

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

БАРАН ДЕНИС ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 621.921

**ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТЕМПЕРАТУР НА МІЦНІСТЬ
І ЦИКЛІЧНУ ТРИЩИНІСТІЙКІСТЬ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ
МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя

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

Офіційні опоненти: **Ігнатович Сергій Ромуальдович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструкцій літальних апаратів, Національний авіаційний університет України, м. Київ

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

Захист відбудеться ” 19 ” вересня 2014р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

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

Автореферат розісланий ” 15 ” серпня 2014р

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Шелестовський

Формат 60×90 Папір ксероксний.
Обл. вид. арк. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 2391

Видавництво Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001
E-mail: vydavnytstvo@tu.edu.te.ua

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність Більшість тримких конструкцій металургійного обладнання, зокрема, валики вальцювальних станів, ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), тривалий час експлуатується з тріщинуватими дефектами. Високотемпературне циклічне деформування є однією з основних причин зародження і розвитку в матеріалі тріщин. Циклічна зміна навантажування за низькочастотного обертання погіршує фізико-механічні характеристики матеріалу, пришвидшує ріст тріщиноподібних дефектів. Вплив високих температур на закономірності експлуатаційного деформування і руйнування теплостійких сталей металургійного обладнання досліджено у працях В.М. Нісковських, Л.В. Буланова, Л.С. Лепіхова, Н.В. Мазура, Н.Н. Огаркова, П.О. Марущака, В.В. Яковлева, Р.Т. Біщака, В.А. Піксаєва, К.Н. Вдовіна, А.Н. Смірнова, В.Е. Хребто, J. Brezinová, M. Du Toit, A. Sanz та ін. Виявлено основні закономірності температурних режимів поширення втомних тріщин і розроблено діагностичні 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 механізми високотемпературної циклічної тріщиностійкості.

В працях О.Є. Андрейківа, Г.М. Никифорчина, О.В. Носоченка, О.П. Осташа, В.В. Панасюка, В.Є. Паніна, В.Р. Скальського, В.Т. Троценка, М.Г. Чаусова, П.В. Яснія досліджено основні механізми статичного та циклічного деформування матеріалів на макро і мікрорівнях. Проте, потребує подальшого дослідження вплив високих температур на закономірності росту втомних тріщин на різних масштабних рівнях. Тому актуальними є:

- дослідження міцності і довговічності сталей металургійного обладнання;
- дослідження впливу температури на швидкість росту тріщин;
- прогнозування залишкової довговічності великогабаритних конструкцій.

Таким чином, актуальною задачею є комплексне дослідження впливу температури і частот навантаження на циклічну тріщиностійкість і мікромеханізми поширення втомних тріщин в теплостійких сталях і вдосконалення методики оцінювання довговічності роликів МБЛЗ з тріщинами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, які склали основу дисертації, отримані здобувачем, як виконавцем теми “Розробка методів прогнозування довговічності металургійного обладнання в умовах високотемпературної втоми”, № державної реєстрації 0107U006982 (2007-2008 рр.), які виконувались у Тернопільському державному технічному університеті імені Івана Пулюя за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявлення основних закономірностей впливу високих температур на циклічну тріщиностійкість теплостійкої сталі 25X1M1Ф і уточнення методики прогнозування залишкової

довговічності ролика МБЛЗ. Для досягнення вказаної мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити методику дослідження температурних полів;
- дослідити кінетику температурних полів і обґрунтувати режими температурно-силових випробувань на циклічну тріщиностійкість;
- дослідити вплив температури і частоти навантаження на швидкість росту втомних тріщин;
- дослідити мікромеханізми статичного, циклічного руйнування сталі 25Х1М1Ф за експлуатаційних температур;
- вдосконалити методику прогнозування залишкової довговічності з напівеліптичним тріщиноподібним дефектом.

Об'єкт дослідження - циклічна тріщиностійкість теплостійкої сталі 25Х1М1Ф.

Предмет дослідження – залишковий ресурс ролика МБЛЗ з урахуванням впливу температури.

Методи дослідження - для експериментальних досліджень використано силові критерії механіки руйнування. Експериментальний метод випробувань, ґрунтується на методі тензометрії. Теоретичні дослідження проводили з використанням положень механіки руйнування деформівного твердого тіла.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено методику дослідження температурних полів (*Патент України, №65053*), спроектовано та виготовлено оригінальну фізичну модель ролика МБЛЗ, яка дозволяє вивчити вплив режимів лиття на параметри температурних полів у роликах МБЛЗ на різних відстанях від поверхні.

- встановлено механізми високотемпературної втоми матеріалів роликів МБЛЗ за експлуатаційних умов, обґрунтовано режими температурно-силових випробувань на циклічну тріщиностійкість, виявлено основні закономірності впливу температури на статичну міцність та ударну в'язкість теплостійкої сталі 25Х1М1Ф. Виявлено що енергія зародження тріщини при 375 °С зростає в 1,6 рази порівнянні з 20 °С. При 600 °С енергія зародження тріщини знижується в 1,2 рази порівняно з результатами випробувань при 20 °С.

- виявлено основні закономірності поширення втомної тріщини у сталі 25Х1М1Ф при температурах 20 °С, 375 °С та 600 °С зокрема в діапазоні значень $18,0 \leq K_{max} \leq 20,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість РВТ при 375°С в 3 рази вища, а при 600 °С в 8 раз вища чим при 20 °С.

- встановлено, що за частот навантажування 0,1 Гц та 1,0 Гц за $K_{max} < 38 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ сталь є нечутливою до частоти навантажування. Підвищення частоти навантажування в діапазоні $K_{max} = 40 \dots 80 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ знижує швидкість поширення тріщини у 2,0...4,0 рази.

- виявлено основні закономірності впливу частоти та форми циклу навантажування на мікрошвидкість росту втомної тріщини (крок втомних борозенок), що дозволяє співставляти макро- та мікрошвидкість росту втомної тріщини та проводити аналіз причин непрогнозованого руйнування металургійного обладнання.

- вдосконалено методику прогнозування залишкової довговічності ролика МБЛЗ, яка ґрунтується на урахуванні зміни фронту тріщини і напружено-деформованого стану конструкції і дозволяє оцінювати довговічність ролика з урахуванням частоти експлуатаційного навантажування.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів в умовах втоми за високих температур, різної частоти навантажування. Отримані результати дають змогу прогнозувати залишковий ресурс роликів МБЛЗ з півеліптичним тріщиноподібним дефектом.

Результати дисертаційної роботи в частині методики оцінювання впливу високих температур та ударну в'язкість та циклічну тріщиностійкість металургійного обладнання використовуються у ВАТ "Булат", (Дов. № 32 від 21.03.2014).

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення дисертації автор отримав самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: одержані закономірності високотемпературних пошкоджень роликів МБЛЗ [1, 4], встановлені закономірності впливу температур на міцність, ударні в'язкість та циклічну тріщиностійкість теплостійкої сталі 25Х1М1Ф [2, 3, 5, 6, 11], одержані закономірності впливу низькочастотного навантажування на тріщиностійкість теплостійкої сталі [7, 13]; мікромеханізми руйнування сталі за експлуатаційних температур [8, 9]; оцінювання залишкового ресурсу [8, 9, 10, 11, 12] та тріщиностійкості сталей роликів МБЛЗ [14-17].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на низці міжнародних конференцій, зокрема: «Сучасні проблеми механіки», до 100-річчя М.П. Шереметьєва, (Львів, 2005), «Современные проблемы машиноведения», научные чтения, посв. П.О. Сухому (Гомель, 2006), «Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні» (Київ, 2007), «Фізика конденсованих систем та прикладне матеріалознавство» (Львів, 2007), Deformations & Fracture of Materials and Nanomaterials DFMN2007 (Moscow, 2007), «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2010), Наук.-техн. конф. яка присвячена 50-ти річчю ТНТУ та 165-ти річчю з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 2010), «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (Вінниця, 2011), Int. Conf. «Mechanika'2011» (Kaunas, Lithuania, 2011), 11-ой межд. научно-техн. конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Ялта, 2011), В повному обсязі робота доповідалась і обговорювалась на розширеному тематичному семінарі Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» семінарі відділу корозійно-водневої деградації та захисту матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 20 друкованих працях, з них 7 – статей у фахових наукових журналах і збірниках [1-7], 2 – статті у закордонних виданнях внесених до науково метричної бази

Scopus [8, 9], 8 – тез та праць у збірниках наукових конференцій [10-18], 2 – патенти [19, 20].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 132 сторінок, в т. ч. 48 рисунки, 9 таблиць та список використаних літературних джерел із 161 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі проаналізовано літературні джерела по тематиці близькій даній роботі. Зокрема впливу температури на властивості конструкційних матеріалів за квазістатичного та циклічного навантаження; розглянуто основні фізичні закономірності руйнування матеріалів за високих температур. На підставі огляду літературних джерел сформульовано основні напрямки досліджень.

В другому розділі дисертаційної роботи описано розроблені методики механічних випробувань, які забезпечують автоматизацію експерименту і

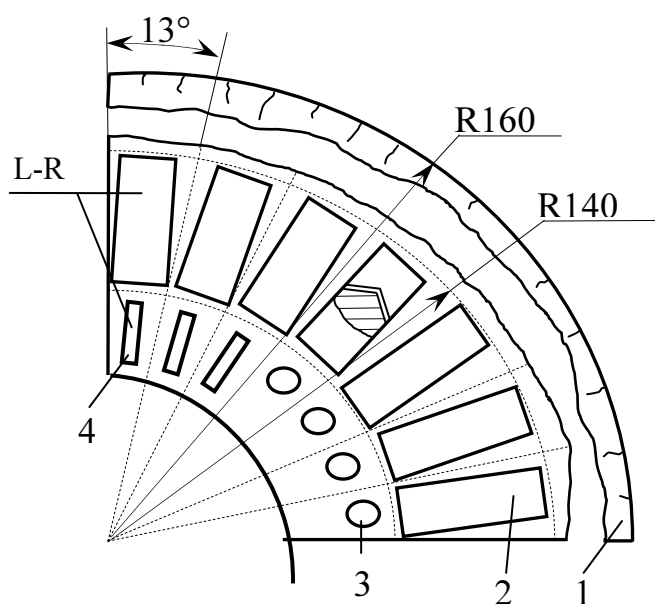


Рис.1 - Схема вирізання компактних зразків із ролика МБЛЗ

- 1-поверхневий пошкоджений шар;
- 2-компактні зразки
- 3-циліндричні зразки
- 4-гладкі зразки

реєстрацію вимірювальних величин з їх подальшою обробкою. Випробування проводили на сервогідроліній машині типу СТМ-100, керованій за допомогою ПК, через контролер моделі В1-07-005 (Індія). Досліджували мало вуглецеву теплостійку сталь 25Х1М1Ф. Зразки для випробування на статичну та циклічну тріщиностійкість вирізали з внутрішнього непошкодженого шару ролика що експлуатувався на горизонтальній ділянці МБЛЗ на ММК ім. Ілліча протягом 4500 плавок без переточування рис. 1. Вирізання зразків проводили виходячи з умов моделювання поширення тріщини в ролик МБЛЗ під час експлуатації.

Механічні властивості визначали за одновісного розтягу гладких циліндричних зразків діаметром 5 мм.

Ударну в'язкість визначали на зразках Шарпі розмірами $10 \times 10 \times 55$ мм з V -подібним надрізом на інструментованому копрі $RKP-300$ з енергією удару 300 Дж. Під час випробувань реєстрували діаграми навантаження в координатах „навантаження - час” і „навантаження - прогин зразка”.

$$KCV = A/F \quad (1)$$

де A - робота руйнування зразка; F - площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу.

Компоненти роботи руйнування A а саме роботу зародження A_i і поширення тріщин A_p розглядали згідно ISO 14556.

$$A = A_i + A_p \quad (2)$$

Було спроектовано і виготовлено оригінальний стенд (Патент України №65053) для дослідження температурних полів в моделі ролика МБЛЗ на поверхні і в тілі ролика на глибині $0,17R$ та $0,5R$ радіуса. рис. 2. Розміри моделі ролика менші в 5 разів від реальної конструкції МБЛЗ.

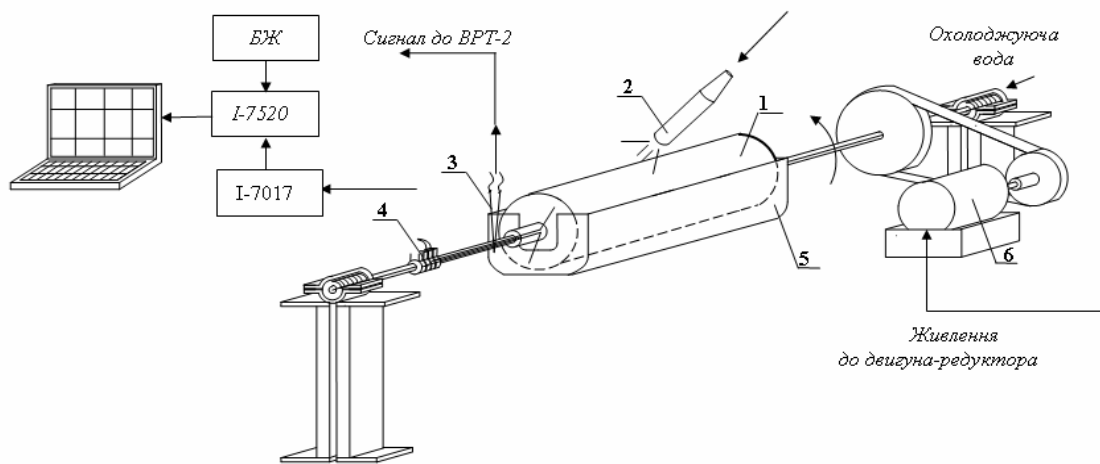


Рис. 2. Схема фізичної моделі високотемпературної роботи ролика МБЛЗ
1 – модель ролика; 2 – зовнішнє джерело нагріву; 3 – хромель-алюмелеві термопари; 4 – порожнистий вал; 5 – охолоджуюча ємність; 6 – двигун – редуктор

Досліджено кінетику зміни температурних полів по глибині ролика за різної глибини тріщиноподібного дефекту, що дозволило обґрунтувати вибір температури випробувань циклічної тріщиностійкості і моделювання росту втомних тріщин рис. 3.

Одержано записи хромель - алюмелевих термопар, встановлених на відстані ($h = 0; 5,0, 15,0$ мм рис. 3) від поверхні ролика. Температуру контролювали візуально, за показниками цифрового вольтметра. Охолодження ролика здійснювали зануренням нижньої частини ролика в ємність з проточною холодною водою.

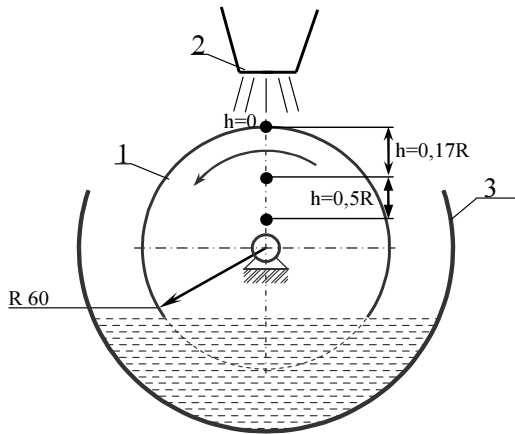


Рис. 3 Схема вимірювання температурних полів модельного ролика (Патент України, №65053)

- 1 - точки вимірювання температури;
- 2 - зовнішнє джерело нагрівання;
- 3 - водоохолоджуюча ємність

Пошкодженість деформованих матеріалів оцінювали методами трансмісійної мікроскопії. Вирізались відповідні зразки які встановлювались у трансмісійному просвічувальному мікроскопі і оцінювалася густина дислокацій, яка є характерною величиною накопичення пошкоджень матеріалів. Додатково проводились випробування по методу запропонованому А. О. Лебедєвим (L-M метод), який дозволяє за статистичним розкидом твердості і мікротвердості оцінити накопичену дефектність матеріалу. Фізичне обґрунтування L-M методу полягає в тому, що розкид по крайній мірі механічних характеристик присутній для всіх металів але степінь їх розсіяння залежить від структурного стану матеріалу. Ця методика дає більше інформації про пошкодження матеріалу, чим усереднене значення твердості.

В третьому розділі оцінювали вплив температури випробувань на мікро-, мезо- та макромеханізми деформування і руйнування зразків теплостійкої сталі 25X1M1Ф. Виявлено вплив високих температур на механічні властивості сталі 25X1M1Ф, рис. 4.

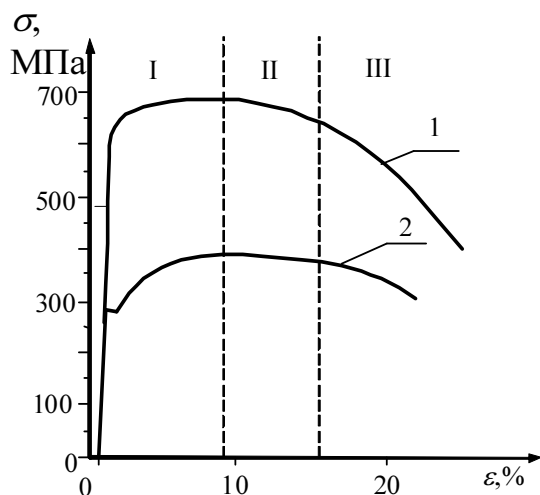


Рис. 4 Діаграми розтягу сталі 25X1M1Ф за 20°C (1) і 600°C (2)

Виявлено, що стадія пластичного деформування I, має місце до досягнення межі міцності. Для зразків у вихідному стані характерне вкрай низьке деформаційне зміцнення. Довжина СПД-I становить близько $\epsilon_I = 9\%$. Стадія пластичного деформування-II (СПД-II) довжиною $\epsilon_{II} = 16\%$ (рис. 4 крива 1) описує розвиток пластичного деформування на стадії макролокалізації (або шийкоутворення). У цьому випадку локалізація деформацій у шийці супроводжується формуванням мікропор (пов'язаних з дією ротаційних мод

деформування), еволюція яких спричиняє заключну стадію-III процесу - руйнування (СР-III). Фізичні механізми пороутворення підтверджуються раніше проведеними дослідженнями, а також літературними даними.

Виявлено, що за однакової величини звуження в шийці, зокрема, при $\psi=0,4$ твердість матеріалу випробуваного при 600°C , значно менша, ніж при 20° , що пов'язано з інтенсифікацією дифузійних процесів за високої температури випробувань.

Оскільки ролики МБЛЗ зазнають динамічних ударів під час проходження захолодженого слябу проведені випробування на ударну в'язкість за температур 20°C , 375°C , 600°C .

Виявлено, що енергія зародження тріщини (A_z) при 375°C зростає в 1,6 рази, що зумовлено збільшенням в'язкості матеріалу і значними енергетичними затратами на руйнування. При 600°C енергія зародження тріщини знижується в 1,2 рази порівняно з результатами випробувань при 20°C . Одержані результати узагальнені в табл. 1.

Табл. 1. Енергоемність руйнування і ударна в'язкість сталі 25X1M1Ф

Температура випробувань, $^{\circ}\text{C}$	$A_z, \text{Дж}$	$A_p, \text{Дж}$	$A, \text{Дж}$	$KCV, \text{МДж/м}^2$
20	33,5	65,8	99,3	1,24
375	54,65	124,6	180,0	2,33
600	39,95	71,35	111,3	1,39

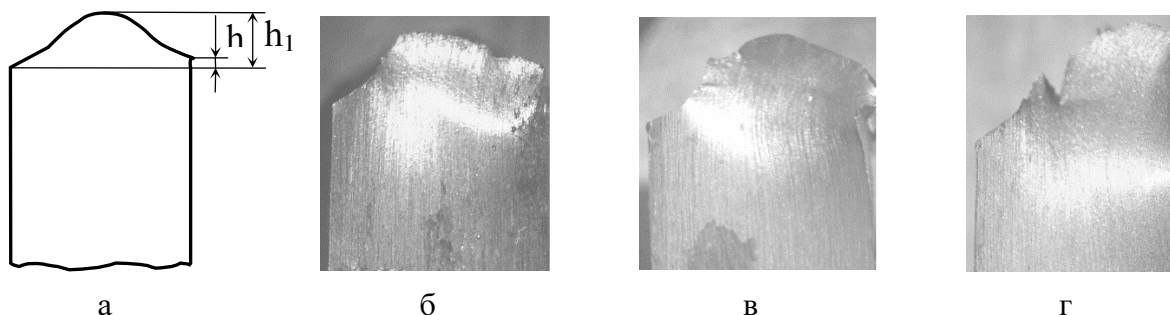


Рис. 5. Зображення губ зрізу зразків Шарпі випробуваних за температури 20°C (б), 375°C (в) та 600°C (г)

Дослідження зламів зразків Шарпі (за методом *I. Yamamoto та ін, 2004*) виявили зміну форми губ зсуву утворених на їх бічних поверхнях. При 20°C губи зсуву слабо розвинуті, рис. 5б.

Із збільшенням температури збільшується кут повороту губ зсуву відносно повздовжньої осі зразка. Форми губ зсуву при 375°C та при 600°C є подібними, проте із зростанням температури збільшується їх висота h , з'являються локальні надриви матеріалу, рис. 5.

В четвертому розділі моделювали зупинку процесу розливання до 5,0 хвилини. Виявлено, що після запуску розігрітого до квазістаціонарного стану ролика відбувається незначне зниження температури циклу з її подальшою стабілізацією, протягом 4-5 обертів. У цілому, дані експерименту ($t_{max} = 600^{\circ}\text{C}$, $t_{min} = 90^{\circ}\text{C}$) близькі до експлуатаційних ($t_{max} = 580^{\circ}\text{C}$, $t_{min} = 130^{\circ}\text{C}$). Побудовані

графіки залежності осесиметричної складової температурного поля ролика від часу обертання, рис. 5б.

Обертання ролика спричиняє виникнення періодичної та неперіодичної складової температурного поля, рис. 6. Неперіодична складова поля температур виникає лише за перехідних режимів.

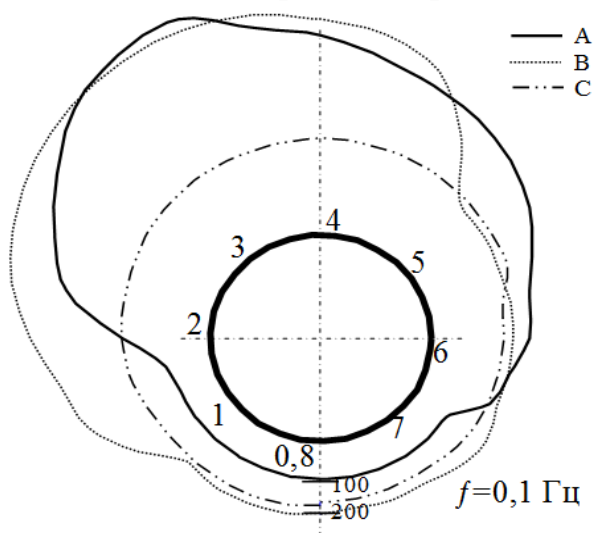


Рис. 6. Температурні поля ролика МБЛЗ: А – на поверхні ролика 0 мм; В – на відстані 5,0 мм; С – на відстані 15,0 мм відповідно від робочої поверхні, після зупинки через 5 хвилин (Патент України №66061).

Для поверхні характерний «гострий» термоцикл трикутної форми (рис. 7а), із збільшенням відстані від поверхні він набуває «згладженої» форми.

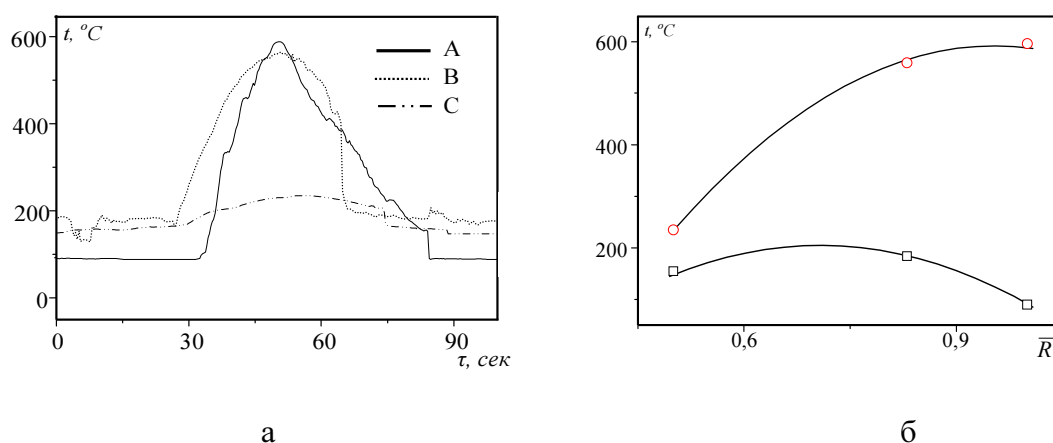


Рис. 7. Термоцикли у бочці модельного ролика– а і залежність від радіуса вимірювання – б

Максимальний розмах термоциклу спостерігали на поверхні моделі. Із зменшенням значення радіусу вимірювання температури розмах термоциклу зменшується.

Зменшення розмаху термоциклу у внутрішніх шарах ролика МБЛЗ спричинене зниженням інтенсивності тепловідводу та переходом до квазістаціонарного температурного поля.

Досліджено вплив температури на швидкість РВТ в сталі 25Х1М1Ф при частоті навантаження 1 Гц.

Виявлено, що в діапазоні значень КІН $18,0 \leq K_{max} \leq 20,0$ МПа $\sqrt{м}$ швидкість РВТ при 375°C в 3 рази вища, а при 600 °С в 8 раз вища чим при 20 °С (рис 8). Із збільшенням довжини тріщини і максимального КІН відмінність в швидкостях РВТ при кімнатних і підвищених температурах зменшується. При

$K_{max} \geq 80 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ швидкість РВТ для всіх досліджуваних температур однакова і складає $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ мм} / \text{цикл}$, рис. 8.

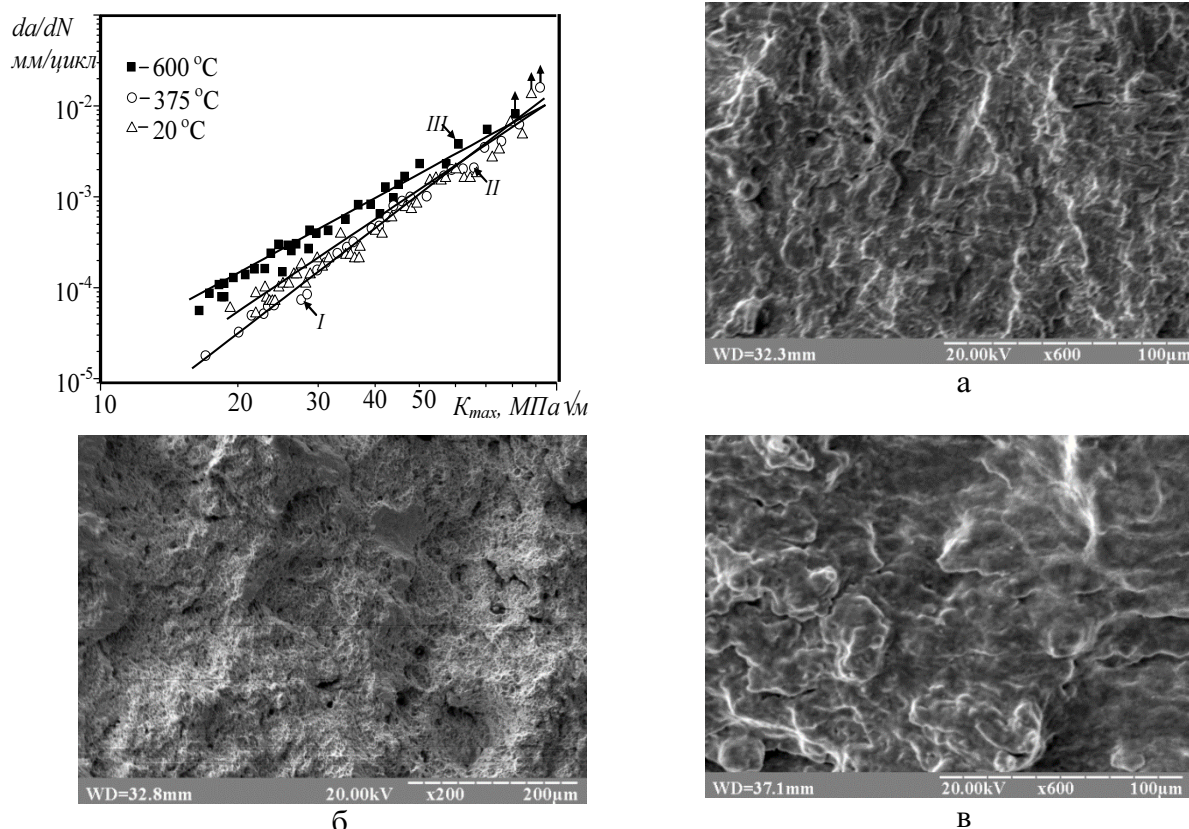


Рис. 8. Залежність швидкості РВТ в сталі 25X1M1Ф від K_{max} при 20 °С, 375 °С, 600 °С і частоті навантаження 1 Гц та асиметрії $R = 0,1$ в абсолютних координатах; I, II, III, точки фрактографічного аналізу а, б, в відповідно.

Є кілька причин зниження циклічної тріщиностійкості сталі 25X1M1Ф із зростанням температури: зниження границі міцності матеріалу внаслідок активації дислокаційних процесів, збільшення масштабного рівня деформації, що призводить до зростання інтенсивності накопичення пошкоджень у порівнянні з випробуваннями при 20° С, збільшення кінетики накопичення пошкоджень.

При 20° С (в точці I) на поверхні руйнування виявлено формування втомних борозенок, розташованих на фасетках зламу рис. 8. Для середньої ділянки діаграми $K_{max} = 35 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ характерними є площини ковзання, що перетинають вторинні тріщини. Ширина втомних борозенок дещо відрізняється в різних точках фронту тріщини. Це обумовлено нерівномірністю підростання тріщини по фронту.

З ростом K_{max} (т. II) зростає вплив включень і дисперсних частинок на механізми поширення втомної тріщини. На поверхні руйнування помітні великі ямки відриву, утворені внаслідок відшарування включень від матриці, а також окремі розтріскані включення. Значні деформації зерен і їх границь сприяють розвитку пластичної зони у вершині тріщини, інтенсифікують перебіг руйнування і спричиняють утворення окремих мікротріщин, які потім об'єднуються з магістральною тріщиною. Сліди такого злиття створюють рубці на поверхні зламу.

Досліджено вплив частоти навантажування $0,1 \text{ Гц}$ і 1 Гц на циклічну тріщиностійкість теплостійкої сталі 25Х1М1Ф, рис. 9.

Виявлено, що циклічна тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф за частоти навантажування $0,1 \text{ Гц}$ становить $28 \cdot 10^3$ циклів, а за частоти $1,0 \text{ Гц}$ - $3 \cdot 10^4$ циклів навантаження. Підвищення частоти навантажування збільшує залишкову довговічність матеріалу приблизно на 10 %, що очевидно зумовлено зменшенням часу активного навантажування зразка.

За результатами мікроаналізу поверхні зламів зразків виявлено «переривчатий» характер розвитку втомної тріщини, який відображається у локальних змінах напрямку її поширення, супроводжується гілкуванням тріщин та утворенням вторинних мікротріщин. Слід зазначити, що ці механізми виразніше проявляються за частоти навантаження зразка $0,1 \text{ Гц}$.

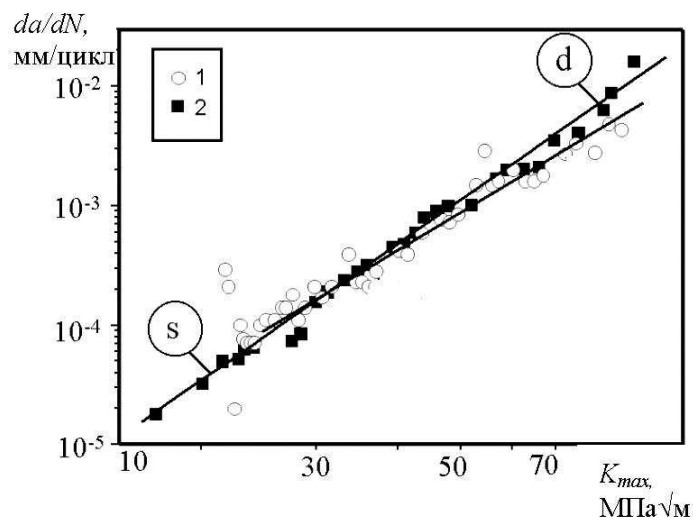


Рис. 9. Діаграма втомного руйнування сталі 25Х1М1Ф за частоти навантажування $1,0 \text{ Гц}$ (1) та $0,1 \text{ Гц}$ (2) і температури 20° C

Виявлено, що при частоті навантаження $0,1 \text{ Гц}$ та $1,0 \text{ Гц}$, механізми поширення тріщин є подібними. Збільшення частоти навантажування від $0,1 \text{ Гц}$ до $1,0 \text{ Гц}$ майже не впливає на швидкість РВТ на ділянці до $K_{max} < 38 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. У подальшому із зростанням K_{max} від 40 до $80 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ швидкість РВТ за $f = 0,1 \text{ Гц}$ знижується у $2,0 \dots 4,0$ рази проти $1,0 \text{ Гц}$, що особливо помітно поблизу ділянки нестабільного поширення тріщини. Це пояснюється більш розвинутою пластичністю за частоти $0,1 \text{ Гц}$ за рахунок більшого часу активного навантаження матеріалу.

У п'ятому розділі моделювали ріст поверхневої півеліптичної втомної тріщини у ролику МБЛЗ зі сталі 25Х1М1Ф.

Ролик розглядали як товстостінний порожнистий циліндр (рис. 10) діаметром $D = 320 \text{ мм}$ із охолоджувальним отвором діаметром $d = 80 \text{ мм}$. Відстань між опорами становить $L = 2000 \text{ мм}$. Поверхнева півеліптична тріщина (рис. 10 б) розташована у центральному перерізі ролика, перпендикулярно до його повздовжньої осі. Залишкову довговічність ролика МБЛЗ оцінювали за наступних припущень:

- розглядали поширення лише однієї поверхневої півеліптичної тріщини початковою глибиною $a_0 = 15$ мм;
- впливом термічної складової на напружено-деформований стан у вершині півеліптичної тріщини нехтували, оскільки при глибині тріщини 15 мм і більше коливання температури протягом одного оберту ролика незначне;
- температура в серединному перерізі зразка стала і рівна 375 °С;
- матеріал ролика ізотропний;
- параметр C рівняння Паріса розглядали як випадкову величину.

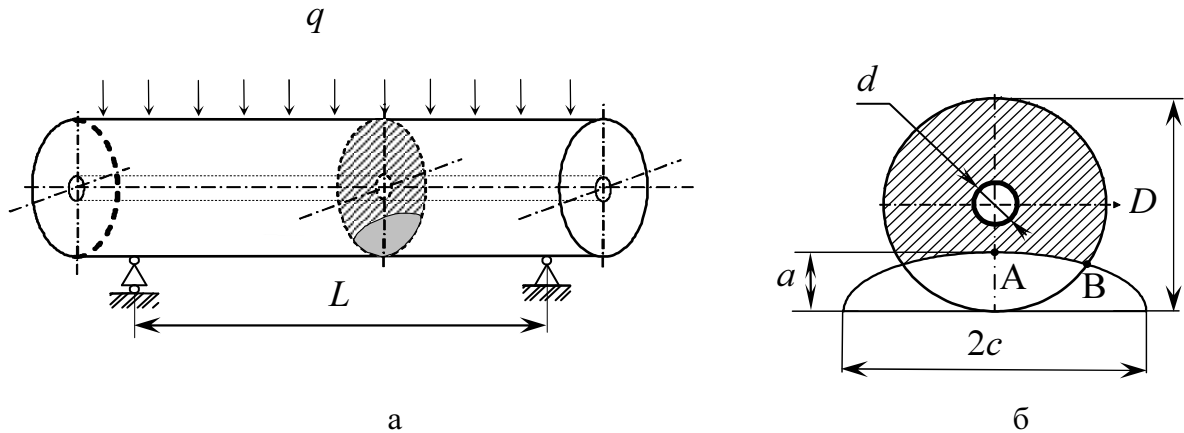


Рис. 10. Схема навантажування ролика МБЛЗ – а та геометричні параметри перерізу з півеліптичною тріщиною – б

Зовнішнє навантаження на ролик зумовлене феростатичним тиском стовпа рідкого металу на оболонку слябу, який підтримується роликами, а також зусиллями від випрямлення злитка. Розглянули ріст поверхневої втомної тріщини у ролику (рис. 10 а) при пульсівному циклі навантаження і розмаху напружень $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 257$ МПа (тут σ_{max} , σ_{min} – найбільше та найменше напруження, відповідно).

КІН півеліптичної тріщини в порожнинному ролику при моделюванні її поширення із врахуванням зміни форми фронту визначали за чисельними даними Карпінтері.

$$K_{A(C)} = \sigma_{bg} \sqrt{\pi a} Y_{A(C)}. \quad (3)$$

Для зручності моделювання було апроксимовано чисельні дані праці і побудовано поверхні безрозмірних КІН $Y_{A(C)} = K_{A(C)} / \sigma_{bg} \sqrt{\pi a}$ залежно від нормалізованої глибини тріщини a/D і форми її фронту a/c .

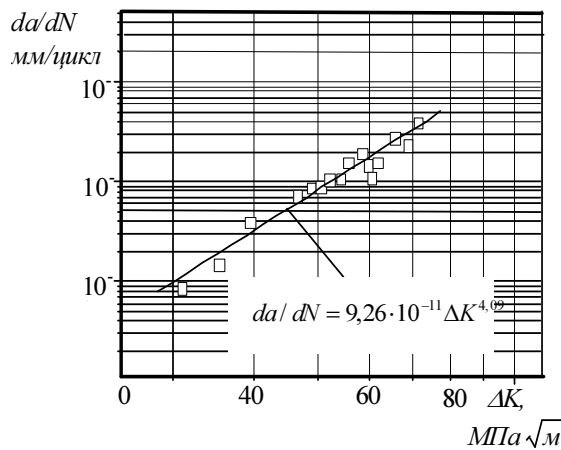
Отримані експериментальні залежності $da/dN - \Delta K$ (рис. 11 а) апроксимували рівнянням Паріса

$$da/dN = C \Delta K^m. \quad (4)$$

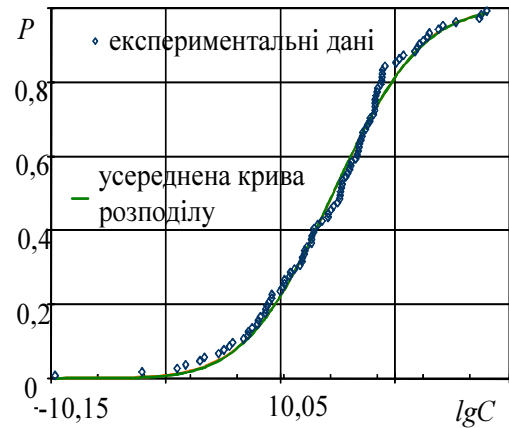
де m , C – параметри, які визначали і з експерименту. Для сталі 25Х1М1Ф при 375 °С: $C = 9,26 \cdot 10^{-11}$ мм/цикл/(МПа·м^{0,5}), $m = 4,09$.

Параметр $lg C$ для сталі 25Х1М1Ф (рис. 11 б) розглядали як нормальну та логарифмічно-нормальну розподілену випадкову змінну.

Експериментальні дані апроксимували за методом найменших квадратів та визначали параметри розподілу $lg C$. Припущення щодо функції розподілу оцінювали за критерієм Андерсона Дарлінга ($A-D$).



а



б

Рис. 11. Залежність швидкості РВТ в сталі 25Х1М1Ф від розмаху КІН – а та розподіл коефіцієнта lgC – б при температурі 375 °С, $R = 0$ і $f = 0,1$ Гц

Ріст поверхневої втомної тріщини в ролику МБЛЗ в радіальному (т. А) і коловому (т. В) напрямках визначали із системи рівнянь типу Паріса:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = C(\Delta K_A)^m, \\ \frac{dc}{dN} = C(\Delta K_B)^m; \end{cases} \quad (5)$$

де K_A , K_C – КІН нормального відриву відповідно в т. А і т. В фронту тріщини.

Для моделювання РВТ використовували нормальний розподіл параметра lgC . Геометричні параметри тріщини відповідали експлуатаційним. Розглядали наступні початкові та граничні умови: початкова глибина тріщини $a_0 = 15$ мм, коефіцієнт форми фронту початкової тріщини $a_0/c_0 = 0,25$; гранична кількість циклів навантаження $N_f = 20000$ циклів; гранична глибина тріщини $a_f = 45$ мм.

Моделювали поширення тріщини в ролику МБЛЗ з урахуванням розкиду параметрів циклічної тріщиностійкості. КІН обчислювали за чисельними даними А. Карпінтері, 2004.

В результаті моделювання отримано функції розподілу кінцевої глибини поверхневої втомної тріщини ролика для наперед заданої кількості циклів ($N_f = 20000$) циклів навантаження або заданого розміру граничного дефекту ($a_f = 45$ мм) рис. 12.

Отримані результати обчислення порівнювали з відомими даними отриманими для сталої форми фронту тріщини ($a/c = 0,25$). Порівнюючи результати, одержані за спрощеною методикою та із урахуванням зміни форми фронту тріщини, слід зазначити що при підростанні тріщини від початкового дефекту ($a_0 = 15$ мм) до ($a = 22$ мм) обидві методика дають однакові результати, рис. 12.

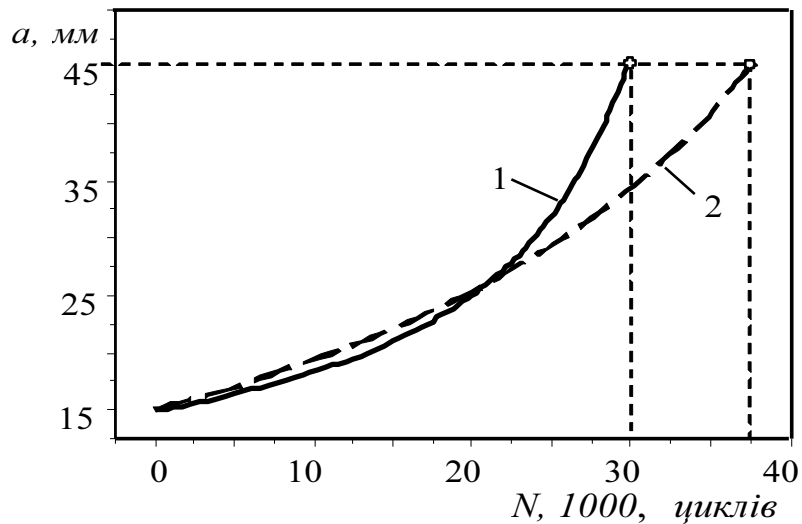


Рис. 12. Залежність глибини тріщини від кількості циклів навантаження за спрощеною методикою (П.О. Марущак, 2009) – (1) та з урахуванням зміни фронту тріщини при обчисленні КІН (2)

Проте при подальшому підростанні втомної тріщини не врахування зміни фронту тріщини, спричиняє зменшення обчисленої довговічності. Зокрема, для глибини $a = 45$ мм, розрахунок за спрощеною процедурою на 25% знижує кількість циклів навантаження (залишкову довговічність ролика) порівняно із розрахунком, в якому КІН обчислювали з урахуванням зміни форми фронту тріщини.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що полягає у виявленні основних закономірностей впливу експлуатаційних температур на циклічну тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф і удосконаленні методики оцінювання залишкового ресурсу ролика МБЛЗ.

1. Виявлено вплив високих температур на стабільність і енергоємність динамічного руйнування сталі 25Х1М1Ф. Виявлено що енергія зародження тріщини при 375 °С зростає в 1,6 рази у порівнянні з 20 °С. При 600 °С енергія зародження тріщини знижується в 1,2 рази у порівнянні з результатами випробувань при 20 °С. Зниження енергії зародження тріщини при підвищенні температури випробувань до 600 °С обумовлено знеміцненням матеріалу, розвитком тріщин, розшаруванням і множинною пошкодженістю матеріалу зразка.

2. Досліджено, що для сталі 25Х1М1Ф за усіх режимів випробувань переважає внутрішньозеренне руйнування за наявності втомних борозенок. Досліджено кінетику поширення тріщини у сталі 25Х1М1Ф при 20 °С, за частот навантажування 0,1 Гц та 1,0 Гц. Виявлено що за $K_{max} < 38$ МПа $\sqrt{м}$ сталь є нечутливою до частоти навантажування. Підвищення частоти навантажування в

діапазоні $K_{max} = 40...80 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ знижує швидкість поширення тріщини у 2,0...4,0 рази

3. Вивчено основні закономірності поширення втомної тріщини у сталі 25Х1М1Ф при температурах 20 °С, 375 °С та 600 °С зокрема в діапазоні значень $18,0 \leq K_{max} \leq 20,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість РВТ при 375°С в 3 рази вища, а при 600 °С в 8 раз вища чим при 20 °С.

4. Розроблено оригінальну фізичну модель ролика МБЛЗ (*Пат. №65053, №66061*), яка дозволила оцінити вплив зупинок лиття на зміну температурних полів ролика на різних відстанях від поверхні. Модельні і експлуатаційні температурні цикли в ролику МБЛЗ задовільно узгоджуються.

5. Запропоновано методика прогнозування залишкової довговічності суцільнокованого ролика МБЛЗ, яка ґрунтується на підходах лінійної механіки руйнування і уточнює довговічність ролика з початковими дефектами з урахуванням впливу частоти експлуатаційного навантажування.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Деградація поверхні* ролика МБЛЗ під час експлуатації / П.В. Ясний, П.О. Марущак, Д.Я. Баран, В.В. Шишкін // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2006. – Т. 11. - №3. - С. 10-16.

2. *Вплив пластичного* деформування на структурну деградацію теплостійких сталей / П.В. Ясний, В.Б. Гладько, П.О. Марущак, Д.Я. Баран // *Машинознавство*. - 2007. - №4. - С. 7-12.

3. *Взаємозв'язок мікродислокаційних* параметрів і твердості пластично деформованих теплотривуих сталей / П.В. Ясний, П.О. Марущак, В.Б. Гладько, Д.Я. Баран // *Фіз-хім. механіка мат-лів*. – 2008. - №2. - С. 41-45.

4. *Моделювання експлуатаційного* термоциклування ролика МБЛЗ на малогабаритному автоматизованому стенді / П.О. Марущак, Г.В. Габрусев, Д.Я. Баран, Р.Т. Біщак, Ю.А. Готович // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту. - 2011. - № 2. - С. 24- 29.

5. *Установка для фізического* моделювання роботи роликів МНЛЗ в умовах термоусталости / П.О. Марущак, Р.Т. Бищак, Д.Я. Баран, В.Н. Бревус // *Металлург*. – 2011. - №9. - С. 59-61.

6. *Ясний П.В. Стадийность* деформування матеріала и кинетика роста усталостной трещины в стали 25Х1М1Ф при низких частот нагружения / П.В. Ясний, П.О. Марущак, С.В. Панин, П.С. Любутин, Д.Я. Баран, Б.Б. Овечкин // *Физическая мезомеханика*.- 2012.- №15, 2.- С. 97-107.

7. *Вплив температури* на мікромеханізми статичного деформування та руйнування теплостійких сталей / П.В. Ясний, В.Б. Гладько, П.О. Марущак, Д.Я.

Баран // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2007. - Т. 14. - № 3. – С. 7-16.

8. *Maruschak P., Degradation and cyclic crack resistance of continuous casting machine roll material under operating temperatures* / P. Maruschak, D. Baran // Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering. - 2011. - Vol. 35. - M2. - P. 159-165.

9. *Failure analysis of continuous casting rolls material and physical simulation of thermal fatigue loading* / P. Maruschak, R. Bishchak, D. Baran, L. Poberezhny // Mechanika.- 2013. –Vol. 19(4). – P. 398 - 402

10. *Ясній П.В. Тріщиностійкість* суцільнокованого ролика машин безперервного лиття заготовок / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Д.Я. Баран // Всеукраїнська наук. конф.: „Сучасні проблеми механіки” (до 100-річчя М.П. Шереметьєва), (7-8 грудня 2005 р.), Львів. - ЛНУ ім. І. Франка. -2005. - С. 40-41.

11. *Марущак П.О. Влияние температуры пластического деформирования на кинетику упрочнения теплостойких сталей* / П.О. Марущак, Д.Я. Баран, В.Б. Гладько // Тезиси докладов IV межд. научно-техн. конф. «Современные проблемы машиноведения» (научные чтения посв. П.О. Сухому), Гомель.-2006. - С.68-69.

12. *Методика досліджень температурних полів модельного ролика машини безперервного лиття заготовок* / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, Д.Я. Баран // Тези 3-ї міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні» (29-31 травня). – К.: ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України. – 2007. – С. 219-220.

13. *Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі 25X1M1Ф* / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Р.Т. Біщак, Д.Я. Баран // Тези доп. міжн. наук. конф. «Фізика конденсованих систем та прикладне матеріалознавство» (11-13 жовтня), Львів. – 2007. – С. 150.

14. *Марущак П.О. Влияние температуры на микромеханизмы разрушения стали 25X1M1Ф при использовании статической трещиностойкости* / П.О. Марущак, В.Б. Гладько, Д.Я. Баран // Deformations & Fracture of Materials and Nanomaterials DFMN2007, Moscow, 2007. – P. 283-284.

15. *Ясній П.В. Вплив частоти навантажування на циклічну тріщиностійкість сталі 25X1M1Ф* / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Д.Я. Баран // Праці наук.-техн. конф. “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (11 - 13 листопада), Львів. – 2010. - С. 17-19

16. *Марущак П.О. Количественное исследование излома стали 25X1M1Ф после ударного высокотемпературного разрушения* / П.О. Марущак, Д.Я. Баран, Ю.А. Готович // Тези міжн. наук.-техн. конф. «Теоретичні і прикладні задачі

обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (30 травня - 2 червня), Вінниця. – 2011. - С. 96-97.

17. *High temperature impact toughness of steel for continuous casting machine rolls* / P. Yasniy, P. Maruschak, Yu. Gotovych, D. Baran // Proc. of 16-th Int. Conf. «Mechanika'2011» (7-8 of April), Kaunas, Lithuania, 2011. - С. 123-127.

18. *Марущак П.О. Высокотемпературная циклическая трещиностойкость теплостойкой стали в низкочастотном диапазоне* / П.О. Марущак, Д.Я. Баран, В.Н. Бревус // Труды 11-ой межд. научно-техн. конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (23-27 мая, Ялта). – 2011. – АТМ України. – С. 141-143.

19. *Пат. № 65053 Україна, МПК G01N 25/72. Спосіб фізичного моделювання експлуатаційних температурних умов роликів машин безперервного лиття заготовок* / П. О. Марущак, Д. Я. Баран, Р. Т. Біщак; заявник і патентовласник Тернопіль нац. тех. ун-т. – № 65053; заявл. 26.04.2011 ; опублік 25.11.2011, Бюл. №22.

20. *Пат. № 66061 Україна, МПК G01N 25/72. Спосіб лабораторного термоциклування матеріалу* / П. О. Марущак, Д. Я. Баран, Р. Т. Біщак, І. Б. Окіпний; заявник і патентовласник Тернопіль нац. тех. ун-т. – № 66061 заявл. 10.05.2011 ; опублік 26.12.2011, Бюл. №24.

АНОТАЦІЯ

Баран Д.Я. Вплив експлуатаційних температур на міцність і циклічну тріщиностійкість теплостійкої сталі металургійного обладнання – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – «Механіка деформівного твердого тіла». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2014.

Дисертацію присвячено виявленню основних закономірностей впливу високих температур на циклічну тріщиностійкість теплостійкої сталі 25Х1М1Ф і розробці методики прогнозування залишкової довговічності ролика МБЛЗ. Виявлено вплив високих температур на стабільність і енергоємність статичного та динамічного руйнування сталі 25Х1М1Ф. Встановлено що енергія зародження тріщини при 375 °С зростає в 1,6 разів порівнянні з 20 °С. При 600 °С енергія зародження тріщини знижується в 1,2 рази в порівнянні з результатами випробувань при 20 °С, що обумовлено зменшенням матеріалу, розвитком тріщин, розшаруванням і множинною пошкодженістю матеріалу зразка. Виявлено що за $K_{max} < 38 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ сталь є нечутливою до частоти навантажування а підвищення частоти навантажування в діапазоні $K_{max} = 40 \dots 80 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ знижує швидкість поширення тріщини у 2,0...4,0 рази. Виявлено, що вплив частоти та форми циклу навантажування на мікрошвидкість росту втомної тріщини аналогічний впливу на макрошвидкість, із збільшенням витримки крок борозенок зменшується, що пов'язано із релаксацією напружень, обумовленою накопиченням пластичності та повзучістю у вершині тріщини. Розроблено оригінальну фізичну модель ролика МБЛЗ, яка дозволила оцінити вплив зупинок лиття на зміну температурних полів ролика на різних відстанях від поверхні. Модельні і експлуатаційні температурні цикли в ролику МБЛЗ задовільно узгоджуються. Запропоновано методику прогнозування залишкової довговічності суцільно кованого ролика МБЛЗ, яка ґрунтується на підходах лінійної механіки руйнування і уточнює довговічність ролика з початковими дефектами з урахуванням впливу частоти експлуатаційного навантаження.

Ключові слова: тріщиностійкість, руйнування, частота навантажування

АННОТАЦИЯ

Баран Д. Я. Влияние эксплуатационных температур на прочность и циклическую трещиностойкость теплостойкой стали металлургического оборудования.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2014.

Диссертация посвящена определению основных закономерностей влияния высоких температур на циклическую трещиностойкость теплостойкой стали 25Х1М1Ф и разработке методики прогнозирования остаточной долговечности ролика МНЛЗ. Обнаружено влияние высоких температур на стадийность и энергоемкость статического и динамического разрушения стали 25Х1М1Ф. Рост температуры приводит к увеличению угла поворота губ сдвига относительно продольной оси образца. Форма губ сдвига при 375 °С и 600 °С подобны, однако с ростом температуры увеличивается их высота, появляются локальные надрывы материала. Установлено что энергия зарождения трещины при 375 °С увеличивается в 1,6 раза по сравнению с 20 °С. При 600 °С энергия зарождения трещины снижается в 1,2 раза по сравнению с результатами испытаний при 20 °С, что обусловлено разупрочнением материала, развитием трещин, расслоением и множественными повреждениями материала образца. Установлено, что для стали 25Х1М1Ф при всех режимах испытаний преобладающим был внутризеренный микромеханизм разрушения с наличием усталостных бороздок. Обнаружено что после деформирования растяжением феррито-перлитной стали 25Х1М1Ф при температуре 600 °С сетчатая и частично ячеистая дислокационная структура превращается в клубковую и ячеистую не разориентированную, ячеистую разориентированную и частично фрагментированную дислокационную структуры. Установлено что за $K_{max} < 38$ МПа $\sqrt{м}$ сталь является нечувствительной к частоте нагружения а повышение частоты нагружения в диапазоне $K_{max} = 40...80$ МПа $\sqrt{м}$ снижает скорость распространения трещины в 2,0...4,0 раза. Обнаружено что влияние частоты и формы цикла нагружения на микроскорость роста усталостной трещины аналогичны влиянию на макроскорость, с увеличением выдержки шаг бороздок уменьшается, что связано с релаксацией напряжений, обусловленной накоплением пластичности и ползучестью в вершине трещины. Установлено увеличение доли межзеренного разрушения, а также следы пластического деформирования бороздок в изломе образца с увеличением времени пребывания при максимальной нагрузке, что свидетельствует о накоплении пластической деформации в вершине трещины при ее распространении. Разработана оригинальная физическая модель ролика МНЛЗ, которая позволила оценить влияние остановок литья на изменение температурных полей ролика на различных расстояниях от поверхности. Модельные и эксплуатационные температурные циклы в ролике МНЛЗ удовлетворительно

согласуются. Предложена методика прогнозирования остаточной долговечности цельнокованого ролика МНЛЗ, которая полагается на анализ напряженно-деформированного состояния пустотелого цилиндра, подходы линейной механики разрушения и уточняет долговечность ролика с начальными дефектами с учетом влияния частоты эксплуатационной нагрузки.

Ключевые слова: трещиностойкость, разрушения, частота нагружения

ABSTRACT

Baran D. Ya. Influence of operating temperature on strength and cyclic crack resistance of the heat-resistant steel of metallurgical equipment. – Manuscript

Dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) sciences, in specialty 01.02.04 - "Mechanics of deformable solids". Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2014.

The thesis deals with the analysis of main regularities of high temperatures effect on the cyclic crack resistance of heat-resistant steel 25Kh1M1F and development of methods for prediction residual durability of casters roller. The influence of high temperatures on the stages and energy consumption of static and dynamic fracture of steel 25Kh1M1F was found. It was established that the energy crack initiation at 375 °C is increased in 1.6 times as compared with that at 20 °C. At 600 °C crack initiation energy is reduced in 1.2 times as compared with the test results at 20 °C, which is caused by the softening of the material, the development of cracks, delamination and multiple fracture of the specimen material. It was found that for $K_{max} < 38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ the steel is not sensitive to the loading rate and raising of loading frequency within the range $K_{max} = 40 \dots 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ decreases the rate of crack propagation in 2.0 ... 4.0 times.

It was found that the effect of frequency and cycle loading form on fatigue crack growth micro-rate is similar to the effect on macrorates, with the increase of exposure the step of grooves decreases, which is caused by the relaxation of stresses resulted from the accumulation of plasticity and creep at the crack tip. A physical model of the original roller casters, which made possible to evaluate the effect of the casting roller stops on the temperature fields at different distances from the surface has been developed. Modeling and operating temperature cycles in the roller have satisfactory agreement. The method of the residual durability prediction of the continuously forged CCM roller, which is based on the approaches of linear fracture mechanics and specifies the durability of roller with initial defects, taking into account of the operating loading frequency, has been developed.

Keywords: crack resistance, fracture, frequency, loading.