

**КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ****А.И. Болотников**

kubikmaster@yandex.ru

SPIN-код: 4364-1211

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведено статистическое исследование изменения микротвердости в процессе циклического нагружения конструкционных сталей на образцах из стали 20, стали 45 и 12Х18Н9Т. Рассчитаны значения зависимости среднего квадратичного отклонения микротвердости и коэффициента неоднородности структуры от относительной долговечности. Полученные статистические характеристики имеют нелинейный характер, что хорошо согласуется с определенными ранее изменениями физических свойств испытанных образцов. Построена зависимость числа трещин различной длины от относительного числа циклов нагружения. Полученные данные соотнесены с опубликованными ранее данными, в результате чего отмечено, что максимум микротвердости, а также статистических и физических параметров наблюдается при одном и том же значении относительной долговечности, соответствующем началу стадии слияния микротрещин.

Ключевые слова

Микротвердость, неразрушающий контроль, усталость, микротрещины, электросопротивление, вихревой ток, конструкционные стали, прочность

Поступила в редакцию 14.09.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Методы неразрушающего контроля важны при оценке усталостного повреждения материалов и конструкций [1–8]. Одним из таких методов является определение микротвердости. Авторы работы [7] отмечали, что микротвердость изменяется нелинейно, и связывали этот процесс с распределением дислокаций во время эволюции поврежденности. Авторы исследования [8] связывают нелинейный характер изменения микротвердости с процессами упрочнения и разупрочнения в ходе циклирования. Выявление этого характера важно при оценке методами неразрушающего контроля остаточной прочности материалов и конструкций. В работах Л. Ботвиной и ее соавторов отмечен квазипериодический характер изменения поврежденности [9]. В данной статье выполнено статистическое исследование микротвердости в процессе циклического нагружения и показана ее связь с физическими параметрами, а также с развитием микротрещин.

Рассмотрены данные изменения микротвердости, полученные на разных стадиях циклического нагружения образцов из трех конструкционных сталей с различной структурой: стали 20, стали 45 и 12Х18Н9Т. Химический состав данных сталей представлен в таблице.

Химический состав и механические свойства исследуемых сталей

Тип материала	Химический состав, %						Механические свойства	
	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Сталь 20	0,17	0,21	0,36	0,04	0,07	0,05	283,0±4,7	435,3±4,2
Сталь 45	0,43	0,25	0,55	0,05	0,11	0,11	342,0±12,5	641,7±22,0
12X18H9T	0,07	0,28	0,91	9,52	0,36	18,0	211,7±4,6	593±6,1

Было проведено не менее 100 измерений микротвердости для каждого значения относительной долговечности в зоне, отмеченной на рис. 1. Для статистического анализа использовали среднее квадратичное отклонение

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum(\bar{H}_\mu - H_{\mu n})^2}{n-1}}$$

и коэффициент неоднородности структуры [10]

$$K_{H_\mu} = \frac{\bar{H}_\mu}{H_{\mu i}}$$

где \bar{H}_μ и $H_{\mu i}$ — среднее и минимальные значения микротвердости соответственно; n — число измерений микротвердости для каждого значения относительной долговечности

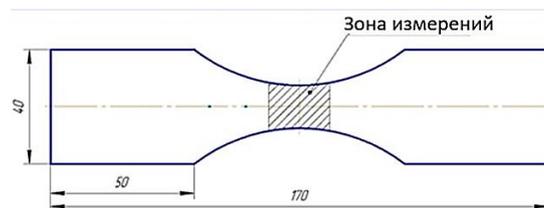
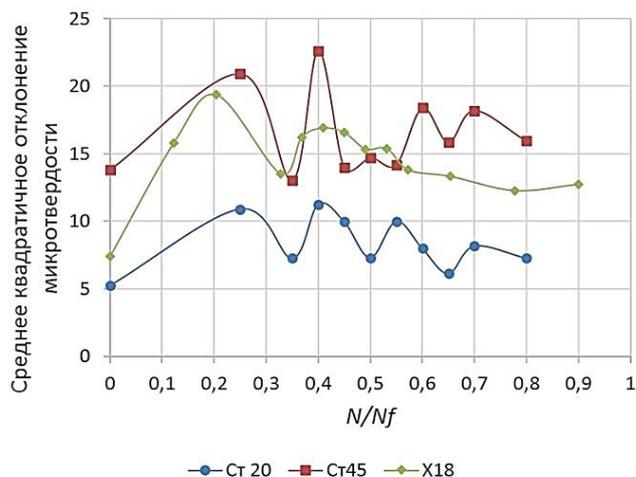


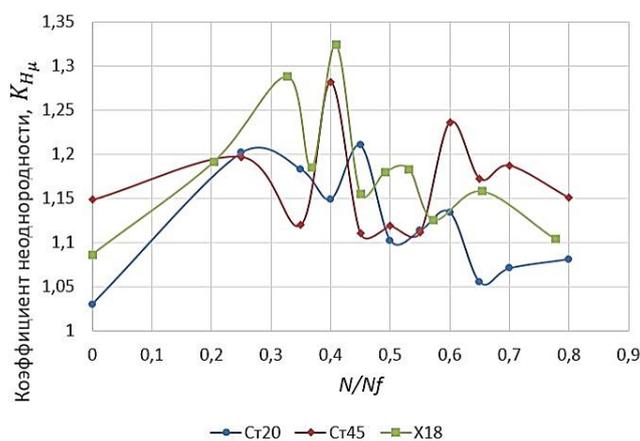
Рис. 1. Внешний вид образца для испытаний

Среднее квадратичное отклонение (СКО) определяет степень отклонения микротвердости от среднего значения, что свидетельствует о неоднородном распределении степени деформации в образце. На рис. 2 видно, что изменения СКО имеют периодический характер, что наиболее заметно для образца из стали 20.

Проанализированы результаты оценки физических свойств низкоуглеродистой стали после усталостных испытаний. Характеристиками служили относительные значения поврежденности D_β и D_R , оцененные по данным измерения вихретокового параметра β и электросопротивления R по соотношениям: $D_\beta = 1 - \beta/\beta_0$ и $D_R = 1 - R/R_0$, где β_0 , R_0 — значения оцененных параметров для исходного образца.



а



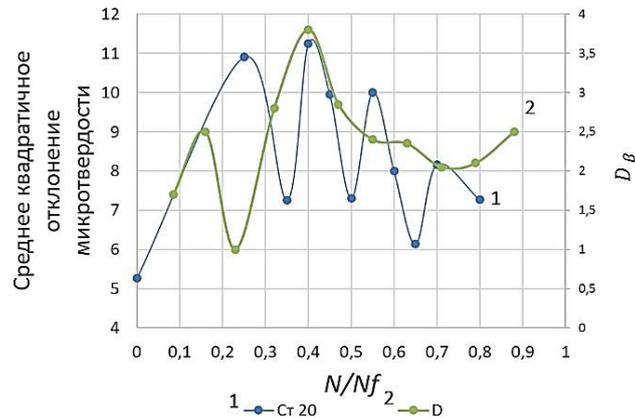
б

Рис. 2. Зависимость среднего квадратичного отклонения микротвердости (а) и коэффициента неоднородности структуры (б) от относительной долговечности стали 20, стали 45 и 12Х18Н9Т

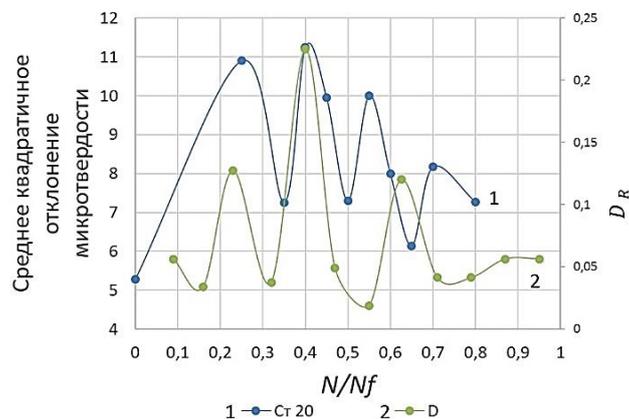
Рассмотрены изменения относительного параметра поврежденности, оцененного по данным измерения вихревого тока, и данным измерения электрического сопротивления вместе со средним квадратичным отклонением микротвердости для стали 20. Видно, что D_B (рис. 3, а) и D_R (рис. 3, б) достигают своего максимума при том же значении относительной долговечности, что и среднее квадратичное отклонение.

Одним из методов, который позволяет подсчитать число трещин, является метод реплик. Его суть заключается в получении слепка с поверхности образца с последующей обработкой этого слепка. В результате проведенной работы нам не удалось зарегистрировать рост трещин на ранних стадиях нагружения. Поэтому был проведен литературный поиск и использованы данные из работы [11], полу-

ченные после циклирования низкоуглеродистой стали, которые представлены на рис. 4. На ранних стадиях влияние трещин мало (рис. 4 а, б), в то время как на последующих стадиях видно слияние микротрещин, ведущее в дальнейшем к разрушению образца (рис. 4, в, г).



а



б

Рис. 3. Зависимости параметров поврежденности D_β (а), D_R (б) и среднего квадратичного отклонения от относительной долговечности для образца из стали 20

Далее с помощью программы было подсчитано число трещин на поверхности и их длина в зависимости от относительной долговечности. Средний размер зерна составляет 30-50 мкм, поэтому было выделено шесть групп трещин различной длины (рис. 5, а, б), кратной размеру зерен. Поскольку количество микротрещин с длиной 0...50, 50...75, 75...100 мкм (см. рис. 5, а) и 100...150, 150...300, 300...500 мкм (см. рис. 5, б) изменяется с числом циклов нагружения подобным образом, они были объединены в две группы (рис. 5, в).

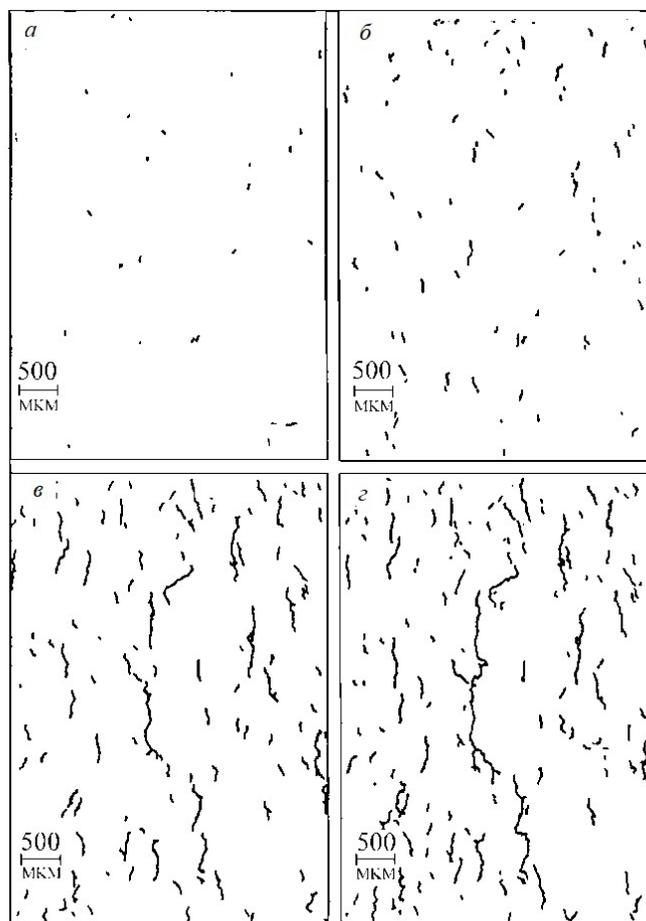
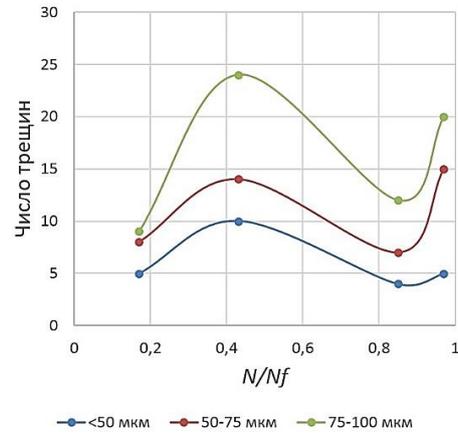


Рис. 4. Картина развития микротрещин на различных стадиях циклического нагружения образца:

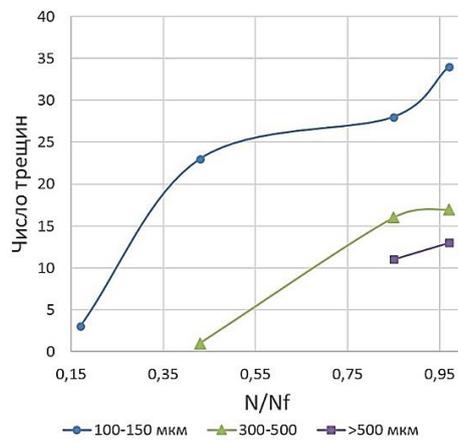
$a - N/N_f = 0,17$; $б - N/N_f = 0,43$; $в - N/N_f = 0,85$; $г - N/N_f = 0,97$

Как видно на рис. 5, a , число микротрещин малой длины (меньшей 100 мкм) изменяется немонотонно и достигает своего максимального значения при относительной долговечности 0,43 N/N_f , что соответствует максимальному значению физических паэтров, полученному для образца из стали 20, использованного в данной работе. При большой длине трещин (больших 100 мкм) немонотонность практически исчезает (см. рис. 5, $б, в$).

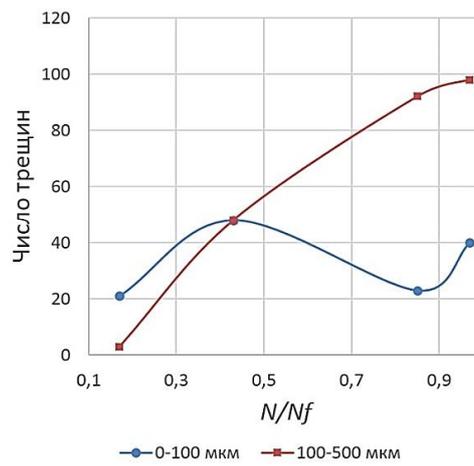
Из представленных результатов следует, что нелинейный характер изменения физических параметров связан с динамикой развития микротрещин: на ранних стадиях нагружения превалирует процесс зарождения одиночных дефектов, а на более поздних стадиях при относительной долговечности большей $N/N_f = 0,43$ решающую роль приобретает их слияние и, как следствие, увеличение длины. Смена режима накопления повреждений отражается на изменении физических свойств материала.



а



б



в

Рис. 5. Зависимость трещин различной длины от относительной долговечности:

а — трещины с длиной 0...100 мкм; б — трещины с длиной 100...500 мкм;

в — трещины с длиной 0...500 мкм

Итак, в результате выполненных исследований проанализировано изменение микротвердости, электросопротивления и вихретокового параметра в процессе циклического нагружения. Установлено, что развитие этих параметров имеет нелинейный характер, который связан с динамикой эволюции микротрещин, а именно их слиянием при относительной долговечности, близкой к значению $0,43N/N_f$.

Литература

- [1] Bonder S.R., Baruch J. Determination of dislocation velocities and densities from the deformation waves of discontinuous yielding. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 2092–2101.
- [2] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. *Физика макролокализации пластического течения*. Новосибирск, Наука, 2008, 328 с.
- [3] Panin V.E., Elskova T.F., Angelova G.V. Wave pattern of fatigue crack propagation on the surface of polycrystalline aluminum subjected to cyclic deformation. *Physical Mechanics*, 2002, vol 5, no. 3, pp. 93–99.
- [4] Крамаренко О.Ю., Куликовская О.В. Применение метода микротвердости при оценке усталостного повреждения. *Заводская лаборатория*, 1972, № 1, с. 80–85.
- [5] Костецкий Б.И., Шевеля В.В., Маркевич К.В. Комплексное изучение основных стадий структурной повреждаемости при усталости некоторых сплавов на основе железа. *Прочность металлов при циклических нагрузках. Материалы IV совещания*. Москва, Наука, 1967, с. 82–87.
- [6] Щипачев А.М., Пояркова Е.В. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла. *Вестник УГАТУ*, 2007. т. 9, № 6, с. 152–157.
- [7] Ye D., Wang Zh. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests. *International Journal of Fatigue*, 2001, vol. 23, no. 1, pp. 85–91.
- [8] Ye D., Tong X., Yao L., Yin X. Fatigue hardening/softening behaviour investigated through Vickers microhardness measurement during high-cycle fatigue. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, vol. 56, no. 3, pp. 199–204.
- [9] Botvina L., Levin V., Soldatenkov A., Trunova V. Periodical changes in microhardness and physical properties of the low-carbon steel at cyclic loading. *Abs. Int. Conf. on Structural Intergity and Durability*, 2017, pp. 85–86
- [10] Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование. *Вестник научно-технического развития*, 2014, № 1, с. 37–54.
- [11] Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H. Fatigue microcracks in a low carbon steel. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 1985, vol. 8, no. 2, pp. 193–203.

Болотников Алексей Игоревич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Левин Виктор Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

QUASIPERIODIC CHANGE OF MICROHARDNESS DURING CYCLIC LOADING OF STRUCTURAL STEELS

A.I. Bolotnikov

kubikmaster@yandex.ru

SPIN-код: 4364-1211

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article conducts a statistical study of the change in microhardness in the process of cyclic loading of structural steels on samples of steel 20, steel 45 and 12X18H9T. The values of the dependence of the mean square deviation of microhardness and the coefficient of heterogeneity of the structure of the relative durability are calculated. The obtained statistical characteristics are nonlinear, which agrees well with the previously determined changes in the physical properties of the tested samples. The dependence of the number of cracks of various lengths on the relative number of loading cycles is plotted. The data obtained are correlated with previously published data. As a result, the maximum of microhardness, as well as statistical and physical parameters, is observed at the same value of relative durability, corresponding to the beginning of the stage of fusion of microcracks.

Keywords

Microhardness, non-destructive testing, fatigue, microcracks, electrical resistance, eddy current, structural steels, strength

Received 14.09.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Bonder S.R., Baruch J. Determination of dislocation velocities and densities from the deformation waves of discontinuous yielding. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 2092–2101.
- [2] Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. Fizika makrolokalizatsii plasticheskogo techeniya [Plastic flow macrolocalization physics]. Novosibirsk, Nauka publ., 2008, 328 p.
- [3] Panin V.E., Elsukova T.F., Angelova G.V. Wave pattern of fatigue crack propagation on the surface of polycrystalline aluminum subjected to cyclic deformation. *Physical Mesomechanics*, 2002, vol 5, no. 3, pp. 93–99.
- [4] Kramarenko O.Yu., Kulikovskaya O.V. Using micro-hardness method in assessment of fatigue damage. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1972, no. 1, pp. 80–85.
- [5] Kostetskiy B.I., Shevelya V.V., Markevich K.V. Kompleksnoe izuchenie osnovnykh stadiy strukturnoy povrezhdaemosti pri ustalosti nekotorykh splavov na osnove zheleza [Complex study of the main stages of structural damage of certain iron-based alloys under fatigue]. *Prochnost' metallov pri tsiklicheskih nagruzkakh. Materialy IV soveshaniya* [Metal Strength Under Cyclic Loads. Proc. IV meeting]. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 82–87.
- [6] Shchipachev A.M., Poyarkova E.V. Fatigue deterioration influence on hardness and internal accumulated energy. *Vestnik UGATU*, 2007, vol. 9, no. 6, pp. 152–157.
- [7] Ye D., Wang Zh. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests. *International Journal of Fatigue*, 2001, vol. 23, no. 1, pp. 85–91.

- [8] Ye D., Tong X., Yao L., Yin X. Fatigue hardening/softening behaviour investigated through Vickers microhardness measurement during high-cycle fatigue. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, vol. 56, no. 3, pp. 199–204.
- [9] Botvina L., Levin V., Soldatenkov A., Trunova V. Periodical changes in microhardness and physical properties of the low-carbon steel at cyclic loading. *Abs. Int. Conf. on Structural Integritiy and Durability*, 2017, pp. 85–86
- [10] Romanov A.N. Material engineering problems in deformation and fracture mechanics at the stage of cracks forming. Part 2. Structural and deformational non-uniformity of construction materials and scattered cracks formation. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2014, no. 1, pp. 37–54.
- [11] Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H. Fatigue microcracks in a low carbon steel. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 1985, vol. 8, no. 2, pp. 193–203.

Bolotnikov A.I. — Bachelor's Degree student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.P. Levin, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.