

УДК 670.191.33

ДІАГНОСТУВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІСЛЯ ТЕРМОЦИКЛУВАННЯ

П. В. ЯСНІЙ¹, П. О. МАРУЩАК¹, А. П. ПИЛИПЕНКО², Р. Т. БИЩАК¹,
І. М. ЗАКІЄВ³, В. Б. ГЛАДЬО¹

¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

² Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ;

³ Національний авіаційний університет, Київ

Проаналізовано проблеми технічного діагностування стану роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Окремо розглянуто питання оцінювання деградації матеріалу роликів МБЛЗ сталі 25X1M1Ф після термоциклічного напрацювання та виявлено найчутливіші до експлуатаційного впливу фізико-механічні характеристики. Методами руйнівного та неруйнівного контролю оцінено деформаційну поведінку сталі у вихідному стані та після термоциклічного напрацювання. Встановлено узгодженість пластичного течіння матеріалу на різних структурних рівнях. Вдосконалено метод оцінювання деградації матеріалу за дисперсією основного хімічного елемента.

Ключові слова: *технічне діагностування, деградація, металургійне обладнання.*

Проблема експлуатаційної надійності технологічного обладнання – одна з найважливіших у металургійному комплексі [1]. Через збільшення обсягів виготовлення металопродукції, перехід на методи безперервного лиття, з метою зниження тривалості непрогнозованих простоїв, зумовлених технічними несправностями, а також для уникнення аварій з важкими наслідками, необхідно підвищити вимоги до діагностування технічного стану елементів конструкцій металургійного обладнання [1, 2].

Одним із характерних об'єктів металургійного обладнання, яке підлягає тривалому термоциклуванню, є машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Їх продуктивність визначають не лише технологічні параметри, зокрема, швидкість лиття, але й показники довговічності окремих вузлів машини, тривалість підготовки машини до роботи, зручність обслуговування і ремонту. Одним з найважливіших елементів МБЛЗ є, як відомо, ролик. Проте, не зважаючи на певні успіхи, досягнуті у підвищенні надійності їх роботи, не завжди вдається уникнути непрогнозованого руйнування [3]. Це пояснюється, насамперед, деградацією в реальних експлуатаційних умовах і множинним розтріскуванням [4–6].

Відомі праці та підходи до автоматизованого діагностування технічного стану елементів металургійного обладнання [4, 6], методи та процедури прогнозування пошкодженості конструкцій [7–9], оцінювання допустимого граничного стану їх експлуатації, ризик-аналіз для встановлення такого стану [10] показують, що прогнозувати залишковий ресурс та роботоздатність роликів під час використання можна лише на основі характеристик міцності, пластичності та тріщиностійкості конструкційних матеріалів з урахуванням їх експлуатаційної деградації. Проте, деградацію властивостей матеріалів не завжди враховують під час оцінювання залишкового ресурсу [11–13].

Раніше було досліджено експлуатаційну деградацію роликів МБЛЗ та запропоновано шляхи врахування зниження роботоздатності елементів конструкції з метою діагностування їх технічного стану [4, 6, 14]. Тут наведені підходи для технічного діагностування, зокрема, оцінювання деградації структурно-механічних властивостей матеріалу роликів МБЛЗ.

Основні підходи для оцінювання деградації матеріалу роликів МБЛЗ. Деградація характеристик металу роликів МБЛЗ за експлуатаційних умов зумовлена накопиченням розсіяних пошкоджень [4, 6]. Отже, однією з найвагоміших причин руйнування є незворотні зміни структури і фізико-механічних властивостей металу внаслідок впливу температурно-силових чинників [6]. Врахування деградації властивостей матеріалів – одне з найважливіших завдань технічного діагностування [9, 15–18]. Для цього необхідно розробити фізично обґрунтовані підходи для оцінювання накопичення пошкоджень та вичерпування пластичності матеріалу [19–21]. Таким чином, доцільно використати комплексний підхід для дослідження стану матеріалу на різних структурних рівнях. Отже, необхідно визначити фізико-механічні властивості матеріалу конструкції у вихідному і деградованому станах, встановити кінетику і закономірності накопичення пошкоджень на основі виявлених механізмів деградації його характеристик та виявити зони максимальної пошкодженості матеріалу і виникнення макродефектів.

На розробку такого комплексного оцінювання, з врахуванням впливу термоциклування на механізми накопичення пошкоджень у сталі 25X1M1Ф та обґрунтуванням параметрів, найчутливіших до деградації, націлені проведені дослідження.

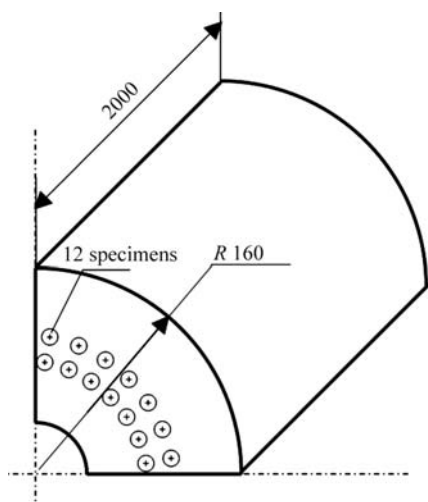


Рис. 1. Схема вирізання циліндричних зразків з ролика МБЛЗ.

Fig. 1. A scheme of cylindrical specimens cutting out from a continuous caster roll.

низці попередніх праць [17, 23].

Статичні випробування. Після термоциклування зразки розтягували за умов рівноважного деформування [14] на випробувальній установці ZD-100Pu з комп'ютеризованою вимірною системою до зародження макротріщини або їх руйнування. Після певної деформації частину зразків розрізали електроіскровим способом у повздовжньому напрямі. Площину зрізу, яка співпадала з осью-

Методика дослідження термоциклованих зразків. Циліндричні зразки діаметром 5,0 mm з теплотривкої сталі 25X1M1Ф вирізали з ролика МБЛЗ Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча. Вирізку виконували у повздовжньому напрямі, поблизу охолоджувального отвору (рис. 1). Структура зразків відповідала структурі матеріалу ролика МБЛЗ у вихідному стані.

Деградацію матеріалу моделювали за традиційною методикою “Кавасакі стил” [22], а саме, термоциклуванням у діапазоні температур $13 \leftrightarrow 500^\circ\text{C}$ впродовж 2500 циклів, зі записом зміни розподілу температури на поверхні зразка залежно від кількості термоциклів [17]. Стан матеріалу контролювали за металографічними шліфами. Тут подані лише параметри термоциклування, достатні для опису методики. Будова та технічні особливості установки для термоциклування наведені у

вим перерізом зразка, шліфували та полірували. Отримані шліфи досліджували на металографічному мікроскопі Axiovert 40MAT та растровому електронному мікроскопі REM-106И з рентгенівським енергодисперсійним мікроаналізатором ЭДАР для визначення хімічного складу.

Оцінювання псевдохімічного складу. Оцінюючи пошкодження в металі, використали метод, згідно з яким за інформаційну ознаку стану матеріалу вибрали характеристики розкиду показників псевдохімічного складу [19, 20]. Кількість пошкоджень у металі залежить не лише від абсолютних значень досліджених параметрів (твердості, мікротвердості, хімічного складу), але і від дисперсії результатів замірів, яку визначали методами математичної статистики. Фізично такий підхід обґрунтовано тим, що розсіювання значень механічних характеристик властиве всім матеріалам, а ступінь їх розкиду визначає структурний стан [19, 20]. Деградацію матеріалу після деформування оцінювали багаторазовими вимірюваннями хімічного складу ділянок зразків довжиною 1,0 mm.

Запропоновано визначати деградацію матеріалу за дисперсією питомого вмісту Fe у матриці металу [24]

$$V = \frac{\bar{S}(H)}{A} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де A – математичне сподівання концентрації основного елемента; $\bar{S}(H)$ – середньоквадратичне відхилення, яке визначали так:

$$\bar{S}(H) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}, \quad (2)$$

де n – кількість замірів ($n = 15 \dots 25$); H_i – поточний вміст Fe, %; \bar{H} – середній вміст Fe, %. Основним матричним елементом сталі 25X1M1Ф є залізо (Fe). Тому визначали характеристику розсіювання вмісту Fe в металі.

Деформування матеріалу знижує вміст Fe в ньому (внаслідок збільшення густини дефектів) і, відповідно, питому вагу інших основних хімічних елементів у матриці матеріалу порівняно з вихідним станом.

Структурна деградація матеріалу. Сталь 25X1M1Ф належить до феритно-перлітного класу і містить розподілені у феритній матриці зерна перліту розміром $\sim 30 \mu\text{m}$ (рис. 2a) [16]. У термоциклованій сталі найбільш деградований приповерхневий шар глибиною до 0,1 mm (рис. 2b). Термоциклічне напрацювання суттєво змінює форму діаграми деформування сталі – зростає ділянка рівномірного деформування та спостерігається полочка текучості (рис. 2c). Знижуються характеристики міцності проти властивостей матеріалу у вихідному стані.

Виявлено накопичення розсіяних пошкоджень, зміну структури феритних та перлітних зерен, розмиття міжфазних меж (рис. 2b). Перлітні ділянки мікроструктури практично повністю зникають і формується структура фериту зі сфероїдизованими карбідами. Одним зі шляхів підвищення міцнісних та пластичних характеристик матеріалу є зменшення розмірів ділянок обох його структурних складників.

Механізми формування мезорельєфу. Термоцикування формує на поверхні зразка систему зернограничних зсувів, через що вичерпується пластичність приповерхневих шарів, а отже, змінюється кінетика їх деформування і зменшується утримувальна здатність матеріалу [21]. Це найпомітніше за умов макролокалізації деформації (утворення шийки) [25]. Для сталі у вихідному і термоциклованому станах визначальним механізмом пластичного деформування зразка в області шийки є узгодження пластичних зсувів макросмуг локального

деформування (рис. 3). У зоні шийки, яка характеризується високим поверхневим деформаційним зміцненням, максимальні деформації спостерігали в її центральній частині (рис. 3*a, b*). Пластичні зсуви в макросмугах зумовлюють неоднорідний напружено-деформований стан шийки зразка.

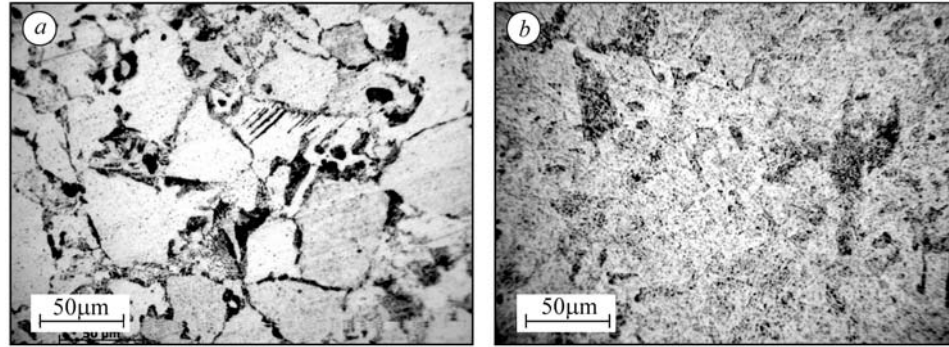


Рис. 2. Структура сталі 25X1M1Φ у вихідному (*a*) і деградованому (*b*) станах ($\times 500$) та діаграми розтягу (*c*): 1 – вихідний стан матеріалу; 2 – термоциклований матеріал.

Fig. 2. Structure of 25X1M1Φ steel in the initial state (*a*) and after degradation (*b*) ($\times 500$) and the stress-strain diagrams (*c*): 1 – initial material; 2 – material after thermocycling.

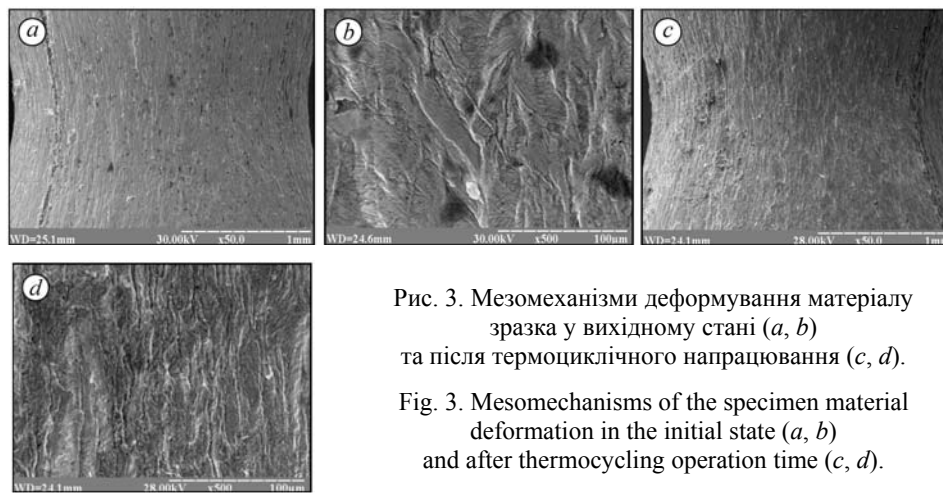
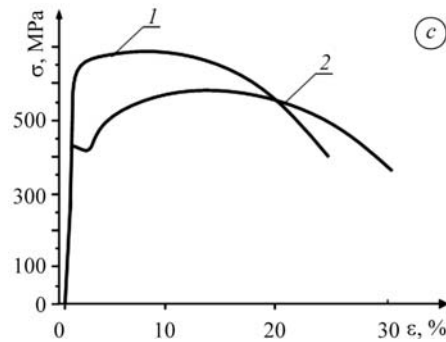


Рис. 3. Мезомеханізми деформування матеріалу зразка у вихідному стані (*a, b*) та після термоциклічного напрацювання (*c, d*).

Fig. 3. Mesomechanisms of the specimen material deformation in the initial state (*a, b*) and after thermocycling operation time (*c, d*).

Для термоциклованих зразків смуги мезорельєфу більш розвинуті, а на мезорівні відбувається інтенсивне гофрування поверхневого шару (рис. 3*c, d*). Обмеження поворотів суміжних об'ємів металу на мезорівні зумовлює більшу неоднорідність деформаційного зміцнення термоциклованого матеріалу (рис. 3*b, d*). Подальший розвиток руйнування пов'язаний з інтенсифікацією зсувів в одній макросмузі.

Оцінювання деградації матеріалу за псевдохімічним складом. Пластичність матеріалу вичерпується з одночасним зародженням мікрodefектів у кількох смугах ковзання, які перетинаються після значної пластичної деформації металу [16]. Мікрodefекти накопичуються між перлітними і феритними зернами, що сприяє пластичному деформуванню матеріалу на початкових стадіях навантаження (рис. 4). Деформація локалізується в площинах ковзання, що послаблює когезивні зв'язки між складниками субструктури матеріалу, зумовлюючи локальне тріщиноутворення, накопичення мікропор. На травлених шліфах одержали характерну орієнтованість зерен вздовж лінії навантаження. Коалесценція мікропошкоджень змінює напружений стан зразка та спричиняє утворення макротріщини [16].

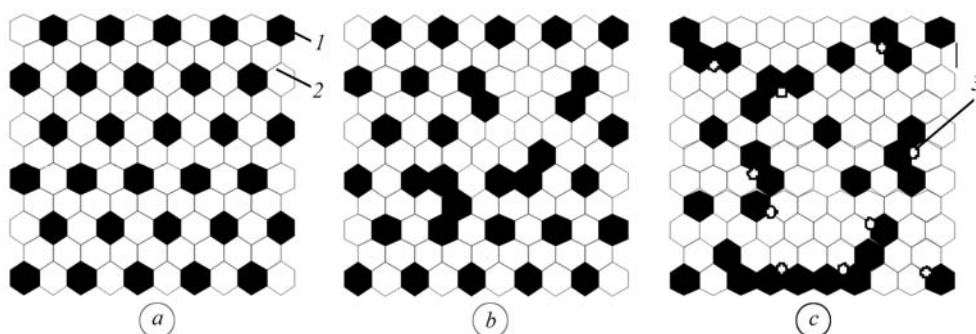


Рис. 4. Схема пошкоджень структури матеріалу під час його деформування: *a* – впорядкована феритно-перлітна структура; *b* – частково розорієнтована; *c* – деградована. 1 – перліт; 2 – ферит; 3 – пори.

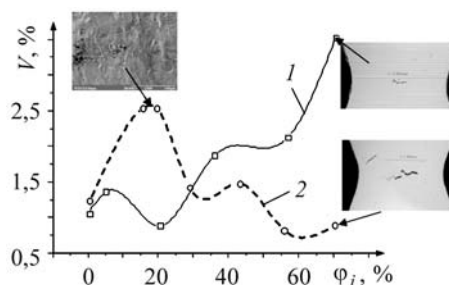
Fig. 4. A scheme of damaging of the material structure under its deformation: *a* – ordered ferrite-pearlite structure; *b* – partially disoriented; *c* – degraded structure. 1 – pearlite; 2 – ferrite; 3 – pores.

Порівнювали закономірності накопичення пошкоджень статично деформованих зразків сталі 25X1M1Ф у вихідному стані та після 2500 термоциклів напруцювання. Термоцикування сприяє розвитку процесів термічного повороту у сталі, при цьому внаслідок їх впливу зростає рівномірність псевдорозподілу Fe.

Пластичне деформування матеріалу оцінювали за зміною діаметра шийки d_i пластично деформованого зразка ($\varphi_i = d_i/d_0$). Помітно, що зі зростанням відносного звуження зразка φ_i відбувається поступове накопичення пошкоджень. Коефіцієнт варіації концентрації Fe зростає від 1,0% до 3,5% (рис. 5).

Рис. 5. Залежність коефіцієнта варіації основного елемента V сталі 25X1M1Ф (Fe) від відносного звуження φ_i зразка у вихідному стані (1) та після 2500 термоциклів (2).

Fig. 5. Dependence of the variation coefficient, V , of the basic element of 25X1M1Ф steel (Fe) on the relative narrowing, φ_i , of the specimen in the initial state (1) and after 2500 thermocycles (2).



Для термоциклованих зразків найбільша неоднорідність Fe досягається за $\varphi_i = 20\%$ (пік зростання неоднорідності Fe до $V = 2,5\%$), після чого відбувається її

падіння нижче вихідного значення. Локальне підвищення V зумовлене стрімким зростанням дефектності структури, а наступне зниження – рівномірним накопиченням пошкоджень.

Закономірності зміни мікротвердості. Кінетику зміцнення матеріалу можна оцінити за параметрами мікротвердості [14–16]. Результати вимірювань мікротвердості сталі у вихідному стані і після термоцикування за різного дійсного звуження зразка $\tilde{\psi} = \ln(d_0/d_i)$ подано на рис. 6. Мікротвердість збільшувалась зі зростанням дійсної деформації, проте у початковому стані вичерпання пластичності матеріалу відбувалось інтенсивніше. Зростання твердості можна пояснити двома основними чинниками: зміною субструктури матеріалу [16] і збільшенням довжини меж вихідних структурних компонент [16, 26]. Пластичне деформування збільшує кількість дислокацій у матеріалі та водночас зростає опір їх переміщенню.

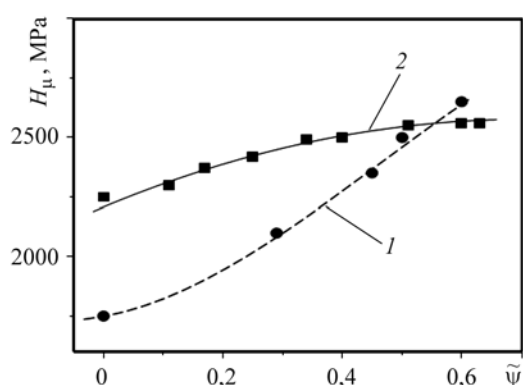


Рис. 6. Залежність мікротвердості (H_μ) сталі 25X1M1Φ у вихідному (1) та термоциклованому (2) станах від дійсного звуження зразка ($\tilde{\psi}$) за одновісного розтягу.

Fig. 6. Dependence of microhardness (H_μ) of 25X1M1Φ steel in the initial state (1) and after thermocycling (2) on actual narrowing of the specimen ($\tilde{\psi}$) under uniaxial loading.

Оцінювання деградації матеріалу за інтерференційною профілографією. Поліморфність сталі 25X1M1Φ спричиняє зародження мікрodefektів на межах зерен. Пори утворюються поблизу зернограничних карбідів у колоніях цементиту та перлітних зернах [26]. Зростання деформацій у локальних зонах зумовлює об'єднання окремих пор у макротріщину (рис. 7). Методом тривимірної інтерферометрії в околі макротріщини виявлено локальні пластично деформовані зони, яким притаманна топографічна сингулярність [27].

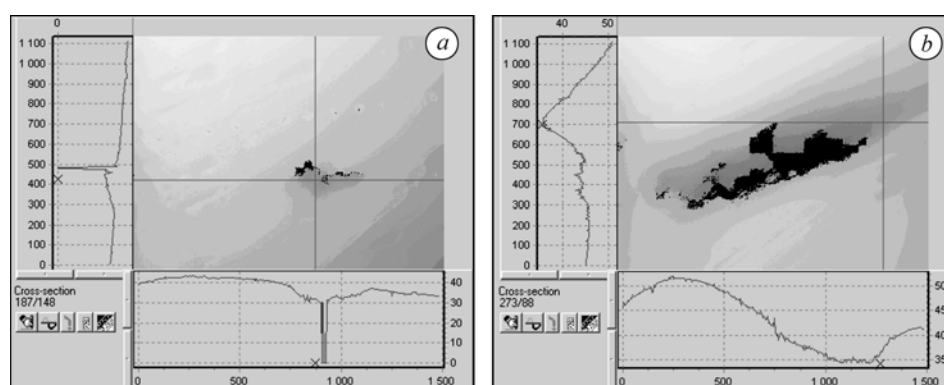


Рис. 7. Топографія повздовжнього перерізу шийки деформованого зразка сталі 25X1M1Φ у вихідному стані (a) та після термоциклічного напрацювання (b).

Fig. 7. Topography of the longitudinal section of the neck of deformed 25X1M1Φ steel specimen in the initial state (a) and after thermocycling operation time (b).

Злиття пор відбувається поступово, впродовж кількох етапів, про що свідчить розвинутість фронту тріщини як вихідного, так і термоциклованого матеріалів (рис. 7*a, b*). Тріщина підростала за механізмом відриву, що потребує меншої кількості енергії, ніж коалесценція пор [28].

Оцінювання деградації матеріалу за фрактографічним аналізом. Незалежно від напрацювання сталь руйнувалась за механізмом відриву та зсуву одночасно у багатьох зернах, що свідчить про міцний когезивний зв'язок феритної та перлітної компонент, а у зламах переважає ямкова компонента (рис. 8). Джерелами пор є неметалеві включення та карбідні частинки [16, 29].

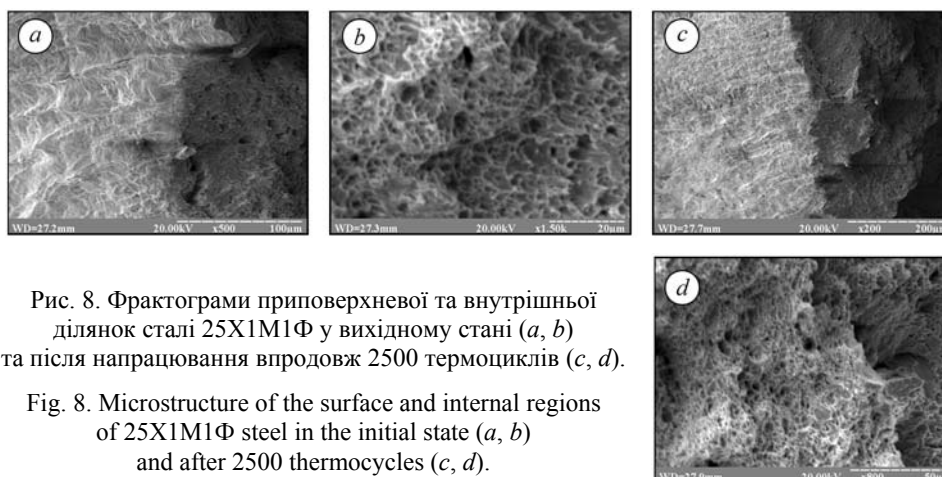


Рис. 8. Фрактограми приповерхневої та внутрішньої ділянок сталі 25X1M1Φ у вихідному стані (*a, b*) та після напрацювання впродовж 2500 термоциклів (*c, d*).

Fig. 8. Microstructure of the surface and internal regions of 25X1M1Φ steel in the initial state (*a, b*) and after 2500 thermocycles (*c, d*).

Термоциклічне напрацювання збільшує частку ямкової компоненти внутрішніх шарів матеріалу, що свідчить про зростання його пластичності. Руйнування зразка вихідного матеріалу в'язке з формуванням ямкового зламу, однорідно по всій поверхні руйнування.

Порівняно із вихідним матеріалом (рис. 8*a, b*) на внутрішніх поверхнях пор термоциклованих зразків виявлено сліди розвинутої деформації (рис. 8*c, d*). Це свідчить, що матеріал навколо пор деформувався разом з матрицею і їх поверхня не була місцем утворення тріщин [16, 29]. Пори мають переважно сферичну форму. У зламі зразка визначено дві ділянки – приповерхневу, у якій виявлено зсувні механізми, та центральну, сформовану внаслідок зародження і об'єднання пор на зернограничних карбідах. Межі вказаних ділянок утворені змішаними (ямковими та зсувними) механізмами руйнування. Крім того, слід зазначити, що розміри ямок на зламах співпадають із розмірами зернограничних карбідів, а довжина площадок зсуву із розмірами феритного зерна. В центральній зоні зразка виявлено вторинні тріщини, а пори мають витягнуту деформовану форму. На повних діаграмах деформування цим стадіям відповідають лінійні ділянки спадних гілок повної діаграми [30].

Узагальнені показники структурної деградації. За результатами досліджень деградації сталі 25X1M1Φ виявили підвищення відносного видовження (ϵ) матеріалу ролика після термоциклування з 25 до 30%. Мікротвердість поверхневих шарів експлуатованого матеріалу ($H_{\mu} = 2250$ МПа) вища порівняно з вихідним станом ($H_{\mu} = 1750$ МПа). Суттєво знизилась показники міцності та пластичності: з $\sigma_{0,2} = 670$ МПа у вихідному стані до 440 МПа. Так само σ_B з 690 МПа до 580 МПа. Отримані результати узагальнено на рис. 9.

Виявили підвищення мікротвердості, проте зниження міцності, а також зростання відносного видовження та зниження відносного звуження термоциклованої

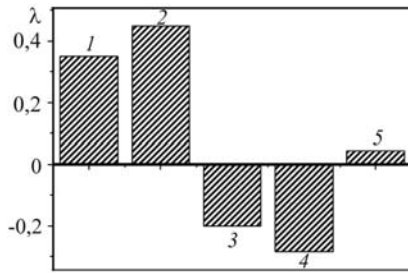


Рис. 9. Деградація механічних характеристик сталі 25X1M1Φ після термоцикування
 $(\lambda_\phi = [(\phi_0 - \phi_{deg}) / \phi_0] \cdot 100\%)$:
 1 - $\sigma_{0.2}$; 2 - σ_B ; 3 - ϵ ; 4 - H_μ ; 5 - ϕ .

Fig. 9. Degradation of the mechanical properties of 25X1M1Φ steel after thermocycling

$(\lambda_\phi = [(\phi_0 - \phi_{deg}) / \phi_0] \cdot 100\%)$:
 1 - $\sigma_{0.2}$; 2 - σ_B ; 3 - ϵ ; 4 - H_μ ; 5 - ϕ .

мезо- та макрорівнях.

Застосування лише окремих методів хоча й може показати деградацію матеріалу на певному структурному рівні, проте не завжди є засобом його фрактодіагностики.

Методи дефектоскопії та можливість їх використання для оцінювання структурно-механічної деградації матеріалу

Методи досліджень	Структурні рівні деградації матеріалу		
	мікро-	мезо-	макро-
Механічні випробування	-	-	+
Сканувальна мікроскопія	+	+	-
Металогія	+	+	-
Псевдохімічний аналіз	+	-	-
Мікроіндентування	+	-	-
Інтерференційна профілографія	+	-	-

ВИСНОВКИ

Показано основні закономірності впливу термоциклічного напрацювання на пошкоджуваність і руйнування сталі 25X1M1Φ та описано фізико-механічні закономірності деформування та руйнування матеріалу. Після 2500 термоциклів напрацювання умовна межа текучості сталі 25X1M1Φ знизилась з 650 МПа у вихідному стані до 520 МПа, а відношення $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ з 0,93 у вихідному стані до 0,75.

Вдосконалено метод визначення псевдохімічного складу матеріалу та оцінюєно структурну деградацію сталі після пластичного деформування.

Описано структурні рівні деформування і руйнування сталі. Виявлено основні закономірності впливу термоциклічного напрацювання на мікро-, мезо- і макрорівнях, які дають змогу оцінити вплив термоцикування на статичну міцність сталі. Виявлено, що руйнування сталі у вихідному стані та після деформування розтягуванням зумовлено кінетикою утворення мікропор, їх злиттям та виникненням центральної макротріщини відриву.

сталі (рис. 9), що є свідченням інтенсивної розсіяної пошкодженості експлуатованого металу [29]. Отримані результати повністю узгоджуються з результатами досліджень експлуатованих роликів МБЛЗ [4]. Вони дають змогу врахувати зниження утримувальної здатності матеріалу під час ризик-аналізу руйнування роликів МБЛЗ шляхом введення відповідних поправкових коефіцієнтів.

Досліджено три характерні [16, 25, 26] масштабні рівні деформування та руйнування матеріалів, а також можливості різних методів оцінювання деградації матеріалу роликів МБЛЗ на певних структурних рівнях (див. таблицю). Для всебічного оцінювання стану експлуатованого матеріалу слід використовувати комплекс методів дослідження деградації матеріалу, які дають змогу виявити її на мікро-,

РЕЗЮМЕ. Проанализирована проблема технической диагностики состояния роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Отдельно рассмотрены вопросы оценки деградации материала роликов МНЛЗ стали 25X1M1Ф после термоциклической наработки, выявлены чувствительные к эксплуатационному влиянию физико-механические характеристики. Методами разрушающего и неразрушающего контроля оценено деформационное поведение стали в исходном состоянии и после термоциклической наработки. Установлена согласованность пластического деформирования материала на различных структурных уровнях. Усовершенствован метод оценки деградации материала по дисперсии основного химического элемента.

SUMMARY. The problem of technical diagnostics of the state of rolls of continuous casting machines (CCM) is analyzed. The problems on assessing material degradation of CCM rolls of 25X1M1Ф steel after thermocycling are considered separately, the physicomachanical characteristics that are sensitive to service effects are found. Methods of destructive and nondestructive testing are used for evaluation of the deformation behavior of 25X1M1Ф steel in the initial state and after thermocycling. The conformity of plastic deformation of the material at different structural levels was established. The method for estimating the degradation of the material by the basic chemical elements dispersion is improved.

Роботу фінансовано Державним комітетом України з питань науки, інновацій та інформатизації, проект 0109U005863.

1. *Процессы* непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. *Биргер И. А.* Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1972. – 238 с.
3. *Диагностирование* механического оборудования металлургических предприятий / В. Я. Седуш, В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская. – Донецк: “Юго-Восток, Лтд”, 2004. – 100 с.
4. *Ясній П. В., Маруцак П. О.* Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
5. *Троценко В. Т., Стрижало В. А., Бородий М. В.* Оценка долговечности металлических материалов в рамках деформационного критерия малоциклового усталости // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 14–25.
6. *Маруцак П. О.* Розробка методів прогнозування ресурсу і імовірності руйнування відповідальних елементів металургійного обладнання // Закл. звіт наук.-досл. проекту (0107U004213) за Грантом Президента України. – Тернопіль: Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2007. – 114 с.
7. *Горицкий В. М.* Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.
8. *Student O. Z.* An accelerated method of hydrogen degradation of structural steels by thermocycling // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 4. – С. 45–52.
9. *Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. T. Tsyurulnyk et al. // Engng. Failure Analysis. – 2010. – Vol. 17. – P. 624–632.
10. *Баранов Г. Л., Гостев А. А., Денисов Ю. В.* Расчет и исследование роликового аппарата зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. – Магнитогорск: Дом печати, 1993. – 110 с.
11. *Бандажированные* прокатные валки и ролики МНЛЗ / Л. С. Белевский, В. И. Кадошников, Е. Л. Белевская и др. – Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т, 2009. – 234 с.
12. *Кононыхин А. А., Самедов Я. Ю.* Трехмерное моделирование дефектных областей прокатных валков по данным ультразвукового контроля // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – 72, № 6. – С. 31–33.
13. *Бида Г. В., Нестерова О. В.* Магнитный, контроль твердости чугуновых прокатных валков // Дефектоскопия. – 2008. – № 5. – С. 3–9.
14. *Damage and fracture analysis of heat-resistance steel subjected to thermal cyclic loading* / P. Yasnii, P. Maruschak, R. Bishchak et al. // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 2009. – 52. – P. 22–25.
15. *Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д.* Аномальний прояв високотемпературної деградації металу шва зварного з’єднання ошаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 73–79.

- (*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D. Abnormal Manifestation of the High-Temperature Degradation of the Weld Metal of a Low-Alloy Steel Welded Joint // Materials Science. – 2007. – 43, № 1. – P. 77–84.*)
16. *Масштабные уровни деформации и разрушения и механические свойства стали 25Х1М1Ф до и после неизотермического нагружения / П. В. Ясний, П. О. Марущак, С. В. Панин, Р. Т. Бищак // Физ. мезомеханика. – 2010. – 13, № 2. – С. 87–96.*
 17. *Марущак П. О., Коноваленко І. В., Біщак Р. Т. Аналіз розтріскування поверхні і методика оцінки термовтоми матеріалів // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2008. – 13, № 1. – С. 33–37.*
 18. *Non-destructive analysis of heat-resistant steel applied to continuous caster roll after plastic deformation / P. Yasniy, P. Maruschak, V. Hlado et al. // Proc. of the 5th Int. Workshop ITELMS'2010 (June 03–04). – Panevezys, 2010. – P. 27–30.*
 19. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – К.: ИПП им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2004. – 133 с.*
 20. *Чаусов Н. Г. Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – К., 1992. – 32 с.*
 21. *Марущак П. О., Біщак Р. Т., Пилипенко А. П. Кінетика статичного деформування та руйнування теплостійкої сталі 25Х1М1Ф після попереднього термоциклічного напруцювання // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2008. – 13, № 4. – С. 56–60.*
 22. *Satoh Y., Yamamura T., and Takimoto T. Techniques for long life materials applied to continuous caster roll // Technical Report. Kawasaki Steel. – 2001. – № 45. – P. 42–49.*
 23. *Марущак П. О., Біщак Р. Т., Либерман М. В. Автоматизированный стенд для оценки термической усталости материалов // Мат. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. “Инженерия поверхности и реновация изделий” (27–29 мая, Ялта). – К.: АТМУ, 2008. – С. 159–161.*
 24. *Патент України № 45972. Спосіб оцінювання деградації матеріалу / П. О. Марущак, Р. Т. Біщак. – Оуб. 10.12.2009, Бюл. № 23.*
 25. *Pokluda J. and Šandera P. Micromechanisms of Fracture and Fatigue: A Multiscale Context. – Springer, 2010. – 295 p.*
 26. *Марущак П. О., Біщак Р. Т., Гладько В. Б. Механізми деформування сталі 25Х1М1Ф на мезо- і мікрорівнях // Вісн. Харківського нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. П. Василенка. – 2009. – 77. – С. 214–218.*
 27. *Игнатович С. Р., Закиев И. М. Контроль качества поверхности с использованием интерференционного профилометра // Винахідник і раціоналізатор. – 2007. – № 6. – С. 8–11.*
 28. *Марущак П. О., Сорочак А. П., Біщак Р. Т. Энергоемкость статического разрушения материала с множественными дефектами // Сб. трудов V Междунар. науч.-техн. конф. “Современные проблемы машиностроения” (23–25 ноября). – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – С. 246–250.*
 29. *Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних металічних матеріалів “в об’ємі” за дії агресивних середовищ // Пробл. прочноти. – 2009. – № 6. – С. 79–94.*
 30. *Вплив термоциклічного напруцювання на деградацію властивостей теплотривкої сталі / П. О. Марущак, В. Б. Гладько, Р. Т. Біщак, А. П. Пилипенко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 1. – С. 90–95.*
(*Marushchak P. O., Hlad'o V. B., Bishchak R. T. and Pylypenko A. P. Influence of thermocyclic operation on the degradation of properties of a heat-resistant steel // Materials Science. – 2010. – № 1. – P. 102–107.*)

Одержано 30.11.2010