

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

**БІЩАК  
Роман Теодорович**

**УДК 620.178.3**

**ОЦІНЮВАННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ  
ПОШКОДЖЕНОСТІ В ТЕПЛОСТІЙКІЙ СТАЛІ ЗА  
ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 01.02.04 - Механіка деформівного твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль - 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор **ЯСНИЙ Петро Володимирович**, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, ректор, завідувач кафедри будівельної механіки, м. Тернопіль

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **ЧАУСОВ Микола Георгійович**, Національний університет природокористування і біоресурсів, завідувач кафедри механіки, опору матеріалів та будівництва, м. Київ

доктор технічних наук, професор **НИКИФОРЧИН Григорій Миколайович**, завідувач відділом корозійно-водневої деградації та захисту матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

Захист відбудеться “ 18 ” 03 2011 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

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

Автореферат розісланий “ 16 ” 02 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат фізико-математичних  
наук

**Шелестовський Б.Г.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Термоциклічне навантаження елементів конструкцій часто є основною причиною їх експлуатаційної деградації через розвиток в матеріалі розсіяної пошкодженості, мережі тріщин розпалу, що понижує їх роботоздатність і довговічність. Ряд високонавантажених конструкцій металургійного обладнання, зокрема, валики вальцювальних станів, ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), експлуатуються саме за умов термомеханічного навантаження. Циклічна зміна температури поверхневих шарів спричиняє зміну фізико-механічних характеристик матеріалу, розвитку у ньому пошкодженості.

Вплив термомеханічного та високотемпературного навантаження на кінетику накопичення пошкод та циклічну тріщиностійкість сталей роликів МБЛЗ досліджено у працях Л.В. Буланова, О.П. Гопкала, Ф.С. Домбровського, Л.К. Лещинського, П.С. Любутіна, О.В. Носоченка, П.О. Марущака, С.В. Паніна, В.Т. Трощенко, Л.А. Хитько, П.В. Яснія, D. Le Jeune, C.L. Tsai, P. Revel, та ін. Виявлено основні закономірності зародження, коалесценції та поширення втомних тріщин і розроблено методологічні підходи до оцінювання технічного стану і підвищення достовірності прогнозування залишкового ресурсу роликів МБЛЗ. Зазначені результати одержано переважно на основі феноменологічних підходів про механічну поведінку матеріалу які лише частково враховують особливості механізмів деформування матеріалу на різних масштабних рівнях. В працях О.Є. Андрейківа, А.О. Лебедева, Г.М. Никифорчина, О.П. Осташа, В.В. Панасюка, В.Є. Паніна, В.Р. Скальського, М.Г. Чаусова досліджено основні механізми квазістатичного деформування матеріалів на макро- і мікрорівнях. Проте, не достатньо вивчено вплив термоциклування на закономірності деформування матеріалу із урахуванням кінетики накопичення пошкод.

Таким чином, актуальною задачею є поглиблене дослідження закономірностей деградації конструкційних сталей за термомеханічного навантаження із урахуванням структурної неоднорідності матеріалу, її еволюції і впливу експлуатаційних чинників на зародження і розвиток пошкодженості матеріалу.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Наукові результати, що складають основу дисертації, отримані здобувачем, як виконавцем держбюджетних тем “Розробка методів прогнозування ресурсу і імовірності руйнування відповідальних елементів металургійного обладнання” (№ держреєстрації 0107U006983, 2007), “Розробка методів прогнозування довговічності металургійного обладнання в умовах високотемпературної втоми” (№ держреєстрації 0107U006982, 2007), “Використання детерміністичних та статистичних підходів для оцінки залишкової довговічності конструкцій” (№ держреєстрації 0109U007705, 2007), “Наукові основи підвищення термовтомної тривкості нержавкої сталі шляхом

наноструктуризації і контрольованого множинного розтріскування поверхневих шарів” (№ держреєстрації 0109U005863, 2009), які виконувались у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України впродовж 2007-2010 років. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в оцінюванні пошкодженості сталі роликів МБЛЗ та виявленні закономірностей її пластичного деформування з урахуванням множинного розтріскування.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- удосконалити методики дослідження термоцикування, деформування та оцінювання розпорошеної пошкодженості матеріалів;
- дослідити основні закономірності експлуатаційного множинного розтріскування сталі 25Х1М1Ф та геометрію втомних тріщин з урахуванням впливу окиснення на параметри ідентифікованих тріщин (відносну частку розтріскування, кількість одиничних та об'єднаних тріщин);
- обґрунтувати характеристики фізико-механічних властивостей, які є найбільш чутливими до експлуатаційної деградації матеріалу ролика МБЛЗ;
- розробити методику оцінювання деформівності та тріщиностійкості сталі, пошкодженої множинним розтріскуванням.

*Об'єкт дослідження* - пошкодженість теплостійкої сталі.

*Предмет дослідження* – міцність та тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф з урахуванням впливу експлуатаційного напруцювання і термоцикування.

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

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

- виявлено основні закономірності експлуатаційної пошкодженості ролика МБЛЗ за аналізом геометрії та взаємного розташування тріщин термомеханічної втоми;
- уточнено форму відокремлених та об'єднаних експлуатаційних втомних тріщин, що дало можливість встановити межі застосування автоматизованого методу аналізу цифрового зображення окисненої поверхні ролика МБЛЗ. Встановлено, що окиснення поверхні знижує кількість ідентифікованих тріщин на глибині до 2,0 мм у 1,5 рази. Максимальна довжина тріщин, виявлених на поверхні конструкції та у приповерхневих шарах, однакова на глибині поверх 2,0 мм;
- розроблено, захищений патентами України метод оцінки пошкоджуваності поверхні тріщинами термічної втоми, який ґрунтується на фізико-хімічному аналізі ділянок поверхні ролика МБЛЗ. Досліджено вплив експлуатаційних умов на механізми поширення дефектів, зокрема, окиснення;

- досліджено основні закономірності деформування та руйнування розтягуванням сталі 25Х1М1Ф у вихідному та деградованому станах. Виявлено, що за напрацювання 2500 термоциклів умовна межа текучості сталі 25Х1М1Ф знизилась на 20 %, умовна границя міцності на 16 % та відношення границі текучості до границі міцності з 0,94 до 0,90;

- обґрунтовано характеристики механічних властивостей, найбільш чутливі до експлуатаційної деградації матеріалу в умовах термовтоми, що супроводжується інтенсивною пошкодженістю. Для експлуатованої сталі ролика МБЛЗ це відносне звуження, в'язкість руйнування, ударна в'язкість та мікротвердість.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Визначено характеристики механічної поведінки матеріалу ролика МБЛЗ за різного термоциклічного напрацювання, які можуть бути використані для розрахунків міцності та тримкості конструкції.

Встановлені закономірності експлуатаційного розтріскування ролика МБЛЗ використовуються у ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України при розробці обладнання для наплавлення роликів МБЛЗ розробленого для ЗАТ "Азовмаш" (дов. № 170/151), а виявлені закономірності деформування та руйнування сталі 25Х1М1Ф після термоциклічного напрацювання використовуються для прогнозування тримкості металургійного обладнання на ВАТ "Булат", (дов. № 12).

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

- розроблення методики експериментальних досліджень та оцінювання пошкодженості поверхні ролика МБЛЗ, створення стенду для порівняльної (інженерної) оцінки термічної стійкості матеріалів;

- розроблення методик оцінювання стану поверхні, пошкодженої сіткою втомних тріщин за умов корозійного окиснення;

- виявлення основних закономірностей пошкодженості сталі 25Х1М1Ф на макро-, мезо- та мікрорівнях після термоциклічного напрацювання та дослідження деформування і руйнування матеріалу за статичного та динамічного навантажень;

- урахування впливу пошкодженості теплостійкої сталі 25Х1М1Ф з множинними дефектами, на параметри міцності та тріщиностійкості матеріалу за деформаційними та енергетичними підходами.

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

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на XI —XIII наукових конференціях ТДТУ (Тернопіль, 2007-2010); VIII Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (Львів, 2007); третій Міжнародній науково – технічній

конференції (Київ, 2007); Международной научно – технической конференции “Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения” (Самара, 2007); Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій” пам’яті академіка НАН України Володимира Івановича Моссаковського (Дніпропетровськ, 2007); 8-й международной научно-технической конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий” (Ялта – Киев, 2008); VII Международной научно – технической конференции “Современные проблемы машиностроения” (Гомель, 2008); “Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials” (Moscow, 2009); VII Международной научно – технической конференции “Динамика систем, механизмов и машин” (Омск, 2009); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2009); Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми механіки” (Львів, 2009); XIX Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт – Петербург, 2010); 4<sup>th</sup> International Conference Processing and Structure of Materials (Serbia, 2010).

В повному обсязі робота доповідалась і обговорювалась на розширеному тематичному семінарі Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя «Прикладна механіка і математика» та семінарі відділу корозійно-водневої деградації та захисту матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 19 друкованих працях, з них 9 – статей у фахових наукових журналах і збірниках, внесених до переліку ВАК України, 2 – статті у закордонних рецензованих виданнях, 3 - патенти, 5 – праць у збірниках міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 166 сторінок, в т. ч. 69 рисунків, 13 таблиць та список використаних літературних джерел із 186 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету роботи та основні напрямки її досягнення, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проаналізовано вплив температури на кінетику накопичення пошкод у зовнішніх та приповерхневих шарах ролика МБЛЗ. Розглянуто вплив циклічного напруження на закономірності накопичення пошкод у поверхневих шарах металургійного обладнання. Проаналізовано

механізми деформування твердих тіл на основі підходів теорії пластичності та фізики міцності матеріалів.

На основі проведеного аналізу літератури можна стверджувати, що незважаючи на низку праць, присвячених проблемам впливу високих температур на процеси пошкодження матеріалів, відомі лише окремі дослідження, в яких розглянуто вплив циклічної зміни температури на пошкодженість матеріалів роликів МБЛЗ на мікро- і макрорівні.

Недостатньо вивчені механізми впливу структури матеріалу на кінетику множинного розтріскування, а також параметрів сітки розпалу на деформівність та тріщиностійкість термоциклованих матеріалів. Потребує поглибленого вивчення вплив механізмів накопичення пошкод на закономірності деформування твердого тіла. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** приведено методики експериментальних досліджень міцності та тріщиностійкості теплостійкої сталі у вихідному та пошкодженому станах, характеристики обладнання, методи і засоби реалізації силових схем та методи зчитування, накопичення та обробки даних для автоматизованого їх керування та запису.

Досліджували сталь 25X1M1Ф у вихідному стані, роликів МБЛЗ діаметром 320 мм після 4000...4500 плавов, знятих з експлуатації на ВАТ “ММК ім. Ілліча” та “МК Азовсталь”, та після термоциклування впродовж 1000...2500 циклів.

Доопрацьовано відому методику термоциклування (*Kawasaki Steel, 2001*) стосовно вибору оптимальних режимів нагріву і охолодження відповідно до експлуатаційних умов (рис. 1).

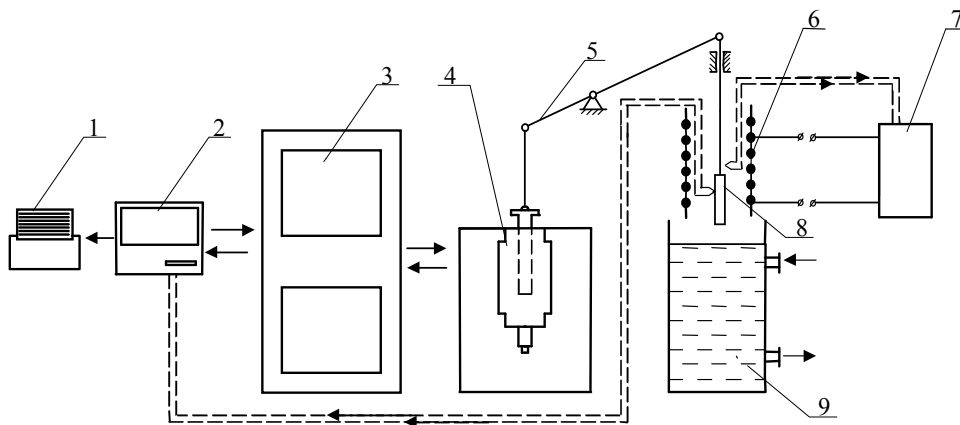


Рис. 1. Принципова схема досліджень термічної тривкості зразків: 1 – принтер; 2 – керуючий ПК; 3 – стійка управління; 4 – гідроциліндр; 5 – важільний механізм; 6 – термокамера; 7 - високоточний регулятор температури ВРТ-2; 8 – зразок; 9 – ємність з водою

Зразок нагрівали в термокамері до температури  $500^{\circ}\text{C}$  впродовж 59 сек., після чого він опускався в ємність з проточною водою температури  $20^{\circ}\text{C}$  за 1 сек. Після охолодження зразок підіймали у термокамеру за час 15 с.

Кінетику накопичення розпорошених пошкод визначали за деформацією розпушування (А.О. Лебедєв і М.Г. Чаусов, 2004):

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu(\varepsilon)) \cdot \varepsilon, \quad (1.1)$$

де  $\mu(\varepsilon)$  - поточний коефіцієнт поперечної деформації;  $\varepsilon$  - відносна деформація;  $\varepsilon_p$  - деформація розпушування.

Статичну тріщиностійкість вихідного та пошкодженого матеріалу визначали за спадною ділянкою повної діграми (М.Г. Чаусов та ін., 1992):

$$K_{1C} = \alpha \cdot \sqrt{S_k \cdot \overline{\Delta l}_p \cdot E}; \alpha = 0,23, \quad (1.2)$$

де  $S_k$  - опір матеріалу відриву;  $\overline{\Delta l}_p$  - нормована, шляхом приведення до початкової площі перерізу стандартного зразка, величина видовження зразка на стадії росту макротріщини відриву;  $E$  - модуль Юнга матеріалу;  $\alpha$  - коефіцієнт.

Оцінювали вплив пошкодженості на деформаційні характеристики матеріалу, зокрема, дійсне поперечне звуження  $\tilde{\varphi}$ :

$$\tilde{\varphi} = \ln(F_0 / F_k), \quad (1.3)$$

Визначали відносне звуження матеріалу:

$$\varphi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%, \quad (1.4)$$

де  $F_0$  і  $F_k$  - початкова площа, та площа після руйнування зразка.

Розпорошену пошкодженість матеріалу оцінювали за твердістю, яку визначали методами індентування та склерометрії: твердість визначали на приладі Супер Роквелл із навантаженням на індентор 150 Н, мікротвердість вимірювали приладом ПМТ-3 із навантаженням на індентор 1 Н з витримкою 15 сек. Структуру матеріалу ролика аналізували на металографічному мікроскопі «Axiovert 40 MAT» фірми «Carl Zeiss», Німеччина.

Безперервне втискання індентора (склерометрія) виконували на приладі "Мікрон-гамма", що дозволило визначити деформівні властивості локальних мікроструктурних об'ємів вздовж траси сканування та оцінити їх розкид як характеристику пошкодженості матеріалу.

Аналізували топографію поверхні вихідного та пошкодженого матеріалу в околі зародженої тріщини статичного відриву на безконтактному інтерференційному профілометрі «Мікрон-бетта» з точністю 10 нм, при використанні програмної обробки цифрових зображень точність зростала до 1 нм (С.Р. Ігнатович та ін., 2007).

Оцінювали пошкодженість деформованого матеріалу за багаторазовими вимірюваннями хімічного складу досліджуваних ділянок зразків та аналізом процентного вмісту основного хімічного елементу (Fe), враховуючи його розсіювання.



Аналізували цифрові зображення поверхні ролика МБЛЗ пошкодженої сіткою тріщин термовтоми. Оцінювали вплив експлуатаційного окиснення поверхні конструкції на геометричні параметри виявлених тріщин.

У **третьому розділі** проаналізовано морфологію мережі тріщин термічної втоми поверхні тривало експлуатованих роликів МБЛЗ.

Макроаналізом поверхні фрагменту ролика МБЛЗ (рис. 2,а) виявлено, що основну частку розтріскування становлять тріщини глибиною до 5,0 мм. Частка «довгих» тріщин є відносно незначною, (рис. 2,б).

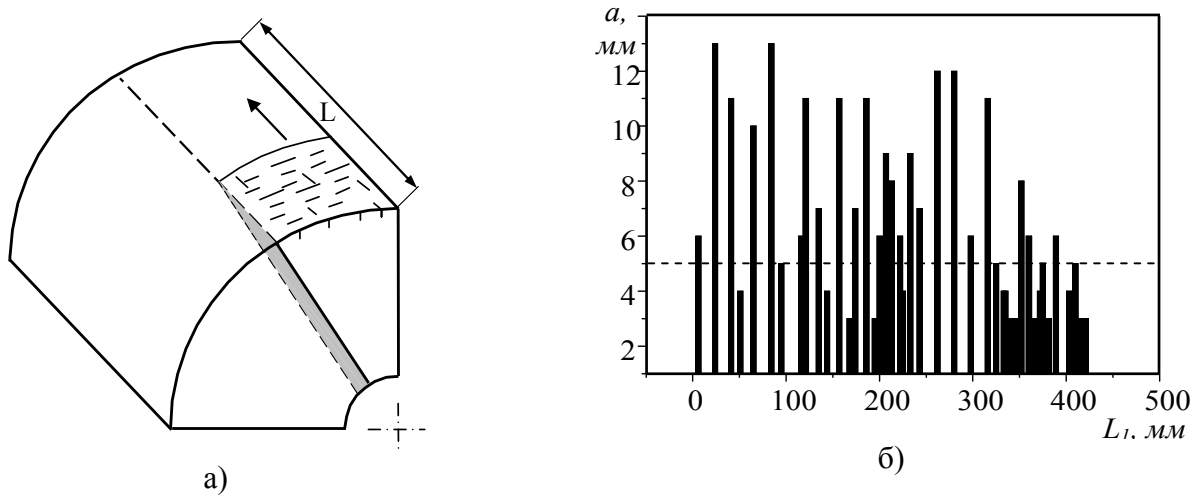


Рис. 2. Схема вирізування фрагменту (а) і розподіл глибин поверхневих тріщин вздовж осі ролика (б)

Виявлено особливості структурних змін і пошкодженості сталі 25Х1М1Ф. У вихідному стані матеріал ферито-перлітної будови із чітко окресленими межами зерен. Зерна перліту розміром близько 30...50 мкм розподілені у феритній матриці. Експлуатований матеріал поверхневого шару ролика на глибині до 5,0 мм має розпорошені пошкоди, втрачається чіткість міжфазних меж матеріалу. В об'ємі феритних зерен і на їх межах карбідні набувають сферичної форми.

Аналізували поверхню ролика МБЛЗ, пошкоджену сіткою тріщин з використанням відомого алгоритму (П.В. Ясній, П.О. Марущак, 2009). Це дозволило виявити кількісні та геометричні параметри мережі тріщин (кількість і орієнтацію тріщин, відносну частку поверхневого розтріскування), чутливі до умов термомеханічного навантаження. Для діагностування впливу окиснення на параметри розтріскування на різних відстанях від поверхні ролика зовнішню поверхню темплету зішліфовували з кроком 0,4 мм. Розтріскану поверхню фотографували із наступним перетворенням початкових (півтонових) зображень структур у їх чорно-білі (бінарні) відповідники.

За результатами аналізу окисненої поверхні ролика та приповерхневих шарів виявлено, що окиснення поверхні майже не впливає на відносну частку

розтріскування,  $F = \frac{\sum_{i=0}^n f_i}{F_{\text{поверх.}}}$ , де  $\sum_{i=0}^n f$  - сума площ тріщин термовтоми, виявлених

на аналізованому зображенні,  $\text{мм}^2$ ;  $F_{\text{поверх.}}$  - площа досліджуваної ділянки. Зокрема, на поверхні  $F = 7\%$ , а на глибині 1,2...1,6 мм відносна частка розтріскування становила відповідно 13% і 8% (рис. 3, а).

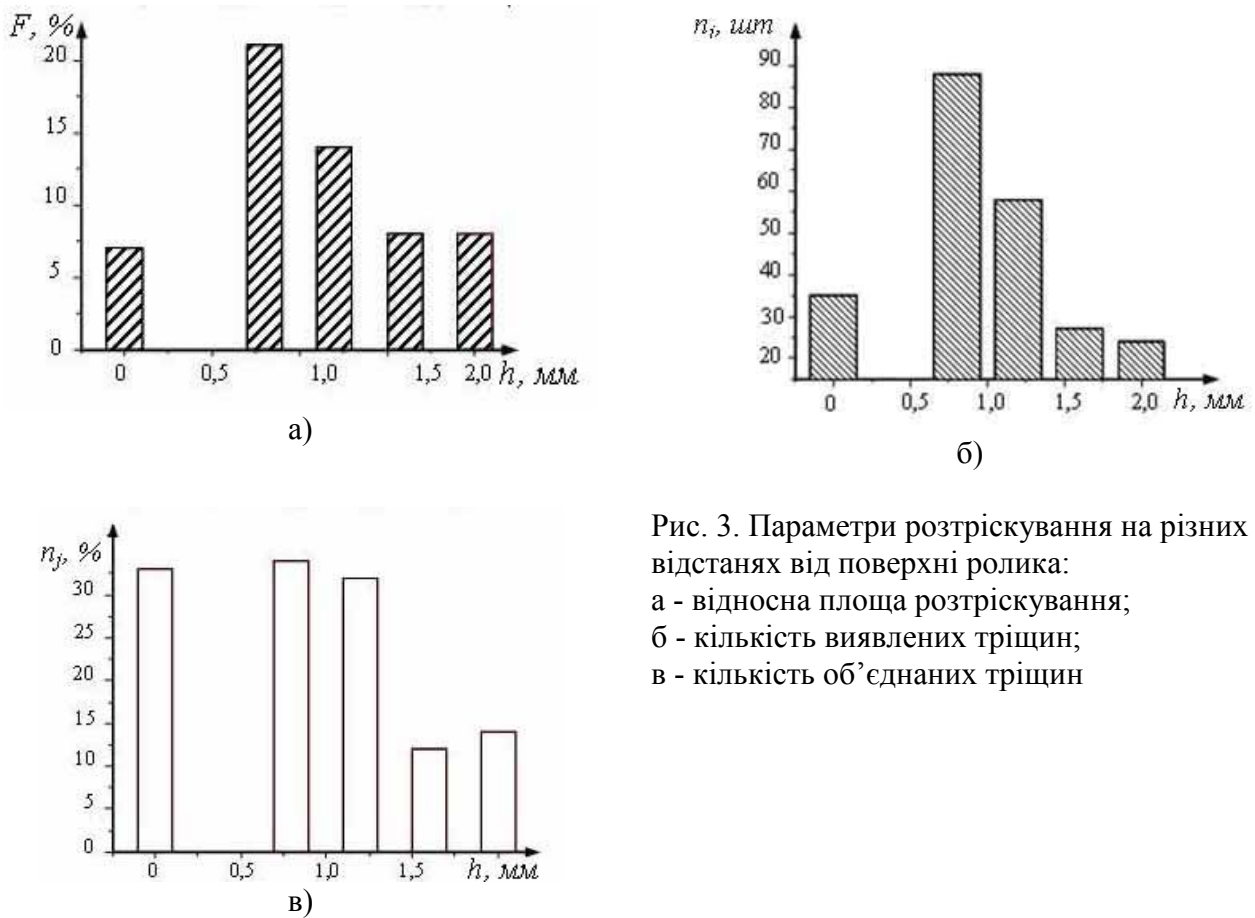


Рис. 3. Параметри розтріскування на різних відстанях від поверхні ролика:  
а - відносна площа розтріскування;  
б - кількість виявлених тріщин;  
в - кількість об'єднаних тріщин

Слід зазначити, що зростання кількості ідентифікованих тріщин ( $n_i$ ) на глибині 0,8 мм до 87 шт. і наступне зниження до 58 шт. на глибині 1,2 мм пов'язане із неповним видаленням поверхневого окисненого шару та ідентифікацією прилеглих до берегів втомних тріщин ділянок, як частки тріщинуватої структури.

Значення параметру  $n_j$  на поверхні конструкції та на глибині 0,8 мм, є сталим, що свідчить про нечутливість даного параметру до впливу окиснення, (рис. 3, б, в). На глибині 1,2...1,6 мм питома частка об'єднаних тріщин знижується від 33% до 32...12%. Це зумовлено геометрією тріщин, які до глибини 4,0 мм мають практично округлу, а за більшої глибини - півеліптичну форму.

На глибині  $h = 0,8$  мм і глибше, кількість виявлених тріщин монотонно знижується. Найбільшу групу становлять тріщини довжиною 2,0...3,0 мм, найглибшими з виявлених є тріщини довжиною 13,0 мм. Одержані результати співставляли з даними пошарового зашліфувування, рис. 5. Отримано розподіли тріщин за довжинами є необхідними для оцінювання граничного стану конструкції ролика. Виявлено параметри взаємозв'язку глибини (а) та довжини тріщин (с) у осьовій та радіальній площині ролика, (рис. 4, а).

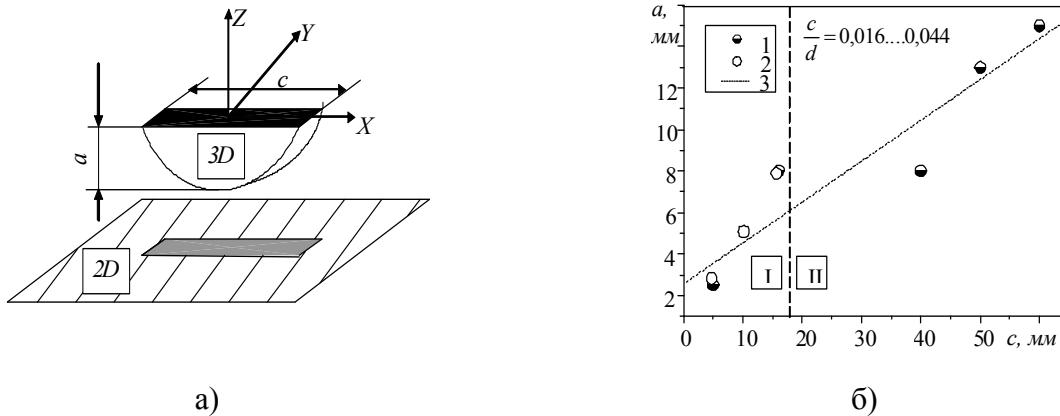


Рис. 4. Схема 2D та 3D тріщини – а, залежність між довжиною та глибиною тріщини – б; 1 – метод пошарового зішліфовування; 2 – експеримент; 3 – (П.В. Ясній та ін., 2006)

На основі встановленої залежності глибини тріщини від її довжини:  $a = kc + b$  проведено пошук значень коефіцієнтів  $k$  та  $b$ , за яких похибка обчислення буде мінімальною. Виявлено, що для дослідженої множини тріщино подібних дефектів  $a/c = 0,52 \pm 0,04$ .

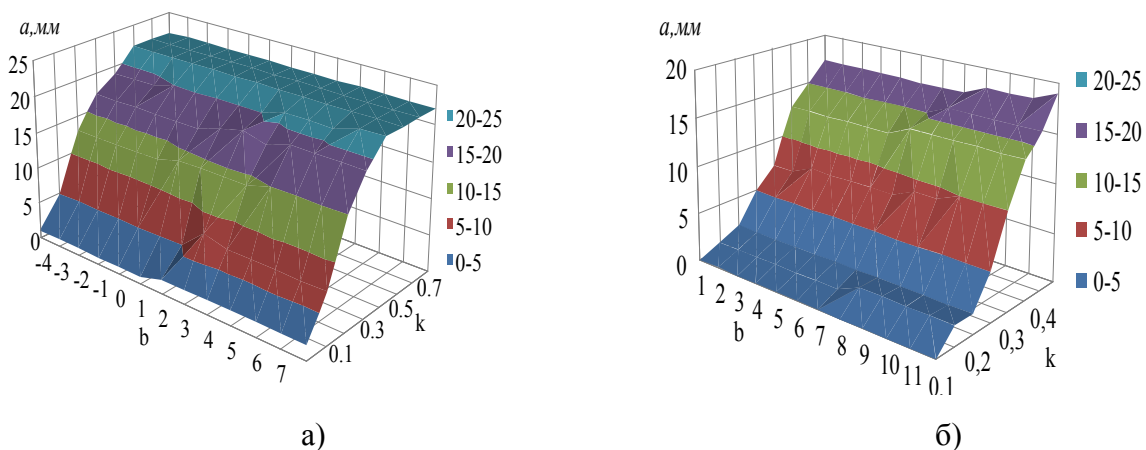


Рис. 5. Залежність параметрів рівняння регресії від глибини тріщини: а – для поверхневої тріщини; б – після 3 мм зашліфовування

На рис. 5 подано графіки розподілу діагностованих тріщин та коефіцієнти рівняння регресії, яке описує форму ідентифікованої тріщини. З діаграми видно, що існує діапазон значень коефіцієнтів інтерполяції, для якого справджується припущення про лінійну залежність глибини тріщини від її довжини. Вибір значень коефіцієнтів  $k$  та  $b$  з цього діапазону дозволяє побудувати модель тріщини, яка адекватно відображатиме залежність глибини тріщини від її довжини.

**У четвертому розділі** досліджено закономірності статичного деформування та руйнування розтягуванням сталі 25X1M1Ф у вихідному та пошкодженому станах. Експлуатаційну деградацію матеріалу моделювали термоцикуванням у відповідності до режимів, поданих у розділі 2.

Виявлено, що термоцикування зразків спричиняє зниження межі текучості вихідного матеріалу з появою полицки текучості на діаграмах розтягування.

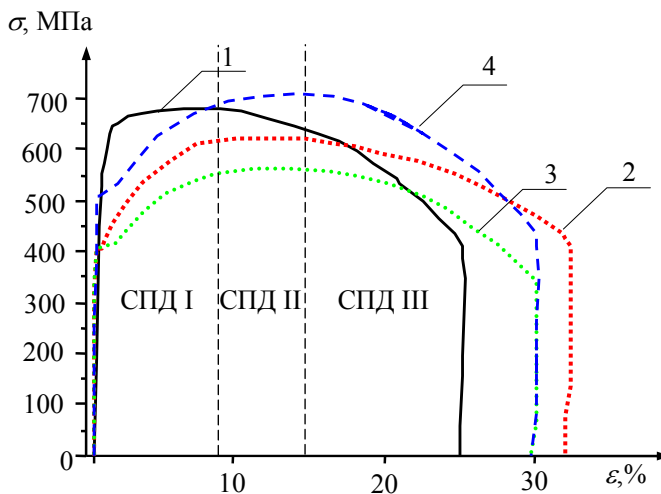


Рис. 6. Діаграми розтягування сталі 25X1M1Ф у вихідному стані (1), за 1000 (2), 2000 (3) та 2500 (4) термоциклів

Після 2500 термоциклів умовна межа текучості сталі 25X1M1Ф знизилась від 650 до 520 МПа (рис. 6).

Напрацювання збільшує залишкову деформацію матеріалу при руйнуванні. Якщо для матеріалу у вихідному стані  $\varepsilon = 25\%$ , то для термоциклованого матеріалу вже  $30\%$ . Отримані механічні властивості досліджених зразків зведені у табл. 1.

Подібно до випроб зразків у вихідному стані при кімнатній температурі помітним є деформаційне зміцнення (різниця між напруженням текучості та границею міцності:  $\Delta\sigma_{\text{деформ}} = 60$  МПа) і істотне знеміцнення (різниця між границею міцності і напруженнями в момент руйнування зразка  $\Delta\sigma_{\text{руйн}}$ ) при формуванні шийки (протяжність етапу, пов'язаного з утворенням шийки, становить більше половини від пластичного деформування зразка:  $\varepsilon_{II} = 14\%$  при  $\Delta\sigma_{\text{руйн}} = 220$  МПа). Порівняльні оцінки для вихідного і термоцикльованого матеріалу за складовими відносного видовження (рівномірного видовження  $\varepsilon_I$  і видовження від початку утворення шийки до руйнування  $\varepsilon_{II}$ ) показали, що пластичність на стадії утворення шийки (нисхідна ділянка діаграми розтягування) мало залежить від стану металу. В той же час відмінності у  $\varepsilon_I$  для двох станів суттєві (9 і 16 % для вихідного і деградованого стану відповідно). Це можна розглядати, як підтвердження розпорошеної пошкодженості у деградованому металі ще до навантаження розтягуванням або її розвитку ще до досягнення границі міцності (висхідна ділянка діаграми розтягування), а збільшення рівномірного видовження відображає не тільки здатність матеріалу пластично деформуватися, але і розкриття існуючих дефектів. За появи шийки деформація локалізується в одному січенні, всередині зразка виникає сепаратна тріщина, яка і визначає всю механічну ситуацію на цій стадії деформування, тому попередньо сформована розпорошена пошкодженість вже її не визначає.

Термоциклічне напрацювання знижує як границю текучості, так і відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  (рис. 7, а), а це свідчить про деформаційне знеміцнення

матеріалу, пов'язане, очевидно, з процесом утворення мікро- і макропор, при злитті яких утворюється макротріщина.

Таблиця 1

Механічні характеристики зразків сталі 25X1M1Ф до і після термоциклування впродовж 2500 циклів

N <sub>ТЦ</sub>	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{руйн}$ , МПа	$\Delta\sigma_{деформ}$ , МПа	$\Delta\sigma_{руйн}$ , МПа	%			$\tilde{\psi}$
						$\epsilon_k$	$\epsilon_I$	$\epsilon_{II}$	
0	650	690	400	40	290	25	9	16	0,60
2500	520	580	360	60	220	30	16	14	0,51

Хоча зниження  $\sigma_{0,2}$ , як правило, супроводжується підвищенням  $K_{Ic}$ , для деградованої в модельних умовах сталі 25X1M1Ф спостерігали немонотонні зміни  $K_{Ic}$  впродовж циклування в діапазоні  $N = 1000 \dots 2500$  циклів (рис. 7, б). Зафіксовано незначне зростання статичної тріщиностійкості, проте, загалом можна вважати показник  $K_{Ic}$  нечутливим до деградаційних процесів, зумовлених термоциклуванням. Зазначимо, що ці процеси спричиняють пошкоджуваність металу (чинник зниження тріщиностійкості), а з іншого – зміну мікроструктури, пов'язану з формуванням на межах феритних зерен карбідів сферичної форми. Відомо, що карбіди такої геометрії порівняно з пластинчастими карбідами створюють меншу концентрацію напружень і це може позитивно відбитися на тріщиностійкості металу.

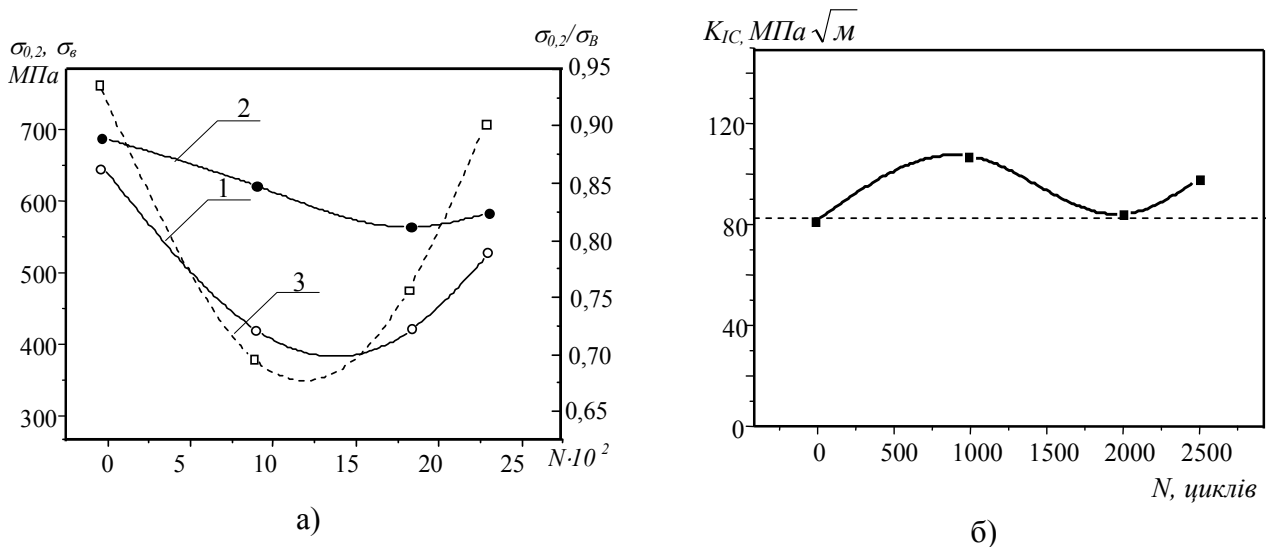


Рис. 7. Вплив ТЦН на характеристики ( $\sigma_{0,2}$  - 1,  $\sigma_B$  - 2,  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  - 3) - а і тріщиностійкість  $K_{Ic}$  - б

Отримані закономірності зміни твердості і мікротвердості зразків сталі 25X1M1Ф до і після термоциклування (табл. 2). Зазначимо, що твердість виявилася нечутливою до зміни стану металу внаслідок термоциклування зразків, тоді як мікротвердість суттєво зросла, особливо в приповерхневих шарах. Таким чином, зміцнення на мікрорівні супроводжується нечутливістю

на макрорівні, що можна пов'язати з проявом в останньому випадку пошкоженості.

Таблиця 2

Твердість і мікротвердість зразків сталі 25X1M1Ф до і після термоцикування впродовж 2500 циклів

Мікротвердість, /Твердість*	До випроб		Після випроб	
	Поверхня	Серцевина	Поверхня	Серцевина
Вихідний стан, $T = 20^{\circ}\text{C}$				
$H_{\mu}$ , МПа	1800		2600	2600
$HRB$	68		95 (за $\tilde{\psi} = 0,4$ )/105(за $\tilde{\psi} = 0,6$ )	
Після ТЦН, $T = 20^{\circ}\text{C}$				
$H_{\mu}$	2420	2250	—	
$HRB$ , МПа	68			

\* твердість зразка в початковому стані, виміряна при  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Термоцикування змінює тріщиностійкість сталі 25X1M1Ф, що відбивається на значеннях статичної в'язкості руйнування (рис. 7, б). Виявлено, що термоцикування впродовж  $N = 1000...2500$  циклів впливає на процес розпушування за наступного статичного розтягування. За зміною

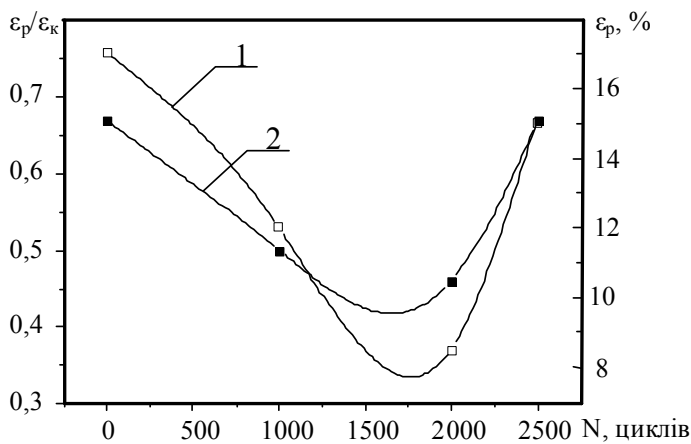


Рис. 8. Вплив термічного напрацювання на зміну деформації розпушення (1) і відносного видовження (2)

відносної деформації розпушення ( $\epsilon_p/\epsilon_k$ ) оцінено кінетику накопичення мікропошкод (рис. 8). Для зразків з напрацюванням 2500 термоциклів за загальної деформації 30 % величина деформації розпушення сягає 20%. Для зразків з напрацюванням 1000 та 2000 циклів за однакової повздовжньої деформації значення деформації розпушення знаходиться в

межах 17 % і 13 % відповідно. Загалом, отримано немонотонний характер залежності  $\epsilon_p/\epsilon_k - N$ , проте вона повністю відбиває закономірність зміни відносного видовження від кількості термоциклів.

Визначали питоми пошкодження термоциклованого матеріалу ролика МБЛЗ за варіацією ( $V$ ) розподілу  $Fe$  в сталі (М.Г. Чаусов, 1992). Деформування матеріалу спричиняє уявне зниження вмісту  $Fe$  внаслідок збільшення питомої густини дефектів.

Для термоциклованих зразків за досягнення  $\phi = 20$  % виявлено пік зростання неоднорідності  $Fe$  до  $V = 2,5$  %, після чого відбувається її падіння

нижче вихідного значення. Локальне підвищення  $V$  зумовлене стрімким зростанням пошкодженості структури, а наступне зниження – рівномірним накопиченням пошкод у термоциклованому матеріалі (рис. 9).

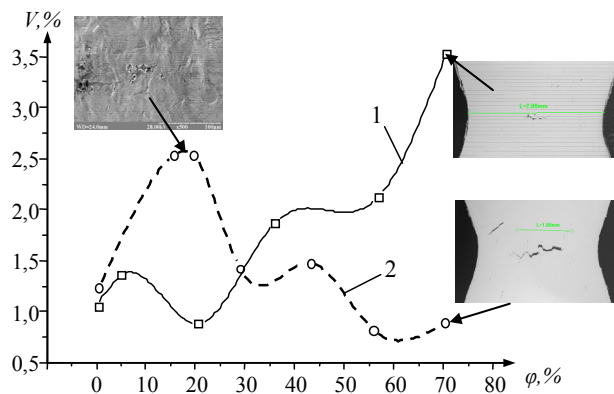


Рис. 9. Залежність коефіцієнту варіації  $Fe$  в сталі 25X1M1Ф від відносного звуження зразка у вихідному стані - 1 та після 2500 термоциклів – 2

У п'ятому розділі досліджено вплив множиного розтріскування поверхні ролика МБЛЗ на показники міцності та тріщиностійкості деградованої сталі. Досліджували призматичні темплети шириною 40 мм, товщиною 10 мм і висотою 60 мм вирізаних з поверхні експлуатованого ролика МБЛЗ. На поверхні зразків було 35 тріщин орієнтованих під кутом 60-90° до осі навантажування, при цьому відносна частка розтріскування складала  $F = 5...9$  %, а частка об'єднаних тріщин була в межах  $n_j = 25...35$  %. Порівнювали характеристики механічних властивостей матеріалу темплетів та циліндричних зразків діаметром 5 мм у вихідному стані. Діаграма деформування тріщинуватого матеріалу подана у відносних координатах  $\bar{\sigma} - \varepsilon$ , при цьому  $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_{max}$ , де  $\sigma_{max}$  – максимальне напруження, для розтрісканого темплету  $\sigma_{max} = 14,0$  МПа. У вихідному стані сталь 25X1M1Ф має умовну межу текучості  $\sigma_{0,2} = 650$  МПа та умовну межу міцності  $\sigma_B = 690$  МПа відповідно. Умовна межа міцності та текучості деградованого матеріалу становила  $\sigma_B = 580$  МПа та  $\sigma_{0,2} = 520$  МПа відповідно. Потрібно відмітити низку ділянок на діаграмі деформування, які відповідають розвитку пошкод та зміцненню матеріалу, (рис. 10,а). Це зумовлено наявністю у матеріалі розвинутої мережі дефектів. Точка 1 формально відповідає границі міцності, проте різкий спад кривої деформування до точки 2 відбиває не утворення шийки, а інтенсивний розвиток пошкодженості. За подальшого деформування проявляються процеси зміцнення, які ще повністю не вичерпали себе, цьому відповідає ділянка 2-3. Приведена діаграма розтягування матеріалу з розвинутою експлуатаційною пошкоджуваністю принципово відмінна від традиційних діаграм деформування пластичних сталей і це треба брати до уваги при аналізі характеристик міцності і пластичності сталей, експлуатованих в умовах термоциклування, і яким може бути властива пошкоджуваність.

З метою оцінювання тріщиностійкості матеріалу з множинними дефектами використано деформаційні та енергетичні підходи. Зокрема,

визначали кут розкриття вершини тріщини (СТОА)  $\psi$  під час навантажування зразка. Виявлено стадійність руйнування матеріалу. Старт макротріщини відбувається за  $\psi = 17^\circ$ . Подальше зниження СТОА зумовлено процесами макродеформації зразка і градієнтом зміщення локальних ділянок фронту втомної тріщини. Мінімальне значення кута розкриття  $\psi = 8 \pm 1^\circ$  відповідає ділянці 2 - 3 діаграми деформування.

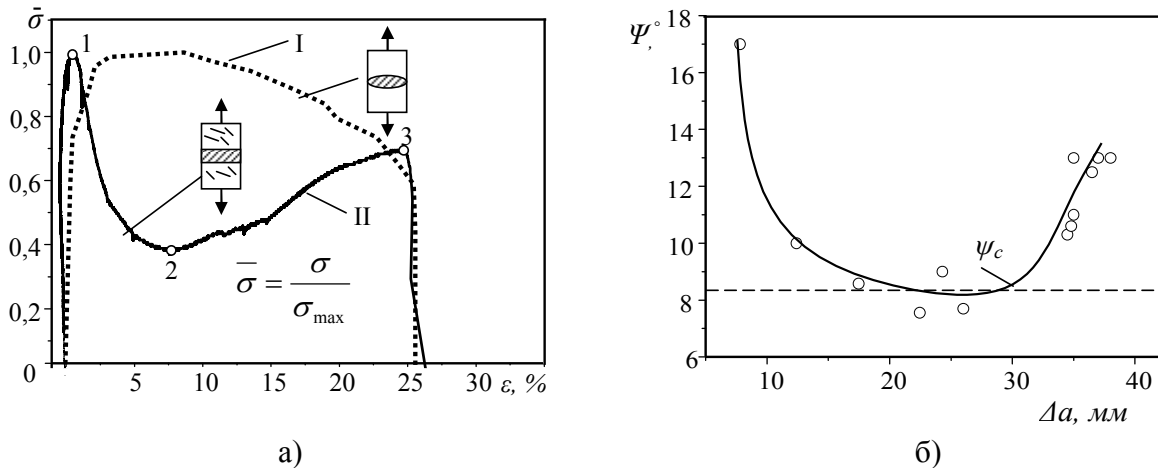


Рис. 10. Діаграми розтягування сталі 25X1M1Ф у вихідному стані (I) та з мережею тріщин (II) (а) ( $\sigma_{\max 1} = 690$  МПа;  $\sigma_{\max 2} = 14$  МПа) та залежність СТОА від підростання тріщини (б)

Подальше збільшення кута розкриття до  $\psi = 13^\circ$ , при значному прирості тріщини ( $\Delta a > 30$  мм) спричиняє її повторний старт і долом зразка, (рис. 10,б). Зазначимо, що руйнування фрагментів матеріалу з сіткою тріщин має низькоенергоємкий квазікрихкий характер, обумовлений злиттям окремих пошкод з макротріщиною. При цьому енерговитрати на збільшення площі магістрального дефекту довжиною 16 мм були значно меншими ( $J_{1c} = 15$  Дж/м<sup>2</sup>), ніж для вихідного матеріалу ( $J_{1c} = 90$  Дж/м<sup>2</sup>).

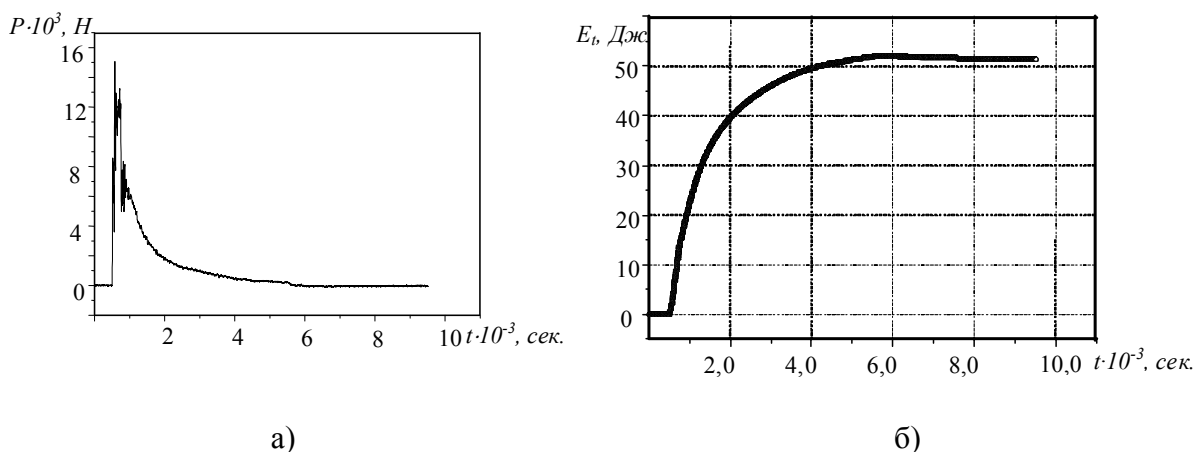


Рис. 11. Зміна руйнівного зусилля (а) та енергії руйнування експлуатованої сталі 25X1M1Ф (б) за ударних випроб  $T = 20^\circ\text{C}$

Експлуатований матеріал за статичного та динамічного навантаження руйнувався за змішаним механізмом відриву та локального зсуву. Випробування за динамічного навантаження проводили на копрі РКР-300, що



дозволяв записувати діаграму динамічного деформування та за результатами експерименту визначати загальну роботу ударного руйнування матеріалу  $E$ , як суму енергії зародження  $E_i$  та поширення тріщини  $E_p$ .

Діаграми динамічного деформування ролика ударним навантаженням у координатах «зусилля-час» та «витрати енергії-час» свідчать про повільне вичерпування енергії удару (рис. 11).

Енергетичні параметри динамічного руйнування сталі 25X1M1Ф узагальнено у табл. 3.

Таблиця 3

Енергоємність руйнування сталі 25X1M1Ф знятого з експлуатації ролика МБЛЗ

Сталь 25X1M1Ф	$E$ , Дж	$E_i$ , Дж	$E_p$ , Дж	Питома частка в'язкого зламу, %
У вихідному стані	102,0	35,1	67,2	52,1
Експлуатована	51,5	13,8	37,7	58,9

Енергія зародження тріщини для експлуатованого матеріалу знизилась у 2,5 рази, а енергія її поширення у 1,8 рази. Зменшення енергії зародження та поширення тріщини у експлуатованому матеріалі зумовлено утворенням мікротріщин розшарування та множинним пошкодженням матеріалу.

Виявлено збільшення відносного видовження ( $\varepsilon$ ) матеріалу ролика після експлуатації з 25% до 27% та зниження відносного звуження від 70% до 3%, рис. 12, а.

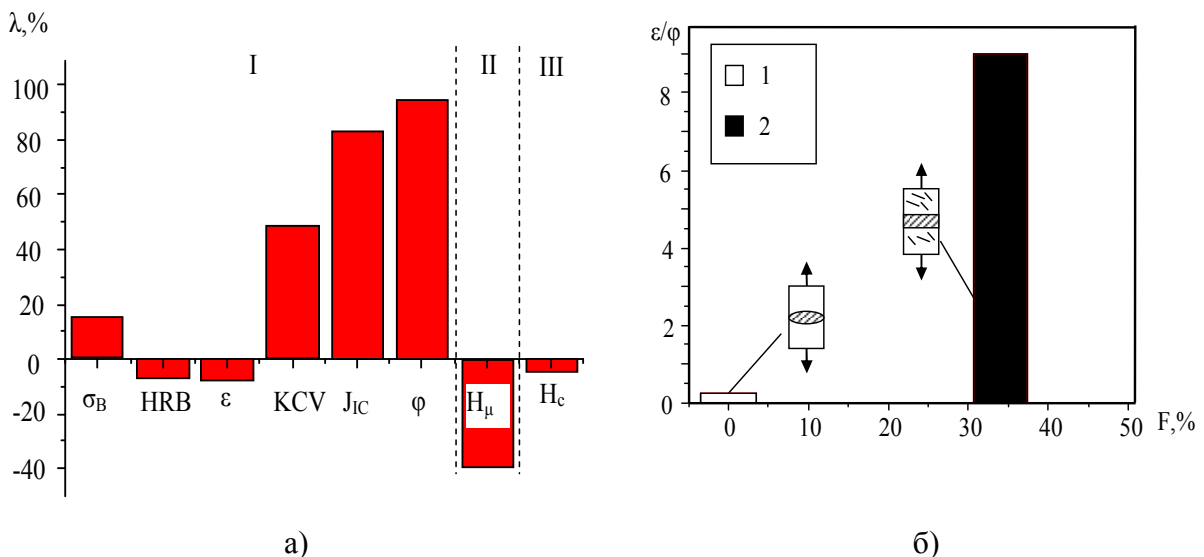


Рис. 12. Деградація механічних характеристик сталі 25X1M1Ф з множинними дефектами після експлуатації (а) та відношення  $\varepsilon/\phi$  від площі загального розтріскування  $F$  (б) для матеріалу ролика у вихідному стані (1) та після напрацювання (2) ( $\lambda_\phi = [(\phi^0 - \phi^{\text{дег}})/\phi^0] \times 100\%$ )

Твердість експлуатованого матеріалу (73 HRB) є вищою порівняно із вихідним станом (68 HRB). Виявлено зниження ударної в'язкості (KCV) з 1,25 у вихідному стані до 0,64 МДж/м<sup>2</sup>, більш виражене для шарів металу розташованих ближче до зовнішньої поверхні ролика.

Зазначимо певні особливості механічної поведінки експлуатованої і не експлуатованої сталі, які отримано з порівняльного аналізу кривих розтягування. По-перше, протилежний характер зміни твердості і міцності: твердість підвищується, що свідчить про деформаційне зміцнення матеріалу впродовж експлуатації, а міцність падає, що з формального погляду вказує на знеміцнення матеріалу. Проте, таке протиріччя усувається, якщо зниження міцності спричинене множинною пошкодженістю металу, як до проведення випроб (експлуатаційна пошкодженість), так і в часі навантаження до досягнення межі міцності. Таким чином, границя міцності визначається не умовою появи шийки (вичерпуванням можливості рівномірної пластичної деформації), а інтенсивним розтріскуванням, яке, подібно утворенню шийки, понижує нетто-січення зразка.

По-друге, встановлена вища чутливість мікротвердості у порівнянні з твердістю до експлуатаційної деградації сталі може бути теж пов'язана з розвитком множинної пошкодженості. Процедура вимірів мікротвердості дає змогу уникнути місця для заміру, яке би охоплювало металографічно видимий мікродефект. Тому загалом можна вважати, що заміри мікротвердості відбивають здатність металу до деформування. З іншого боку, деформування металу при замірах твердості охоплює значні ділянки металу навколо індентора, тому вона може включати і мікродефекти, які будуть знижувати рівень твердості. Таким чином, зміну здатності металу до деформування внаслідок тривалої експлуатації слід оцінювати за зміною мікротвердості, а різницю у чутливості до деградації металу показників твердості і мікротвердості слід віднести до впливу множинної пошкодженості.

По-третє, протилежний характер зміни відносного видовження і відносного звуження (рис. 12. б), що також свідчить про інтенсивну розпорошену пошкодженість експлуатованого металу. Зниження відносного звуження вказує на експлуатаційне окрихчення металу, в тому числі внаслідок деформаційного зміцнення, показником якого може слугувати збільшення твердості і мікротвердості. В той же час підвищення відносного видовження пов'язане з розкриттям множинних дефектів, тобто не відбиває здатності металу до пластичного деформування. Це вказує на необхідність критичного ставлення до відносного видовження, як показника пластичності експлуатованого металу, якщо у ньому допускається множинна пошкоджуваність.

## ВИСНОВКИ

У дисертації запропоновано теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі, що полягає в оцінюванні закономірностей пошкоджуваності,

деформування і руйнування сталі 25X1M1Ф у вихідному та деградованому у лабораторних і експлуатаційних умовах станах та розробленні методики оцінювання тримкості тіл із тріщиноподібними дефектами.

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

2. Поглиблено вивчено поверхню ролика МБЛЗ, експлуатаційно пошкоджену множинними дефектами, що дозволило уточнити геометрію відокремлених та об'єднаних втомних тріщин (відношення глибини до довжини тріщин  $a/c = 0,52 \pm 0,04$ ), гістограми їх розподілу. Експлуатаційне окиснення не впливає на кількість ідентифікованих тріщин на поверхні і на глибині більше 2,0 мм. Ремонтне перешліфовування ролика на глибину 0,4... 2,0 мм із неповним видаленням окисненого шару знижує кількість ідентифікованих тріщин у півтора рази. Виявлення цих закономірностей дозволило обґрунтувати межі застосування автоматизованого методу аналізу цифрового зображення для окисненої поверхні ролика МБЛЗ. На ідентифікацію глибших тріщин окиснення поверхні не впливає.

3. Розроблено метод оцінювання пошкодженості поверхні, який ґрунтується на фізико-хімічному аналізі локальних ділянок матеріалу (*Патент України № 42189*) та метод оцінювання впливу пластичної деформації на розпорошені пошкодження матеріалу (*Патент України № 45972*), що дозволяють оцінити поточне пошкодження матеріалу під час деформування розтягуванням.

4. Виявлено основні закономірності впливу термоциклічного напруцювання на деформування і руйнування сталі 25X1M1Ф за методом повних діаграм. Термоцикування знижує умовну межу текучості і відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  сталі 25X1M1Ф, збільшує відносне видовження, в основному за рахунок збільшення складової рівномірної деформації, порівняно із вихідним станом. Статична тріщиностійкість не чутлива до термоцикування.

5. Досліджено вплив експлуатаційного напруцювання на механічні характеристики сталі 25X1M1Ф. Виявлено особливості механічної поведінки експлуатованого металу, які вказують на розвиток у ньому множинної пошкодженості: вища чутливість до деградації металу мікротвердості порівняно з твердістю; одночасне підвищення твердості й мікротвердості, з одного боку, а з іншого – зниження міцності; протилежний характер зміни відносного видовження і відносного звуження.

6. Обґрунтовано характеристики механічних властивостей, найбільш чутливі до експлуатаційної деградації матеріалу в умовах термовтоми, що супроводжується інтенсивною пошкодженістю. Для експлуатованої сталі зменшується ударна в'язкість у 2 рази та підвищується мікротвердість в 1,4 рази проти матеріалу у вихідному стані. Виявлену різницю у чутливості до

деградації металу показників твердості і мікротвердості слід віднести до впливу множинної пошкодженості, а зміну здатності металу до деформування внаслідок тривалої експлуатації слід оцінювати за зміною мікротвердості.

7. Запропоновано та обґрунтовано можливість використання енергетичного ( $J$ -інтеграл) та деформаційного (СТОА) підходів до оцінювання статичної тріщиностійкості матеріалів з множинними дефектами, які дозволяють врахувати вплив пошкодження на параметри механіки руйнування.

### Перелік опублікованих праць

1. Ясній П.В. Автоматизований аналіз поверхневих тріщин у конструкційних елементах / П.В. Ясній, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак // Фізико - хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 6. – С. 83-88.
2. Ясній П.В. Деградація структури і пошкодження сіткою тріщин сталі металургійного обладнання / П.В. Ясній, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак // Фізико - хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 6. – С. 40-44.
3. Марущак П.О. Вплив термоциклічного напрацювання на деградацію властивостей теплотривкої сталі / П.О. Марущак, В.Б. Гладько, Р.Т. Біщак, А.П. Пилипенко // Фізико - хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 1. – С. 90-95.
4. Ясній П.В. Високотемпературна корозія і розтріскування поверхні елементів металургійного обладнання / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Р.Т. Біщак // Фізико - хімічна механіка матеріалів (Спец. вип. №8). – 2010. – С. 110-114.
5. Марущак П.О. Вплив температури на ударну вязкість та динамічну тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, В. Гліха, А.П. Сорочак // Фізико - хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 4. – С. 118-121.
6. Марущак П.О. Аналіз розтріскування поверхні і методика оцінки термовтоми матеріалів / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту. – 2008. – Т. 13. – № 1. – С. 33-37.
7. Марущак П.О. Зміна деформівної здатності матеріалу після термоциклювання / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, А.П. Пилипенко, В.Б. Гладько // Обробка матеріалів тиском. Збірник наукових праць. – 2009. – № 1 (20). – С. 156-160.
8. Марущак П.О. Кінетика руйнування теплостійкої сталі після термоциклічного напрацювання / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, О.П. Ясній, А.П. Пилипенко // Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – 2008. – Т. 2. – № 75. – С. 493-497.
9. Ясній П.В. Масштабные уровни деформации и разрушения и механические свойства стали 25Х1М1Ф до и после неизотермического нагружения / П.В. Ясній, П.О. Марущак, С.В. Панин, Р.Т. Бищак // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. - № 2. – С. 87-96.
10. Влияние температуры на характер ударного разрушения феррито-перлитной стали 25Х1М1Ф / П.В. Ясній, П.О. Марущак, С.В. Панин, Р.Т. Бищак, Т. Вухерер, Б.Б. Овечкин, В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. - № 4. – С. 73-84.

11. *Damage and fracture of heat resistance steel under cyclic thermal loading* / P. Yasniy, P. Maruschak, R. Bishchak, V. Hlado, A. Pylypenko // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2009. – Vol 52. – P. 22-25.
12. *Патент України № 40788* Спосіб оцінки пошкоджуваності поверхні тріщинами термічної втоми / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак (Україна). – Заявл. 24.11.2008; Опубл. 27.04.2009. – Бюл. №8.
13. *Патент України № 42189* Спосіб ідентифікації корозійно-утомної тріщини / Марущак П.О., Біщак Р.Т., Коноваленко І.В. / Заявлено 02.02.2009; Опубліковано 25.06.2009. – Бюл. №12.
14. *Патент України № 45972* Спосіб оцінювання деградації матеріалу / Марущак П.О., Біщак Р.Т. / Заявлено 23.02.2009; Опубліковано 10.12.2009. – Бюл. №23.
15. *Марущак П.О.* Вплив попереднього термоциклічного напруження на закономірності деформування та руйнування сталі 25Х1М1Ф / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, А. П. Сорочак // *Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 9-й международной научно-технической конференции, 25-29 мая 2009г., г. Ялта.* – Киев: АТМ Украины, 2009. – С. 136-138.
16. *Біщак Р.Т.* Автоматизоване діагностування множинного розтріскування / Р.Т. Біщак, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко // *Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету.* – Тернопіль, 2009. – С. 197.
17. *Марущак П.О.* Влияние температуры на закономерности деформирования и разрушения теплостойких сталей 25Х1М1Ф / П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, А. П. Сорочак // *Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials – DFMN 2009 / Book of articles.* ed. by O.A. Bannykh et. al. – Moscow: Imerkontakt Nauka, 2009 – P. 76-77.
18. *Марущак П.О.* Дослідження геометричних параметрів сітки тріщин термічної втоми / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Біщак, О.П. Ясній // *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій. Тези доп. міжн. науково-техн. конф. пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського – Дніпропетровськ, 2007.* – С. 53-54.
19. *Yasniy P.V.* Multiple cracks on continuous caster rolls surface: A three-dimensional view / P.V. Yasniy, P.O. Maruschak, I.V. Konovalenko, V. Gliha, T. Vuherer, R.T. Bishchak // *Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. conf. «Processing and Structure of Materials» (May 27-29), Palić, Serbia.* – 2010. – P. 7-12.

## АНОТАЦІЯ

**Біщак Р.Т.** Оцінювання зародження та розвитку пошкодженості в теплостійкій сталі за термоциклічного навантаження. – 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, м. Тернопіль, 2010.

Дисертацію присвячено оцінюванню пошкодженості сталі роликів МБЛЗ та закономірностей її пластичного деформування з урахуванням множинного розтріскування.

Встановлено основні закономірності впливу термоциклічного напруження на пошкоджуваність, руйнування сталі 25Х1М1Ф та запропоновано схеми деформування матеріалу на різних структурних рівнях.

Вперше описано структурні рівні деформування і руйнування сталі 25Х1М1Ф. Встановлено основні закономірності впливу термоциклічного напруження на мікро-, мезо- і макрорівнях, які дозволяють оцінити вплив термоциклування на статичну міцність сталі 25Х1М1Ф.

Проаналізовано механізми високотемпературного поширення втомних тріщин у сталі 25Х1М1Ф. Тріщини поширюються за змішаним механізмом відриву та локального зсуву матеріалу. Досліджено кількісні показники множинного втомного розтріскування ролика МБЛЗ за різної глибини від зовнішньої поверхні та вплив окиснення поверхні на кількість ідентифікованих тріщин. Виявлено зниження їх кількості на глибині до 2,0 мм у 1,5 рази.

**Ключові слова:** пластична деформація, міцність, пластичність, температура, мікромеханізми руйнування.

**Бицак Р.Т** Оценка зарождения и развития поврежденности в теплостойкой стали при термоциклическом нагружении. – 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, г. Тернополь, 2010.

Диссертация посвящена исследованию поврежденности стали роликов МНЛЗ и закономерностей ее пластического деформирования с учетом множественного растрескивания.

В работе исследовано деформационное поведение и закономерности разрушения стали 25Х1М1Ф в исходном состоянии и после термоциклической наработки. Установлен эффект снижения условной границы текучести, возрастание относительного удлинение, в основном за счет увеличения составляющей равномерной деформации. Статическая трещиностойкость оказалась слабо чувствительной к изменению состояния металла. Указанные особенности являются следствием изменений в структуре металла и его поврежденности.

Установлены основные закономерности влияния термоциклической наработки на микро-, мезо- и макроуровне, которые позволяет сформулировать практические рекомендации по учету влияния термоциклирования на несущую способность и статическую трещиностойкость стали 25Х1М1Ф.

Изучено влияние эксплуатационной термомеханической нагрузки на изменения основных механических характеристик стали 25Х1М1Ф. Установлено три особенности механического поведения эксплуатируемого

металла, которые указывают на развитие в нем множественной поврежденности: более высокая чувствительность к деградации металла микротвердости по сравнению с твердостью; одновременное повышение твердости и микротвердости, с одной стороны, а с другой - снижение прочности; противоположный характер изменения относительного удлинения и относительного сужения.

Проанализированы механизмы высокотемпературного роста усталостных трещин в стали 25Х1М1Ф. Согласно данным фрактографического анализа следует, что магистральная трещина зарождается во внешних слоях материала, развиваясь по механизму вязкого сдвига и отрыва. При этом характер разрушения материала определяется интенсивностью внутризеренной деформации и объединениям пор.

Исследованы количественные показатели множественного усталостного растрескивания ролика МНЛЗ на разной глубине от внешней поверхности и влияние окисления поверхности на параметры идентифицированных трещин. Выявлено снижение их количества на глубине до 2,0 мм в 1,5 раза.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, прочность, поврежденность, пластичность, температура, разрушения.

**Bishchak R. T.** Evaluation of the damage initiation and development in heat resistant steel during thermal cycle loading. – **Manuscript.**

Dissertation for the candidate degree in engineering in speciality 01.02.04— "Mechanics of deformable solids". — Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University Ternopil, 2010.

The thesis deals with the investigation of steel damage 25Kh1M1F and laws of its plastic deformation with operating multiple cracking.

The basic laws of the thermo cyclic loading influence on the damage, fracture of 25Kh1M1F steel and scheme of material deformation at different structural levels have been established.

The basic laws of the influence thermo cyclic loading at micro -, meso - and macro levels have been investigated and estimated the effect of thermal cycling on the static strength of 25Kh1M1F steel.

The mechanisms of high temperature fatigue crack growth in the steel 25Kh1M1F have been analyzed. Cracks are distributed by the mixed mechanism of separation and displacement of local material. The quantitative indices of multiple fatigue roller cracking at different depths from the outer surface and the effect of surface oxidation on the number of identified cracks have been investigated. Their decrease in 1,5 times have been detected at depth range of 2,0 mm.

**Key words:** plastic deformation, strength, plasticity, temperature, fracture.