

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

СОРОЧАК АНДРІЙ ПЕТРОВИЧ



УДК 620.178.3:539.43

**ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ І ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ОСЕЙ
КОЛІСНИХ ПАР З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНО-
МЕХАНІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ**

Спеціальність 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ясній Петро Володимирович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, ректор,
м. Тернопіль

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Силованюк Віктор Петрович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, провідний науковий співробітник
відділу теоретичних основ механіки руйнування,
м. Львів

доктор технічних наук, професор
Чаусов Микола Георгійович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України, професор
кафедри механіки, м. Київ

Захист відбудеться « 5 » лютого 2016 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті ім. І. Пулюя за адресою: 46008, м. Тернопіль, вул. Білогірська, 50, конференцзал.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий « 28 » грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час експлуатації конструкційні елементи багатьох типів машин і механізмів працюють за циклічного навантаження, що призводить до їх втомного руйнування. Тому для них важливе значення має як оцінка довговічності на етапі проектування, так і визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з наявними пошкодженнями у вигляді втомних тріщин. Особливо актуальною дана проблема є для важливих елементів конструкцій, які є критичними з точки зору забезпечення їх надійної експлуатації, зокрема осей колісних пар залізничного транспорту.

Осі колісних пар залізничного транспорту розраховуються на довготривалий термін експлуатації. Проте відомі випадки їх руйнування, зумовлені дефектами, що з'являються під час експлуатації і є джерелом зародження та розвитку втомних тріщин.

Впливу асиметрії циклу навантаження на швидкість росту втомних тріщин і мікромеханізми руйнування присвячено багато праць, зокрема авторів F.S. Silva, C. Benz, F.F.J. Romeiro, A.H. Nagozi, В.Т. Трощенко, А.А. Шанявського, М.Г. Чаусова, В.П. Силованюка та ін.

Дослідженнями впливу експлуатаційних факторів на тріщиностійкість осей колісних пар і прогнозуванням їх залишкової довговічності займалися U. Zerbst, S. Beretta, K. Maedler, N. Gravier, M. Luke, M. Carboni, R.A. Smith, V. Gerdun, R. Hirakawa, W. Chen, I.B. Варфоломеев, О.П. Ясній, I.O. Вакуленко та ін. Ними запропоновано підходи до проектування осей колісних пар за умов багатоциклової втоми, виявлено основні фактори, що впливають на їх довговічність. Важливу роль відіграють дослідження впливу форми експлуатаційних дефектів на залишкову довговічність осей колісних пар і статистичний опис підростання втомної тріщини, врахування впливу геометрії осей на зародження та ріст втомних тріщин (РВТ), визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершині тріщини.

В працях Г.В. Левченко, О.Г. Дьоміної, О.Є. Нефедьєвої встановлено відмінності мікроструктури матеріалу осі колісної пари по товщині та проаналізовано вплив технологічних факторів на формування однорідної і дрібнозернистої мікроструктури осі, зокрема режимів обтиску заготовки на блюмінгу та температури нормалізації.

Наведені дослідження потребують подальшого продовження з метою урахування впливу експлуатаційних та технологічних факторів на циклічну тріщиностійкість і мікромеханізми поширення втомних тріщин в матеріалі осей колісних пар. Таким чином, актуальною задачею є підвищення достовірності методів оцінювання пошкоженості осей в процесі експлуатації та прогнозування їх залишкового ресурсу з урахуванням структурно-механічної неоднорідності матеріалу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, що складають основу дисертації, отримані здобувачем, як виконавцем держбюджетної теми «Методологія оцінки поширення втомних

пошкоджень у відповідальних елементах конструкцій» (№ державної реєстрації 0109U002297), яка виконувалась у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя у 2009-2011 рр. за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є виявлення основних закономірностей впливу експлуатаційних чинників (температури, асиметрії циклу навантажування) на циклічну тріщиностійкість сталі ОСЛ і уточнення методики оцінювання залишкового ресурсу осі з урахуванням структурно-механічної неоднорідності матеріалу. Для досягнення вказаної мети вирішували наступні задачі:

- вдосконалити методи стереоскопічного аналізу зламів зразків за статичного та ударного навантаження;
- виявити основні закономірності впливу асиметрії циклу навантажування на кінетику росту втомних тріщин у сталі ОСЛ;
- ґрунтуючись на енергетичних та деформаційних підходах механіки руйнування виявити основні закономірності впливу низьких температур на ударну в'язкість та статичну тріщиностійкість сталі ОСЛ;
- дослідити взаємозв'язок між мікромеханізмами руйнування сталі ОСЛ та енергетичними, деформаційними і силовими критеріями руйнування за циклічного, статичного та ударного навантаження;
- вдосконалити методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари з тріщиноподібним дефектом із урахуванням структурної неоднорідності матеріалу.

Об'єкт дослідження – циклічна тріщиностійкість матеріалу осі залізничної колісної пари – сталі ОСЛ.

Предмет дослідження – залишковий ресурс осі колісної пари з урахуванням структурної неоднорідності матеріалу.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження і розрахунки швидкості РВТ проводили на основі положень лінійної механіки руйнування деформівного твердого тіла. Експериментальні дослідження РВТ виконувалися на сервогідравлічній машині СТМ-100 з комп'ютерною системою керування та збору інформації з використанням силових та деформаційних критеріїв механіки руйнування. Для мікроструктурних та фрактографічних досліджень використано електронний мікроскоп РЕМ-106И та методи растрової електронної мікроскопії, в т. ч. псевдостереометричний аналіз зображень.

Наукова новизна одержаних результатів.

- виявлено основні закономірності впливу температур 20°C та -40°C на ударну в'язкість, енергію зародження та поширення тріщини в сталі ОСЛ з урахуванням структурно-механічної неоднорідності;
- встановлено взаємозв'язок висоти губ зрізу та ударної в'язкості матеріалу осі. Виявлено, що за кімнатної і низької температур залежність енергії

поширення тріщини від висоти губ зрізу є інваріантною до зміни фізико-механічних властивостей сталі ОСЛ по радіусу вирізання з осі;

- виконано оцінку пошкодженості приповерхневих шарів осі колісної пари;

- досліджено основні закономірності впливу градієнту фізико-механічних властивостей на циклічну тріщиностійкість сталі ОСЛ за асиметрії циклу навантажування $R = 0$ і $R = -1$;

- визначено і систематизовано мікромеханізми поширення втомної тріщини в сталі ОСЛ та взаємозв'язок ширини втомних борозенок з розмахом коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН), запропоновано фізико-механічну модель поширення втомних тріщин за досліджених асиметрій циклу навантажування;

- вдосконалено методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари з поверхневою півеліптичною тріщиною, яка враховує вплив градієнту циклічної тріщиностійкості матеріалу на кінетику підростання втомної тріщини;

- уточнено залишкову довговічність осі колісної пари з врахуванням структурної неоднорідності матеріалу, що може бути враховано при визначенні міжінспекційних періодів контролю колісних пар.

Практичне значення одержаних результатів.

Отримані результати дають змогу:

- оцінити ресурс безпечної експлуатації осей із урахуванням очікуваних дефектів та умов навантажування;

- обґрунтувати допустимий рівень пошкодженості матеріалу осей колісних пар за експлуатаційного спектру навантажень;

- обґрунтувати вибір матеріалу із заданим комплексом характеристик циклічної тріщиностійкості із урахування градієнту структури осі;

- обґрунтовувати черговість та обсяг оглядів та контролю і своєчасного виявлення дефектів;

- обґрунтовувати можливість подальшої експлуатації осі колісної пари із виявленими тріщинами.

Результати дисертаційної роботи в частині методів оцінювання впливу асиметрії циклу навантажування на довговічність осей колісних пар використовуються у відокремленому підрозділі «Локомотивне депо Тернопіль» Державного територіально-галузевого об'єднання «Львівська залізниця» при розрахунку залишкового ресурсу елементів колісних пар (акт №57 від 08.07.2015).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: оцінка пошкодженості матеріалу осей колісних пар після експлуатації [1, 4]; встановлені закономірності впливу температури на ударну в'язкість і статичну тріщиностійкість сталі ОСЛ [1, 3]; виявлені структурно-механічні рівні статичного та динамічного руйнування матеріалу осі

[2, 6]; вплив асиметрії циклу навантажування та місця вирізки зразків на мікромеханізми руйнування сталі ОСЛ та швидкість росту втомних тріщин [5, 7, 8]; оцінювання залишкового ресурсу та тріщиностійкості осей колісних пар з урахуванням структурно-механічної неоднорідності [9, 10].

Формулювання задач, аналіз і трактування одержаних результатів та можливостей їх практичного застосування проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема: 4-й Міжнародній конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (Львів, 2009), Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, 2009), 18-й Європейській конференції з механіки руйнування ECF18 (Дрезден, 2010), Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (Тернопіль, 2010), XIV-XVI наукових конференціях Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя (Тернопіль, 2010-2012).

В повному обсязі робота доповідалась і обговорювалась на розширеному тематичному семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» (Тернопіль, 2015), семінарі відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2015).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 друкованих працях, з них 3 – статті у фахових наукових журналах і збірниках [1-3], 5 – статті у закордонних виданнях, внесених до науково-метричної бази Scopus [4-8], 9 – тез та праць у збірниках наукових конференцій [9-17].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 133 сторінки, в т. ч. 50 рисунків, 17 таблиць та список використаних літературних джерел із 157 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету роботи та методи її досягнення, наукову новизну роботи, її практичне значення та апробацію результатів.

У першому розділі проаналізовано моделі росту втомних тріщин за від'ємних асиметрій циклу навантажування. Розглянуто мікромеханізми росту втомних тріщин. Проаналізовано механізми зародження та поширення втомних тріщин в осях колісних пар та методи оцінювання їх залишкового ресурсу.

На основі виконаного аналізу літературних джерел можна стверджувати, що дослідженню циклічної тріщиностійкості осей колісних пар присвячена значна кількість праць, проте в них відсутні узагальнені підходи щодо оцінки пошкодженості матеріалу на різних ієрархічних рівнях. Недостатньо дослідженим є питання впливу асиметрії циклу навантаження на кінетику росту втомної тріщини в матеріалі осі. Майже відсутні праці, у яких досліджено вплив мікроструктури матеріалу осей колісних пар на характер їх втомного руйнування. Також потребує подальшого розвитку методика оцінки залишкового ресурсу осей колісних пар з урахуванням структурно-механічної неоднорідності. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі описано методики експериментальних досліджень циклічної тріщиностійкості, ударної в'язкості та статичної тріщиностійкості матеріалу осі колісної пари, а також фрактографічних та мікроструктурних досліджень методами растрової електронної мікроскопії, в тому числі з використанням стереоскопічного аналізу.

Циклічну тріщиностійкість матеріалу осей колісних пар – сталі ОСЛ – визначали на призматичних зразках з центральним концентратором розмірами 155x25x5 мм. Зразки вирізали із осі колісної пари на підматочній ділянці діаметром 194 мм в повздовжньому напрямі на відстані 20, 50 і 81 мм від її центру (рис. 1).

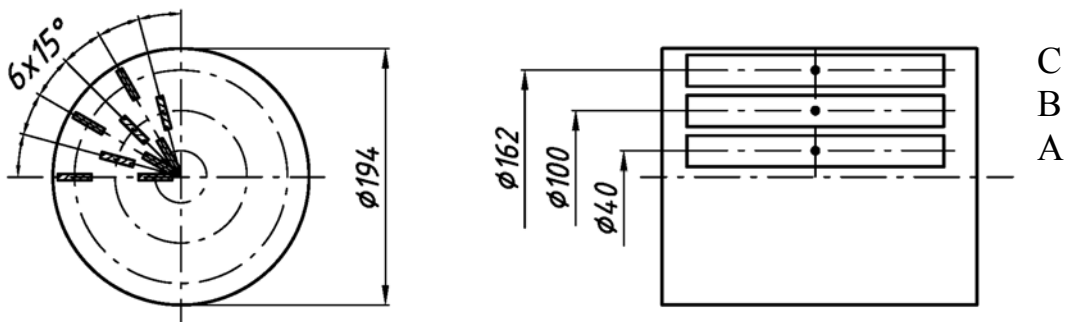


Рис. 1. Схеми вирізання зразків з центральним отвором з осі колісної пари на різних відстанях від її центру

Дослідження проводили за одновісного розтягу з коефіцієнтом асиметрії циклу навантаження $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ та $R = 0$ (тут σ_{\min} і σ_{\max} – найменше і найбільше напруження). Частота навантаження складала $f = 10$ Гц, форма циклу – синусоїдальна. Дослідження циклічної тріщиностійкості проводили при кімнатній температурі на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100 з комп'ютерною системою керування та реєстрації інформації BISS 2370. Під час випробувань забезпечувалося керування процесом навантажування досліджуваних зразків за одним з каналів та одночасний запис за шести каналами вимірювань за допомогою спеціального програмного забезпечення BISS. Для вимірювання довжини тріщини використовували оптичну систему на базі мікроскопу типу МБС-10.

Дослідження впливу температури на ударну в'язкість визначали навантаженням зразків типу Шарпі розмірами 10x10x55 мм із V-подібним надрізом радіусом $0,25 \pm 0,025$ мм на копрі РКР-300 з енергією удару 300 кДж із реєстрацією діаграми навантаження в координатах «зусилля – час» та «зусилля – прогин зразка». Зразки вирізали з підматочної ділянки осі діаметром 194 мм на різній відстані від її центру. Проводили дві серії випробувань при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ та -40°C .

За площею під отриманими діаграмами $P(s)$ визначали складові енерговитрат на руйнування зразків на окремих етапах. При цьому загальну роботу руйнування зразків A за випроб ударом розглядали як суму роботи зародження A_i та поширення тріщини A_p :

$$A = A_i + A_p \quad (1)$$

Для оцінки взаємозв'язку параметрів зламу зразків Шарпі та енергії руйнування використовували висоту губ зсуву, запропоновану *I. Yamamoto et al., 2004*.

Статичну тріщиностійкість визначали за позацентрового розтягу призматичних зразків з тріщиною шириною 50 мм і товщиною 25 мм на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100. Фрактографічні дослідження поверхні руйнування зразків проводили на скануючому електронному мікроскопі Selmi РЕМ-106И в режимі вторинних електронів.

Доопрацьовано методику визначення висоти елементів мікрорельєфу за допомогою стереоскопічного аналізу зображень, отриманих за допомогою електронного мікроскопу. Запропоновано алгоритм псевдостереометричного аналізу зображень та відповідне програмне забезпечення. Проаналізовані фактори, що впливають на достовірність обчислення висоти мікронерівностей поверхні запропонованим методом, зокрема точність визначення кута стереоповороту, величина збільшення стереопари та ідентифікація на обох зображеннях одних і тих же точок об'єкту.

Для оцінки пошкодженості матеріалу осі колісної пари використано метод ЛМ-твердості (*А.О. Лебедев, Н.Р. Музыка, 2002*), що дозволяє отримати оцінку стану структури матеріалу на основі розкиду його механічних характеристик, зокрема мікротвердості.

В третьому розділі проаналізовано вплив експлуатаційних чинників на зародження втомних тріщин в матеріалі осей колісних пар – сталі ОСЛ.

Проведені мікроструктурні дослідження матеріалу осі на різній відстані від її центру виявили певну неоднорідність структури, що проявляється в зменшенні середнього розміру зерна зі збільшенням радіусу вирізки зразків. Структура містить дрібні зерна фериту та перліту неправильної форми. Межі зерен звивисті, часто незамкнуті. Розмір зерна має значний розкид, середнє значення залишається в межах номера зерна 7-7,5 за еталонною шкалою ГОСТ 5639-82. Слід зазначити, що для всіх досліджених ділянок середній розмір зерна залишається в межах, встановлених нормативними документами – не більше 5-го номеру. Одержані результати підтверджують дані, отримані раніше в працях *Г.В. Левченко та співавторів, 2009*.

Причиною виникнення неоднорідності є технологія виготовлення осей колісних пар залізничного транспорту. Найбільший вплив на формування мікроструктури матеріалу осей в процесі виготовлення мають особливості процесів ліквідації і фазових перетворень в сталі, а також температурно-деформаційні параметри обробки прокату. Зокрема, значна роль тут відводиться величині деформації центральної зони заготовки при обтисканні на блюмінгу. При прокаті заготовок значного діаметру величина деформації вздовж перерізу є нерівномірною, що спричиняє формування нерівномірної структури матеріалу.

Іншим чинником, що впливає на неоднорідність структури матеріалу, є режим нормалізації осі та нерівномірне остигання матеріалу вздовж перерізу. Нерівномірність структури в свою чергу призводить до деякої нерівномірності механічних властивостей матеріалу вздовж перерізу осі колісної пари.

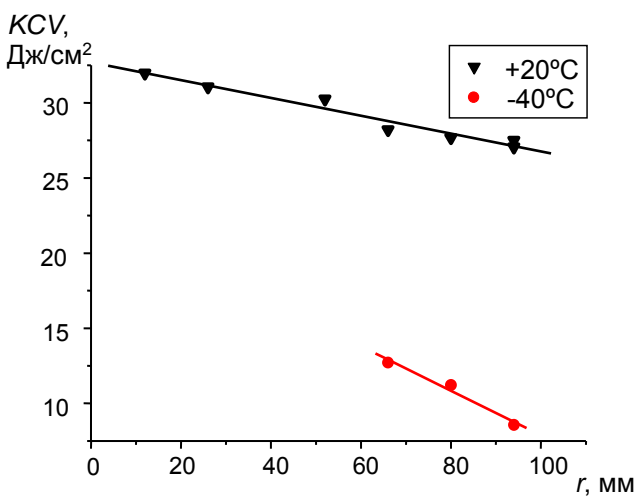


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості від температури та радіуса вирізання зразка

Встановлено лінійну залежність ударної в'язкості від радіусу вирізання (рис. 2). Виявлено, що зменшення температури випробувань з 20°C до -40°C призводить до зменшення ударної в'язкості у середньому в 3 рази та спричиняє звуження діаграм ударного руйнування і зниження частки в'язкого руйнування (рис. 3).

Висоту губ зсуву розглядали як аналог нелінійних параметрів механіки руйнування, таких як розкриття у вершині тріщини чи зона витягування, і використовувалася для додаткового оцінювання впливу низьких температур на ударну в'язкість матеріалу. Виявлено, що за температури -40°C на зразках із сталі ОСЛ майже відсутні прояви пластичного деформування і відносна площа губ зсуву у зламі є незначною (2,4%) порівняно з кімнатною температурою (12,4%).

Виявлено, що як за -40°C так і за 20°C зростання енергоємності руйнування супроводжується зростанням висоти губ зсуву (рис. 4). Максимальна висота губ зсуву становила 1,6 мм за 20°C та 0,6 мм при -40°C. Слід зазначити, що висота губ зсуву зростає із збільшенням енергоємності руйнування за обох досліджених температур, що свідчить про зв'язок ударної в'язкості із пластичністю матеріалу зразка на макрорівні. На кожному з представлених графіків помітно ділянку «насичення», коли висота губ дещо зростає, а енергоємність матеріалу залишається майже сталою. Для сталі ОСЛ ці значення досягаються при $E_{pr} = 14$ Дж (при 20°C) та $E_{pr} = 8,5$ Дж (при -40°C), рис. 4.

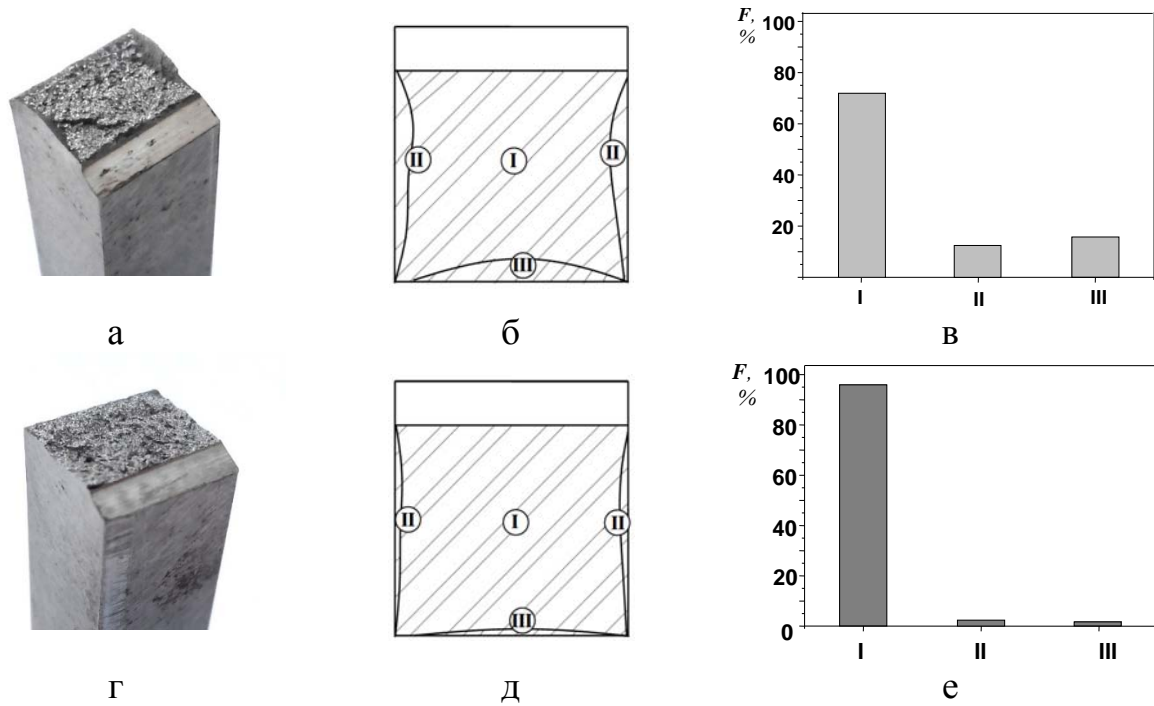


Рис. 3. Макрозлами зразків Шарпі досліджених за температур 20°C (а) та -40°C (г), схеми розташування на них зон з характерним рельєфом (б, д): I – ділянка зародження та росту тріщини; II – губи зрізу; III – долом; та гістограми їх площ (в, е)

Проаналізовано особливості динамічного деформування і руйнування сталі ОСЛ на трьох структурно-механічних рівнях: мікрорівень – накопичення дефектів вздовж меж зерен, їх взаємовплив та еволюція; мезорівень – зміщення конгломератів зерен, їх локальні зсуви за схемою «зсув+поворот» з формуванням смуг локалізованого пластичного деформування; макрорівень – інтегральні процеси в матеріалі, не пов'язані з його структурою.

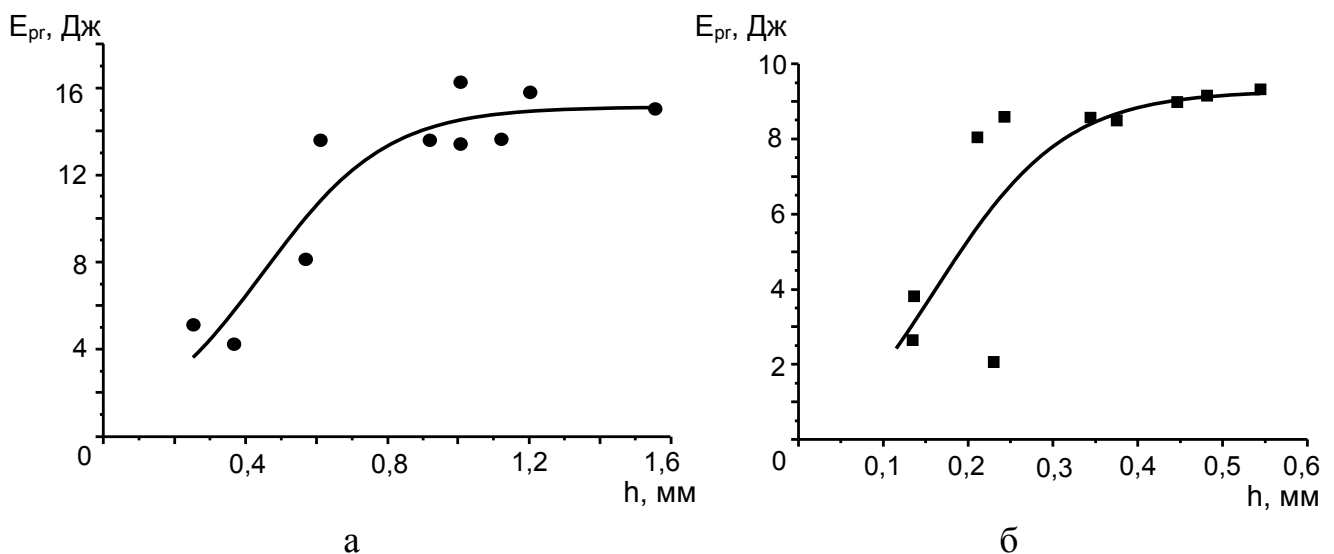


Рис. 4. Залежність висоти губ зсуву від енергоємності росту тріщини у зразку Шарпі для 20°C (а) та -40°C (б)

З аналізу фрактограм поверхнь зламів зразків за температури 20°C виявлено переважання на макро- і мікрорівнях квазікрихкого зсувного механізму руйнування. Відхилення орієнтації локальних ділянок зламу від напрямку прикладання сили під час динамічних випроб свідчить про змішаний механізм руйнування – зсувом і відривом. Зниження температури до -40°C супроводжується переходом до крихкого механізму руйнування з формуванням фасеток сколювання та струмкового візерунку. Сталь ОСЛ з ферит-перлітною структурою є міцною, проте на макрорівні мало пластичною. Тому у зразках відбувається релаксація напружень в околі вершини тріщини, яка проявляється значною локалізацією деформацій зсуву з формуванням ямок відриву на неметалевих включеннях.

Процес пластичного деформування зразків досліджених за температур 20°C та -40°C відрізнявся як за розподілом деформацій, так і за перебігом у часі. Із зростанням зовнішнього навантаження на бічній поверхні зразків (макрорівень) зароджувались смуги локалізованих деформації і поширювались у глибину зразків. При цьому на поверхні зразків присутні локальні області типові для різних стадій розвитку деформаційного процесу. Формування смуг мало імпульсний характер, зумовлений з одного боку процесом генерації дефектів у вершині надрізу, а з іншого неоднорідним напружено-деформівним станом, який виникає в результаті градієнта деформацій пружно-пластично деформованих областей. Окремі прояви цих процесів помітні на макрозламах зразка.

Пластична деформація на мезорівні пов'язана з ротаційною динамікою фрагментів матеріалу, а дисипація енергії відбувається в результаті роботи тертя на їх межах. Одним із проявів цього є формування губ зсуву. Отже, мезодеформуванню відводиться особлива роль в дисипативних процесах.

На мікрорівні старт тріщини при 20°C був в'язко-крихким, виявлено пластичну деформацію окремих зерен. Значна неоднорідність деформування структурних складових перешкоджає реалізації деформування на мікрорівні шляхом кристалографічних зсувів із в'язкою мікроямковою оторочкою. Докритичний ріст тріщини супроводжувався пластичною макродеформацією нетто-перерізу зразків. Руйнування відбувалось за механізмом змішаного (крихкого-в'язкого) руйнування.

При -40°C старт тріщини відбувся крихко, у кількох площинах, злам мав ступінчастий вигляд. При цьому перед фронтом тріщини утворились мікроструктурні концентратори напружень, а руйнування відбулося за крихким зсувним механізмом. Докритичний ріст тріщини супроводжувався крихким руйнуванням, без спотворнення поперечного перерізу зразка. Наявність фасеток сколювання, розмірами спірозмірними із розмірами зерен свідчить про домінуючий механізм крихкого руйнування. Процес руйнування відбувся за кількома площинами із розвиненою поверхнею руйнування, на якій спостерігали розорієнтовані рубці, гребені.

Досліджено статичну тріщиностійкість матеріалу осі колісної пари, обчислені значення J -інтегралу J_c і відповідного КІН K_{Jc} (табл. 1), що можуть бути використані для оцінки критичного розміру тріщини. Як і в попередньому випадку оцінювали морфологію поверхні зламу. За допомогою запропонованої

методики стереоскопічного аналізу отримано двовимірні зрізи рельєфу зони витягування сталі залізничної осі (рис. 5).

Таблиця 1

В'язкість руйнування сталі ОСЛ при статичному навантаженні

K_c^* , МПа $\sqrt{м}$	K_Q , МПа $\sqrt{м}$	φ_c , %	J_c , кДж/м ²	K_{Jc} , МПа $\sqrt{м}$	h , мм
94,2	57,4	2,58	139	87,6	0,25

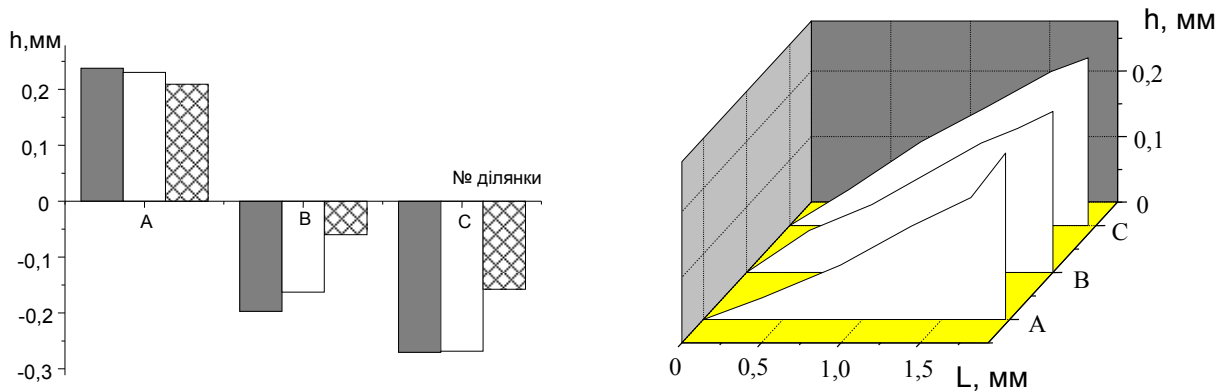


Рис. 5. Сукупність висот зони витягування для різних пар точок відносно базової точки – а; профіль зразка в зоні витягування (двовимірні зрізи) – б

З використанням методу LM-твердості виявлено, що коефіцієнт гомогенності m на відстані $h = 1$ мм до поверхні осі в 2,2 рази менший, ніж у внутрішніх шарах матеріалу. Це вказує на більшу пошкодженість матеріалу біля зовнішньої поверхні осі, що пояснюється накопиченням втомних пошкоджень в процесі експлуатації осі колісної пари.

В четвертому розділі досліджено вплив експлуатаційних чинників на кінетику росту втомних тріщин в матеріалі осей колісних пар.

Встановлено вплив місця вирізки зразків на швидкість росту втомних тріщин (рис. 6). Для зони А ($r = 20$ мм) виявлено, що за асиметрії циклу навантажування $R = -1$ швидкість росту втомної тріщини є у 2...4 рази вищою, ніж за асиметрії $R = 0$ у діапазоні значень розмаху КІН від 20 до 35 МПа $\sqrt{м}$. Для зони вирізання В ($r = 50$ мм) встановлено, що при низьких значеннях $\Delta K = 10$ МПа $\sqrt{м}$ за асиметрії циклу навантажування $R = -1$ швидкість росту тріщини є у 8 разів вищою, ніж за асиметрії $R = 0$. Проте ця відмінність поступово знижується і за $\Delta K = 30$ МПа $\sqrt{м}$ швидкості росту втомної тріщини для цих двох асиметрій є однаковими. В зоні вирізання С ($r = 81$ мм) швидкості росту втомної тріщини за $\Delta K = 10$ МПа $\sqrt{м}$ є практично однаковими, проте із зростанням значення розмаху КІН відмінність між ними зростає і вже за $\Delta K = 25$ МПа $\sqrt{м}$ швидкість росту тріщини сталі ОСЛ за асиметрії циклу навантажування $R = -1$ є у 2...3 рази вищою, ніж за асиметрії $R = 0$.

В табл. 2 наведено параметри апроксимації кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) на ділянці усталеного росту тріщини для різних ділянок вирізання зразків рівнянням Періса

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

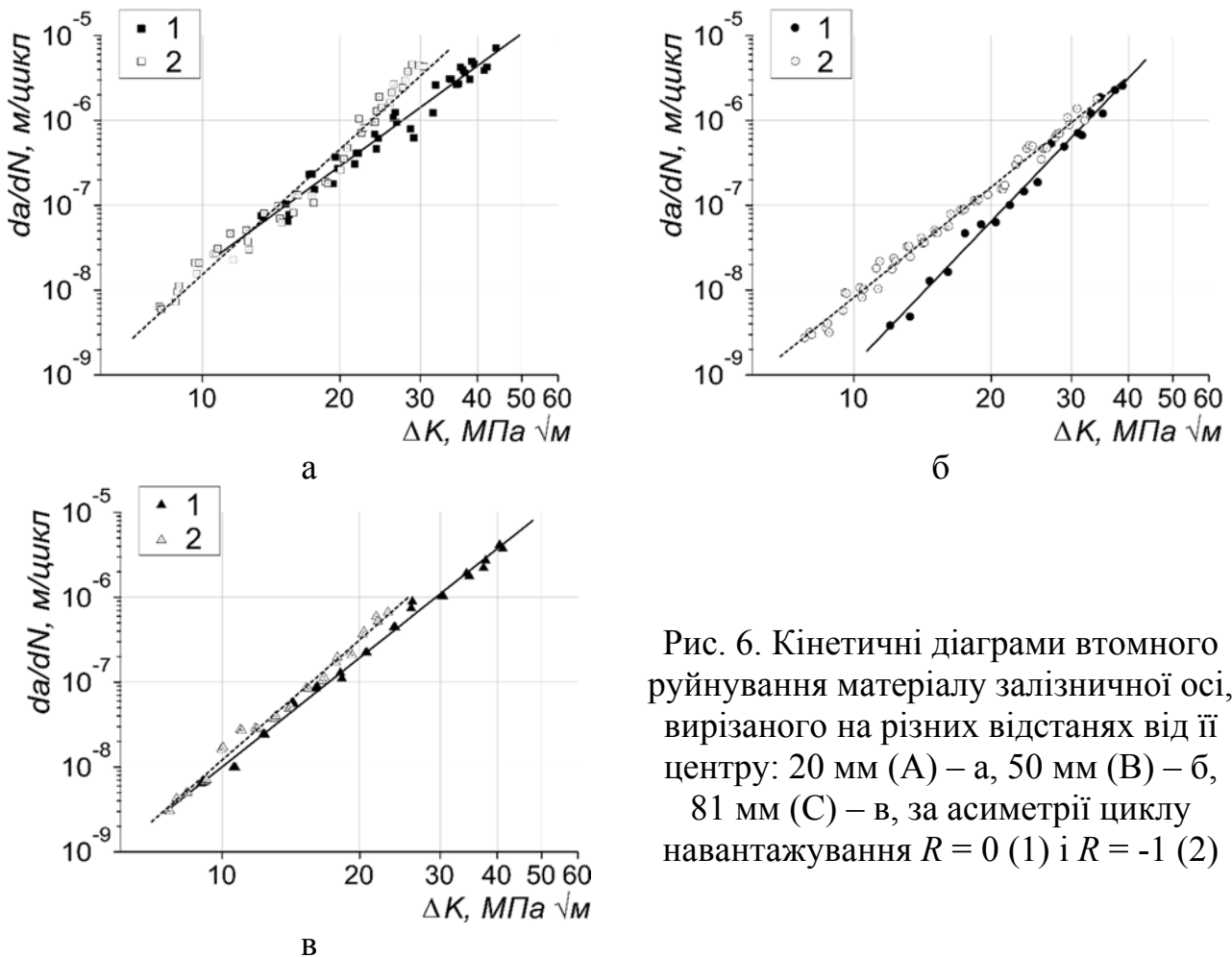


Рис. 6. Кінетичні діаграми втомного руйнування матеріалу залізничної осі, вирізаного на різних відстанях від її центру: 20 мм (А) – а, 50 мм (В) – б, 81 мм (С) – в, за асиметрії циклу навантажування $R = 0$ (1) і $R = -1$ (2)

Виявлені закономірності засвідчують неоднозначний вплив асиметрії циклу навантажування на матеріал вирізаний із різних ділянок осі. На нашу думку, це може бути пов'язано із впливом структурно-механічних особливостей сталі ОСЛ, коли циклічна тріщиностійкість складним чином залежить від розмірів та будови перлітних зерен та характеру руйнування перлітних структур.

Таблиця 2

Параметри циклічної тріщиностійкості сталі ОСЛ за лежно від радіусу вирізання зразків

R	Радіус вирізання	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^m}$	m
0	А	$2,26 \cdot 10^{-12}$	3,923
	В	$3,22 \cdot 10^{-15}$	5,615
	С	$5,34 \cdot 10^{-13}$	4,273
-1	А	$1,86 \cdot 10^{-13}$	4,911
	В	$3,87 \cdot 10^{-13}$	4,325
	С	$2,35 \cdot 10^{-13}$	4,710

Порівнянням діаграм втомного руйнування сталі ОСЛ, що отримані для різних ділянок вирізання при випробуванні за асиметрії циклу навантажування $R = 0$ (рис. 7, а), встановлено, що найбільша швидкість поширення тріщин спостерігається у внутрішньому шарі (А), найнижча – у шарі В. Різниця між ними при невеликих значеннях КІН досить значна, майже в 10 разів. Проте у зоні передруйнування швидкості поширення тріщин для всіх досліджених ділянок вирізання стають практично однаковими.

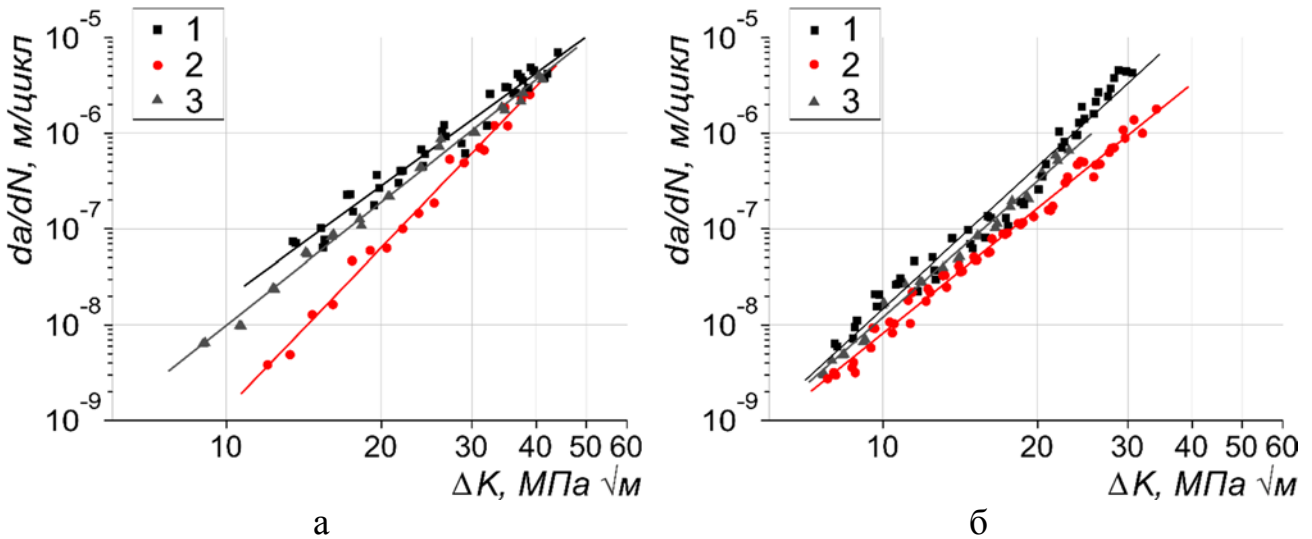


Рис. 7. КДВР матеріалу осі за асиметрії циклу навантажування $R = 0$ (а) та $R = -1$ (б), вирізаного на різних відстанях від її центру: 20 мм (А) – 1; 50 мм (В) – 2; 81 мм (С) – 3

За асиметрії навантажування $R = -1$ помітно схожу картину (рис. 7, б) – найвища швидкість поширення тріщин спостерігається у внутрішньому шарі (А), найнижча – у шарі В. Але в цьому випадку різниця між ними значно менша, всього в 1,5...2 рази при невеликих значеннях КІН.

Значна відмінність в швидкості поширення втомних тріщин на макрорівні пояснюється структурною неоднорідністю матеріалу, встановленою на мезорівні для різних ділянок вирізання зразків. За результатами фактографічних досліджень виявлено, що в зразках вирізаних із зон А та С тріщина поширювалася за втомним механізмом. Проте, у зразках вирізаних із зони В спостерігали змішаний (втома + квазісколювання) механізм поширення тріщини. Запропоновано фізико-механічну інтерпретацію морфології рельєфу на різних етапах поширення втомної тріщини (рис. 8) для зразків вирізаних з поверхні, внутрішніх та центральних шарів осі, де видно, що в одних випадках тріщина має прямолінійну поверхню, а в інших поверхня є зі значним гілкуванням і розщепленням вздовж пластинок цементиту, що і спричиняє її затримку і зниження швидкості росту.

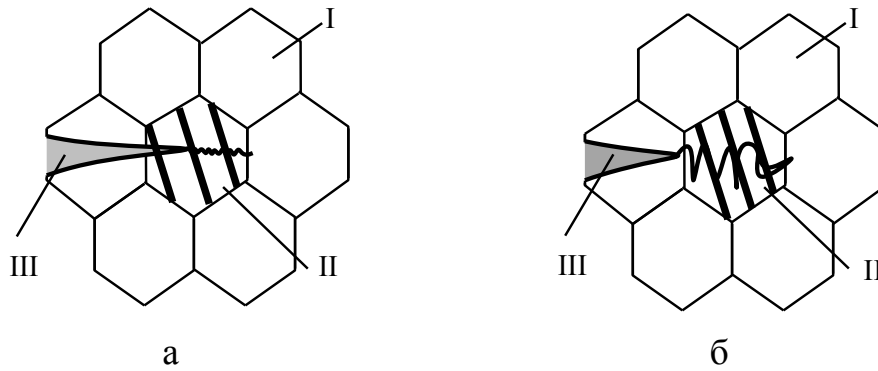


Рис. 8. Фізичні закономірності поширення тріщини у зразках А, С (а) та В (б); I – феритне зерно; II – перлітне зерно; III – тріщина

Проаналізовано та узагальнено мікрозаконності поширення втомної тріщини у сталі ОСЛ. За невеликих значень розмаху КІН поверхня руйнування зразка сформована терасами із борозенковим рельєфом, із збільшенням довжини тріщини зростає частка в'язкої (ямкової) складової. Зона передруйнування зразка має ознаки в'язкого руйнування із відривом включень від матриці матеріалу та формуванням ямкового рельєфу.

Встановлено, що мікрошвидкість росту втомної тріщини, визначена за кроком втомних борозенок, при $R = -1$ для всієї середньоамплітудної ділянки діаграми втомного руйнування є більшою, ніж мікрошвидкість при $R = 0$. Мікрошвидкості росту втомних тріщин зі збільшенням КІН в обох випадках змінюються подібним чином – спочатку зростають, а після $\Delta K = 15 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – зменшуються. На ділянці ДВР до $\Delta K = 26,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ мікрошвидкість росту тріщин є значно більшою за макрошвидкість, після цього значення макрошвидкості стає більшим за мікрошвидкість, в зламі з'являються ямки відриву, характерні для в'язкого руйнування.

Таким чином, структурна неоднорідність матеріалу осі проявляється у відмінності характеристик мікротвердості, ударної в'язкості та циклічної тріщиностійкості для різних ділянок вирізання.

У п'ятому розділі моделювали ріст поверхневої півеліптичної тріщини в осі колісної пари. Навантаження P на буксу приймали рівним 260 кН. Модуль Юнга матеріалу (сталі ОСЛ) становив $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

Запропоновано модель статичного навантаження буксового вузла вантажного вагона, що враховує схему експлуатаційного прикладення зусилля (рис. 9, а).

Залишкову довговічність оцінювали за наступних припущень:

1. Напружений стан осі колісної пари з тріщиною описували на основі підходів лінійної механіки руйнування.

2. Вважали що тріщина поширюється лише за розтягуючої фази циклу навантажування.

3. Вісь розглядали за підходами мезомеханіки як багатомасштабну механічну систему:

- макрорівень (ізотропне середовище);
- мезорівень (тришаровий циліндр, різний опір поширенню втомних тріщин на різних ділянках якого описується характеристиками циклічної тріщиностійкості, рис. 9, б);
- структурно-неоднорідне середовище (ферито-перлітна сталь).

Напружено-деформований стан і КІН з осі було оцінено у найнебезпечнішому перерізі, де тріщини з'являються найчастіше. Даний переріз знаходиться в околі галтельного переходу від циліндричної частини діаметром 130 мм.

Ріст поверхневої втомної тріщини в осі в радіальному (т. A) і коловому (т. C) напрямках визначали із системи рівнянь типу Періса:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = C(\Delta K_A)^m \\ \frac{dc}{dN} = C(\Delta K_C)^m \end{cases} \quad (3)$$

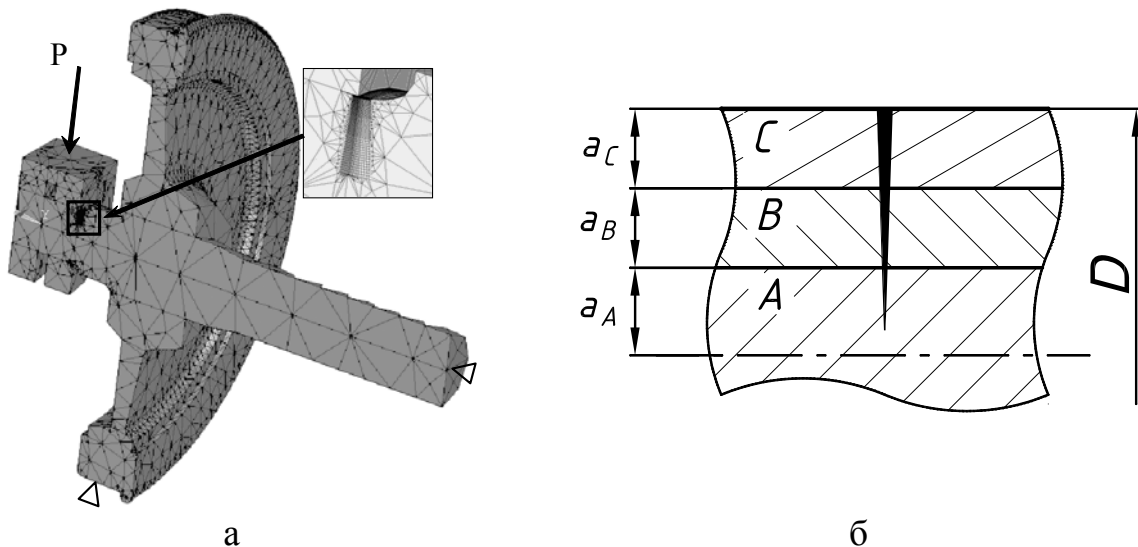


Рис. 9. Схема навантажування осі (О.П. Ясній та ін., 2013) – а; геометричні параметри перерізу з півеліптичною тріщиною – б

КІН півеліптичної тріщини в осі при моделюванні її поширення врахує зміну форми її фронту, для чого використано відомі поправкові функції (Ясній О.П., 2013).

Для моделювання росту втомної тріщини використовували параметри циклічної тріщиностійкості C та m , встановлені експериментально для трьох ділянок вирізанні зразків (див. табл. 2).

На основі запропонованої методики змодельовано підростання поверхневої втомної тріщини в осі колісної пари з урахуванням зміни співвідношення півосей еліпса та параметрів циклічної тріщиностійкості. Залишкову довговічність осі оцінювали за однієї поверхневої півеліптичної тріщини початковою глибиною $a_0 = 5$ мм. Поверхнева півеліптична тріщина

розташована в околі букси колісної пари, перпендикулярно до її повздовжньої осі.

Отримано кінцеві глибини поверхневої втомної тріщини (рис. 10). Порівнюючи результати, одержані за пропонованою методикою з урахуванням структурно-механічної неоднорідності матеріалу та в припущенні гомогенного матеріалу (N_{δ}), слід зазначити, що залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування $R = -1$ дає значення залишкової довговічності, які у 1,05 рази менші значень одержаних в припущенні гомогенного матеріалу для критичної довжини тріщини $a_{crit} = 50,8$ мм. Залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування $R = 0$ має занижені значення залишкової довговічності, які на 7% нижчі за значення одержані в припущенні гомогенного матеріалу. Дані для інших значень довжини тріщини наведено в табл. 3.

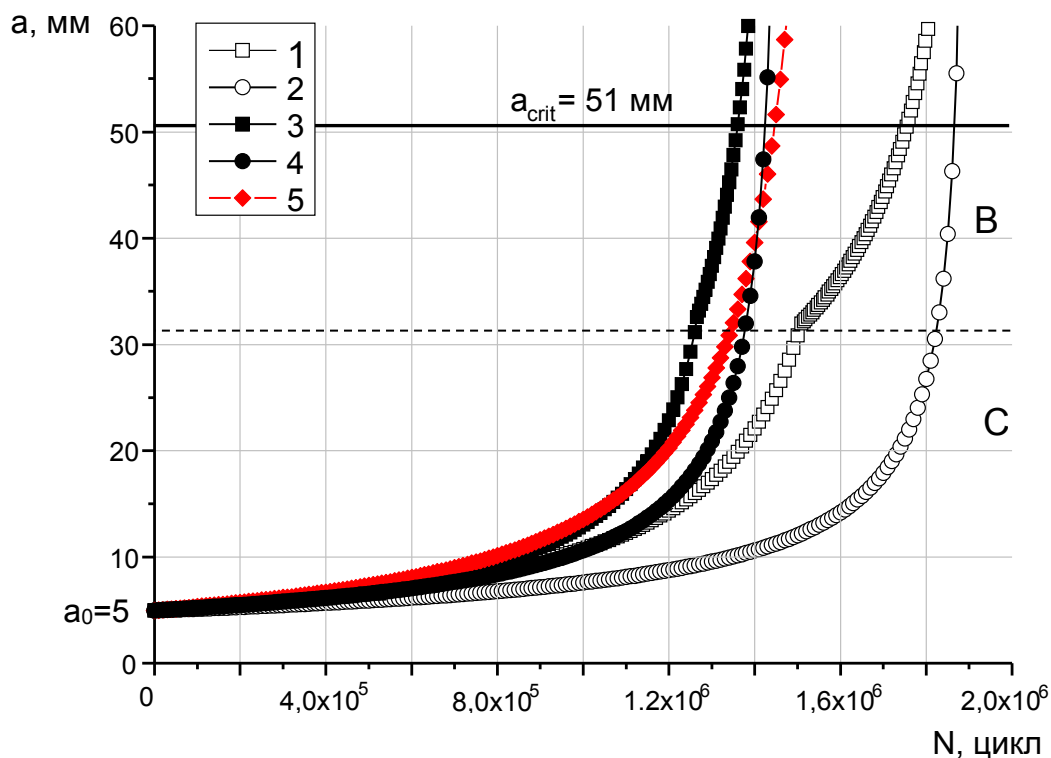


Рис. 10. Залежність глибини тріщини від кількості циклів навантаження з врахуванням структурної неоднорідності матеріалу (1, 3) та в припущенні гомогенного матеріалу (2, 4, 5 – за даними *О.П. Ясній, 2008*) при $R = 0$ (1, 2), $R = -1$ (3, 4) і блочному навантаженні (5)

Порівнюючи результати, одержані за пропонованою спрощеною методикою та результати, одержані раніше із урахуванням спектру навантажування (*О.П. Ясній, 2008*), виявлено, що залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування $R = -1$ є більшою на 10%. Таким чином, хоч дані є близькими, запропонований спосіб обчислення залишкової довговічності дає більш консервативну оцінку залишкового ресурсу осі та може бути запропонований для інженерного використання.

Довговічність осі колісної пари, визначена згідно запропонованої методики відносно базової (в припущенні гомогенного матеріалу)

R	a , мм	N/N_0
0	51	0,943
	40	0,894
	30	0,820
	20	0,786
-1	51	0,954
	40	0,936
	30	0,915
	20	0,903

Запропонована методика дає можливість визначити параметри довжини тріщини для заданої кількості циклів навантаження і значення довговічності для заданої допустимої глибини тріщини.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукової задачі, що полягає у виявленні основних закономірностей впливу експлуатаційних факторів та структурно-механічної неоднорідності на циклічну тріщиностійкість матеріалу осі залізничної колісної пари – сталі ОСЛ – і уточнені методики прогнозування залишкового ресурсу осі.

1. Розроблено методику експериментального дослідження циклічної тріщиностійкості матеріалу осей колісних пар за одновісного пульсівного і симетричного циклу навантаження та нерегулярного навантаження і обробки результатів експериментальних досліджень.

2. Виявлено основні закономірності втомного руйнування матеріалу залізничної осі – сталі ОСЛ. За асиметрії циклу навантаження $R = -1$ швидкість росту втомної тріщини є в 2...4 рази вищою, ніж за асиметрії $R = 0$ за однакових значень розмаху коефіцієнту інтенсивності напружень.

3. Досліджено та систематизовано мікромеханізми поширення втомної тріщини у сталі ОСЛ. За невеликих значень розмаху КІН поверхня руйнування зразка сформована терасами із борозенковим рельєфом, із збільшенням довжини тріщини зростає частка в'язкої (ямкової) складової. Зона передруйнування зразка має ознаки в'язкого руйнування із відривом включень від матриці матеріалу та формуванням ямкового рельєфу. Запропоновано фізико-механічну інтерпретацію морфології рельєфу на різних етапах поширення втомної тріщини для зразків вирізаних з поверхні, внутрішніх та центральних шарів осі.

4. Вдосконалено і автоматизовано метод визначення висоти мікронерівностей поверхні з допомогою псевдостереопари, що дозволяє використовувати її для визначення геометрії зони старту тріщини в'язкого

відриву. Проаналізовані фактори, що впливають на достовірність обчислення висоти мікронерівностей поверхні запропонованим методом.

5. Досліджено вплив кліматичних температур на ударну в'язкість зразків Шарпі, вирізаних з осі колісної пари на різних відстанях від її центру. Визначено стадійність динамічного деформування та руйнування зразків за температур 20°C та -40°C на мікро-, мезо- та макрорівнях. Виявлено взаємозв'язок між висотою губ зсуву та енергоємністю поширення тріщини.

6. Запропоновано методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари з півеліптичним тріщиноподібним дефектом, яка ґрунтується на підходах лінійної механіки руйнування і характеристиках циклічної тріщиностійкості матеріалу з урахуванням його структурно-механічної неоднорідності та зміні фронту тріщини.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дослідження деградації матеріалу осі колісної пари локомотива після експлуатації [Текст] / О.П. Ясній, Т. Вухерер, Ю.І. Пиндус, А.П. Сорочак, Р.Т. Біщак // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Спец. випуск. – Ч. 2. – 2011. – С. 105 – 112.

2. Фрактодіагностика множинних експлуатаційних та технологічних тріщиноподібних дефектів [Текст] // П.О. Марущак, Г.М. Данилишин, І.Б. Окіпний, А.П. Сорочак / Машинознавство. – № 3 – 4. – 2011. – С. 40 – 44.

3. Вплив температури на ударну в'язкість та динамічну тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф [Текст] / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, В. Гліха, А.П. Сорочак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Том 46, № 4. – С. 118 – 121.

4. In-service damage of railway steel axles [Text] / O. Yasniy, T. Vuherer, Y. Pyndus, A. Sorochak, I. Samardžić // Technical Gazette. – 2011. – Vol. 18, № 1. – P. 87 – 90.

5. Assessment of lifetime of railway axle [Text] / O. Yasniy, Y. Lapusta, Y. Pyndus, A. Sorochak, V. Yasniy // International Journal of Fatigue. – Vol. 50. – 2013. – P. 40 – 46.

6. Maruschak, P.O. Stereoscopic analysis of the stretch zone of a steel specimen cut out of a railway axle and tested for static fracture toughness [Text] / P.O. Maruschak, A.P. Sorochak, I.V. Konovalenko // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2015. – Vol. 15, Issue 3. – P. 436 – 440.

7. Sorochak, A. Cyclic fracture toughness of railway axle and mechanisms of its fatigue fracture [Text] / A. Sorochak, P. Maruschak, O. Prentkovskis // Transport and Telecommunication. – 2015. – Vol. 16, № 2. – P. 158 – 166.

8. Maruschak, P. Effect of load ratio on fatigue failure micromechanisms of railway axle steel [Text] / P. Maruschak, A. Sorochak, S. Panin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 209 – 215.

9. Probabilistic modelling of fatigue crack growth in railway axle [Text] / O. Yasniy, Y. Pyndus, A. Sorochak, V. Yasniy // 18th European conference on fracture «Fracture of materials and structures from micro to macro scale»: Book of abstracts (August 30 – September 3, 2010). – Dresden, 2010. – P. 373.

10. Ясній, О.П. Імовірнісна оцінка довговічності осі колісної пари електропотяга [Текст] / О.П. Ясній, Ю.І. Пиндус, А.П. Сорочак // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 433 – 438.

11. Пиндус, Ю.І. Вплив температури на ударну в'язкість матеріалу осі колісної пари локомотиву [Текст] / Ю.І. Пиндус, О.П. Ясній, А.П. Сорочак, Т. Вухерер // Праці III Міжнародної науково-технічної конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (21 – 24 вересня 2009 р., м. Тернопіль). – Тернопіль: ТНТУ, 2009. – С. 312 – 317.

12. Pyndus, Y.I. In-service damage of railway axles steel [Text] / Y.I. Pyndus, O.P. Yasniy, A.P. Sorochak // Metalurgija. – № 49 (3). – 2010. – P. 211.

13. Пиндус, Ю.І. Швидкість росту втомних тріщин в матеріалі осей колісних пар локомотивів [Текст] / Ю.І. Пиндус, А.П. Сорочак // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 13 – 14 травня 2009 р.). – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – С. 195.

14. Пиндус, Ю. Оцінка пошкоженості матеріалу осі колісної пари локомотива після експлуатації [Текст] / Ю. Пиндус, А. Сорочак, О. Ясній // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (19 – 21 травня 2010 р., Тернопіль). – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 81 – 82.

15. Сорочак, А. Дослідження мікроструктури матеріалу осей колісних пар локомотивів [Текст] / А. Сорочак, Ю. Пиндус // Збірник тез доповідей XIV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (27-28 жовтня 2010 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 56.

16. Ясній, П. Мікромеханізми росту втомних тріщин у матеріалі осей колісних пар локомотивів [Текст] / П. Ясній, Ю. Пиндус, А. Сорочак // Збірник тез доповідей XVI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – Том II. Матеріалознавство та машинобудування. – Тернопіль: ТНТУ, 2012. – С. 84.

17. Пиндус, Ю. Вплив асиметрії циклу навантаження на швидкість і мікромеханізми росту втомних тріщин у матеріалі осей колісних пар локомотивів [Текст] / Ю. Пиндус, А. Сорочак // Збірник тез доповідей II наукової конференції МТФ ТНТУ «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (24 – 25 квітня 2013 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – С. 2 – 3.

АНОТАЦІЯ

Сорочак А.П. Тріщиностійкість і залишковий ресурс осей колісних пар з урахуванням структурно-механічної неоднорідності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2015.

Дисертацію присвячено виявленню основних закономірностей впливу експлуатаційних чинників (температури, асиметрії циклу навантажування) та структурно-механічної неоднорідності на циклічну тріщиностійкість сталі ОСЛ і уточнення методики оцінювання залишкового ресурсу осі з урахуванням структурно-механічної неоднорідності матеріалу.

Встановлено взаємозв'язок між мікромеханізмами та енергетичними, деформаційними і силовими характеристиками руйнування за циклічного, статичного та ударного навантаження сталі ОСЛ.

Виявлено основні закономірності впливу градієнту фізико-механічних властивостей на циклічну тріщиностійкість сталі ОСЛ за асиметрії циклу навантажування $R=0$ і $R=-1$. Встановлено і систематизовано мікромеханізми поширення втомної тріщини в сталі ОСЛ.

Вдосконалено методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари з тріщиноподібним дефектом із урахуванням структурної неоднорідності матеріалу. Виконано моделювання росту півеліптичної втомної тріщини початковою глибиною 5 мм в припущенні градієнту параметрів циклічної тріщиностійкості.

Ключові слова: колісна пара, тріщиностійкість, структурно-механічна неоднорідність, мікромеханізми руйнування, залишковий ресурс.

АННОТАЦИЯ

Сорочак А.П. Трещиностойкость и остаточный ресурс осей колесных пар с учетом структурно-механической неоднородности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2015.

Диссертация посвящена установлению основных закономерностей влияния эксплуатационных факторов (температуры, асимметрии цикла нагружения) и структурно-механической неоднородности на циклическую трещиностойкость стали ОСЛ и уточнения методики оценки остаточного ресурса оси с учетом структурно-механической неоднородности материала.

Установлены основные закономерности влияния температур 20°C и -40°C на ударную вязкость, энергию зарождения и распространения трещины в стали ОСЛ. Установлены основные закономерности влияния высоты губ среза на ударную вязкость материала оси. Исследовано, что при комнатной и низкой температуре зависимость энергии распространения трещины от высоты губ

среза является инвариантной к изменению физико-механических свойств стали ОСЛ по радиусу вырезки с оси.

Установлена взаимосвязь между микромеханизмами и энергетическими, деформационными и силовыми характеристиками разрушения за циклического, статического и ударного нагружения стали ОСЛ.

Установлены основные закономерности влияния градиента физико-механических свойств на циклическую трещиностойкость стали ОСЛ при асимметрии цикла нагружения $R = 0$ и $R = -1$. Установлены и систематизированы микромеханизмы распространения усталостной трещины в стали ОСЛ.

Усовершенствовано методика оценки остаточной долговечности оси колесной пары с поверхностной полуэллиптической трещиной, которая учитывает влияние градиента циклической трещиностойкости материала на кинетику роста усталостной трещины. Уточнено остаточную долговечность оси колесной пары с учетом структурной неоднородности материала, что необходимо учитывать при определении межинспекционных периодов контроля колесных пар. Смоделирован рост полуэллиптической усталостной трещины начальной глубиной 5 мм при наличии градиента параметров циклической трещиностойкости.

Ключевые слова: колесная пара, трещиностойкость, структурно-механическая неоднородность, микромеханизмы разрушения, остаточный ресурс.

ABSTRACT

Sorochak A. P. Fracture toughness and residual life of wheelset axles considering structural and mechanical heterogeneity. – Manuscript.

Dissertation for Candidate of Science degree in Engineering in speciality 01.02.04 – Mechanics of deformable solids. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2015.

The thesis is devoted to revealing the basic laws of operational factors (temperature, stress ratio) and structural and mechanical heterogeneity impact on fatigue crack growth of the OSL steel and refinement of axle residual life assessment procedure considering structural and mechanical heterogeneity of material.

The interrelation between micromechanisms and energy, force and deformation parameters of failure by cyclic, static and impact loading of the OSL steel has been found.

The basic mechanisms of the mechanical properties gradient effect on fatigue crack growth of the OSL steel have been found at stress ratio $R = 0$ and $R = -1$. Summary and systematization of the micromechanisms of fatigue crack propagation in the OSL steel were made.

Procedure of residual lifetime assessment of a wheelset axle with crack defect was improved taking into account the structural heterogeneity of the material. Modelling of fatigue semi-elliptical crack growth with initial depth of 5 mm was made assuming gradient of cyclic crack resistance properties.

Keywords: wheelset axle, fracture toughness, structural and mechanical heterogeneity, fracture micromechanism, residual life.