

УДК 670.191.33

## ВПЛИВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО НАПРАЦЮВАННЯ НА ДЕГРАДАЦІЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ

П. О. МАРУЩАК<sup>1</sup>, В. Б. ГЛАДЬО<sup>1</sup>, Р. Т. БИЩАК<sup>1</sup>, А. П. ПИЛИПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування, Київ

З використанням методів неруйнівного контролю, а також методу повних діаграм досліджено основні закономірності впливу термоциклічного напруження на кінетику деградації властивостей сталі 25X1M1Ф. Методом вимірювання мікротвердості встановлено, що протягом циклічних змін температури поверхня зразків зміцнюється, водночас їх внутрішній шар знеміцнюється внаслідок процесів термічного повороту і самовідпуску матеріалу. Показано, що за статичного розтягу зразків після напруження змінюється кінетика накопичення пошкод. При цьому поверхневий шар полікристала розглядали як автономну підсистему. Вивчено локалізоване пластичне течіння на мезорівні у поверхневому шарі матеріалу.

**Ключові слова:** термоциклічне напруження, мікротвердість, деградація, мезорівень.

Ролики машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) експлуатують за циклічної зміни температури поверхневих шарів, спричиненої періодичним контактом зі слябом та примусовим повітряно-водяним охолодженням [1]. Це обумовлює структурно-фізичну деградацію матеріалу, вичерпування пластичності, накопичення розсіяних мікродфектів, зародження сітки розгару [2–4]. Методи твердості та мікротвердості кількісно інформують про властивості матеріалу в мікрооб'ємах (мікротвердість) та конгломератах зерен – мезооб'ємах (твердість), коли інші методи малоінформативні [5, 6]. Твердість та мікротвердість добре корелюють з іншими механічними властивостями. Проте кінетика термоциклічної пошкоджуваності досить складна. Відсутні також дані про пошкоджуваність та деградацію властивостей матеріалів роликів МБЛЗ з урахуванням циклічного напруження матеріалу. Крім того, важливо дослідити закономірності деформування та руйнування матеріалів після термоциклічного напруження на мезо- і макромасштабному рівнях.

Мета роботи – оцінити деградацію властивостей теплотривкої сталі 25X1M1Ф після термоциклічного напруження.

**Методика досліджень.** Циліндричні зразки діаметром 5,0 mm термоциклували в діапазоні температур  $13 \leftrightarrow 500^\circ\text{C}$  із частотою 0,013 Hz впродовж 1000; 2000 і 2500 cycles. Форма термоциклу пилкоподібна. Фіксували розподіл температури на поверхні зразка та кількість термоциклів [3].

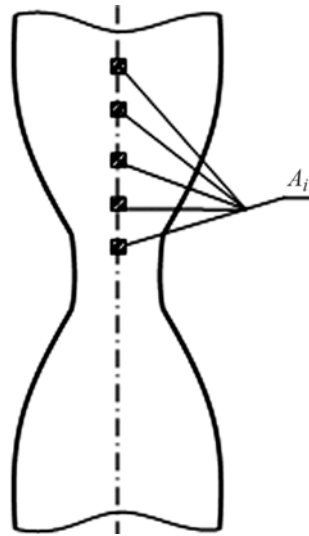
Термоцикловані зразки деформували розтягом з побудовою повних діаграм на випробувальній установці ZD-100Pu з комп'ютеризованою вимірною системою. Під час експерименту заміряли зусилля і поздовжню та поперечну деформації зразка. Після напруження – твердість (мікротвердість) та залишкову деформацію.

---

Контактна особа: П. О. МАРУЩАК, e-mail: maruschak@tu.edu.te.ua

Рис. 1. Схема розташування контрольних точок на зразку для замірів та досліджень після термоциклічного напрацювання з подальшим одноосовим розтягом.

Fig. 1. Scheme of location control points on the specimen for measuring and testing after thermal-cycles work with the following uniaxial tension.



Деградацію поверхні зразка після термоциклічного напрацювання аналізували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И за різного ступеня деформування в контрольних точках  $A_i$  (рис. 1). Зміцнення матеріалу після термоциклікування оцінювали за твердістю і мікротвердістю, що дало можливість фізично обґрунтувати накопичення розсіяних пошкод на мікро- та мезорівнях [6–9]. Першу заміряли твердоміром Супер Роквелл за навантаження 150 N, а другу – мікротвердоміром ПМТ-3 за навантаження 1 N та витримки 15 s.

**Твердість та мікротвердість матеріалу після термоциклічного напрацювання.** Поверхня під час циклічного термоциклікування знаходиться в особливих енергетичних умовах, що спричиняє незворотні зміни властивостей і структури. Через невідповідність теплофізичних властивостей складників мікроструктури (фериту, перліту, включень тощо) за циклічної зміни температури створюються напруження, що сприяє вичерпуванню пластичності та формуванню розсіяних пошкод у вигляді зміцнених мікроділянок матеріалу. Інтенсивність накопичення пошкод визначають тривалість напрацювання, структурні перетворення в метали і режим навантаження (рис. 2). Помітно, що мікротвердість ( $H_\mu$ ) на поверхні термоциклованого зразка монотонно зростає зі збільшенням кількості термоциклів (рис. 2b) з виходом на “насичення”.

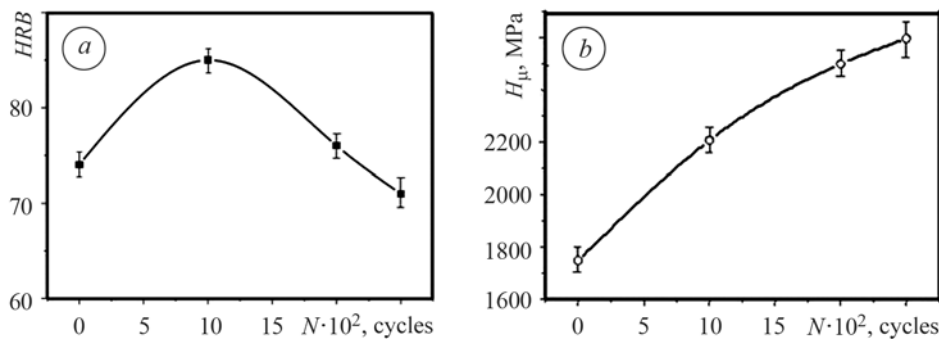


Рис. 2. Залежність твердості  $HRB$  (a) та мікротвердості  $H_\mu$  (b) сталі 25X1M1Ф від кількості термоциклів напрацювання  $N$ .

Fig. 2. Dependence of hardness  $HRB$  (a) and microhardness  $H_\mu$  (b) of 25X1M1Ф steel on the number of thermal-cycled work,  $N$ .

Для твердості ( $HRB$ ) спостерігали дещо іншу закономірність. Із збільшенням напрацювання до  $10^3$  циклів вона зростає, після чого знижується і за напрацювання  $2,5 \cdot 10^3$  циклів є дещо менша за твердість матеріалу у вихідному стані (рис. 2a). Тобто в макрооб’ємах матеріалу відбувається знецінення,

спричинене термонапруженнями, процесами термічного повернення та самовідпуску. Отже, пластичне деформування за термоцикування можна розглядати як багаторівневу систему, в якій пластичне течіння розвивається самоузгоджено на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях. Поверхневий шар деформується значно легше, ніж матеріал у внутрішніх шарах. Мікротвердість на поверхні зразків більша, ніж всередині, незалежно від кількості термоциклів напрацювання (рис. 3).

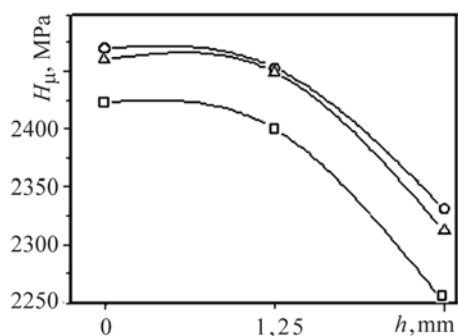


Рис. 3. Зміна мікротвердості  $H_{\mu}$  сталі 25X1M1Φ по глибині зразка  $h$  після 1000 (□); 2000 (△) і 2500 (○) термоциклів напрацювання.

Fig. 3. Change of microhardness  $H_{\mu}$  of 25X1M1Φ steel across the specimen depth after 1000 (□); 2000 (△) and 2500 (○) thermal-cycles work.

Механічні властивості поверхневих шарів інші, ніж у глибині матеріалу. Основними причинами цього є незавершеність зв'язків атомів на поверхні (поверхнева енергія), а також відсутність умов для стиснення (обмеження) під час пластичного течіння сприятливо розташованих до напрямку навантаження мікрооб'ємів матеріалу [3].

Під час термоциклічного навантажування зерна та їх межі деформуються по-різному. Процеси міжзернової пластичності суттєво впливають на кінетику їх наклепу та розвиток мікротріщин. Мезоскопічні механізми деформування проявляються в поверхневих шарах полікристалів за термоциклічного навантажування. Особливості поверхневого шару обумовлюють розвиток у ньому пластичного течіння за напружень, нижчих границі текучості. Пружно-деформований підшар "навантажує" пластично деформований поверхневий шар за схемою циклічного стиску-розтягу. На поверхні зразків після  $10^3$  термічних циклів виявили прямолінійні розорієнтовані смуги ковзання  $A$  (рис. 4а). Із зростанням кількості термоциклів напрацювання виникають системи слідів ковзання, що перетинають утворені раніше. Це свідчить про пластичне деформування послідовно, або одночасно в кількох кристалографічних площинах.

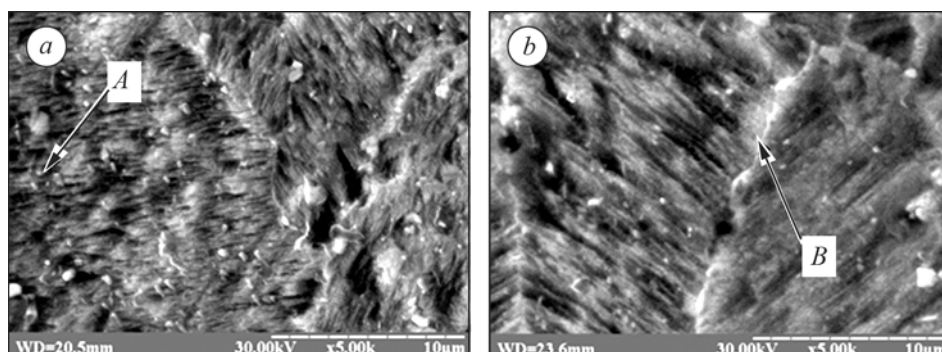


Рис. 4. Мікрорельєф на поверхні зразків сталі 25X1M1Φ після 1000 (а) та 2500 (б) термоциклів напрацювання.

Fig. 4. Microrelief on the 25X1M1Φ steel specimen surface after 1000 (a) and 2500 (b) thermal cycles work.

Із зростанням кількості термоциклів напрацювання спостерігали поворот окремих зерен, що помітно за певним викривленням смуг ковзання  $B$  (рис. 4b). На межах зерен смуги ковзання гальмуються з переходом у суміжне зерно (за значної розорієнтації ґратки), або викривляються та продовжуються в сусідньому зерні (за наявності малокутових меж). Неоднорідність пластичного деформування окремих ділянок закріплюється в них під час термоцикування, через що утворюються локальні кристалографічні зсуви.

Зміна густини пошкод у металі супроводжується зміною їх геометрії, розмірів та просторової орієнтації, що обумовлює зміну мікротвердості поверхневих шарів.

#### Макромеханізми деформування термоциклованого матеріалу.

Метод повних діаграм деформування ефективний для оцінювання впливу попереднього термоцикування на кінетику накопичення пошкод і тріщиностійкість матеріалу за подальшого статичного розтягу. Виявлено, що термомеханічне навантажування зразків спричиняє чітку площадку текучості за напружень, нижчих вихідної границі текучості матеріалу. Діаграма деформування матеріалу у вихідному стані істотно відрізняється від діаграми розтягу термоциклованого матеріалу (рис. 5). Зокрема, за напрацювання 2500 термоциклів умовна границя текучості сталі знизилась від 650 до 520 МПа.

Проте помітно, що напрацювання збільшує залишкову деформацію матеріалу. Якщо для матеріалу у вихідному стані  $\epsilon = 25\%$ , то для термоциклованого становить 30%. Підвищення пластичності матеріалу із напрацюванням пов'язано із термічним поверненням у внутрішніх шарах матеріалу, поступовим залученням мезооб'ємів матеріалу до пластичного деформування, що підтверджує зміна деформації в момент руйнування.

Відмінності спостерігали також у нахилах діаграм деформування на ділянках спадання, що свідчить про відмінність енергоємності макроруйнування. Виявлено, що зі збільшенням термоциклічного напрацювання кут нахилу діаграми на ділянці спадання зменшується.

**Мезо- та мікромеханізми деформування термоциклованого матеріалу.** Проаналізовано закономірності формування рельєфу на бічній поверхні розтягнутого зразка біля шийки згідно з рис. 1. Через деформування в поверхневому шарі виникає смугаста гофрована мезоструктура (рис. 6). Смуги пластичного деформування орієнтовані в напрямку прикладання зусилля для всіх досліджених зразків. У зонах локальної концентрації напружень помітні смуги ковзання (рис. 6a, d). Пластичне течіння в мезосмугах біля шийки зразка обумовлене деформаційною здатністю матеріалу та розподілом напружень і деформацій на межі поверхневий шар–підшар [9].

У зразку формується симетрична шийка, вкрита мезосмугами деформування (рис. 6b, e). Із зростанням деформації зразка окремі мезосмуги зміцню-

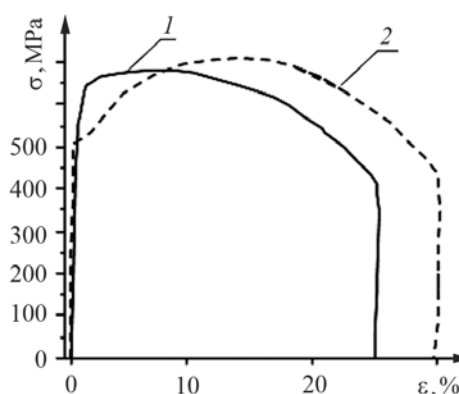


Рис. 5. Повні діаграми статичного розтягу зразків із сталі 25X1M1Φ у вихідному стані (1) та після 2500 термоциклів напрацювання (2).

Fig. 5. Complete static tension diagrams of 25X1M1Φ steel in the initial state (1) and after 2500 thermal-cycle work (2).

ються, деформування продовжується у суміжних смугах, де утворюються ділянки впорядкованого мезорельєфу, збільшується інтенсивність руйнування початкової смугової фрагментованої мезосубструктури та локально зменшуються макросмуги локалізованого течіння.

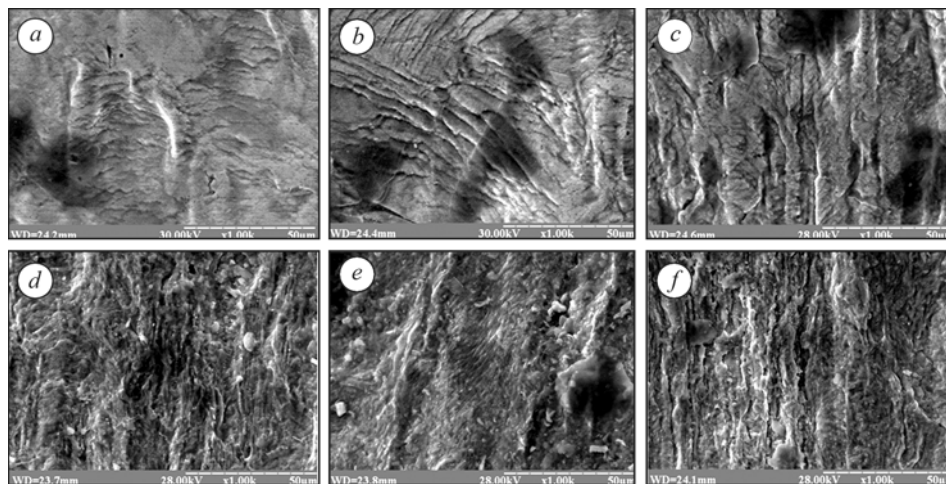


Рис. 6. Деформаційний рельєф статично деформованого зразка у вихідному стані (a–c) та після 2500 термоциклів напрацювання (d–f).

Fig. 6. Deformation relief of the statically deformed specimen in the initial state (a–c) and after 2500 cycles of thermal-cycle work (d–f).

Зсувна та поворотна компоненти деформації максимальні в шийці, а смуги зсуву фрагментують її матеріал (рис. 6c, f). Внаслідок анізотропії властивостей матеріалу в окремих мікронах виникають перенапруження, що спричиняють локальні пластичні деформації. Із збільшенням кількості термоциклів напрацювання зростає кількість концентраторів напружень у поверхневому шарі (рис. 6f) та поздовжніх смуг розшарування, порівняно з матеріалом у вихідному стані (рис. 6c). Надлишок поверхневих дефектів в термоциклованих зразках зростає, що помітно за збільшенням мікротвердості.

Через накладення лінійних та зсувних компонентів деформування утворюються значні зсуви зерен та субзерен матеріалу (рис. 6c, f), а також тріщини розшарування, орієнтовані вздовж напрямку дії розтягу. Формування цих тріщин спричинено поперечними напруженнями розтягу в шийці та підвищенням під час деформування енергії меж. Механізми подальшого руйнування пов'язані із відмінностями властивостей окремих мезосмуг. Із зменшенням поперечного перерізу зразка реалізуються умови для переходу до об'ємного напруженого стану, втрачається зсувна макротривкість. У певному перерізі зразка формується макроконцентратор напружень, який локалізує макродеформацію і ініціює самоорганізацію всієї системи мезодефектів перерізу. Це спричиняє виникнення в зоні локалізації деформацій зародкових мікротріщин, фрагментацію матеріалу і його руйнування [9].

## ВИСНОВКИ

Досліджено вплив термоциклічного напрацювання сталі 25X1M1Ф на твердість і мікротвердість поверхневих шарів. Виявлено, що зі збільшенням кількості термоциклів напрацювання мікротвердість поверхневого шару зрос-

тає. Водночас у зразку зафіксовано термічне повернення, що проявляється у зниженні мікротвердості матеріалу від поверхні до центральної частини зразків.

Руйнування зразків за розтягу вивчали, ураховуючи послідовність процесів деформування. На поверхні зразка виявлено мезосмуги пластичного течіння. Відмінності пластичного зсуву тут обумовлюють неоднорідний напружено-деформований стан у шийці зразка. Термоциклування спричиняє накопичення поверхневих дефектів та збільшує неузгодженість деформування на різних рівнях. Це інтенсифікує утворення мезосмуг, полегшує перерозподіл лінійних та зсувних деформацій, що збільшує пластичність матеріалу, але сприяє локалізації напружень.

*РЕЗЮМЕ.* С использованием неразрушающего метода, а также полных диаграмм нагружения исследованы основные закономерности влияния термоциклической наработки на деградацию свойств стали 25X1M1Ф. Методом измерения микротвердости установлено, что в процессе термоциклирования поверхность образцов упрочняется, а их внутренний слой разупрочняется вследствие процессов термического возврата и самоотпуска материала. Показано, что при статическом растяжении образцов после термоциклической наработки изменяется кинетика накопления повреждений. При этом поверхностный слой поликристаллического образца рассматривали как автономную подсистему. Изучены процессы локализованного пластического течения на мезоуровне в поверхностном слое материала.

*SUMMARY.* The regularities on the influence of thermal-cycle work on degradation of the heat-resistant 25X1M1Ф steel properties have been investigated by the non-destructive methods, and also the method of complete leading diagrams. Using the method of microhardness measuring it has been found that in the process of thermocycling the specimen surface hardened and its internal layer softened due to the processes of material thermal self-recovery and self-tempering. In this case the surface layer of polycrystal specimen was considered to be an autonomous mesostructural level of deformation, in which plastic flow developed more easily than in the material volume.

**Роботу фінансував Державний фонд фундаментальних досліджень, реєстраційний номер 0109U005863.**

1. *Thermal fatigue material degradation of caster rolls' surface layers* / P. Yasniy, P. Maruschak, Y. Lapusta et al. // Mech. Adv. Mater. Struct. – 2008. – **15**, № 6, 7. – P. 499–507.
2. *Алехин В. П.* Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
3. *Марущак П. О., Коноваленко І. В., Біцак Р. Т.* Аналіз розтріскування поверхні і методика оцінки термовтоми матеріалів // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2008. – № 1. – С. 33–37.
4. *Малыгин Г. А., Лихачев В. А.* Роль анизотропии теплового расширения и тепловых микронапряжений // Заводская лаборатория. – 1966. – № 3. – С. 335–347.
5. *Кукса Л. В., Арзамасова Л. М.* Метод масштабного эффекта механических свойств поликристаллических сплавов на микро- и макроуровнях // Там же. – 1999. – № 6. – С. 54–55.
6. *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.
7. *Погребняк А. Д., Желдубовский А. В.* К вопросу об оценке сопротивления усталости жаропрочных материалов на основе измерения микротвердости. Сообщ. 1. Закономерности изменения состояния поверхности в процессе усталости // Пробл. прочности. – 1983. – №12. – С. 27–31.
8. *Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах* / Р. Р. Балохонюк, А. В. Болеста, М. П. Бондарь и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
9. *Koval A. V. and Panin S. V.* Mesoscale deformation and cracking of surface-hardened low carbon steel // Theoret. and Appl. Fract. Mech. – 2000. – **34**. – P. 117–121.

Одержано 05.12.2008