

УДК 670.191.33

П. Марущак¹, канд. техн. наук; Р. Біщак¹;
М. Бондар², канд. пед. наук;
А. Сорочак¹

¹Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя

²Національний університет природокористування та біоресурсів

МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ МЕЗОСТРУКТУРИ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛІ 15X13МФ ЗА НОРМАЛЬНИХ ТА ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

У статті досліджено процеси пластичного деформування сталі 15X13МФ при 20°C і 600°C з урахуванням ієрархічного підходу. Це дозволяє описати деградацію структури матеріалу і пов'язати її із фрагментацією на макро-, мезо- і мікрорівнях.

Ключові слова: висока температура, розтяг, структура, тріщина, поверхня, сталь.

P. Maruschak, R. Bishchak, M. Bondar, A. Sorochak

MECHANISMS OF SURFACE MESOSTRUCTURE FORMATION IN 15Kh13MF STEEL AT NORMAL AND HIGH TEMPERATURES

The article demonstrate that the multilevel process of plastic deformation of 15Kh13MF steel at 20°C and 600°C can be correctly described with the mesomechanics. This approach describe material fragmentation at mesolevel and microstructure degradation.

Key words: high temperature, tension, structure, crack, surface, steel

Висока міцність і низька пластичність ферито-мартенситних сталей зумовлює їхнє використання у важливих конструкціях, зокрема у роликах машин безперервного лиття заготовок [1-3].

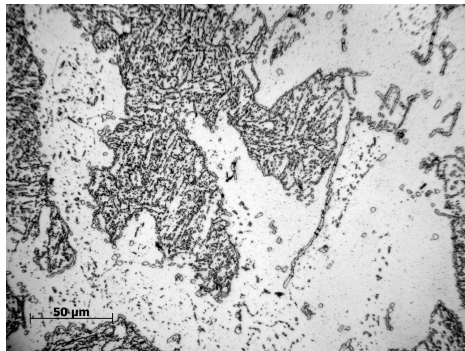
У попередніх працях досліджено субструктурні зміни і закономірності руйнування сталі 15X13МФ [2-5]. Це допомогло встановити фундаментальні закономірності розвитку деформування на макро- і мікрорівнях. Крім того, інтенсивно розвиваються підходи мезомеханіки, які дозволяють описати полікристалічне тіло як нерівноважну, самоорганізовану ієрархічну систему [6].

Згідно з ними пластичне деформування розглядають як синергетичний процес втрати стійкості до зсуву на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях. При пластичному деформуванні у високотемпературних умовах у матеріалі відбуваються процеси термічного повороту, інтенсифікується еволюція дислокаційної структури, зростає пластичне розпушення. У поверхневому шарі генеруються деформаційні дефекти. Це збільшує тривалість квазірівномірного пластичного течіння матеріалу до макролокалізації деформації [1].

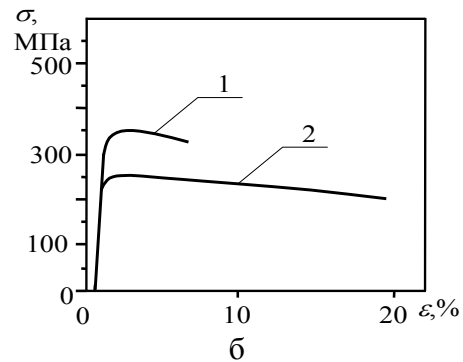
Мета даної роботи – дослідити вплив температури на механізми деформування і руйнування сталі 15X13МФ на різних масштабних рівнях.

Методика досліджень. Зразки сталі 15X13МФ з робочою частиною 4,0×6,0×25,0 мм випробовували розтягом за швидкості деформування $\dot{\epsilon}=10^{-1} \text{ с}^{-1}$ на автоматизованій сервогідролінійній установці СТМ-100. Визначали характеристики міцності й пластичності за діаграмою статичного розтягу. Структуру сталі 15X13МФ у вихідному стані досліджували на металографічному мікроскопі Axiovert 40 MAT. Морфологію зламів зразків аналізували на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Макромеханізми деформування. Сталь 15X13МФ належить до ферито-мартенситного класу. Мікроструктура сталі 15X13МФ складається із рейкового дислокаційного мартенситу – рис. 1а, а також значної частини фериту, “масивних” включень і виділень карбідів [2, 3].



а



б

Рисунок 1 – Структура (а) і діаграми деформування сталі 15X13МФ (б) при 20 °С (1) і 600 °С (2)

Діаграми деформування при 20 і 600 °С є подібні за формою. Виявлено кілька механізмів деформування, зокрема, спочатку квазіпружно деформуються мартенситні рейки. На стадії псевдотекучості зростає питома частка мезооб’ємів, орієнтованих переважно уздовж головних напружень ($\bar{\sigma}$) або у напрямку дії максимальних дотичних напружень (τ_{\max}), упорядковуються домени вихідної структури [7].

Мезомеханізми деформування. Аналізували густину і морфологію смуг ковзання зразків, досліджених при 20 °С (1) і 600 °С (2), на різних відстанях від зламу – рис.1б. Виявлено, що для досліджених температур із збільшенням відстані від зламу зменшується неоднорідність слідів ковзання. За довжиною вони не перевищують розміру зерна, що свідчить про їхнє утворення на стадії рівномірної текучості, яка охоплювала окремі зерна, сприятливо орієнтовані до площини навантажування. Утворенню мезосувів передують локальне пластичне деформування, при цьому на межах між феритом і мартенситом інтенсивно накопичуються мікрodefекти – рис. 2а.

Мезосуви зумовлюють перебудову дислокаційної структури матеріалу, а локалізація структурних деформацій спричиняє фрагментацію мартенситних рейок. Мезодеформації накопичуються уздовж смуг ковзання, і перетинки між ними руйнуються – з утворенням дрібних, практично паралельних тріщин – рис. 2б.

Дослідження еволюції дефектів дозволило виявити такі закономірності:

- мікропластичні деформації локалізуються на ділянках, прилеглих до меж зерен;
- із зростанням відносної деформації ці локальні структурні зміни “поширюються” уздовж певних кристалографічних напрямків, формуючи дефекти вищого порядку;
- деформування стає мезомасштабним.

Відомий синергетичний критерій пластичності, що дозволяє описати кінетику деформування матеріалу [8]:

$$\left(\text{Rot} S^{\alpha\mu} \right) = V \left(\text{Rot} R^{\alpha} \right)^{\mu},$$

де V – швидкість деформування $d\varepsilon / dt$; $S^{\alpha\mu}$ – зміна в часі градієнта складової тензора дисторсії; R^{α} – градієнт складової тензора згинання-кручення. Згаданий критерій описує взаємовплив роторів первинного ковзання і акомодативних вторинних потоків деформаційних дефектів.

Отже, у деформованому матеріалі можна виділити об’єм, у межах якого загальний вихор усіх потоків деформаційних дефектів урівноважується:

$${}^{\text{Rot}} \sum J_k = 0,$$

де J_k – k -й потік деформаційних дефектів.

Лінійний розмір цього об'єму визначає верхній структурний рівень деформування, який слід враховувати при аналізі деформування полікристалічного тіла як ієрархічної системи [8]. Виявлено, що за однакової деформації частка структурних дефектів при 20 °С вища, ніж при 600 °С, що пов'язано з більшим спотворенням кристалічної ґратки матеріалу. Інтенсифікація зміни дислокаційної структури за температури 600 °С зумовлена зменшенням кількості мезодефектів – унаслідок впливу процесів термічного повороту. Очевидно, це пов'язано зі зниженням енергетичного бар'єра зміни структурного стану атомів матеріалу. Виявлено, що при деформації (~7,0 %) у матеріалі формуються окремі розорієнтовані ділянки, із частковим збереженням кристалічної структури – рис. 2а.

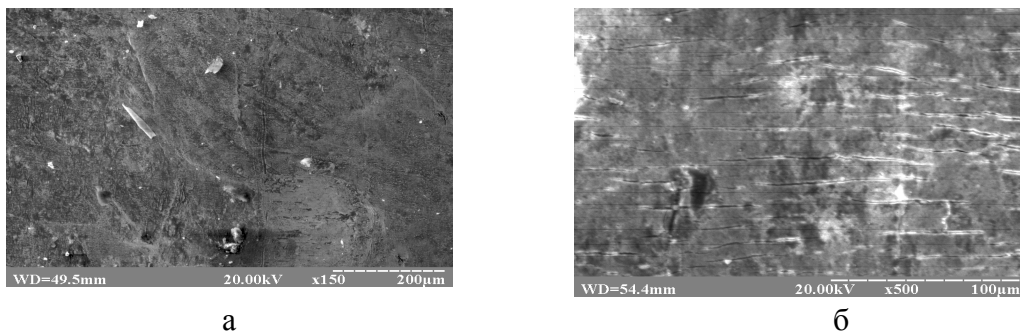
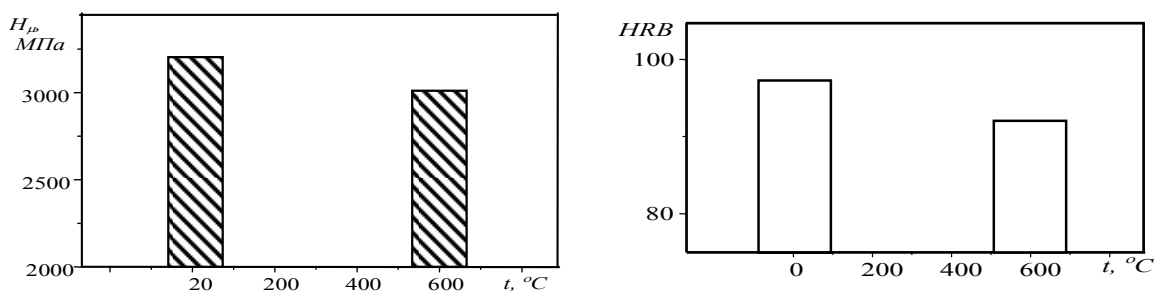


Рисунок 2 – Мезосмуги ковзання (а) і система мікротріщин (б) на бічній поверхні зразків, випробуваних при 600 °С

При деформації більше 8% виявлено систему первинних мікротріщин, орієнтованих перпендикулярно напрямку розтягування, які мають ширину 1-2 мкм і розподілені квазіперіодично із кроком ~ 15-20 мкм – рис. 2б. Розтріскані ділянки утворюють окремі фрагменти, на межах яких починають формуватися смуги локалізованого деформування. Гальмується зростання мікротріщин при перетині меж підзон із різною пластичністю.

За високих температур додаткові системи ковзання активізуються, що сприяє розблокуванню локальних зсувів та перетину мезосмуг. Підвищення температури рівномірно розподіляє деформацію по перерізу зразка, а це підвищує пластичність матеріалу та збільшує його залишкову деформацію [2].

Граничні пластичні деформації сталі супроводжуються істотною еволюцією субструктури матеріалу: зростає густина дислокацій у малокутових границях, релаксують окремі поля макронапружень. Дані процеси визначаються граничним зміцненням субструктури, “насиченням” її значною кількістю мікродефектів. Підвищення температури деформування від 20 °С до 600 °С зменшує граничне зміцнення сталі 15X13МФ. Твердість та мікротвердість сталі 15X13МФ зумовлена впливом процесів термічного повороту та підвищенням пластичності зі зростанням температури – рис. 3 а,б.



а б
Рисунок 3 – Мікротвердість (а) та твердість (б) сталі 15X13МФ, деформованої за температури 20 і 600 °С в околі зламу зразка

Механізми руйнування. Злами досліджених зразків утворені макрозсувом. Поверхня руйнування сталі 15X13МФ при 20 °С зображена ділянками сколювання на рис. 4а, які оторочені смужками в'язкого межзеренного відриву. У зламі сталі 15X13МФ переважає внутрішньозеренний механізм руйнування, зумовлений зниженою тримкістю меж між рейками дислокаційного мартенситу. Фасетки сколювання мають складний рельєф, схожий на струмковий візерунок, що відображає злами пакетів субзерен різних кристалографічних напрямків. Руйнування сколюванням відбулося унаслідок злиття кількох локальних тріщин, розміщених у менш сприятливо орієнтованих площинах окремих зерен у єдину поверхню.

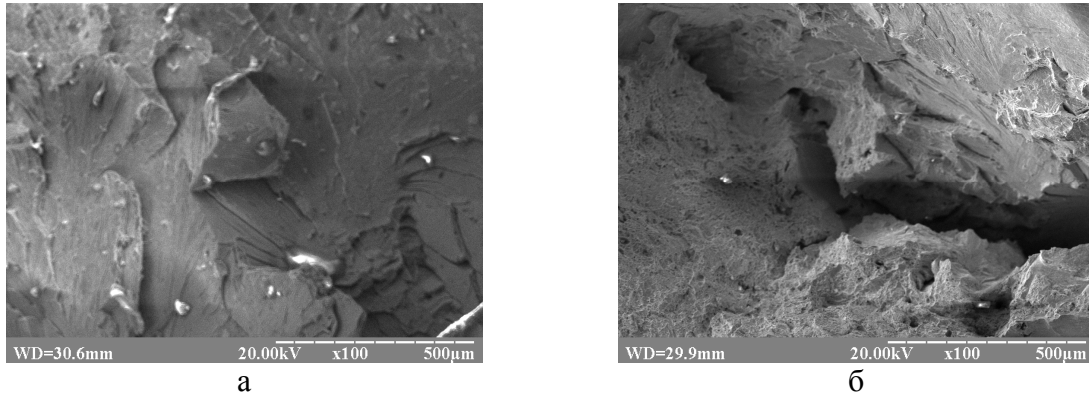


Рисунок 4 – Поверхня руйнування сталі 15X13МФ при 20 °С (а) і 600 °С (б)

Унаслідок пластичного деформування і розриву перемичок між тріщинами утворюються елементи мікрорельєфу – гребені та сходинки. Наявність у зламі гладких ділянок ймовірно пов'язана з інтенсивною деформацією зсуву. При 600 °С сталь 15X13МФ має в'язку структуру зламу, що зумовлена зародженням мікропор на дисперсних включеннях – рис. 4б. Мікромеханізми руйнування підтверджують зміну кінетики деформування матеріалу. Сканування бічної поверхні зразків сталі 15X13МФ, випробуваних при різних температурах, підтвердило якісну відмінність механізмів накопичення пластичних пошкоджень матеріалу.

Висновки. Виявлено, що кінетика пластичного деформування сталі 15X13МФ визначається процесом розвитку мезоскопічної структури. Початку макроруйнування передуює виникнення поперечних мікротріщин у поверхневому, пластично деформованому шарі.

Сталь 15X13МФ при температурі 20 °С руйнується за механізмом внутрішньозеренного відколу із формуванням фасеток, кристалічних ділянок, унаслідок проходження тріщини певними кристалографічними площинами. Розрив проміжків між цими площинами відколу зумовлює утворення сходинок, які виглядають як річковий візерунок. При 600 °С руйнування майже повністю в'язке за механізмом ямкового відриву.

Одним із подальших завдань є дослідження еволюції деформаційного мезорельєфу при пластичному деформуванні сталі 15X13МФ та розвиток підходів неруйнівного контролю пошкоджуваності поверхневих шарів.

Роботу виконано за кошти україно-словенського проекту, реєстраційний номер 0109U005184.

1. Панин В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий / Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. – Томск: Изд-во политех. ун-та, 2008. – 286с.

2. Yasniy P.V. Hardening of heat-resistant steels under conditions of plastic deformation at different temperatures / P.V. Yasniy, P.O. Maruschak and V.B. Hlado // *Computational & Experimental Analysis of Damaged Materials*, 2007. – P. 167–181.
3. Вплив пластичного деформування на структурну деградацію теплостійких сталей / Ясній П.В., Гладько В.Б., Марущак П.О., Баран Д.Я. // *Машинознавство*. – 2007. – №4 – С. 7–12.
4. Strain hardening of steels: studies of dislocation density and hardness / P. Yasniy, P. Maruschak, V. Hlado, D. Baran // *Proc. of the 2nd International conference “Modern methods and instruments of quality estimation and diagnostics state of objects”* (October 19-20), Mogilyov, Belarus, Bel-RussSTU. – 2006. – P. 201–203.
5. Yasniy P. Diagnostics of heat-resistance steel hardening and dislocation structure evolution after plastic deformation / P. Yasniy, P. Maruschak, V. Hlado // *Proc. of the XI WSEAS International conference “Sustainability in Science Engineering”* (May 27–29).– Timisoara, Romania. – 2009.– 1.– P. 47–50.
6. Гольдштейн Р.В. Модель формирования структуры разрушения в слое с упрочненными приповерхностными зонами / Гольдштейн Р.В., Панин В.Е., Осипенко Н.М, Л.С. // *Физическая мезомеханика*. – 2005. – 8. – № 6. – С. 23–32.
7. Multiple cracking in surface-hardened tensile specimens and their fracture mechanisms / L.S. Derevyagina, V.E. Panin, R.V. Goldstein, et al // *Proc. of the 13th International Conference “Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures”*, (July 1-6.-2007).– Alexandroupolis, Greece. – Springer. – P. 1391–1392.
8. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В. и др. В 2 т. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1 – 298 с., Т. 2 – 320 с.

Одержано 10.07.2009 р.