

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

**ЛЕНКОВСЬКИЙ**

**Тарас Михайлович**



**УДК 539.4:669.1**

**МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ  
ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**ІВАНИЦЬКИЙ Ярослав Лаврентійович**,  
Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів),  
завідувач відділу міцності та довговічності конструкцій  
за складного навантаження

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**ПОПОВИЧ Василь Степанович**,  
Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я. С. Підстригача НАН України (м. Львів),  
заступник директора з наукової роботи

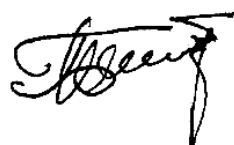
кандидат технічних наук, доцент  
**ПИНДУС Юрій Іванович**,  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя (м. Тернопіль),  
докторант кафедри будівельної механіки

Захист відбудеться “04” лютого 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Білогірська, 50.

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

Автореферат розісланий “28” грудня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



**Б. Г. ШЕЛЕСТОВСЬКИЙ**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В реальних умовах роботи більшість деталей машин та елементів металоконструкцій працюють за циклічних навантажень. Під час тривалої експлуатації в них зароджуються та поширюються втомні тріщини, що призводить до передчасного руйнування окремих елементів чи виходу з ладу конструкцій в цілому. Для прогнозування та забезпечення розрахункового ресурсу їх роботи потрібними є знання про опірність конструкційних сталей росту втомних тріщин (РВТ). Тому в науковій та інженерній практиці використовують методи механіки руйнування, які базуються на побудові кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) матеріалів та визначенні характеристик їх циклічної тріщиностійкості (ЦТ). У випадку руйнування нормальним відривом КДВР побудовані для багатьох класів конструкційних сталей, а визначені на основі цих діаграм характеристики ЦТ на сьогодні є довідниковими даними. Однак втомне руйнування деталей машин, які працюють за складного навантаження, відбувається за змішаними макромеханізмами, а у випадку контактної втоми кочення із утворенням дефектів типу відшарувань – за макромеханізмом поперечного зсуву. Тому вибір оптимальних матеріалів для забезпечення роботоздатності виробів в зазначених умовах необхідно здійснювати з урахуванням характеристик їх ЦТ, визначених за поперечного зсуву. Відомостей про такі характеристики в літературі є обмаль.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота пов'язана з науково-дослідними роботами, які проводились у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка згідно з тематичними планами Національної академії наук України, в яких дисертант був виконавцем:

- НДР 17–2.48 “Оптимізація фазово-структурного стану і характеристик циклічної тріщиностійкості колісних сталей для зниження пошкоджуваності високоміцних залізничних коліс”, № держ. реєстр. 0112U002773, 2015 р.;
- програма “Ресурс” (розділ 9.5) “Підготовка нормативного документа для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів за поперечного зсуву”, № держ. реєстр. 0113U004230, 2013–2015 рр.;
- НДР 12–3.37 “Розроблення аналітико-експериментальних методів оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій енергетичного обладнання за сумісної дії складного циклічного навантаження і водню”, № держ. реєстр. 0112U002782, 2012–2014 рр.;
- НДР 12–III–109–15 “Розроблення методів оцінювання впливу повзучості металу у водневмісному середовищі на тривалу міцність елементів енергетичного обладнання”, № держ. реєстр. 0115U000118, 2015 р.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – розробити метод оцінювання опірності конструкційних сталей РВТ за поперечного зсуву, що базується на визначенні їх характеристик ЦТ.

Для цього слід розв'язати такі задачі:

- розробити конструкцію зразка та силову схему його навантаження, що забезпечує утворення та стабільний РВТ за поперечного зсуву;
- встановити розрахункову формулу для обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_{II}$  у зразку з врахуванням тертя берегів тріщини (ТБТ);

- розробити спосіб та методику експериментального визначення коефіцієнта ТБТ за поперечного зсуву;
- побудувати КДВР конструкційної сталі після різних термообробок (ТО) та оцінити її опірність втомному руйнуванню за поперечного зсуву;
- на основі характеристик ЦТ сталі оцінити пошкоджуваність поверхні кочення модельних залізничних коліс за контактної втоми.

*Об'єкт дослідження.* Втомне руйнування сталі за умов циклічного поперечного зсуву.

*Предмет дослідження.* Опірність сталей РВТ за поперечного зсуву, характеристики ЦТ, залежності характеристик ЦТ від механічних характеристик сталей.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети використано: основні положення механіки деформівного твердого тіла, методи механіки руйнування, числові методи визначення КІН, методи оптичної та електронної мікроскопії.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- сформульовано умови стабільного РВТ за поперечного зсуву в зразку для широкого діапазону відносних довжин тріщини;
- запропоновано експериментальний спосіб визначення коефіцієнта ТБТ за поперечного зсуву;
- розроблено ефективну методику побудови КДВР сталей за поперечного зсуву та апробовано її на сталі 65Г після різних ТО;
- співставлено схематичні залежності характеристик ЦТ від характеристик міцності сталей типу 65Г за поперечного зсуву з аналогічними відомими для руйнування за нормального відриву;
- на основі аналізу власних результатів та літературних даних підтверджено гіпотезу підвищення порогів втоми за поперечного зсуву з ростом характеристик міцності сталей;
- співставлено КДВР побудовані за поперечного зсуву і нормального відриву та встановлено співвідношення характеристик ЦТ для цих макромеханізмів руйнування;
- встановлено зв'язок пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс з характеристиками ЦТ сталей.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що розроблений метод дає можливість оцінювати опірність сталі РВТ за умов поперечного зсуву за низько-, середньо- та високоамплітудних навантажень. Таким чином, знаючи характеристики ЦТ матеріалів можна проводити їх ранжування та вибір для забезпечення необхідної роботоздатності деталей машин, що працюють за специфічних умов роботи, зокрема за контактної втоми кочення. Оскільки важливою задачею є дослідження опірності залізничних коліс утворенню вищербин, то знаючи циклічну в'язкість руйнування сталей, з яких вони виготовлені, можна оцінювати опірність коліс утворенню тріщин паралельних до поверхні кочення.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати та положення дисертації автором отримані самостійно. У публікаціях [2, 3, 5–10], виконаних у співавторстві, дисертанту належить: розроблення конструкції зразка та створення його

тривимірної моделі для визначення  $K_{II}$  з використанням методу скінченних елементів (МСЕ); конструювання вузлів випробувальної установки та проведення втомних випробувань зразків; побудова КДВР сталі 65Г після різних ТО; апробація способу визначення коефіцієнта ТБТ за поперечного зсуву; графічна апроксимація діаграм та визначення характеристик ЦТ; обробка, аналіз отриманих результатів та їх ілюстрація; формулювання висновків.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідались та обговорювались на: 5-ій Міжнародній конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій” (Львів, 2014); 12-ому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2015); XXII Відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України “Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи” (Львів, 2011). У повному обсязі дисертацію було представлено на наукових семінарах “Проблеми механіки крихкого руйнування” під керівництвом академіка В. В. Панасюка у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України, “Механіка взаємозв’язаних полів” під керівництвом члена-кореспондента НАН України Р. М. Кушніра в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача та “Механіка, міцність матеріалів і конструкцій” у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 11 праць, з них 5 – у наукових фахових виданнях (2 у моноавторстві), які входять у наукометричну базу даних “Scopus”, 2 патенти України на корисну модель.

*Структура та обсяг роботи.* Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, переліку літературних джерел (110 найменувань) та додатку. Загальний обсяг роботи становить 145 сторінок, в тому числі 91 рисунок та 13 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** окреслено сучасний стан проблеми оцінювання міцності матеріалів за складного навантаження; обґрунтовано актуальність вибраної теми; сформульовано мету роботи та основні задачі, які необхідно розв’язати для її досягнення; охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення; наведено дані про апробацію результатів досліджень; подано інформацію про публікації за темою дисертації та вказано основний внесок здобувача в них.

**У першому розділі** на основі літературних даних проаналізовано застосування силового підходу механіки руйнування до оцінки ЦТ матеріалів, який базується на побудові КДВР, а також відомі результати досліджень ЦТ низки конструкційних сталей.

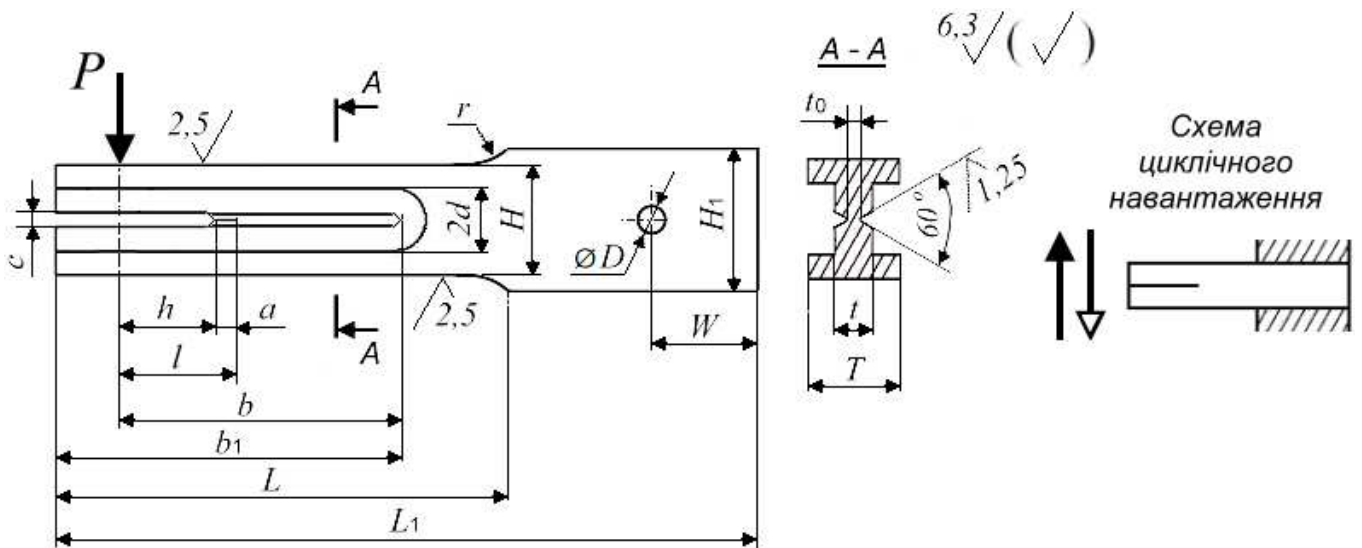
Проведено літературний огляд залежностей характеристик ЦТ від характеристик міцності сталей після різних ТО за нормального відриву, які встановлено в роботах О. Романіва, Ю. Сімонова, Х. Коями, С. Яреми, М. Георгієва, О. Осташа, В. Поповича, Ю. Пиндуса та ін. Разом з тим, проведено огляд відомих методик втомних випробувань зразків з тріщинами за умов поперечного зсуву. Основні досягнення в напрямку дослідження опірності сталей та кольорових сплавів РВТ за поперечного зсуву представлені в працях П. Болда, А. Оцуки, Ю. Мураками, К. Пінни, Я. Іваницького, М. Ванга, С. Сонга, А. Геллера, Я. Поклуди, М. Лю, Х. Матсунаги, О. Хоцяновського,

В. Доквета, Р. Бузарда та ін. Проаналізовано основні типи зразків та силові схеми їх навантаження, що пропонуються для дослідження втомного руйнування поперечним зсувом. На основі приведених КДВР визначено характеристики ЦТ деяких сталей. За аналізом морфології втомних тріщин та кореляції результатів експериментів оцінено ефективність використання окремих типів зразків, силових схем їх навантаження та методів для дослідження втомного руйнування за поперечного зсуву.

Аналіз розрахункових формул для визначення КІН  $K_{II}$  в зразках різної геометрії вказує на необхідність врахування ТБТ. Це значно зменшить розкид експериментальних даних при побудові КДВР та збільшить точність визначення характеристик ЦТ. Встановлено необхідність побудови тривимірної моделі для визначення КІН  $K_{II}$  у зразку, з достеменним відтворенням його геометрії та контакту берегів тріщини.

Другий розділ присвячено розробленню відповідних технічних засобів для реалізації експериментального моделювання стабільного РВТ та дослідження кінетики тріщини за поперечного зсуву.

На основі аналізу літературних даних та власних досліджень розроблено зразок оригінальної конструкції для дослідження ЦТ металічних матеріалів за поперечного зсуву (рис. 1).



**Рис. 1.** Зразок для дослідження ЦТ матеріалів за поперечного зсуву:

$L_1=180,0$  мм;  $H_1=32,0$  мм;  $r=20,0$  мм;  $L=110,2$  мм;  $W=27,0$  мм;  $D=6,0$  мм;  $H=27,8$  мм;  $T=9,6$  мм;  
 $b_1=87,8$  мм;  $b=72,0$  мм;  $2d=15,9$  мм;  $c=1,4$  мм;  $t=3,2$  мм;  $h=25,2$  мм;  $t_0=1,1$  мм.

Зразок у вигляді двотаврової балки має захватну і робочу частини. Остання має дві полицки, що з'єднані між собою стінкою. Посередині стінки у повздовжньому напрямку паралельно до полицок прорізано паз, який закінчується гострим надрізом, а на його продовженні виконано бокові V-подібні канавки з радіусом при вершині  $r=0,3$  мм. Потовщена частина зразка прямокутного перерізу служить для кріплення його в захоплювач установки. Конструкцію зразка захищено патентом України. Розрахунок зсувних напружень  $\tau$  в суцільному зразку проведено на основі відомої формули Журавського:

$$\tau(y) = \frac{QS(y)}{I_z b(y)}, \quad (1)$$

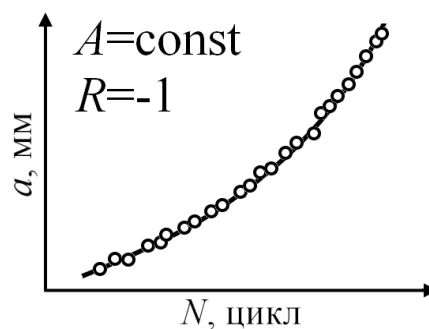
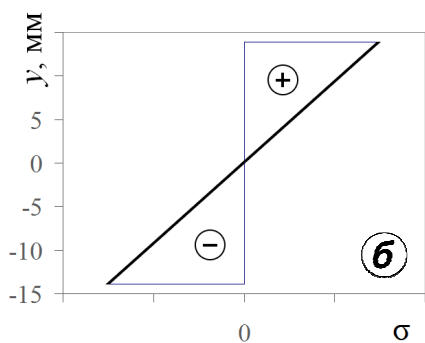
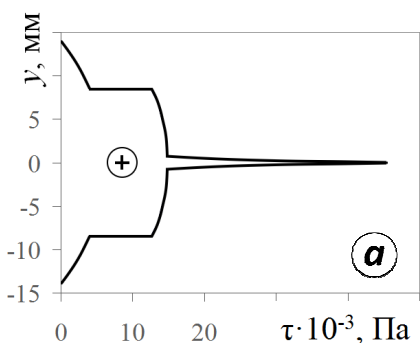
де  $Q$  – перерізуюча сила,  $S(y)$  – статичний момент відсіченої частини,  $I_z$  – момент інерції перерізу,  $b(y)$  – ширина січення,  $y$  – відстань від нейтральної лінії до площини січення балки.

Показано (рис. 2), що зсувні напруження на нейтральній лінії суцільного зразка щонайменше в 3 рази більші за напруження в його стінці і їх розподіл характеризується піком максимуму. В свою чергу схематичний розподіл розтягальних напружень  $\sigma$  показує, що такі на нейтральній лінії відсутні. Для визначення максимальних зсувних напружень  $\tau_{\max}$  запропоновано таку розрахункову формулу:

$$\tau_{\max} = 1,34 \frac{P}{t_0 \cdot H}, \quad (2)$$

де  $P$  – сила згину,  $t_0$  – товщина робочого перешийка,  $H$  – висота робочої частини зразка.

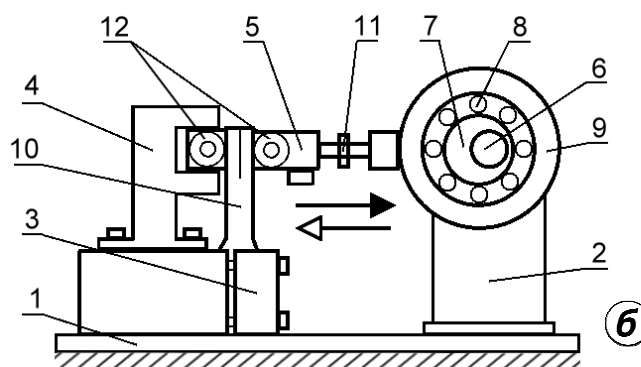
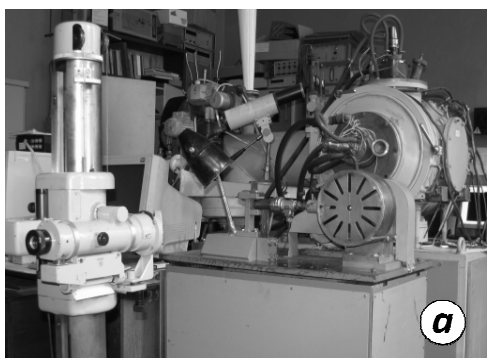
Знакозмінні зсувні напруження під час циклічного навантаження зразка з постійною амплітудою  $A$  реверсивним консольним згином за асиметрії  $R=-1$  формують на продовженні гострого надрізу зону передруйнування, а відтак, зумовлюють РВТ (рис. 3) в напрямку максимальних зсувних напружень.



**Рис. 2.** Розподіл зсувних (а) та розтягальних (б) напружень в суцільному зразку за консольного згину силою 1 Н.

**Рис. 3.** Схематична залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження зразка.

Для випробування зразків сконструйовано та виготовлено установку (рис. 4), яка забезпечує симетричний цикл навантаження зразка за синусоїдним законом частотою 12 Гц. Конструкцію установки захищено патентом України.

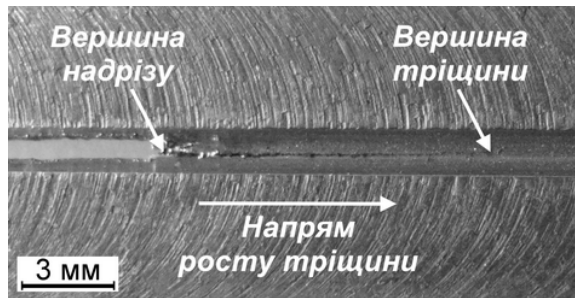


**Рис. 4.** Загальний вигляд (а) та конструктивна схема (б) установки для втомних випробувань зразків за поперечного зсуву:

1 – опорна плита, 2 – підшипникова опора, 3 – захоплювач зразка, 4 – фіксатор, 5 – динамометрична тяга, 6 – вал підшипникової опори, 7 – змінний ексцентрик, 8, 12 – підшипники, 9 – шатун, 10 – зразок, 11 – різьбова шпилька.

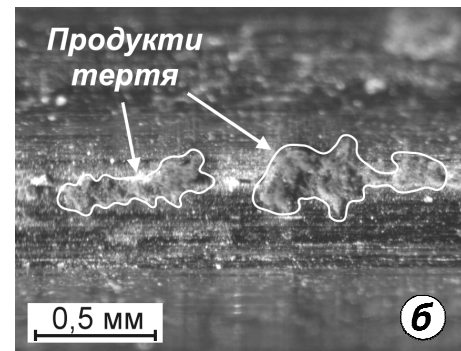
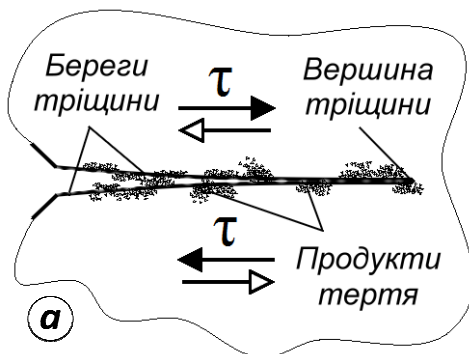


Під час втомних випробувань зразків з модельної сталі (сталь 65Г, гартування з  $820^{\circ}\text{C}$  в оливу, відпуск  $500^{\circ}\text{C}$  1 год,  $\sigma_{\text{в}}=1320\text{ МПа}$ ) досягнуто стабільного РВТ в напрямку максимальних зсувних напружень (рис. 5). Внаслідок постійного контакту берегів тріщини за зсуву відбувається їхнє взаємне зношування, а на поверхню канавок біля ділянки контакту виділяються продукти тертя (рис. 6) у вигляді дисперсного порошку. За результатами рентгенофазового аналізу цього порошку ідентифіковано оксиди заліза та виявлено невідомі (метастабільні) фази.

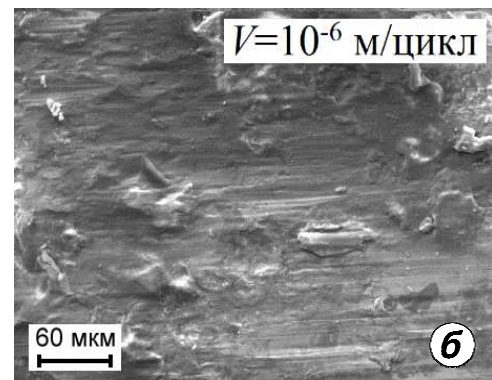
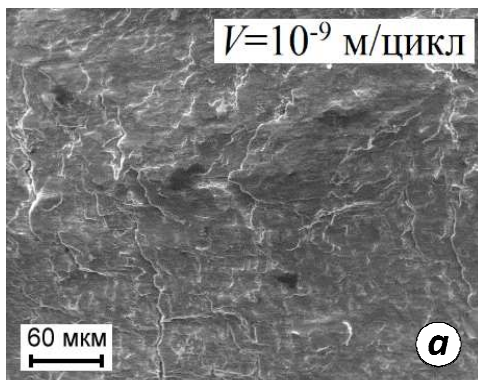


**Рис. 5.** Втомна тріщина довжиною  $a=11,5\text{ мм}$  утворена циклічним поперечним зсувом.

На основі фрактографічного аналізу зламів зразків встановлено, що втомне руйнування відбувається за рахунок зсувів матеріалу, внаслідок чого утворюються площини гладкого розшарування і так звані “язики зрізу” (рис. 7), тоді як за циклічного розтягу зразків (за нормального відриву) утворюються ямки або відкольні фасетки. За низьких швидкостей РВТ  $V$ , близьких до  $10^{-9}\text{ м/цикл}$  язики зрізу виникають доволі часто, в той час як за високих швидкостей ( $V=10^{-6}\text{ м/цикл}$ ) – рідко, натомість домінують площини гладкого розшарування.



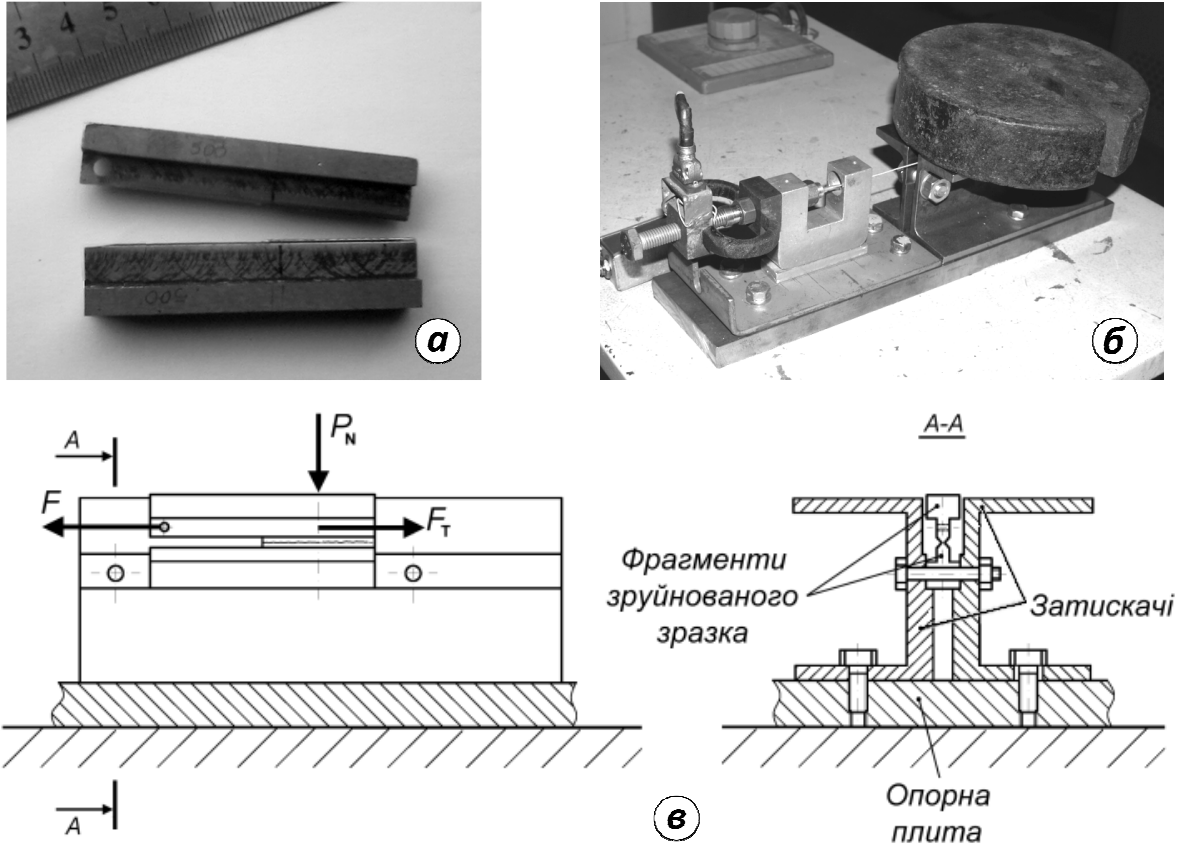
**Рис. 6.** Схема зсуву (а) та продукти тертя (б) берегів тріщини.



**Рис. 7.** Фрактографія зламів за низьких (а) та високих (б) швидкостей РВТ за поперечного зсуву.



Щоб коректно врахувати ТБТ при визначенні характеристик ЦТ матеріалів, необхідно знати коефіцієнт ТБТ  $f_c$ . Для експериментального визначення  $f_c$  із зруйнованих зразків вирізали фрагменти довжиною 70 мм кожен (рис. 8а), які містять береги втомної тріщини та випробовували їх як пару тертя за законом Кулона-Амонтона, використовуючи спеціально розроблений пристрій (рис. 8б, в).



**Рис. 8.** Фрагменти зразка (а), загальний вигляд пристрою (б) та його конструктивна схема (в) для визначення коефіцієнта ТБТ.

Встановивши зусилля зсуву  $F$  для різних сил притиску  $P_N$ , обчислювали коефіцієнт  $f_c$  за формулою:

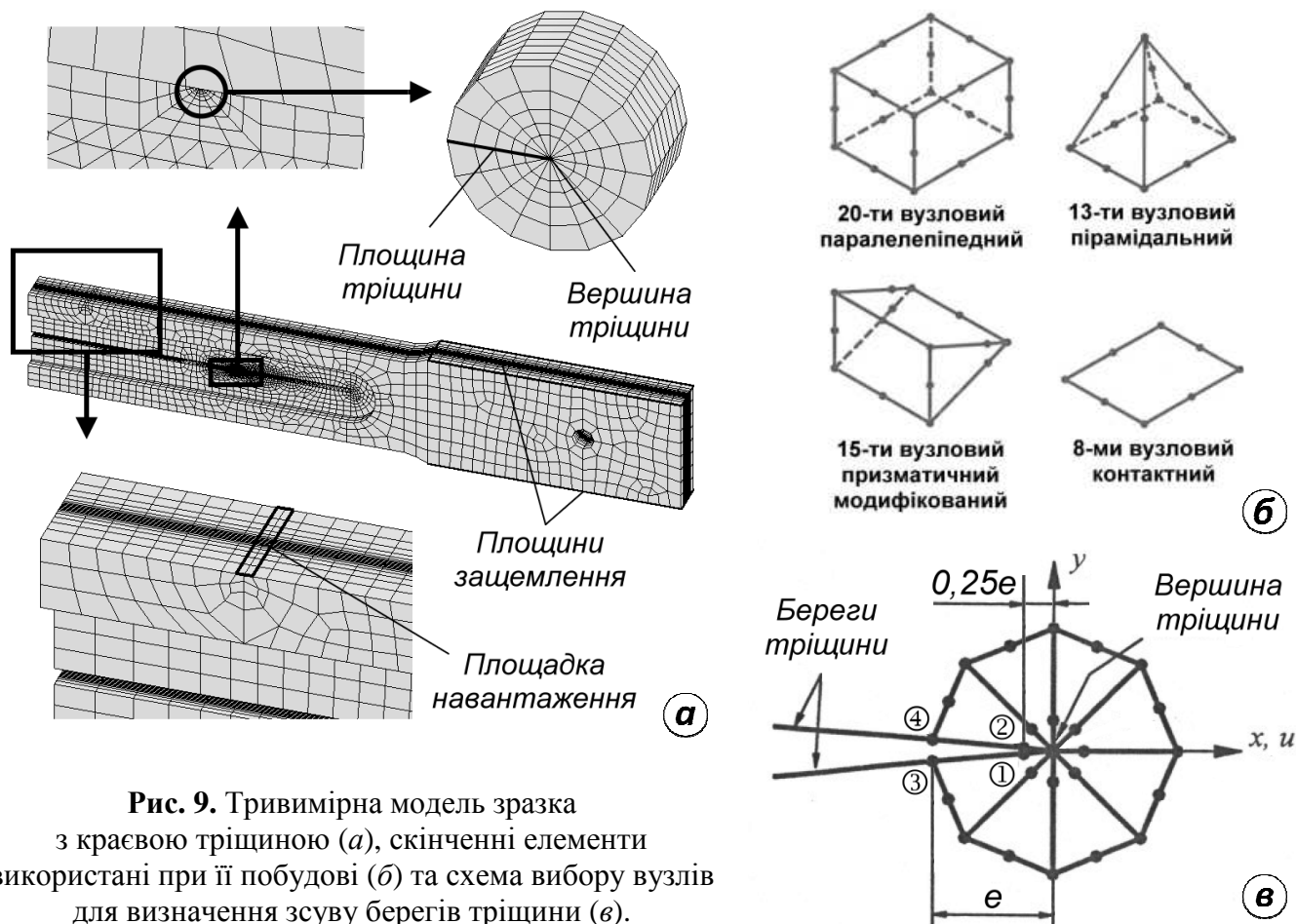
$$f_c = \frac{F}{P_N}. \quad (3)$$

Зокрема, для модельної сталі  $f_c=0,72$ , що в 3...4 рази більше за коефіцієнт тертя, визначений для гладких полірованих поверхонь за стандартними методиками.

У **третьому розділі** викладено методику визначення КІН  $K_{II}$  у запропонованому зразку з краєвою тріщиною та встановлено діапазон достовірності розрахункової формули.

З використанням МСЕ створювали тривимірну модель зразка, яка повністю відтворює його геометрію, а саме: полички, стінку, краєвий надріз, бокові канавки, перехідну камертоноподібну та захватну частини, а також контакт берегів тріщини (рис. 9а). Для цього використали 20-ти вузлові паралелепіпедні, 13-ти вузлові пірамідальні, 15-ти вузлові призматичні тривимірні елементи, а для забезпечення контакту берегів тріщини – 8-ми вузлові плоскі контактні елементи (рис. 9б). Для матеріалу моделі задавали модуль Юнга  $E=210$  ГПа та коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ .

Також виконували умову плоскої деформації, приймаючи  $\kappa=1$ . Статичне навантаження моделі здійснювали за схемою консольного згину розподіленим зусиллям в 1 Н по площадці на верхній полиці її вільного кінця при защемленій захватній частині. Після zdeформування моделі зовнішнім навантаженням знаходили переміщення вузлів (№1...4) у призматичних елементах, що прилягають до площини і фронту тріщини та характеризуються розміром  $e=12,5$  мкм (рис. 9в).



**Рис. 9.** Тривимірна модель зразка з краювою тріщиною (а), скінченні елементи використані при її побудові (б) та схема вибору вузлів для визначення зсуву берегів тріщини (в).

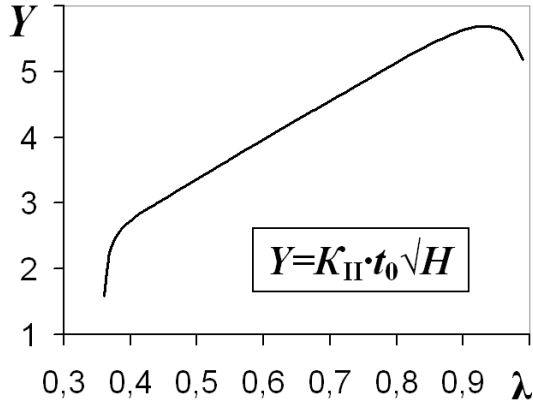
КІН  $K_{II}$  обчислювали для відносної довжини тріщини  $\lambda=l/b$  (див. рис. 1) в діапазоні від 0,36 до 0,99 за формулою:

$$K_{II} = \frac{2G}{\chi + 1} \sqrt{\frac{\pi}{2e}} [(4u_2 - u_4) - (4u_1 - u_3)]. \quad (4)$$

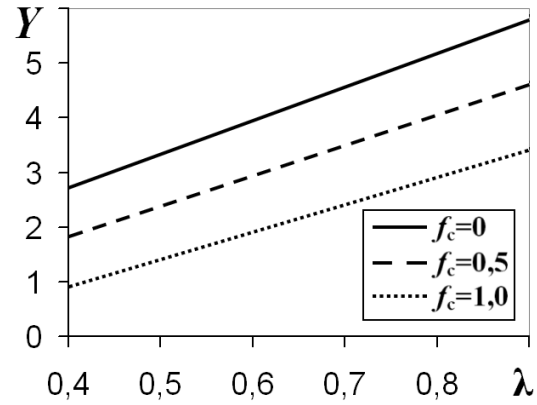
Тут  $G=E/(2(1+\mu))$ ,  $\chi=(3-\mu-4\kappa\mu^2)/(1+\mu)$ ,  $u_1...u_4$  – зсуви вузлів з відповідними номерами.

Таким чином, побудовано графічну залежність нормованого  $K_{II}$  від відносної довжини тріщини  $\lambda$ , так звану “ $K$ -тарувальну криву” (рис. 10). Аналізуючи цю криву встановлено, що для  $\lambda < 0,4$  існує суттєвий вплив надрізу на напружено-деформований стан зразка, а для  $\lambda > 0,9$  – вплив защемлення захватної частини. З цієї причини, усі наступні розрахунки проводили в діапазоні зміни  $\lambda$  від 0,4 до 0,9, в якому  $K$ -тарувальна крива близька до прямої лінії. Врахування контактної взаємодії берегів тріщини дало можливість отримати графічні залежності, які відображають вплив  $f_c$  на нормований  $K_{II}$  (рис. 11). Як видно, збільшення  $f_c$  монотонно зменшує нормований  $K_{II}$ . Для малих значень  $\lambda$  цей вплив більший ніж для великих майже у

1,5 рази.



**Рис. 10.** Залежність нормованого КІН  $K_{II}$  від відносної довжини тріщини  $\lambda$ .

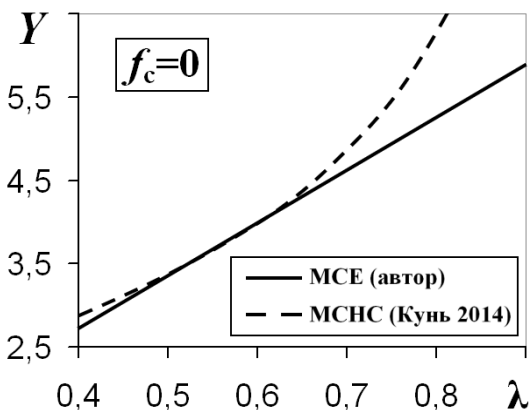


**Рис. 11.** Вплив коефіцієнта ТБТ  $f_c$  на нормований КІН  $K_{II}$ .

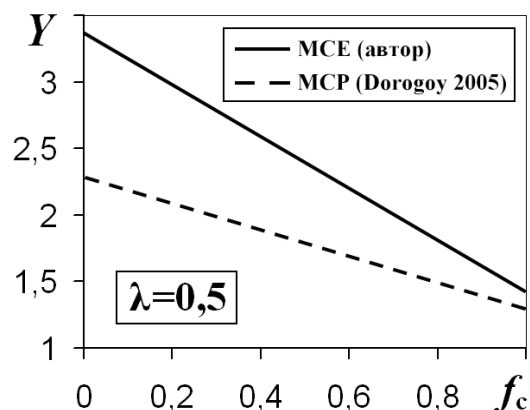
Використовуючи метод найменших квадратів отриманий масив розрахункових даних апроксимували функцією від двох змінних  $Y=f(\lambda, f_c)$  з максимальним відхиленням до 4%. На основі цього для обчислення КІН  $K_{II}$  в діапазоні  $0,4 \leq \lambda \leq 0,9$  та  $0 \leq f_c \leq 1$  записано розрахункову формулу:

$$K_{II} = \frac{P}{t_0 \sqrt{H}} [0,22 + 6,29 \lambda - f_c (1,2 \lambda + 1,34)]. \quad (5)$$

Результати співставлено з розв'язками, отриманими іншими методами. Співставлення  $K$ -тарувальної залежності (5) з розв'язком, отриманим методом суперпозицій напружених станів (МСНС), показує добру кореляцію в діапазоні  $\lambda$  від 0,4 до 0,7 (рис. 12) в якому максимальне відхилення не перевищує 5%. Залежність, яка відображає вплив  $f_c$  на нормований  $K_{II}$  співставлено з аналогічною, отриманою для стиску дискового зразка з нахилоною центральною тріщиною відносної довжини  $\lambda=0,5$  методом скінченних різниць (МСР). Як видно (рис. 13), обидві залежності мають спадний прямолінійний характер, що не суперечать закону тертя Кулона-Амонтона, коли сила тертя поверхонь залежить тільки від сили притиску та коефіцієнта тертя між ними.

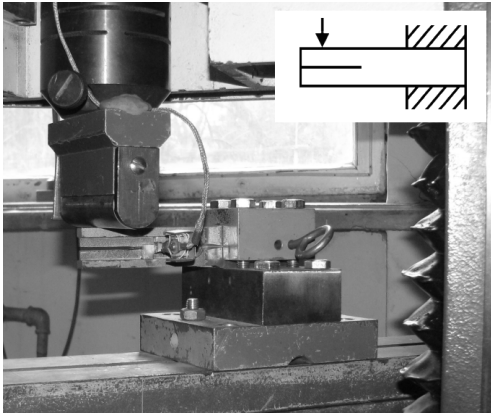


**Рис. 12.** Зіставлення розв'язків нормованого КІН  $K_{II}$  для зразка з краєвою тріщиною.

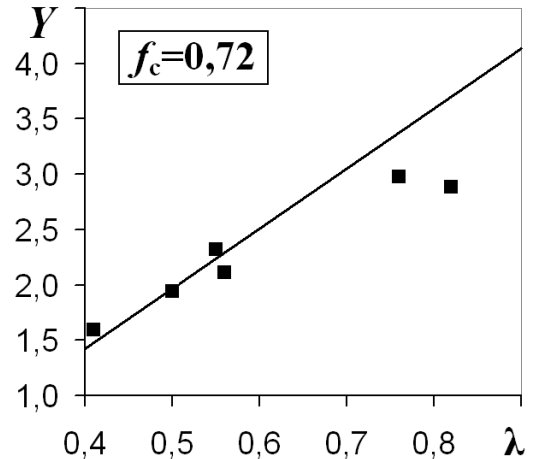


**Рис. 13.** Вплив коефіцієнта ТБТ  $f_c$  на нормований КІН  $K_{II}$  для різних типів зразків.

З метою підтвердження коректності розрахункової формули (5) проведено експериментальне  $K$ -тарування. Для цього в зразках з модельної сталі поперечним зсувом утворювали втомні тріщини різної довжини. Далі зразки руйнували статичним консольним згином (рис. 14). Встановивши руйнівне зусилля  $P_c$  обчислювали функцію  $Y$  та наносили точки поряд з розрахунковою  $K$ -тарувальною кривою, побудованою з врахуванням ТБТ (рис. 15).



**Рис 14.** Зразок з краєвою тріщиною поперечного зсуву встановлений на машині FP-100 для статичних випробувань.



**Рис. 15.** Експериментальне  $K$ -тарування формули (5) на зразках зі сталі 65Г ( $\sigma_B=1320$  МПа) з врахуванням коефіцієнта ТБТ.

Порівняння експериментальних точок з теоретичною кривою показало, що максимальне відхилення в діапазоні  $\lambda$  від 0,41 до 0,56 становить 7%, а в діапазоні  $\lambda$  від 0,56 до 0,76 – 12%. Таким чином, для розрахункової формули (5) встановлено основний та додатковий діапазони:

$$0,41 \leq \lambda \leq 0,56, \quad (6)$$

$$0,56 \leq \lambda \leq 0,76. \quad (7)$$

Також визначено умови автотрещинного поширення тріщини за поперечного зсуву, які обмежують мінімальну довжину тріщини  $l$  та довжину нетто перерізу робочої частини зразка:

$$l \geq 4(K_{II \max} / \tau_{0,3})^2, \quad b - l \geq 5,6(K_{II \max} / \tau_{0,3})^2, \quad (8)$$

де  $K_{II \max}$  – максимальній КІН циклу навантаження обчислений з врахуванням ТБТ,  $\tau_{0,3}$  – умовна границя текучості матеріалу за зрізу.

**Четвертий розділ** присвячено методичним аспектам визначення характеристик ЦТ з КДВР, побудованих за поперечного зсуву, та дослідженню ЦТ сталі 65Г після різних ТО.

Зразки для втомних випробувань зі сталі 65Г піддавали гартуванню з  $820^\circ \text{C}$  в оливу та відпуску протягом 1 год за температур 600, 500, 400 та  $300^\circ \text{C}$ . Після такої ТО отримали структури різної дисперсності. Параметри мікроструктури оцінювали металографічним методом на травлених мікрошліфах з використанням оптичного та електронного мікроскопів. Результати металографічних досліджень подано в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив ТО на параметри мікроструктури сталі 65Г

Гартув. з 820° С в оливу та відп. за темп. $t_{\text{відп.}}, ^\circ\text{C}$	Розмір карбідних колоній $d_k$	Міжкарбідна віддаль $d_0$	Дисперсність структури $D=(d_k \cdot d_0)^{-0,5}$ , мкм <sup>-1</sup>
	МКМ		
600	10...20	0,25...0,35	0,47
500	6...12	0,18...0,26	0,71
400	4...8	0,11...0,17	1,09
300	2...5	0,03...0,09	2,18

Як видно, з пониженням температури відпуску розмір карбідних колоній та міжкарбідна віддаль в мікроструктурі зменшуються, дисперсність – зростає. Механічні характеристики сталі за розтягу та зрізу визначали на десятикратних циліндричних зразках діаметром 5 мм згідно із стандартами ГОСТ 1497-84 та ОСТ 1.90148-74. Зі збільшенням дисперсності структури характеристики міцності як за розтягу ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ), так і за зрізу ( $\tau_{0,3}$ ,  $\tau_B$ ) зростають, характеристики пластичності – спадають (табл. 2).

Таблиця 2. Механічні властивості сталі 65Г різної мікроструктури

Дисперсність структури $D$ , мкм <sup>-1</sup>	Механічні властивості				
	Характеристики міцності		Характеристики пластичності		Твердість $HRC$
	$\sigma_{0,2} / \tau_{0,3}$	$\sigma_B / \tau_B$	$\delta_{10}$	$\psi$	
	МПа		%		
0,47	910 / 490	1050 / 690	14	48	32
0,71	1160 / 650	1320 / 860	10	34	39
1,09	1530 / 780	1680 / 990	8	28	44
2,18	1810 / 950	2120 / 1170	6	27	54

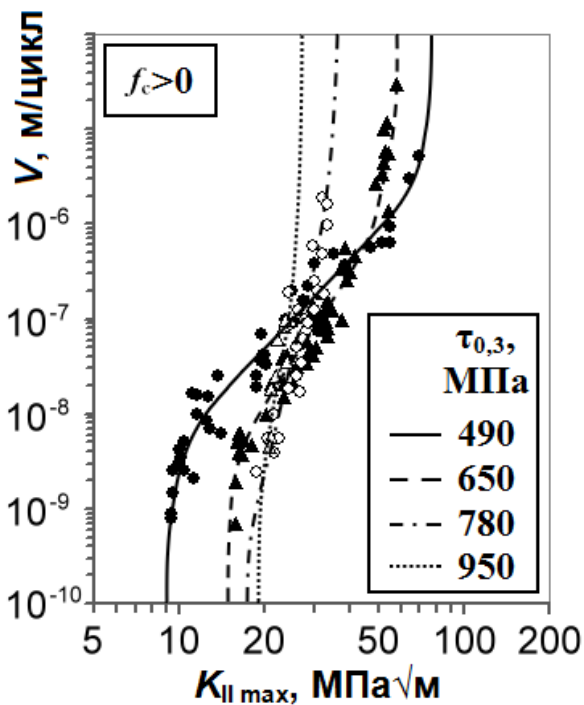


Рис. 16. КДВР сталі 65Г різної міцності побудовані з врахуванням ТБГ.

Використовуючи запропонований підхід до дослідження втомного руйнування поперечним зсувом, будували КДВР сталі 65Г різної міцності в логарифмічних координатах “максимальний КІН  $K_{II \max}$  – швидкість РВТ  $V$ ”. Як видно (рис. 16), діаграми мають похилу S-подібну форму, яка зі збільшенням міцності сталі проявляє тенденцію наближення до лінії, паралельної до осі ординат. Слід зауважити, що для  $K_{II \max}$ , близьких до 25 МПа√м, та швидкостей РВТ  $V$ , близьких до  $10^{-7}$  м/цикл є характерна ділянка, в якій діаграми для сталей різної міцності перетинаються.

Із побудованих КДВР визначали основні характеристики ЦТ: поріг втоми  $K_{II th}$  (за швидкості РВТ  $V=10^{-10}$  м/цикл), циклічну в’язкість руйнування  $K_{II fc}$  (за  $V=10^{-4}$  м/цикл),

а також додаткові:  $K_{II\ 1-2}$  та  $K_{II\ 2-3}$ , які вказують на початок та кінець середньої ділянки діаграми. Середню ділянку діаграм апроксимувували рівнянням (аналогічним до рівняння Періса для нормального відриву) у вигляді степеневі залежності:

$$V = C_{II} (K_{II\ max})^{n_{II}}, \quad (9)$$

де  $C_{II}$  та  $n_{II}$  – параметри, які характеризують положення КДВР відносно осі абсцис та кут нахилу діаграми до осі ординат відповідно.

Таким чином, встановлено (табл. 3), що з підвищенням міцності сталі (умовної границі текучості  $\tau_{0,3}$ ) з 490 до 950 МПа  $K_{II\ th}$  зростає з 9 до 19,2 МПа $\sqrt{м}$ , а  $K_{II\ fc}$  спадає з 76 до 27 МПа $\sqrt{м}$ . Степеневий показник  $n_{II}$  рівняння (9) зростає з 3,154 до 22,441. Також слід зазначити, що  $f_c$  зростає з 0,48 до 0,96.

Таблиця 3. Характеристики ЦТ сталі 65Г різної міцності

Умовна границя текучості $\tau_{0,3}$ , МПа	Коеф. ТБТ $f_c$	Характеристики ЦТ				Параметри рівняння середн. діл. КДВР	
		$K_{II\ th}$	$K_{II\ 1-2}$	$K_{II\ 2-3}$	$K_{II\ fc}$	$C_{II}$	$n_{II}$
	МПа $\sqrt{м}$				$(\text{МПа}\sqrt{м})^{-n_{II}} \times$ $\times \text{м/цикл}$		
490	0,48	9,0	14	50	76	$3,935 \cdot 10^{-12}$	3,154
650	0,72	14,8	18	43	58	$9,764 \cdot 10^{-15}$	4,691
780	0,84	17,3	20	29	36	$1,499 \cdot 10^{-25}$	12,394
950	0,96	19,2	21	24	27	$1,209 \cdot 10^{-38}$	22,441

На основі визначених характеристик ЦТ сталі 65Г після різних ТО побудовано діаграми конструкційної міцності (рис. 17) та інші залежності (рис. 18). Показано (рис. 17, 18а), що встановлені тенденції залежностей характеристик ЦТ від характеристик міцності зберігаються навіть коли при обчисленнях  $K_{II}$  не враховувати ТБТ, приймаючи  $f_c=0$ .

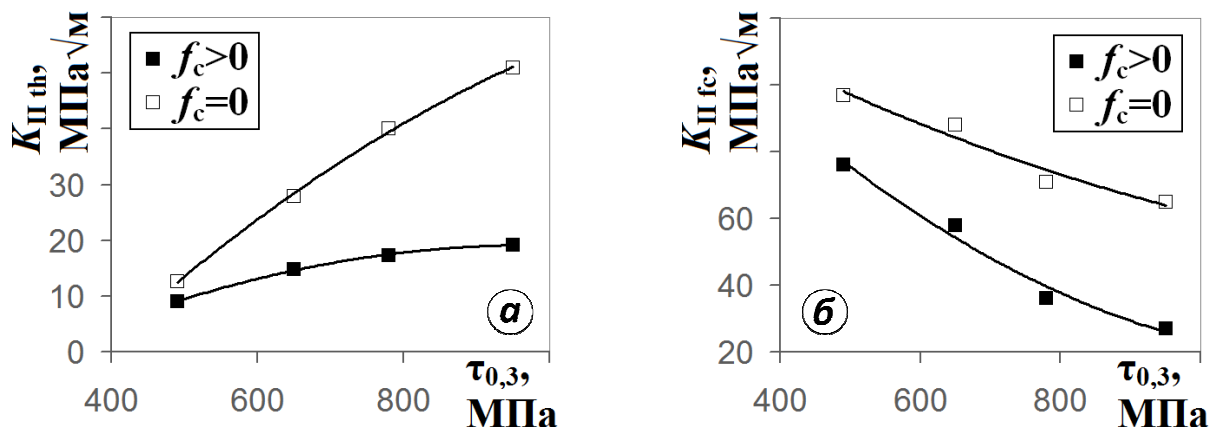


Рис. 17. Вплив умовної границі текучості на поріг втоми (а) та на циклічну в'язкість руйнування (б) сталі 65Г.

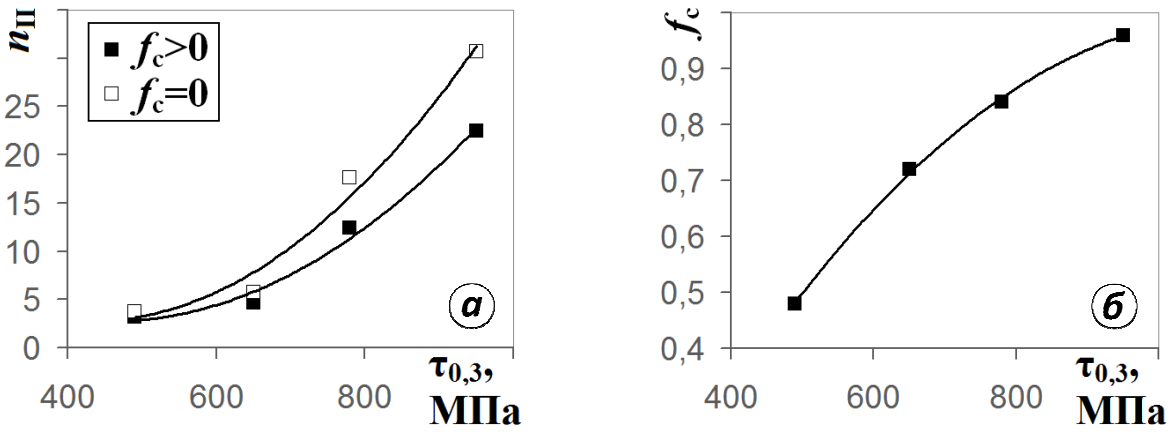


Рис. 18. Вплив умовної границі текучості сталі 65Г на степеневий показник рівняння середньої ділянки КДВР (а) та на коефіцієнт ТБТ (б).

Отримані залежності зіставлено з аналогічними схематичними, відомими для руйнування сталей типу 65Г нормальним відривом (рис. 19). Залежності циклічної в'язкості руйнування  $K_{fc}$  та степеневого показника  $n_{II}$  від умовної границі текучості сталі подібні, а порогів втоми  $K_{th}$  – обернені.

З метою підтвердження достовірності отриманих результатів числові значення порогів втоми сталі 65Г різної міцності співставляли зі значеннями для інших конструкційних сталей, відомих у літературі. Для цього будували діаграму в координатах “границя міцності  $\sigma_B$  – поріг втоми  $K_{II th}$ ” (рис. 20).

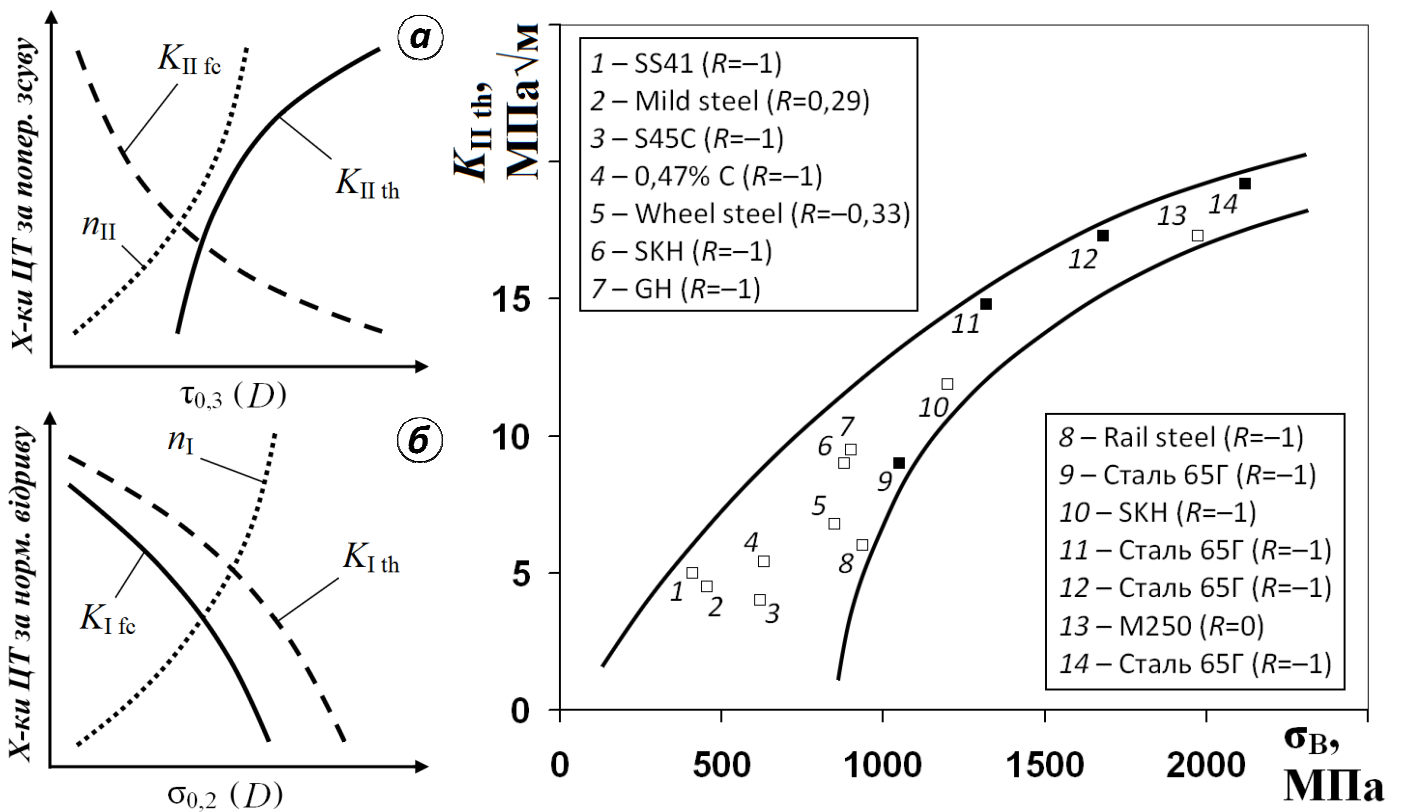


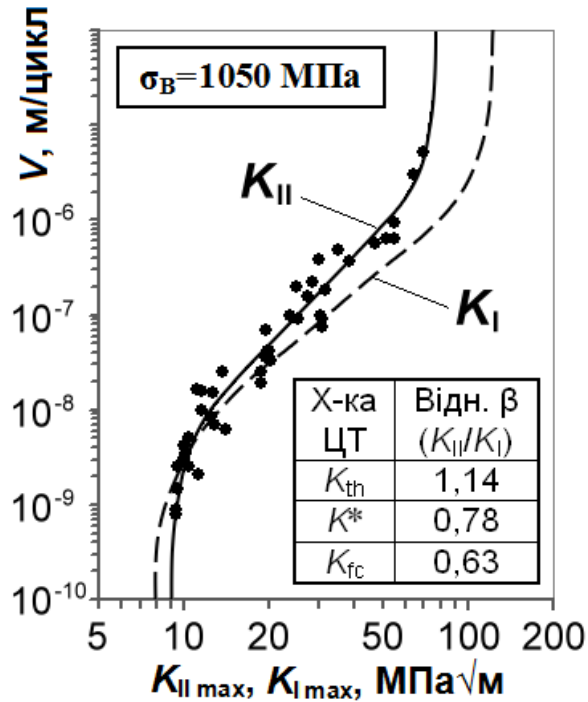
Рис. 19. Схематичні залежності характеристик ЦТ за поперечного зсуву (а) та нормального відриву (б) від характеристик міцності сталей типу 65Г.

Рис. 20. Залежність порогів втоми за поперечного зсуву від границі міцності сталей за результатами автора (■) та за літературними даними (□).



Необхідно зазначити, що для коректного співставлення  $K_{II\ th}$  визначали з виразу  $K_{II\ th} = \Delta K_{II\ th} / (1-R)$ , де  $\Delta K_{II\ th}$  – пороговий розмах максимального КІН в циклі навантаження. З побудованих графічних залежностей (рис. 20) слідує, що отримані результати добре корелюють з результатами інших дослідників.

Щоби порівняти опірність сталі РВТ за поперечного зсуву та за нормального відриву співставляли відповідні КДВР (рис. 21). КДВР в логарифмічних координатах “максимальний КІН  $K_{I\ max}$  – швидкість РВТ  $V$ ” будували за розтягу



**Рис. 21.** КДВР сталі 65Г у низькоміцному стані за різних макромеханізмів РВТ.

умовного центру симетрії діаграми  $\beta^* = 0,78$ , а для циклічної в'язкості руйнування  $\beta_{fc} = 0,63$ . Як видно,  $\beta^* < 1$  та  $\beta_{fc} < 1$ , що вказує на меншу опірність сталі РВТ за середньо- та високоамплітудних циклічних навантажень в напрямку максимальних зсувних напружень за поперечного зсуву, аніж в напрямку максимальних розтягальних напружень за нормального відриву.

У п'ятому розділі оцінено опірність сталей утворенню вищербин за контактної втоми кочення на основі їх характеристик ЦТ.

Відомо, що залізничні колеса працюють за умов контактної втоми, а на їх поверхні кочення та у приповерхневих об'ємах матеріалу, внаслідок знакозмінних навантажень зароджуються і ростуть тріщини. В поодиноких випадках це призводять до повного катастрофічного руйнування виробів, а найчастіше – до утворення дефектів у вигляді вищербин (рис. 22).



**Рис. 22.** Вищербини на поверхні кочення залізничних коліс.

З літератури відомо, що вищербини утворюються внаслідок РВТ за різних комбінацій розмахів КІН  $\Delta K_{II}$  та  $\Delta K_I$  на конкретних ділянках (№1...3) в циклі кочення і визначають довговічність  $N_1...N_3$  (рис. 23). Умовно вищербини класифікують за двома базовими схемами. Ті, що утворюються від первинних тріщин в приповерхневих об'ємах паралельних до поверхні кочення, називають відшаруваннями (рис. 23а), а утворені від первинних краєвих тріщин з поверхні – пітинги (рис. 23б). Для відшарувань домінуючим і визначальним є розмах  $\Delta K_{II}$ , тому оцінювання опірності залізничних коліс утворенню вищербин загалом необхідно здійснювати з урахуванням характеристик ЦТ сталей не тільки за нормального відриву, а й за поперечного зсуву.

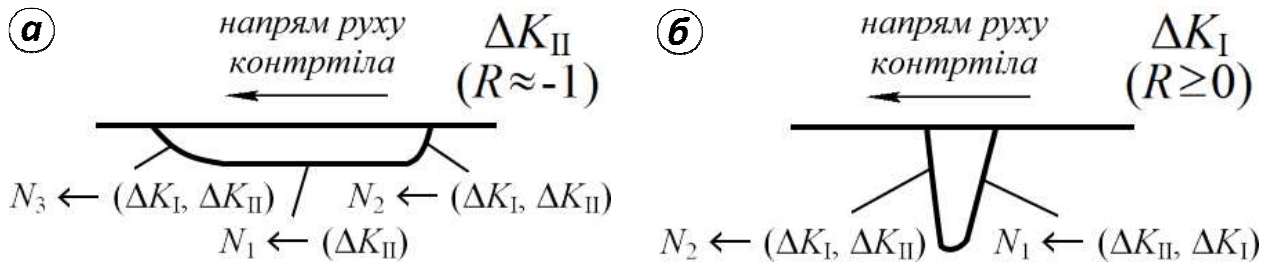


Рис. 23. Схеми утворення вищербин через відшарування (а) та пітинг (б).

Оскільки сталь 65Г є аналогом колісної сталі марки “Г”, то на основі визначених для неї характеристик ЦТ за поперечного зсуву та нормального відриву оцінено опірність утворення вищербин для її середньоміцного (СМ) та високоміцного (ВМ) структурного станів. Для цього побудовано гістограму (рис. 24), яка відображає зміну характеристик ЦТ за поперечного зсуву та нормального відриву при підвищенні границі міцності сталі від 1320 до 1680 МПа. Очевидно, що найчутливішою характеристикою до зміни міцності сталі є циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$  для обох макромеханізмів руйнування. З підвищенням міцності  $\Delta K_{fc}$  знижується на 38% за поперечного зсуву та на 24% за нормального відриву. Для випробування сталей за умов контактної втоми науковцями відділу №17 ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ під керівництвом О. Остаха сконструйовано та виготовлено установку (рис. 25), яка імітує роботу пари “колесо – рейка”.

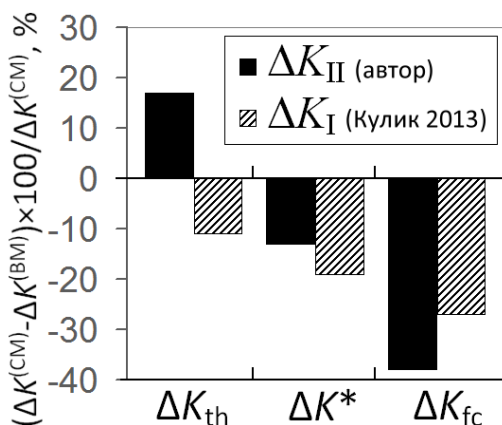


Рис. 24. Вплив підвищення границі міцності сталі 65Г від 1320 до 1680 МПа на зміну характеристик ЦТ.

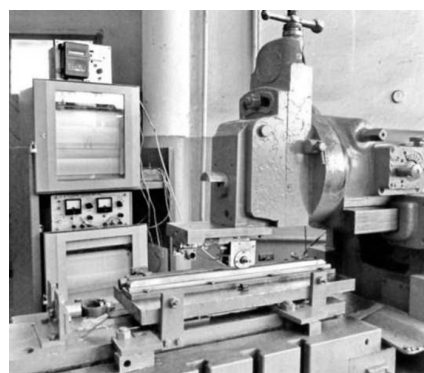


Рис. 25. Загальний вигляд установки для випробувань конструкційних сталей на контактну втому.

Випробовували модельні колеса із зазначеної пари сталей (див. рис. 24) протягом 200 тис. циклів кочення за контактного тиску  $p_0=750$  МПа. Після випробувань поверхню кочення коліс досліджували на оптичному мікроскопі та ідентифікували контактні-втомні пошкодження. При обстеженні виявлено, що на поверхні кочення високоміцного колеса утворилося значно більше дефектів, подібних за формою до відшарувань і до пітингів, у порівнянні з поверхнею середньоміцного колеса (рис. 26). Такі залежності пояснюються рівнем циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{fc}$ , яка для високоміцної сталі є меншою як за поперечного зсуву, так і за нормального відриву.

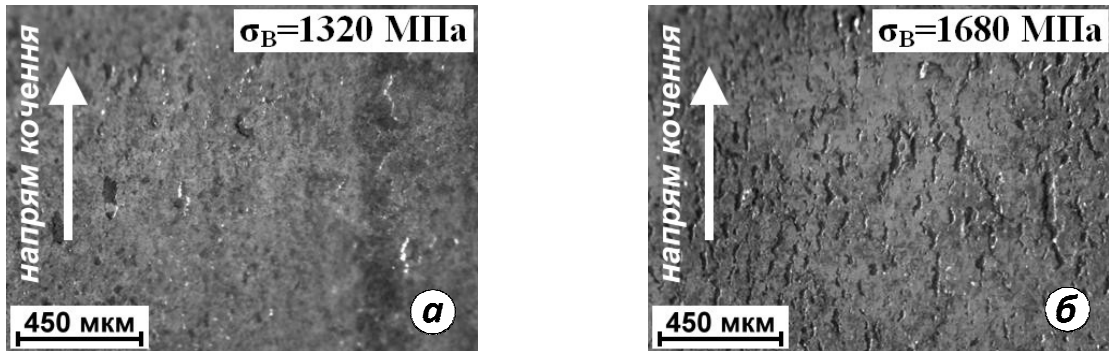


Рис. 26. Дефекти на поверхні кочення середньоміцного (а) та високоміцного (б) модельних коліс.

На підставі результатів проведених експериментів, для запобігання утворення вищербин через відшарування чи пітингоутворення на поверхні кочення залізничних коліс (рис. 27) рекомендовано обирати сталі для їх виготовлення з високою циклічною в'язкістю руйнування  $\Delta K_{fc}$ , не тільки за нормального відриву, але й за поперечного зсуву (рис. 28).

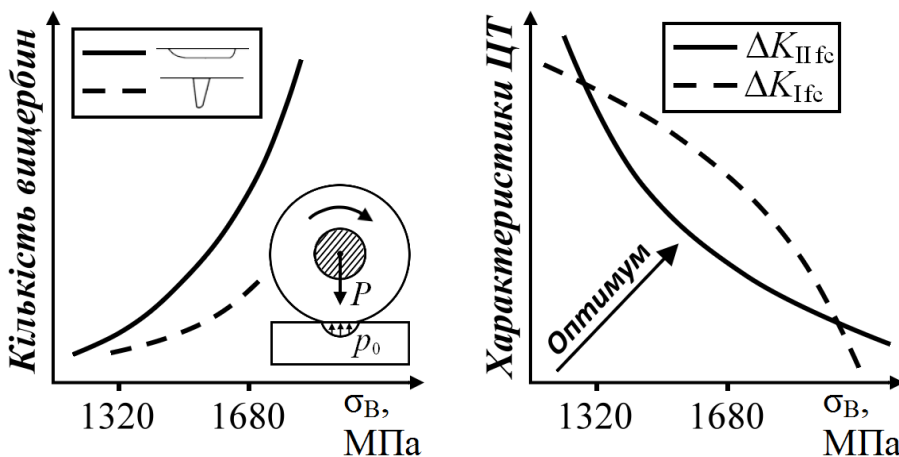


Рис. 27. Схематичні залежності кількості вищербин на поверхні кочення від міцності коліс.

Рис. 28. Схема вибору оптимального матеріалу для підвищення ресурсу коліс.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Запропоновано новий зразок у формі двотаврової балки з краєвим надрізом і повздовжніми бічними канавками та  $K$ -тарувальну залежність для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів за поперечного зсуву.
2. Розроблено методику побудови кінетичних діаграм втомного руйнування сталей з визначенням характеристик циклічної тріщиностійкості за

поперечного зсуву та апробовано її на сталі 65Г різної міцності. Ця методика є основою проекту відповідного нормативного документа.

3. Вперше визначено коефіцієнт тертя берегів зсувної тріщини експериментальним способом та показано, що зі збільшенням характеристик міцності сталі 65Г у два рази він зростає з 0,48 до 0,96.
4. Вперше досліджено кінетику втомних тріщин за поперечного зсуву в діапазоні швидкостей  $10^{-10} \dots 10^{-4}$  м/цикл. Встановлено тенденцію зростання порогів втоми з підвищенням умовної границі текучості сталі 65Г на відміну від тенденції їх спадання за нормального відриву, а для циклічної в'язкості руйнування – тенденції подібні.
5. Співставлено кінетичні діаграми втомного руйнування за поперечного зсуву та нормального відриву. Встановлено, що опірність сталі 65Г в низькоміцному стані росту втомної тріщини за середньо- та високоамплітудних циклічних навантажень в напрямку максимальних зсувних напружень є меншою, ніж в напрямку максимальних розтягальних напружень.
6. На основі аналізу характеристик циклічної тріщиностійкості за поперечного зсуву та нормального відриву показано, що сталь 65Г у високоміцному стані за високоамплітудних навантажень чинить значно менший опір втомному руйнуванню, ніж у середньоміцному. Так, її циклічна в'язкість руйнування менша на 38 та 27% відповідно.
7. Запропоновано вибирати циклічну в'язкість руйнування за визначальну характеристику для оцінювання пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс за контактної втоми. Це узгоджено з результатами натурних експериментів, згідно яких у високоміцних модельних колесах утворюється значно більше дефектів, подібних до відшарувань та пітингів, ніж у середньоміцних.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ленковський Т. М. Вплив тертя берегів тріщини на циклічну тріщиностійкість сталі 65Г за поперечного зсуву / Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – №5. – С. 53–57.
2. Іваницький Я. Л. Методика побудови кінетичних діаграм втомного руйнування сталей за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини / Я. Л. Іваницький, Т. М. Ленковський, В. М. Бойко, С. Т. Штаюра // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – №6. – С. 41–45.
3. Кунь П. С. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень для тріщини поперечного зсуву у балковому зразку / П. С. Кунь, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – №2. – С. 50–53.
4. Ленковський Т. М. Визначення характеристик циклічної тріщиностійкості сталей за поперечного зсуву (огляд) / Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – №3. – С. 29–37.
5. Іваницький Я. Л. Визначення характеристик тріщиностійкості сталі 09Г1С за поперечного зсуву / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – № 5. – С. 73–78.
6. Патент на корисну модель № 74163. Зразок для визначення характеристик

- циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів за поперечного зсуву / Іваницький Я. Л., Ленковський Т. М., Штаюра С. Т., Мольков Ю. В. – Оpubл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
7. Патент на корисну модель № 73715. Установка для утворення втомної тріщини поперечного зсуву в балковому зразку / Іваницький Я. Л., Штаюра С. Т., Ленковський Т. М., Мольков Ю. В., Квашнівський Ю. І. – Оpubл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
  8. Панасюк В. В. Нормативи на сталі для запобігання експлуатаційних дефектів на поверхні кочення суцільнокатаних високоміцних залізничних коліс / В. В. Панасюк, О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик, О. П. Дацишин, Я. Л. Іваницький, А. Ю. Глазов, Т. М. Ленковський, В. І. Ваврух // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2012. – С. 594–598.
  9. Штаюра С. Т. Методичні рекомендації для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів за поперечного зсуву / С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський // Праці 5-ї міжнар. конф. з Механіки руйнування матеріалів та міцності конструкцій (Львів, 2014) / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ НАНУ, 2014. – С. 187–194.
  10. Осташ О. Зв'язок між пошкоджуваністю поверхні кочення залізничних коліс та циклічною тріщиностійкістю сталей / О. Осташ, В. Кулик, Т. Ленковський // 12-ий Міжнародний симпозіум інженерів-механіків у Львові. Тези доповідей – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2015. – С. 6–7.
  11. Ленковський Т. М. Методика побудови кінетичних діаграм втомного руйнування за поперечного зсуву / Т. М. Ленковський // Матеріали ХХІІ Відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів ФМІ НАН України КМН-2011 (Львів, 2011) “Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи”. – Львів: ФМІ НАНУ, 2011. – С. 51–54.

**АНОТАЦІЯ.** Ленковський Т. М. Метод оцінювання циклічної тріщиностійкості сталей за поперечного зсуву. – На правах рукопису.

*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.*

Дисертація присвячена розробленню методу оцінювання опірності сталей росту втомної тріщини в напрямку максимальних зсувних напружень. Запропонований в роботі підхід до оцінювання тріщиностійкості сталей ґрунтується на побудові кінетичних діаграм втомного руйнування за поперечного зсуву з врахуванням тертя берегів тріщини та визначенні з них характеристик циклічної тріщиностійкості сталей.

Для досягнення стабільного росту втомної тріщини за поперечного зсуву розроблено новий зразок, вибрано силову схему та виготовлено установку для його циклічного навантаження. Розроблено експериментальний спосіб визначення коефіцієнта тертя берегів тріщини та побудовано  $K$ -тарувальну залежність для обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{II}$  з врахуванням тертя берегів

тріщини.

Визначено основні та додаткові характеристики циклічної тріщиностійкості за поперечного зсуву і встановлено тенденцію зростання порогів втоми з підвищенням характеристик міцності сталі 65Г після різних термообробок, на противагу тенденціям за нормального відриву. Співставлено кінетичні діаграми втомного руйнування за поперечного зсуву та нормального відриву і показано, що на середньо- та високоамплітудній ділянці сталі 65Г у низькоміцному стані чинить менший опір руйнуванню коли тріщина розвивається в напрямку максимальних зсувних напружень.

Встановлено, що сталь 65Г у високоміцному стані за високоамплітудних навантажень чинить значно менший опір втомному руйнуванню, ніж у середньоміцному. На підставі півнатурних експериментів показано, що циклічна в'язкість руйнування є визначальною характеристикою при оцінюванні пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс за контактної втоми.

**Ключові слова:** *циклічна тріщиностійкість, поперечний зсув, кінетичні діаграми втомного руйнування, коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{II}$ , тертя берегів тріщини, сталь 65Г, діаграми конструкційної міцності, контактна втома кочення, відшарування.*

**АННОТАЦИЯ. Ленковский Т. М. Метод оценки циклической трещиностойкости сталей при поперечном сдвиге. – На правах рукописи.**

*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 разработке метода оценки сопротивляемости сталей росту усталостной трещины в направлении максимальных касательных напряжений. Предложенный в работе подход к оценке трещиностойкости сталей основан на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения при поперечном сдвиге с учетом трения берегов трещины и определении из них характеристик циклической трещиностойкости сталей.

Для достижения стабильного роста усталостной трещины при поперечном сдвиге разработан новый образец, выбрана силовая схема его циклического нагружения и изготовлена соответствующая установка. Разработан экспериментальный способ определения коэффициента трения берегов трещины и построена  $K$ -тарировочная зависимость для вычисления коэффициента интенсивности напряжений  $K_{II}$  с учетом трения берегов трещины.

Определены основные и дополнительные характеристики циклической трещиностойкости при поперечном сдвиге и установлена тенденция роста порогов усталости с повышением характеристик прочности стали 65Г после различных термообработок, в отличие от тенденций при нормальном отрыве. Сопоставлены кинетические диаграммы усталостного разрушения при поперечном сдвиге и нормальном отрыве и показано, что на средне- и высокоамплитудном участке стали 65Г в низкопрочном состоянии оказывает меньшее сопротивление разрушению, когда трещина развивается в направлении максимальных касательных напряжений.



Установлено, что сталь 65Г в высокопрочном состоянии при высокоамплитудных нагрузках оказывает значительно меньшее сопротивление усталостному разрушению, чем в среднепрочном. На основании полунатурных экспериментов показано, что циклическая вязкость разрушения является определяющей характеристикой для оценки повреждаемости поверхности качения железнодорожных колес при контактной усталости.

**Ключевые слова:** *циклическая трещиностойкость, поперечный сдвиг, кинетические диаграммы усталостного разрушения, коэффициент интенсивности напряжений  $K_{II}$ , трение берегов трещины, сталь 65Г, диаграммы конструкционной прочности, контактная усталость качения, отслоение.*

**ABSTRACT. Lenkovskiy T. M. The method of cyclic crack growth resistance evaluation of steels under transverse shear. – The manuscript.**

*Thesis for the degree of Candidate of technical sciences (Ph.D. in engineering) in specialty 01.02.04 – mechanics of deformable solids. – Ternopil Ivan Pulyuj National Technical University, Ternopil, 2015.*

The thesis is dedicated to development of a method for fatigue crack growth resistance evaluation of steels in the direction of maximal shear stress. The proposed approach is based on the construction of fatigue crack growth rates curves at the transverse shear taking into account the crack faces friction and the determination from these curves a cyclic crack growth resistance characteristics of steels.

To achieve a stable fatigue crack spreading at the transverse shear, a new specimen is designed, the loading scheme of its cyclic loading is selected and the machine for its realization is made. An experimental method of crack faces friction factor determination is developed and the  $K$ -calibration curves to calculate the stress intensity factor  $K_{II}$  with tacking into account crack faces friction is build.

The primary and the secondary cyclic crack growth resistance characteristics at transverse shear are determined. It is shown that increase of mechanical strength of 65Г steel after various heat treatments leads to increase of fatigue threshold, in contrast to trends at normal tension. The fatigue crack growth rates curves at transverse shear and normal tension are compared. It shows that at high-amplitude loading 65Г steel in low strength state has less resistance to fatigue fracture then in medium strength state when crack has spreading in direction of maximum shear stress.

It is found that at high amplitude loads 65Г steel in high strength state has significantly less resistance to fatigue fracture than in middle strength state. Based on semi-natural tests it is shown that cyclic fracture toughness is a defining characteristic for damage evaluation of railway wheels rolling surface under contact fatigue.

**Keywords:** *fatigue fracture, transverse shear, fatigue crack growth rates curves, stress intensity factor  $K_{II}$ , crack faces friction, 65Г steel, structural strength curves, rolling contact fatigue, shelling.*