього аналізу зображень виявлено, що розкид нахилів різних прямолінійних фрагментів становить біля 4° . Таким чином, вибраний крок $0,5^\circ$ дозволяє розпізнати зміну нахилу прямолінійного фрагмента.

Кількісний аналіз акумуляторів у параметричному просторі дозволив знайти на зображенні прямі з найбільшою кількістю інформативних точок.

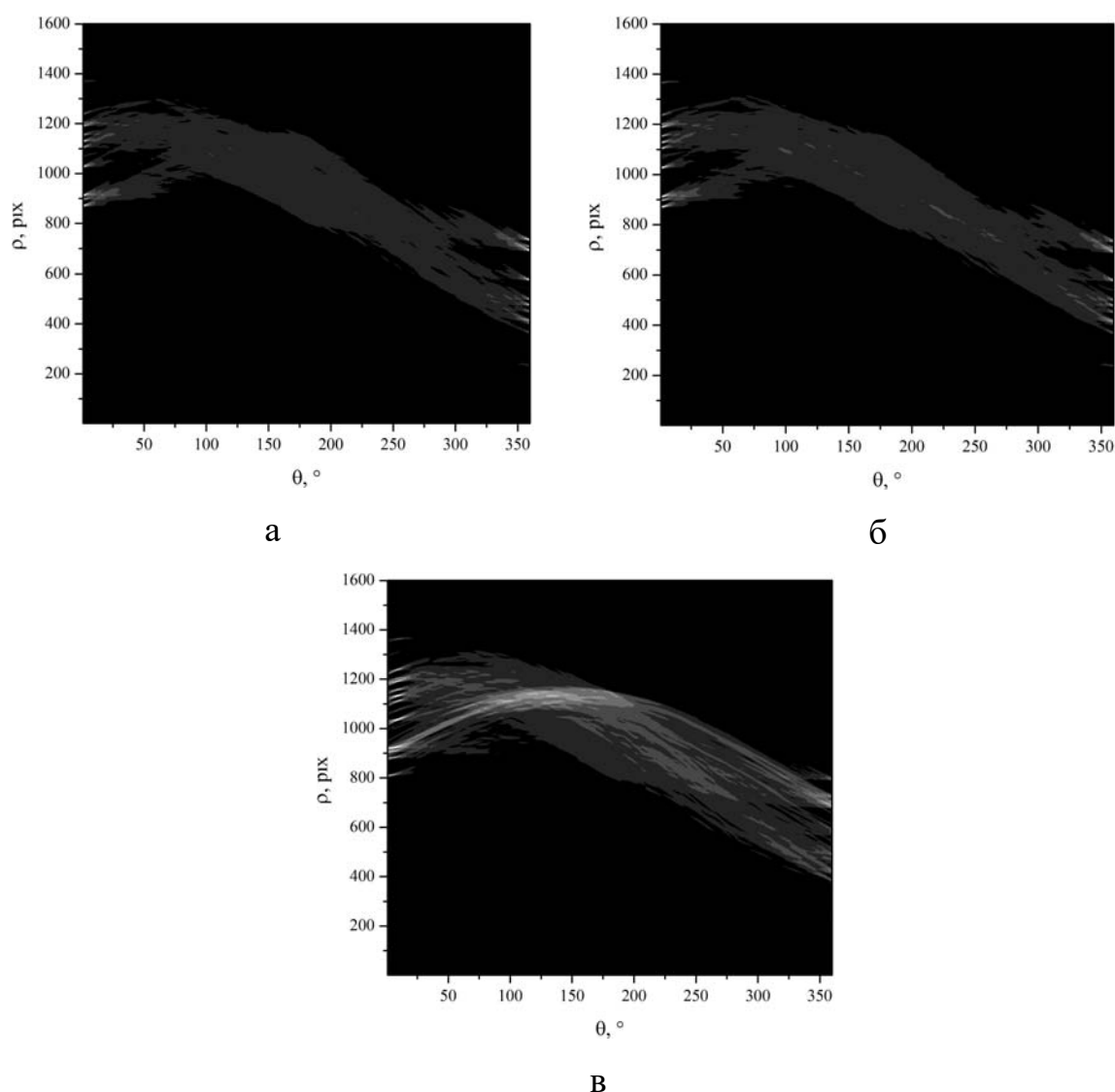


Рис. 5.3. Вигляд функції перетворення Хафа для зображень (рис. 5.2, е, ж, і).

Зони, в якій функція $H(S(\theta, \rho))$ досягає максимуму, відповідають найкраще вираженим прямим. Відповідне значення параметра $\theta = \theta_{base}$

характеризуватиме переважаючий напрямок переміщення інформативних точок (елементів деформаційного рельєфу). Вигляд функції $H(S(\theta, \rho))$ для зображень (рис. 5.2, з, і, к) показано на рис. 5.3, а-в. Зони максимальних значень функції $H(S(\theta, \rho))$ (найсвітліші зони на рис. 5.3) відповідають тим комбінаціям параметрів (θ, ρ) , які формують пряму, що проходить через найбільшу кількість точок зображення. Найсвітлішими зонами вважали ті, де яскравість пікселя становила 250-255 (де 255 – максимальне значення яскравості). Наявність кількох невеликих пікових зон (рис. 5.3, а) означає, що зображення містить кілька добре виражених прямих. Розмивання зон високих значень функції $H(S(\theta, \rho))$ вказує на те, що прямі лінії на зображенні слабше виражені. Їх зміщення вздовж осі θ відповідає зміні кута нахилу прямих на зображенні.

З одержаних результатів прийшли до низки висновків, зокрема:

- зміна орієнтації міток є чутливим параметром накопичення пошкоджень на поверхні зразка, проте вони мають індивідуальні особливості у кожній з аналізованих ділянок;
- індивідуальні особливості зміни кожної маркерної смуги визначається локалізацією деформації у аналізованій ділянці і визначається пропонованим алгоритмом.
- маркерні смуги можуть слугувати для аналізу стадійності розвитку пошкоджуваності аналізованої поверхні, рис. 5.4.

Ідентифіковані первинні деформаційні дефекти протягом циклічного деформування та підростання тріщини перерозподіляються та поширюються. Висока міцність матеріалу спричиняє локалізацію деформаційного процесу, а також розвиток смуг локального пластичного деформування. При цьому, зміна орієнтації смуг - маркерів має синергетичну природу і є відгуком на зсувні та ротаційні повороти конгломератів зерен сталі 17Г1С.

Слід відзначити, що запропонований підхід для оцінювання деформації матеріалу дає можливість врахувати фізичну будову матеріалу, зокрема неоднорідність деформаційних полів та зсувні процеси у полікристалах [138].

Раніше [18, 20] запропоновано алгоритм аналізу формозміни пітингів шляхом їх об'єднання та індивідуального підростання. Цей підхід ефективно використали для оцінювання стану пластини із коловим отвором під час циклічного напруження. Наявність тріщиноподібного дефекту активно впливає на податливість матеріалу, що спричиняє інтенсивну формозміну отвору.

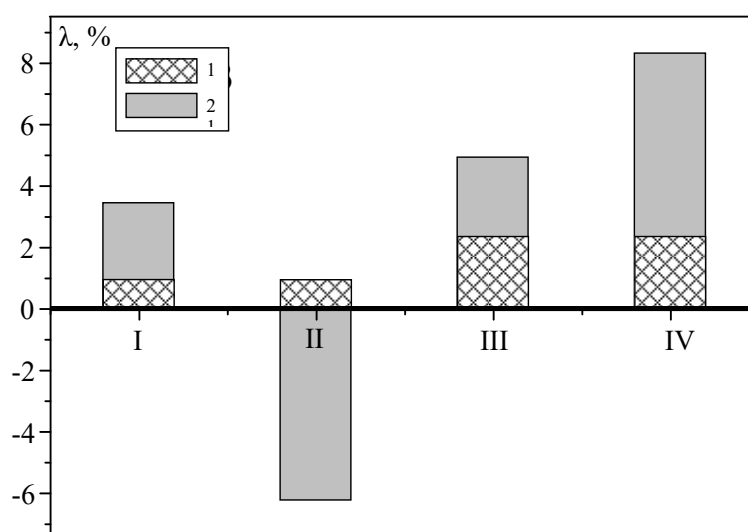


Рис. 5.4. Зміна напрямку смуг-маркерів на поверхні зразка зі сталі 17Г1С: ($\lambda_{\varphi} = [(\alpha_0 - \alpha_{deg}) / \alpha_0] \cdot 100\%$), де $\alpha_0 = 90^\circ$ у зонах контролю I-IV, після 10^3 (1) та 10^4 (2) циклів напруження

Циклічне підростання тріщини спричиняє перерозподіл напружено-деформованого стану у пластині, спричиняючи спотворення форми отвору, які фіксували протягом напруження (рис. 5.5, а-д).

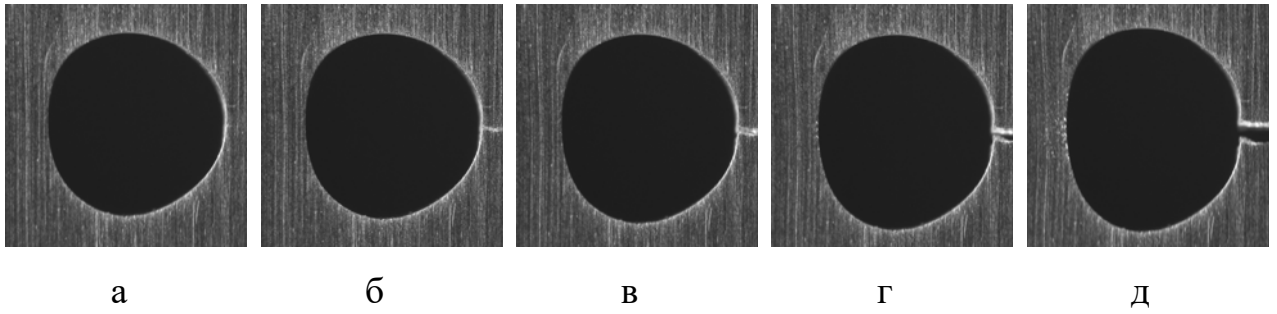


Рис. 5.5. Цифрові зображення отвору для різних точок оптико-цифрового контролю зразка зі сталі 17Г1С.

Міру наближення форми отвору до колової, розраховували за коефіцієнтом круглості. Щоб виявити ступінь спотворення отвору при підростанні тріщини, розраховували координати його центра мас $C_i(x_{ci}, y_{ci})$:

$$x_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} x_m}{f_i}, \quad (5.4)$$

$$y_{ci} = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} y_m}{f_i}.$$

Після цього обчислювали коефіцієнт округлості K_{ci} – відсоток попадання пікселів об'єкта у коло з діаметром d_i , центр якого суміщено з центром мас C_i :

$$K_c = \frac{\sum_{m=1}^{f_i} g(\vec{r}_m, d_i)}{f_i} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

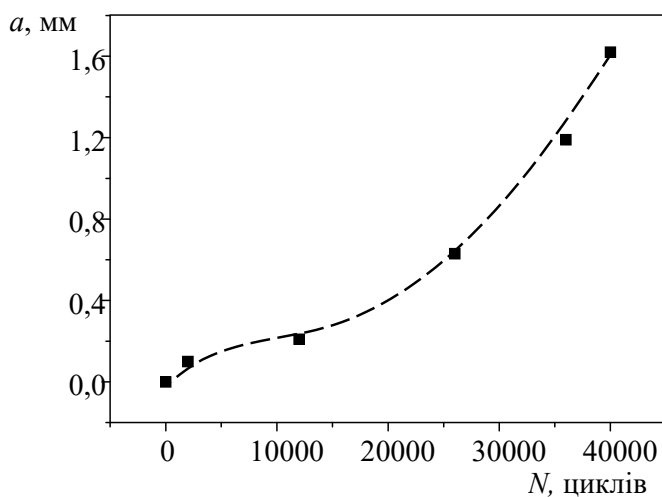
$$g(\vec{r}_m, d_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } |\vec{r}_m| \leq d_i / 2 \\ 0, & \text{при } |\vec{r}_m| > d_i / 2 \end{cases},$$

де $g(\vec{r}_m, D_i)$ – індикаторна функція, яка показує, чи попадає m -ий піксель отвору у межі еквівалентного кола з діаметром D_i ; $\vec{r}_m$ – радіус-вектор, направлений від центру еквівалентного кола $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ до m -того пікселя об'єкта з координатами (x_m, y_m) .

Вважали, що зміна коефіцієнта округлості K_c характеризує локалізацію деформування на макрорівні, яка зумовлена підrostанням втомної тріщини, рис. 5.6а. До вхідних зображень застосовували бінарне перетворення (5.1) і аналізували найбільший зі знайдених зв'язний елемент. Обчислювали його площу (за кількістю пікселів) та координати центру мас. За значенням площі обчислили еквівалентний D діаметр i -го кола еквівалентної площі.

Він приймає значення від 1 % до 100 % і показує кількість пікселів, що потрапляє всередину кола, центр якого розташований у центрі мас реального колового концентратора та еквівалентним діаметром протягом циклічного напруження рис. 5.6,б.

Виявлено, що еквівалентний діаметр D змінюється від 2,45 мм у ненавантаженому зразку до 2,59 мм для останньої точки оптико-цифрового контролю (рис. 5.6а). Коефіцієнт округлості K_c при цьому спадає від 98,5% до 94,9 % (рис. 5.6б). Це особливо помітно внаслідок зниження коефіцієнту округлості отвору. Після 25 тис. циклів навантажування в околі отвору утворюється локалізоване поле деформацій.



а

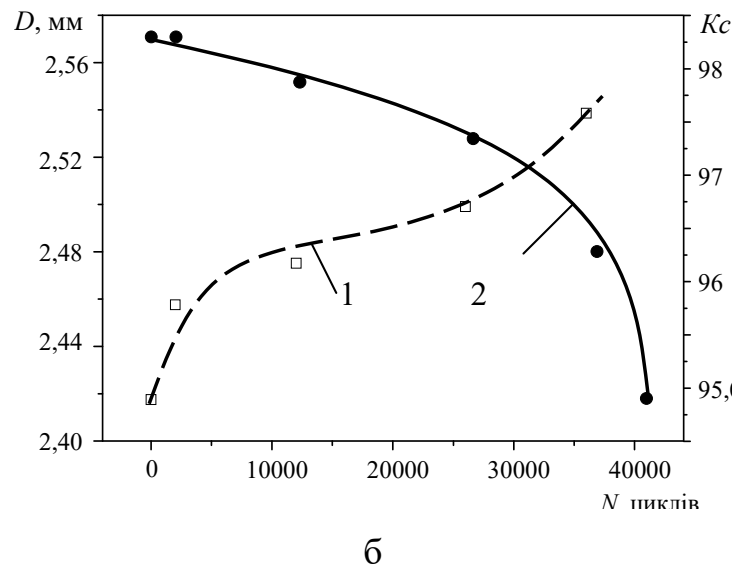


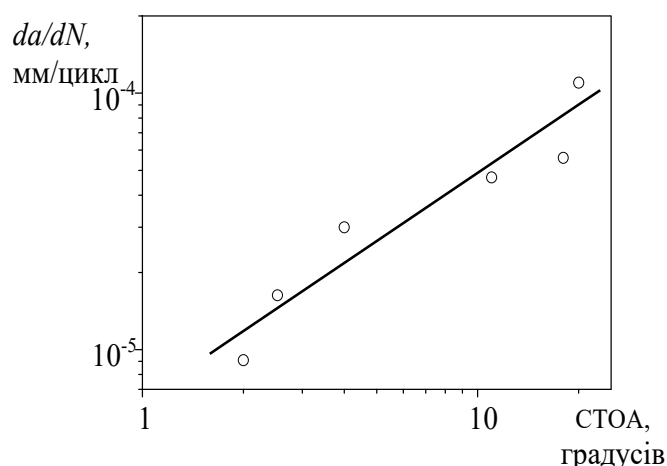
Рис. 5.6. Крива залишкової довговічності пластини з отвором зразка зі сталі 17Г1С – а та параметри зміни форми (1) та коефіцієнту форми (2) отвору - б

Форма отвору є чутливою до локалізації деформаційного процесу (рис. 5.6б). Отримані результати мають чіткий фізико - механічний зміст, адже неоднорідність геометричних параметрів отвору відповідає локалізації деформації на ділянках концентрації напружень. Крім того, зі збільшенням швидкості підростання дефекту інтенсифікується пластичне деформування в околі отвору (рис. 5.6б).

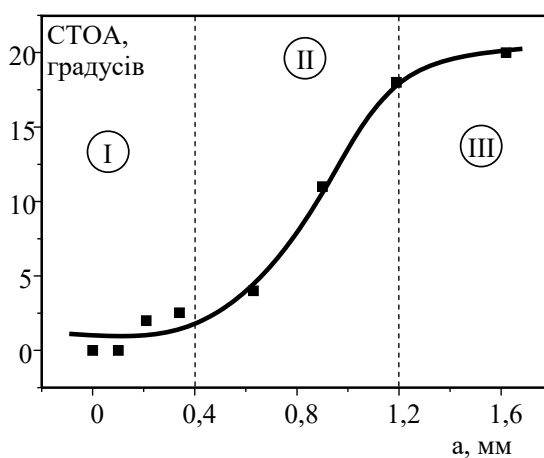
5.2. Деформаційні підходи до оцінювання циклічної тріщиностійкості матеріалу магістрального газопроводу

СТОА дозволяє описати циклічну тріщиностійкість матеріалу за циклічного навантаження, для аналізованого випадку таку залежність подано на рис 5.7. Його перевагою є те, що на відміну від інших параметрів лінійної та нелінійної механіки СТОА може бути визначений на підставі «чистого» вимірювання, без додаткових перерахунків. Разом з тим, цей параметр має низку недоліків. Одним з них є припущення, що при підростанні тріщина не затуплюється, а її ріст контролюється значенням кута СТОА = ψ_c , яке використовують для оцінювання тріщиностійкості матеріалу.

Основним при цьому є механізм шарнірного обертання макрофрагментів зразка відносно вершини тріщини, який зумовлює мінімальне тунелювання і забезпечує точність вимірювання кута розкриття тріщини для «тонких» зразків. Передбачалося, що ψ_c є константою матеріалу, хоча, як виявилось, він залежить від довжини тріщини, рис. 5.7.



а



б

Рис. 5.7. Залежність швидкості росту тріщини a від СТОА – а та вплив довжини тріщини на зміну СТОА – б

Проаналізовано кути розкриття тріщини залежно від її довжини (рис. 5.7б). Для «фізично короткої тріщини» кут розкриття становив 2° . Граничне значення кута відповідає значному підростанню тріщини, яке передуює руйнуванню зразка (СТОА $> 20^\circ$).

Поведінка матеріалу під час деформування. Закономірності зміни СТОА від довжини тріщини можна поділити на три ділянки, рис. 5.7, які можуть бути пов'язані з різними масштабними рівнями деформування.

Мікрорівень. На ділянці (I) СТОА мав невисоке значення, оскільки робочий переїз зразка мав ще достатній запас стримувальної здатності і матеріал активно опирався деформуванню і руйнуванню. Подальша зміна кута нахилу залежності a - СТОА відображає не лише вплив початкової дефектності на поверхні зразка, але і зниження його стійкості до зсуву під час навантажування. Незалежно від виду мікронапруженого стану в околі вершини тріщини взаємопов'язаність деформаційних процесів в суміжних ділянках поширюється на більший структурно - масштабний рівень. Локалізація деформації в навантаженому зразку проявляється перегином кривої.

Мезорівень. Ділянка графіка (II) характеризується максимальним зростанням СТОА та чергуванням процесів деформування і руйнування матеріалу. Спостерігали перерозподіл розкриття тріщин і розвитку релаксаційних процесів у металі. Аналіз залежності, рис. 5.7б показує, що структурна адаптація матеріалу відбулася внаслідок зсуву прилеглих ділянок металу в околі вершини тріщини.

Макрорівень. Ділянка (III) описує деформування матеріалу до точки втрати зсувної макростійкості. При цьому, зсувні деформації спричиняють релаксацію концентраторів напружень у вершині втомної тріщини. Це пов'язане із вичерпуванням запасу пластичності матеріалу.

Проаналізовано три характерні масштабні рівні деформування та руйнування матеріалів. Встановлено можливості використання різних показників для оцінювання деградації матеріалу магістрального газогону. Стан експлуатованого матеріалу слід оцінювати з використанням комплексу показників деградації матеріалу, які дають змогу виявити її на мікро-, мезо- та макрорівнях.

Таблиця 5.1

Параметри оцінювання деградації сталі

Параметри оцінювання	Структурні рівні деградації матеріалу		
	мікро-	мезо-	макро-
Кут орієнтації поверхневого рельєфу	+	+	+
Площа макродефекту	—	+	+
Еквівалентний діаметр макродефекту	—	+	+
Кут розкриття вершини тріщини	—	—	+

Використання сукупності пропонованих підходів оптично-цифрового контролю, для реєстрації пошкодженості поверхні, має низку переваг. Вони дозволяють отримувати інформацію, представлену у вигляді розподілу деформаційних зсувів, проводити експеримент безконтактно із мінімальною підготовкою поверхні, а також підвищити достовірність оцінювання стану матеріалу.

Апробований у даній роботі підхід є перспективним для аналізу пошкодженості у околі колоподібних концентраторів напружень в конструктивних елементах. Розвинуто відомі оптично-цифрові діагностичні підходи аналізу розпорошених та локалізованих пошкоджень, які можуть бути використані як додаткові параметри оцінювання технічного стану системи. У поєднанні із параметрами нелінійної механіки руйнування вони дозволяють оцінити тріщиностійкість, залишкову довговічність матеріалів, поглибити фрактодіагностування.

5.3. Інженерний підхід до оцінювання динамічної тріщиностійкості труби магістрального газопроводу

Розглянемо схему руйнування ділянки магістрального газопроводу, рис.

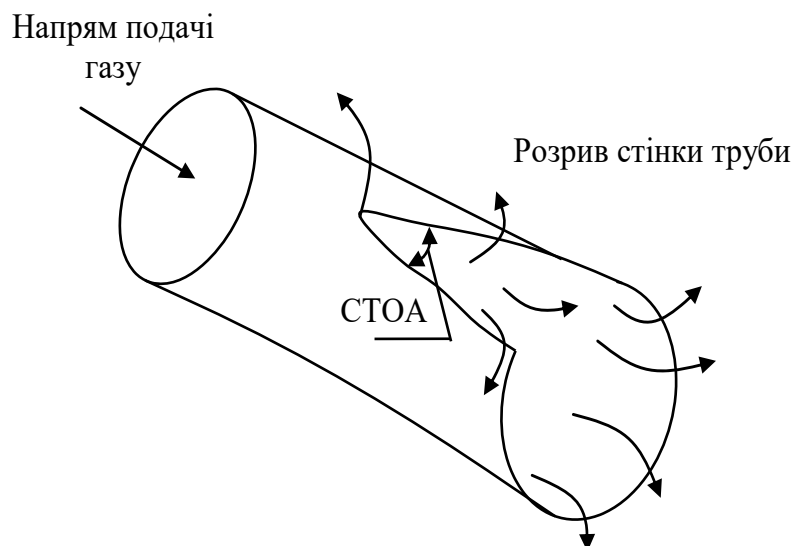


Рис. 5.8. Схема руйнування ділянки магістрального газопроводу [146]

Відомо, що тріщиностійкість труби можна розглядати як сукупність енерговитрат на зародження та поширення тріщини.

$$E = E_z + E_p,$$

де E_z , E_p - енергія зародження та енергія поширення дефекту;

Відома залежність [46]:

$$\frac{E}{A} = R_c + S_c L$$

де A - площа руйнування; R_c - енергія утворення нових поверхонь;

У роботі [46] одержано закономірність для сталі Х65, яку було використано для наближеного обчислення сталі 17Г1С, оскільки це сталі – аналоги, рис. 5.9.

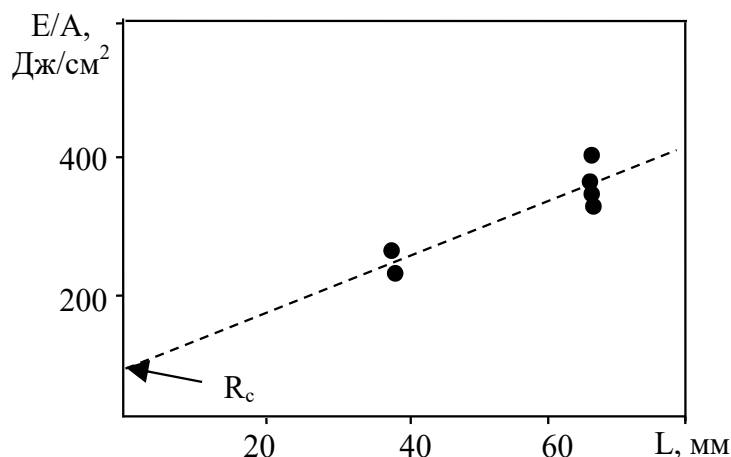


Рис. 5.9. Енерговитрати на руйнування сталі X65 [46]

При обчисленнях, враховували співвідношення між ударними в'язкостями руйнування вихідних та експлуатованих зразків. Значення $R_c = 150 \text{ Дж/см}^2$, як для нового так і для експлуатованого матеріалів.

Критичне значення (СТОА) обчислено за рівнянням [46]:

$$(СТОА)_c = \frac{180}{\pi} 2571 \frac{S_c}{\sigma_{od}},$$

де S_c - енергія пластичного деформування матеріалу вздовж поверхні руйнування;

σ_{od} - параметр стійкості матеріалу до динамічного впливу;

$$\sigma_{od} = 0,65(\sigma_{0,2} + \sigma_B),$$

Результати обчислень параметрів тріщиностійкості

Стан труби	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	S_c (Дж/мм)	СТОАс, °
Нова	430	580	37000	11
Експлуатована	460	720	23000	6

Таким чином параметр тріщиностійкості СТОА може бути використаний для оцінювання стану матеріалу як у вихідному так і в експлуатованому стані, оскільки є достатньо чутливим до деградаційних змін у матеріалі.

Висновки

Запропоновано підхід багатопараметрового оптико-цифрового діагностування дефектності матеріалів, сформульовано низку вимог щодо його інформативності й кількісного опису. Визначено і фізично обґрунтовано способи вибіркового оптико-цифрового аналізу дефектності матеріалів, зокрема за одночасного вимірювання кількох інформативних параметрів діагностування. Це дозволило аналізувати стан матеріалу на різних структурно-масштабних рівнях.

Розроблені на цій основі підходи та алгоритмічне забезпечення неруйнівного контролю характеризується підвищеною чутливістю до зародження пошкоджень. Зокрема, створено підхід оптико-цифрового контролю дефектності матеріалу, оснований на математично коректному врахуванні взаємодії поля деформацій із штучними сенсорними мітками.

Описано методи експериментального визначення характеристик циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів за кутом розкриття вершини тріщини, побудовано відповідну експериментальну залежність.

На основі проведених досліджень запропоновано фізичну модель структурних рівнів деформування матеріалу і руйнування сталі 17Г1С на мікро-, мезо- і макрорівнях у вихідному стані і після термоциклічного напруження, для різних ділянок повної діаграми деформування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації запропоновано теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі, що полягає в оцінюванні закономірностей пошкоджуваності, деформування і руйнування сталі 17Г1С у вихідному та деградованому у експлуатаційних умовах станах та оцінюванню тримкості магістральних газопроводів із тріщиноподібними дефектами.

1. Розроблено та вдосконалено методики автоматизованого дослідження процесів деформування та оцінювання розпорошеної пошкодженості теплостійких сталей, що дозволило підвищити достовірність одержаних експериментальних результатів та оцінити пошкодженість матеріалу на мікро-, мезо-, і макрорівнях.

2. Поглиблено вивчено поверхню магістрального газопроводу, експлуатаційно пошкоджену множинними корозійними пітингами, що дозволило уточнити геометрію відокремлених та об'єднаних корозійних ямок, гістограми їх розподілу. Виявлення цих закономірностей дозволило обґрунтувати межі застосування автоматизованого методу аналізу цифрового зображення для кородованої поверхні магістрального газопроводу.

3. Розроблено метод оцінювання пошкоджуваності поверхні, який ґрунтується на оптико-цифровому аналізі локальних ділянок матеріалу в околі вершини втомної тріщини та метод оцінювання впливу пластичної деформації на локалізовані дефекти матеріалу, що дозволяють оцінити поточне пошкодження матеріалу під час циклічного деформування розтягом.

4. Виявлено основні закономірності впливу тривалого напруження на деформування і руйнування сталі 17Г1С за методом повних діаграм. Напруження збільшує умовну межу плинності і відношення $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ сталі 17Г1С, збільшує відносне видовження, в основному за рахунок збільшення складової рівномірної деформації, порівняно із вихідним станом.

5. Обґрунтовано характеристики механічних властивостей, найбільш чутливі до експлуатаційної деградації матеріалу в умовах тривалого

напрацювання, що супроводжується інтенсивною пошкодженістю. Протилежний характер зміни відносного видовження і відносного звуження, що свідчить про інтенсивну розпорошену пошкодженість експлуатованого металу. Зниження відносного звуження вказує на експлуатаційне окрихчення металу, в тому числі внаслідок деформаційного зміцнення, показником якого може слугувати збільшення твердості і мікротвердості. В той же час підвищення відносного видовження пов'язане з розкриттям множинних дефектів, тобто не відображає здатності металу до пластичного деформування.

6. Запропоновано та обґрунтовано можливість використання деформаційного (СТОА) підходів до оцінювання циклічної та динамічної тріщиностійкості матеріалів експлуатованих магістральних газопроводів, які дозволяють врахувати вплив пошкодження на параметри механіки руйнування. Метод за відповідного забезпечення портативними оптико-цифровими засобами має перспективи використання на експлуатованих об'єктах в польових умовах для діагностування стану труби з наявними втомними тріщинами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Фридман Я.Б.* Механические свойства. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман. - М.: Машиностроение, ч. I, 1974. - 472 с.
2. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность / Я.Б. Фридман -М.: Изд-во Машиностроение. 1974. ч. II. - 368 с.
3. *Bonora N.* A Nonlinear cdm model for ductile failure / N. Bonora // Engineering Fracture Mechanics. – 1997. - Vol. 58, No. ½. – P. 11-28.
4. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. М.: Наука, 1974. - 312 с.
5. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. М.: Наука, 1979. - 744 с.
6. Макклиток Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклиток, А. Аргон . М.: Мир, 1970. - 443 с.
7. Шестериков С.А. Избранные труды / С.А. Шестериков. М.: Изд-во Московского университета, 2007. - 242 с.
8. *Rice J.R.* On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields / J.R. Rice, Tracey D.M // Mech. Phys. Solids. – 1969. - Vol. 17. - P. 201-217.
9. *Rousselier G.* Ductile fracture models and their potential in local approach of fracture / G. Rousselier // Nuclear Engineering and Design. - 1987. - Vol. 105. - P. 97–111.
10. *Norris D. M.* A plastic-strain, mean-stress criterion for ductile fracture / D. M. Norris, J. E. Reaugh, B. Moran, D. F. Quiñones // J. Engng. Mat. Tech., Trans. ASME. – 1978. – Vol. 100. – P. 279-286.
11. *Lemaitre J.* Coupled elasto-plastic and damage constitutive equations / J. Lemaitre // Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering. - 1985. - Vol. 51. - P. 31-49.

12. *Lemaitre J.* Anisotropic damage law of evolution / J. Lemaitre // Eur. J. Mech. A/Solids. - 2000. - Vol. 19. - P. 187-208.
13. *Shi Z.M.* A novel damage variable to characterize evolution of microstructure with plastic deformation for ductile metal materials under tensile loading / Z.M. Shi, H.L. Ma, J.B. Li // Engineering Fracture Mechanics. - 2011. - Vol. 78. - P. 503-513.
14. W. Abuzaid. Plastic strain localization and fatigue micro-crack formation in Hastelloy X / W. Abuzaid, H. Sehitoglu, J. Lambros // Materials Science and Engineering A. - 2013. - Vol. 561. - P. 507–519.
15. N.G. Chausov. Getmanchuk Effect of the form of stressed state on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of body steel 15Kh2MFA under different conditions. Communication 1. Stagerwise process of steel KP60 failure / N.G. Chausov, A.A. Lebedev, L.V. Zaisteva, A.V. Getmanchuk // Strength of Materials, 1993, Vol. 25, Issue 3, P. 157-162.
16. Lebedev A.A. Systematic evaluation of the damage to a material during plastic deformation / A.A. Lebedev, N.G. Chausov, I.O. Boginich, S.A. Nedoseka // Strength of Materials. – 1996. - Vol. 28. - Issue 5. - P. 347-352.
17. Clift S.E. Fracture prediction in plastic deformation processes / S.E. Clift, P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G.W. Rowe // International Journal of Mechanical Sciences. – 1990. – Vol. 32(1). – P. 1-17.
18. Панин В.Е. Эффект «шахматной доски в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном твёрдом теле» / В.Е.Панин, А.В.Панин, Д.Д. Моисеенко, Т.Ф. Елсукова, О.Ю.Кузина, П.В. Максимов // Доклады академии наук. – 2006. - Т. 409. - №5. - С. 1-5.
19. Панин В.Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твёрдом теле / В.Е. Панин, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. - 2005. - Т. 8. - №5. - С. 7-15.
20. Моисеенко Д.Д. Стохастический подход к многоуровневому моделированию возмущений на границах раздела в нагруженном твёрдом

- теле / Д.Д. Моисеенко, П.В. Максимов, И.А. Соловьёв // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - №4. - С. 19-24.
21. Моисеенко Д.Д. Распределение напряжений и деформаций на интерфейсе «поверхностный слой - подложка»: моделирование на основе стохастического под хода / Д.Д. Моисеенко, П.В. Максимов. // Физическая мезомеханика. – 2005. - Т.8. - №6. - С. 89-96.
 22. Панин В.Е. Эффект «шахматной доски в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном твёрдом теле» / В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина, П.В. Максимов // Доклады Академии Наук. – 2006. – Т. 409. - №5. С. 1-5.
 23. Панин В.Е. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твёрдом теле как многоуровневой иерархически организованной системе / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин // Успехи физических наук. - 2012.- Т. 182. - № 12. - С. 1351-1357.
 24. Панин В.Е. Эффект каналирования пластических сдвигов и нелинейные волны локализованной пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин // Физ. мезомех. -2010. -Т. 13. -№ 5. -С. 7-26.
 25. Панин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физ. мезомех. - 2011. - Т. 14. - № 3. - С. 7-26.
 26. Панин В.Е. «Шахматный» мезо-эффект интерфейса в гетерогенных средах в полях внешних воздействий / В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко // Физ. мезомех. -2006. -Т. 9. -№ 6. -С. 5-15.
 27. Елсукова Т.Ф. Механизмы интенсивной пластической деформации поликристаллического алюминия на мезомасштабном уровне при циклическом нагружении / Т.Ф. Елсукова, В.Е. Панин, Ю.Ф. Попкова // Деформация и разрушение материалов. - 2010. - № 8. - С. 11-15.
 28. Панин В.Е. Елсукова Т.Ф., Попкова Ю.Ф. Каналирование локальных структурных превращений в поверхностных слоях поликристаллов при

- циклическом нагружении знакопеременным изгибом / В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова // Физическая мезомеханика. - 2010. - Т. 13. - № 4. - С. 5-14.
29. Панин В.Е. Стадийность многоуровневого развития усталостных трещин как нелинейного автоволнового процесса поворотного типа / В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова // Физическая мезомеханика. - 2010. - Т. 13. - № 6. С. 27-35.
30. Панин А.В. Нелинейные волны локализованного пластического течения в наноструктурированных поверхностных слоях твердых тел и тонких пленках / А.В. Панин // Физическая мезомеханика. - 2005. - Т. 8. - № 3. - С. 5-17.
31. Зуев Л.Б. Физика макролокализации пластического течения / Л.Б.Зуев, В.И.Данилов, С.А.Баранникова : Новосибирск: Наука, 2008. 327 с
32. Paris P.C. A rational analytic theory of fatigue / P.C. Paris, M.P. Gomez, W.E. Anderson : The Trend in Engineering. 1961. - No.13. - P. 9-14
33. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension, Eng. Fracture Mechs. - 1970. - Vol. 2. - P. - 37-45.
34. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy / M.R. Stoudt, L.E. Levine, A. Creuziger, J.B. Hubbard // Materials Science and Engineering A. - 2011. - Vol. 530. - P. 107–116.
35. Beden S.M. Review of fatigue crack propagation models for metallic components / S. M. Beden, S. Abdullah, A. K. Ariffn // European Journal of Scientific Research, 2009. - Vol 28(3). - P. 364-397.
36. P. Bate The effect of deformation on grain growth in Zener pinned systems / P. Bate // Acta Materialia. – 2001. - Vol. 49. - Issue 8. - P. 1453-1461.
37. Grain refinement in a commercial Al–Mg–Sc alloy under hot ECAP conditions / O. Sitdikov, T. Sakai, E. Avtokratova, R. Kaibyshev, Y. Kimura, K. Tsuzaki // Materials Science and Engineering A.- 2007. - Vol. 444.- Issues 1-2. - P. 18-30.

38. Paranjpe S.A. Interrelation of crack opening displacement and J-integral / S.A. Paranjpe and S.Banerjee // Engg. Fract. Mech. - 1979. - Vol. 11. - P. 43-53.
39. R.K. Pandey A comparison of critical stress intensity parameter with other nonlinear toughness parameters / R.K.Pandey // Engineering Fracture Mechanics. - 1984. -Vol. 19. - Issue 2. - P. 233–238.
40. Forman R.G. Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures / R.G.Forman, V.E Kearney, R.M.Engle // J. Bas. Engng. - 1967. - Vol. 89. - P. 459-464.
41. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. / Г.П. Черепанов: Наука. - 1974. - 640 с.
42. Хеллан К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан. – М.: Мир. - 1988. - 364 с.
43. Брок, Д. Основы механики разрушения / Д. Брок. – М.: Высшая школа. - 1980. - 368 с.
4. Troop J.F., Miller G.A., in: Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, ASTM STP 467 / J.F. Troop, G.A. Miller ASTM. - 1970. - P. 154-168
45. Banks-Sills L., Volpert Y. Application of the cyclic to fatigue crack propagation of Al 2024-T351 / L. Banks-Sills, Y. Volpert // Engineering Fracture Mechanics. - 1991. - Vol. 40. - Issue 2. - 1991. - P. 355-370.
46. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines / P. E.O'Donoghue, M.F. Kaninnen, C.P. Leung, Demofonti // Int. J. Pres. Ves. & Piping. – 1997. - Vol. 70. - P 11-25
47. Heerens J. On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using light microscopy and 5δ measurement technique / J. Heerens, M. Schodel // Eng. Frac. Mech. - 2003. - Vol. 70. - P. 417-426.
48. Review of CTOA as a measure of ductile fracture toughness / L. N. Verbit, S. Dinovitzer, A. Tyson, W. Glover, A. Collins, L. Carlson, J. Beattie: In Proceedings of The 2000 International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada. 2000. - Vol. 1. - P. 247-254. - 2000.

49. Schindler H.J. A CTOA-based approach to burst and leak-before-break Behaviour / H.J. Schindler // Int. J. Pres. Ves. & Piping. - 1996. - Vol. 69. - P. 125-134.
50. Experimental Investigation of CTOA in linepipe steels rudland / G.M. Wilkowski, Z.Feng, Y.Wang, D. Horsley and A. Golver // Eng. Frac. Mech. - Vol. 70. - P. 567-577. - 2003.
51. A review of the CTOA/CTOD fracture criterion / J.C. Newman Jr., M.A. James, U. Zerbst // Eng. Frac. Mech. - 2003.- Vol.70. - P.371-385.
52. Hashemi S.H. A new data analysis technique to examine crack tip opening angle values tested in API X65 pipe steel / S. H. Hashemi, H. Dastani and J. Sadri // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2013 – Vol. 36. – P. 614-622.
53. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин., С.В. Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любутин // Контроль. Диагностика. - 2011. - № 11 (161). - С. 56-62.
54. 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 / В.Е. Панин, С.В.Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любутин // Дефектоскопия. - 2011. - № 9. - С. 49-61.
55. Многомасштабный метод изучения деформации и разрушения нагруженных твердых тел по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / В.Е. Панин, С.В.Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любутин, В.В. Гренке, О.В. Башков, С.А. Хижняк // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2011. - Т. 77. - № 9. - С. 50-59.
56. Стадийность локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями

- различного диаметра по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любути́н, С.А. Хижняк // Дефектоскопия. - 2012. - Т. 48. - № 10. - С. 57 - 70.
57. Панин С.В. Применение поверхностей Безье и адаптации размера апертуры фильтра в задаче сглаживания векторных полей при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любути́н // Автометрия. - 2014. - Т. 50. - №1. - С.74-81.
58. С.В. Панин. Инкрементный поход определения перемещений фрагментов изображений при построении векторных полей / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любути́н // Автометрия. - 2014. - Т. 50. - №2. - С. 39-49.
59. Исследование различных критериев оценки для серии изображений, полученных методом ДДИТ / С.В. Панин, П.С. Любути́н, М.В. Бурков, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк, В.П. Кузнецов // Вычислительные технологии. - 2014. - Т. 19. - №3. - С. 103-118.
60. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико- эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О.В. Башков, С.В. Панин, П.С. Любути́н, А.В. Бяков, С. Рамасуббу / Отв. ред. Н.А. Семашко - Томск: Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета. - 2014. - 301 с.
61. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів та ін.: Під ред. В. І. Похмурського і Є. І. Крижанівського. – Львів – Івано-Франківськ: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2006. – 1193 с.
62. Рекомендации по оценке работоспособности участков газопроводов с поверхностными повреждениями / В.В. Харионовский, И.Н. Курганова, Д.И. Ремизов и др. М.: ООО ВНИИГАЗ, 1996. - 20 с.

63. Харионовский В.В. Прогноз сроков безопасной эксплуатации газопроводов / В.В. Харионовский, А.А. Гришко / Наука и техника в газовой промышленности. -2005.- № 2. С.27-32.
64. Зайнуллин Р.С. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами / Р.С. Зайнуллин, Я.М. Морозов, А.А. Александров, М.: Наука, 2005. - 316 с.
65. Зайнуллин Р.С. Повышение ресурса нефтепроводов. / Р.С. Зайнуллин А.Г. Гумеров, М.: Недра, 2000. - 494 с.
66. Ямалеев К.М. Структурный механизм старения трубных сталей при эксплуатации нефтепроводов / К.М. Ямалеев, А.В. Пауль // Нефтяное хозяйство, 1988. -№ 11.-С. 61-63.
67. Ямалеев К.М. Определение предельного состояния металла труб длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов. / К.М. Ямалеев, Р.И. Габдюшев, Р.Р. Гумеров // Тр. конференции. Уфа: ИПТЭР, 2004. - С. 185-187.
68. Гумеров А.Г. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта. / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Р.С. Гумеров / М.: Недра, 1998. - 251с.
69. Бакиев А.В. Тонкоструктурные изменения металла длительно эксплуатируемых трубопроводных систем газоснабжения. / А.В. Бакиев, В.А. Сандаков, Уфа: Гилем, 2008. - 134с.
70. Горицкий В.М. Структура и усталостное разрушение металлов. / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев, М.: Металлургия, 1980. - 207 с.
71. Лебедев А.А. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, И.О. Богинич, С.А. Недосека // Пробл. прочности. - 1995. - № 7. - С. 31–40.
72. Лебедев А.А. Модель накопления поврежденности в металлических материалах при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов, И.О. Богинич // Пробл. прочности. -1997. - № 3. - С.55–63.

73. Лебедев А.А. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов–Киев, Изд-во ИПП НАН Украины. - 2004. - 133 с.
74. Лебедев А.А. Исследование кинетики разрушение пластичных материалов на заключительной стадии деформирования /А.А. Лебедев, О.И. Марусий, Н.Г. Чаусов, Л.В. Зайцева // Проблемы прочности. - 1992. - № 1. – С. 35–42.
75. Лебедев А.А. К оценке трещиностойкости пластичных материалов / А.А. Лебедев, Н.Г. Чаусов // Проблемы прочности. – 1983. – № 2. – С. 11 – 13.
76. Structural degradation and damage caused by a system of cracks to the steel of metallurgical equipment // P.V. Yasnii, P.O. Marushchak, I.V. Konovalenko, and R.T. Bishchak // Mat. Sci. – 2009. – Vol. 45. – P. 798–803.
77. P. Maruschak Automated diagnostics of damage to an aluminum alloy under the conditions of high-cycle fatigue // P. Maruschak, I. Konovalenko, M. Karuskevich, et al. // Materiali in Tehnologije. – 2013. – Vol. 47. – P. 357–361.
78. Konovalenko I. A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters / I. Konovalenko, P. Maruschak, A. Menou, et al. // Proc. Int. Symp. Operational Research and Applications, Marrakech, Morocco, May 9–10, 2013.
79. Diagnostics of thermal fatigue cracks on continuous caster rolls surface / P. Yasniy, P. Maruschak, I. Konovalenko, and R. Bishchak // Mechanika. – 2011. - No. 17(3). – P. 251–254.
80. Сызранцев В.Н. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, Новосибирск: Наука, 2004. - 206 с.
81. Panin S.V. Multiscale method for studying deformation and failure of loaded solids from acoustic emission data, correlation of digital images and tensometry // S. V. Panin, A. V. Byakov, P. S. Lyubutin, et al. // Zavod. Lab. Diagn. Mater. – 2011. – Vol. 77. – P. 50–59.

82. Pitting corrosion of duplex and austenitic stainless steel using greyscale image analysis // D. Y. Kong, E. Cano, J. L. Polo, and J. M. Bastida // Corros. Preven. Control. 2004. – Vol. 51. - No. 1. – P. 17–22.
83. In service degradation of mechanical and corrosion-mechanical properties of transit gas pipeline steels / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk, et al // Proc. of 14th international conference «Mechanika», Kaunas, Lithuania, 2009. – P. 278–283.
84. Методика визначення областей підвищеної корозійної та біокорозійної активності як складова комплексного моніторингу нафтогазопроводів / Л.Я. Побережний, А.І. Станецький, М.С. Полутренко, П.О. Марущак // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. - № 13. - С. 161-166.
85. Оценка предельного состояния металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / А.В. Лыглаев, А.М. Большаков, А.Р. Иванов // Заводская лаборатория. - 2009. - №7. - С. 44-47.
86. РД 12-411-01 Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов / Г.И. Зубаилов, В.С. Волков, Ю.И. Пашков, А.Л. Шурайц и др. - М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2001. – 101 с.
87. Пышминцев И.Ю. Особенности микроструктуры и текстуры труб К65 (Х80), влияющие на способность материала трубы останавливать протяженное вязкое разрушение / И.Ю. Пышминцев, А.М. Гервасьев, А.Н. Мальцева, А.О. Струин // Наука и техника в газовой промышленности. – 2011. – №4. – С. 73-78.
88. Левин Д.М. Исследование повреждаемости трубных сталей по эффектам неупругой релаксации / Д.М. Левин, А.Н. Чуканов, Л.В. Муравлева / Вестник Тамбовского университета. – 1998. - Вып. 3. - С. 315-318.
89. Maruschak P. Fatigue and brittle fracture of carbon steel of gas and oil pipelines / P. Maruschak, L. Poberezhny, T. Pyrig // Transport. – 2013. – Vol. 28(3). - P 270-275.

90. Контроль рассеянной поврежденности стали магистрального газопровода методом магнитооптической вихретоковой интроскопии / В.Н. Бержанский, П.О. Марущак, Р.Т. Бищак и др. // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту. - 2013. - №3. - С. 272-278.
91. Побережний Л.Я. Вплив експлуатаційної деградації на несучу здатність матеріалу магістральних трубопроводів / Л.Я. Побережний, П.О. Марущак, А.І. Станецький // Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2012. - Спец. вип. № 9. - С. 642-646.
92. Ясній П.В. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів / П.В. Ясній, П.О. Марущак – Тернопіль: Вид-во «Джура», 2009. – 232 с.
93. Зміна деформівної здатності матеріалу після термоциклювання / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, А.П. Пилипенко, В.Б. Гладько // Обробка матеріалів тиском. – 2009. – №1(20). – С. 156–160.
94. Коноваленко І.В. Автоматизоване оцінювання пошкодженості поверхні магістрального газопроводу корозійними пітингами . / І.В. Коноваленко, П.О. Марущак, Р.Т. Біщак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. - №4. - С. 70-76.
95. Голованенко С.А. Микроструктурные аспекты разрушения при водородном охрупчивании газопроводных сталей / С.А. Голованенко, Т.К. Сергеева // Сталь. - 1984. - № 7. - С. 71-73.
96. Чаусов Н. Г. Особенности деформирования материалов в упругой области при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, В. Б. Березин, М. М. Бондар // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. - № 3. - С. 24-27.
97. Karuskevich M.V. Single-crystal as an indicator of fatigue damage / M.V. Karuskevich, A.I. Radchenko, E.E. Zasimchuk // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. - 1993. - 15. - № 12. - P. 1281-1283.
98. Gordon G.G. Face recognition from depth maps and surface curvature / G.G. Gordon // Proc. of SPIE conference on geometric methods in computer vision.– 1991. - San Diego, CA. - P. 234-247.

99. Игнатович С.Р. Контроль качества поверхности с использованием интерференционного профилометра / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев // Винахідник и раціоналізатор. – 2007. – №6. – С. 8–11.
100. Марущак П.О. Патент України № 45972 Спосіб оцінювання деградації матеріалу / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак / Заявлено 23.02.2009; Опубліковано 10.12.2009. - Бюл. №23.
101. Березін В.Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / В.Б. Березін, М.Г. Чаусов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2011. - № 2. - С. 15-20.
102. Панин В.Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов / В.Е. Панин // Изв. вузов. Физика. - 1995. - Т. 38. - № 11. - С. 6-25.
102. Белый А.П. Толстолистовая сталь для газопроводных труб категории прочности X80 / А.П. Белый, Ю.И. Матросов, И.В. Ганошенко и др. // Сталь. - 2004. - №3. - С.51-55.
103. Исследование влияния уровня напряжений на коррозионное растрескивание подземных трубопроводов / К.Д. Басиев, К.М. Дзиев, А.Д. Алборов, О.В. Тибилов / Коррозия: материалы, защита. - 2010. - № 3. - С. 14-16.
104. Карпаш О.М. Удосконалення засобів вимірювання глибини корозійних пошкоджень та товщини стінки металоконструкцій / О. М. Карпаш, І. В. Рибіцький // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». - №7. - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008 - Т. 2. - С. 721-723.
105. Розвиток засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики в нафтогазовій галузі / О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Н.Л. Тацакович // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2009. – № 3. - С. 35 - 41.

106. Estimation of damage to the collector of a water economizer by thermal fatigue cracks / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, Ya. D. Onyshchak, A. D. Markov, I. V. Ripei, V. P. Rusyn, and H. M. Nykyforchyn // Materials Science. - 2004. - Vol. 40. - № 1. - P. 132-138.
107. Чаусов Н.Г. Эволюция поля деформации на поверхности листовой нержавеющей стали при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов, В.Б. Березин // Вісник Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут".серія: Машинобудування. – 2011. - № 63. - С. 253-257.
108. Influence of dissipative structures formed by impulsed loads on the processes of deformation and fracture / V. Hutsaylyuk, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko, K. Volyanska // Key Engineering Materials. - 2014. - Vol. 577. - P. 573- 576.
109. Комп'ютерна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим зображенням / Б. П. Русин, В.Г. Іванюк, Г. Лау, В. М. Довгуник // Фіз.–хім. механіка матеріалів. - 2004. - № 5. - С. 77–80.
110. Характеристик тріщин за зображеннями поверхні матеріалів / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, В.В. Корній // Фіз.–хім. механіка матеріалів. - 2007. - №4. - С. 107–113.
111. Балохонов Р.Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балохонов, С.В. Панин и др. // Отв. ред. В.Е. Панин. - Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 2006. - 520 с.
112. Duda R.O. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures / R.O. Duda, P.E. Hart // Artific. Intell. Center, Comm. ACM. - 1972. - 15, No. 1, 11–15
113. Maruschak P. Effect of long-term operation on degradation of material of main gas pipelines / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, et al., // Mat. Sci. Forum, 782, 279–283 (2014).

114. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring / S.R. Ignatovich, A. Menou, M.V. Karuskevich, P.O. Maruschak // Theor. Appl. Fract. Mech. - 2013. - Vol. 65. - P. 23-27.
115. Деревягина Л.С. Самоорганизация пластических сдвигов и макрополос локализованной пластической деформации в шейке высокопрочных поликристаллов и ее роль в разрушении материалов при одноосном растяжении / Л.С. Деревягина, В.Е. Панин, А.И. Гордиенко // Физ. мезомех. - 2007. - Т.10. - №4. - С. 59-71.
116. Пышминцев И.Ю. Роль структурных составляющих в формировании свойств современных высокопрочных сталей для магистральных трубопроводов / И.Ю. Пышминцев, А.Н. Мальцева, М.А. Смирнов // Наука и техника в газовой промышленности. - 2011. - №4. - С. 46-52.
117. Шанявский А.А. Влияние лазерного воздействия на усталостное разрушение сплава 2024-T351 / А.А. Шанявский, М.А. Артамонов // Физическая мезомеханика. - 2007. - Т. 10. - № 4. - С. 87-95.
118. Шанявский А.А. Мультимодальное распределение усталостной долговечности титанового сплава ВТ9 в области долговечностей до $3 \cdot 10^8$ циклов в интервале температур 20-500 °С / А.А. Шанявский, .П. Т. Захарова, Ю.А. Потапенко // Физическая мезомеханика. - 2006. - Т. 9. - № 6. - С. 71-82. 5
119. Шанявский А.А. Предел усталости и выносливости как характеристики материала или элемента конструкции с позиций синергетики / А.А. Шанявский, М.А. Артамонов // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - № 2. - С. 25-33.
120. Ivanova V.S. Relationship of fracture relief formed in growth of a fatigue crack in aluminum alloys to the mechanism of failure / V.S. Ivanova, A.A. Shanyavskii // Strength of Materials. - 1980. - Т. 11. - № 6. - С. 558-563.
121. Shanyavskii A.A. Fracture-relief morphology of aluminum alloys during corrosion-fatigue fracture / A.A. Shanyavskii // Materials Science. - 1981. - Т. 16. - № 5. - С. 426-427.

122. Shanyavskii A.A. Curve of discrete crack growth under conditions of self-simulation / A.A. Shanyavskii // Materials Science. - 1983. - Vol. 19. - № 1. - P. 35-41.
123. Shanyavskii A.A. Role of rotational deformations in the formation of spherical particles in a fatigue fracture / A.A. Shanyavskii // Materials Science. 1986. - Vol. 21. - № 5. - P. 421-425.
124. Shanyavskii A.A. Fractographic determination of the level of equivalent stresses under conditions of self-modeling and similarity of the kinetics of fatigue cracks / A.A. Shanyavskii // Materials Science. - 1988. - Vol. 23. - № 5. - P. 497-502.
125. Caballero A. 3D meso–structural fracture analysis of concrete under uniaxial tension and compression / A. Caballero, I. Carol, C.M. Lopez. // Anales de Mecanica de la Fractura. - 2005. - Vol. 22. - P. 581–586.
126. Панин В.Е. Методология физической мезомеханики как основа построения моделей в компьютерном конструировании материалов / В.Е. Панин. // Изв. вузов. Физика. – 1995. – Т. 38. – № 11. – С. 6–25.
127. Panin V.E. Mesomechanics of multiple cracking of brittle coatings in a loaded solid / V.E. Panin, R.V.Goldstein, S.V Panin // International Journal of Fracture. - 2008. - V. 150. - P. 37-53.
128. Панин С.В. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности / С.В. Панин, В.И. Сырямкин, П.С Любутин. // Автометрия. – 2005. - Т.41. - №2. - С. 44-58.
129. Любутин П.С. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико–телевизионным методом / П.С.Любутин, С.В Панин // Вычислительные технологии. - 2006. - Т. 11. - №2. - С. 52-66.
130. Влияние импульсного ввода энергии и высокой температуры на пластификацию алюминиевого сплава Д16 / Н.Г. Чаусов, А.П. Пилипенко, В.Б. Березин, Е.М. Волянская, В.В. Ключков // Вестник Пермского

национального исследовательского политехнического университета.
Механика. - 2012. - № 4. - С. 143 - 156.

131. Универсальная машина для коррозионно-механических испытаний металла труб / В.Н. Сызранцев, Я.П. Невелев, С.Л. Голофаст, Д.М. Плотников // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2006. - № 2. - С. 39-43.
132. Сызранцев В.Н. Тарирование датчиков деформаций интегрального типа для оценки нагруженности валов и роторов // Известия высших учебных заведений / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, О.В. Богомолов // Нефть и газ. - 2006. - № 1. - С. 85-92.
133. Новоселов В.В. Мониторинг коэффициента запаса прочности трубопровода в эксплуатации / В.В. Новоселов, В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2011. - № 3. - С. 66-73.
134. Сызранцев В.Н. Оценка погрешности измерения с помощью датчиков деформаций интегрального типа крутящего момента на валах и роторах / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, О.В. Богомолов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2006. - № 3. - С. 44-49.
135. Исследование механических характеристик трубных сталей 17ГС, 17Г1С, 14ХГС после длительной эксплуатации нефтепроводов / В.Н. Сызранцев, С.Л. Голофаст, Я.П. Невелев, К.К. Лысяный // Нефтяное хозяйство. - 2008. - № 3. - С. 98-100.
136. Вероятностный подход к оценке прочностной надежности трубопроводов / В.Н. Сызранцев, В.Н. Пермяков, В.В. Новоселов, С.Л. Голофаст // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2010. - № 4. - С. 105-112.
137. Оценка вероятности безопасной эксплуатации газопровода при наличии коррозионных дефектов / В.Н. Сызранцев, Н.Н. Карнаухов, Я.П. Невелев, С.Л. Голофаст // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2011. - № 1. - С. 23-30.

138. Сызранцев В.Н. Расчет коэффициента запаса в трубопроводах с коррозионными дефектами / В.Н. Сызранцев, В.В. Новоселов, С.Л. Голофаст // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2011. - № 4. - С. 74-79.
139. Сызранцев В.Н. Приводы на основе прецессирующей передачи для запорной арматуры трубопроводов / В.Н. Сызранцев, В.В. Новоселов, С.Л. Голофаст // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2011. - № 6. - С. 89-92.
140. Голофаст С.Л. Расчет допустимых параметров коррозионных дефектов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию трубопровода / С.Л. Голофаст, В.В. Новоселов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. - 2013. - № 4. - С. 91-96.
141. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков и др. // Контроль. Диагностика. - 2011. - № 11. - С. 56-62.
142. Исследование локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного КМ с различными концентраторами напряжений по данным акусто-эмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Перспективные материалы. - 2011. - №13. - С. 129-138.
143. Стадийность деформации и разрушения при испытании на срез образцов углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Известия ВУЗов. Физика. - 2012. - Т. 55 - №5/2 - С. 228-233.
144. Стадийность локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями различного диаметра по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на

- поверхности и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Дефектоскопия. - 2012. - №10. - С. 57-70.
145. Применение датчика деформации интегрального типа при циклических испытаниях композиционного материала на основе углеродных волокон / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин и др. // Известия ВУЗов. Физика – 2013 - Т. 56 - №12/2 - С. 182-187.
146. Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines / X.B. Yang, Z. Zhuang, X.C. You, Y.R. Feng, C.Y. Huo, C.J. Zhuang // Engineering Fracture Mechanics. - 2008. - Vol. 75. - P. 5018-5028.

ДОДАТОК

Публічне
акціонерне товариство
"УКРТРАНСГАЗ"

Філія "Управління магістральних
газопроводів
"ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ"

вул.Незалежності, 48
м.Івано-Франківськ, Україна, 76018
тел.: (0342) 75-09-23
факс: (0342) 55-90-88
e-mail: p-office@utg.ua



UKRTRANS GAZ



ISO 9001:2008
ISO 14001:2004
BS OHSAS 18001:2007

Public
Joint-Stock Company
"UKRTRANS GAZ"

PRYKARPATTRANS GAZ
Main Pipeline
Division

48, Nezalezhnosity st.,
Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
tel.: +38 (0342) 75-09-24
fax.: +38 (0342) 55-90-88
e-mail: p-office@utg.ua

22.09.15р. № 353/16-02

на № _____

ДОВІДКА

Видана про те, що результати дисертаційної роботи «Оцінювання пошкодженості та деформаційних параметрів циклічної тріщиностійкості експлуатованої сталі магістрального газопроводу» аспірантки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Данилюк Ірини Михайлівни в частині пропонованих підходів оцінювання впливу розпорошеної пошкодженості на деградацію механічних властивостей ферито-перлітних сталей, використовуються при дослідженнях міцності та тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів.

Головний інженер



Степ'юк М.Д.

0012921