

УДК: 621.771.23.09

## ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Максимов А.Б., к.т.н., доцент (aleksandrmsk@yandex.ru)*

*Гуляев М.В., к.воен.н., доцент кафедры информатики и прикладной математики*

*Ерохина И.С., инженер, преподаватель*

**Керченский государственный морской технологический университет**

(98300, Россия, Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

**Аннотация.** В работе исследовано влияние повреждаемости структуры низколегированных и углеродистых сталей, образующейся при циклической деформации изгибом, на коэрцитивную силу и электросопротивление. Образцы из низколегированных и углеродистых сталей (09Г2С, 10Г2С1 и СтЗсп) деформировали циклически по схеме чистого изгиба по симметричному циклу со степенью разовой деформации 2 и 5 %. Повреждаемость стали оценивали по отношению числа циклов изгиба к числу изгибов при разрушении. Увеличение повреждаемости до 0,2 – 0,3 сопровождается интенсивным упрочнением, а затем происходит стабилизация. Упрочнение стали обусловлено развитием дислокационной структуры (увеличением плотности дислокаций). По мере формирования ячеистой дислокационной структуры интенсивность упрочнения понижается. Коэрцитивная сила с увеличением степени деформации при растяжении возрастает по затухающей кривой. Аналогично изменяется электросопротивление. При циклической деформации коэрцитивная сила изменяется сложным образом. Это объясняется характером изменения дислокационной структуры и возникновением напряжений сжатия вблизи поверхности образца и напряжений растяжения в центре. Поскольку при изгибе деформация равномерно возрастает от центра к поверхности, то до некоторой степени деформации происходит процесс «залечивания» дефектов. Поэтому возникает некоторый слой в центральной части образца с частично восстановленной структурой. Вследствие постоянного смещения нейтральной линии деформации с сторону сжатых волокон ширина слоя восстановленной структуры становится меньше. Кроме того, количество циклов деформации приводит к снижению степени разовой деформации, при которой происходит восстановление структуры стали. При циклической деформации электросопротивление вначале немного возрастает, затем стабилизируется, а потом скачкообразно возрастает. Такое скачкообразное изменение электросопротивления сталей при циклической деформации, по-видимому, обусловлено возникновением вакансий при смене направления деформирования. Процесс стабилизации значений электросопротивления связан с частичным восстановлением структуры, которое при циклической деформации обуславливает меньшее упрочнение стали, чем при односторонней деформации. На основании проведенных исследований сделан вывод о возможности осуществлять контроль повреждаемости структуры по изменению физико-механических свойств сталей.

**Ключевые слова:** низколегированные и углеродистые стали, упрочнение, коэрцитивная сила, электросопротивление, повреждаемость, точечные и линейные дефекты, циклический изгиб, растяжение.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-5-364-368

Под повреждаемостью понимаются все изменения структуры (макро- и микро), происходящие в результате внешнего воздействия, в данном случае деформационного. Это точечные (вакансии) и линейные (дислокации) дефекты структуры, области напряженно-деформированного состояния, микро- и макротрещины. Наличие в металле макротрещин и их развитие определяет стадию разрушения. С точки зрения эксплуатационной стойкости конструкции большой интерес представляют первые четыре фактора.

Влияние повреждаемости на физико-механические свойства сталей при мало- и многоциклового усталости достаточно полно описаны в научно-технической литературе [1 – 7]. Известно, что прочностные свойства сталей при растяжении больше, чем при циклической деформации. Это обусловлено тем, что при циклической деформации возникает большее количество вакансий, чем при односторонней. Это приводит к неконсервативному движению дислокаций, что снижает эффект упрочнения. Одним из источников вакансий

при циклической деформации, в отличие от односторонней, является реверсивное движение дислокаций [8, 9].

В данной работе циклическая деформация пластическим изгибом рассматривается как элемент термомеханической обработки [10].

Технологическими параметрами упрочняющей обработки толстолистового проката являются амплитуда деформации и число циклов изгиба. Деформационные параметры технологии должны быть ограничены предельно-допустимыми значениями в области обратимой повреждаемости.

Цель настоящей работы – исследование влияния циклического пластического изгиба на коэрцитивную силу и электросопротивление стали.

Для исследований использовались толстолистовые низколегированные и углеродистые стали 09Г2, 10Г2С1 и СтЗсп толщиной 8 мм. От листов промышленной выплавки вырезались заготовки размером  $(300 \times 200) \cdot 10^{-3}$  м и подвергались нормализации. Из термообработанных

заготовок вырезались вдоль направления прокатки образцы размером  $(300 \times 25 \times 8) \cdot 10^{-3}$  м и подвергались деформации циклическим пластическим изгибом по жесткой схеме нагружения с амплитудой деформации 2; 5,5 и 8 %. Амплитуду деформации рассчитывали по наружному волокну образца по формуле [11]

$$\varepsilon_a = \frac{h}{R} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина образца, м;  $R$  – радиус изгиба, м.

Деформацию по сечению образца определяли по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{x_i}{R} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$  – деформация слоя металла в образце на расстоянии  $x_i$  от средней геометрической линии.

Электрическое сопротивление образцов измеряли методом двойного моста. Коэрцитивную силу измеряли на коэрцитиметре КИФМ-1.

Повреждаемость стали при циклическом деформировании оценивали по формуле

$$\psi_i = \frac{N_i}{N_p}, \quad (3)$$

где  $\psi_i$  – повреждаемость стали при  $N_i$  циклах деформирования;  $N_p$  – число циклов до разрушения.

Повреждаемость стали при растяжении оценивали по формуле

$$\psi_i = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_p}, \quad (4)$$

где  $\psi_i$  – повреждаемость стали при растяжении на деформацию, равную  $\varepsilon_i$ ;  $\varepsilon_p$  – величина равномерной деформации для данной марки стали при растяжении.

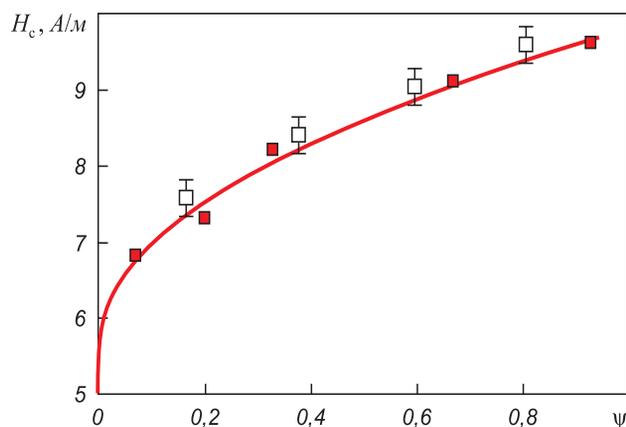


Рис. 1. Изменение коэрцитивной силы при растяжении стали Ст3сп: ■ – прогнозная точка; □ – экспериментальные данные

Fig. 1. Change of the coercive force at tension of 3sp steel: ■ – forecast point; □ – experimental data

При математической обработке экспериментальных данных доверительный интервал рассчитывали с надежностью  $p = 0,95$ .

На рис. 1, 2 представлено изменение коэрцитивной силы в зависимости от степени деформации и повреждаемости при растяжении и циклическом изгибе. Величина коэрцитивной силы в стали зависит от величины упругих напряжений в локальных областях, соизмеримых с размерами доменов. При односторонней деформации растяжением коэрцитивная сила возрастает с убывающей интенсивностью [12,13]. Известно [6], что коэрцитивная сила  $H_c$  связана с плотностью дислокаций  $\rho_d$  соотношением

$$H_c = \lambda G b \sqrt{\rho_d}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – магнитострикция насыщения;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса.

Уравнение регрессии для коэрцитивной силы от повреждаемости (рис. 1) имеет вид:

$$H_c = 5,65 + 4,157\sqrt{\psi}. \quad (5)$$

При циклическом изгибе с амплитудой деформации 8 и 12 % вначале наблюдается повышение значений коэрцитивной силы, а затем снижение (рис. 2). Циклическое деформирование с амплитудой 5,5 % приводит к периодическому изменению с постепенным снижением коэрцитивной силы.

В работе [14] показано, что при пластическом изгибе бруса толщиной  $8 \cdot 10^{-3}$  м в поверхностном слое (до  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м) возникают остаточные сжимающие напряжения, которые повышают коэрцитивную силу. В центральной области – остаточные растягивающие напряжения, понижающие коэрцитивную силу.

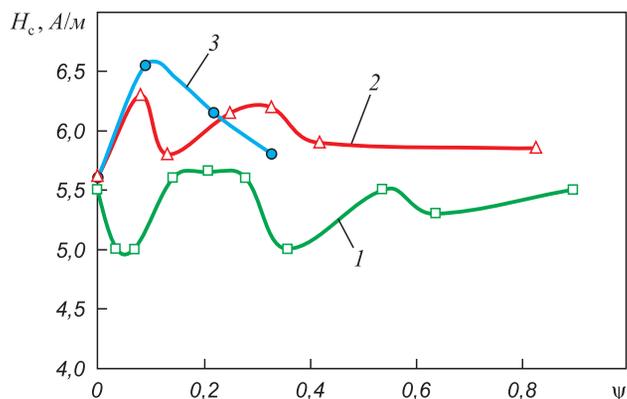


Рис. 2. Изменение коэрцитивной силы при циклической деформации изгибом стали 10G2C1:

1 – амплитуда деформации 5,5 %; 2 – амплитуда деформации 8 %; 3 – амплитуда деформации 12 %

Fig. 2. Change of coercive force during cyclic deformation by curve of 10G2S1 steel:

1 – amplitude of deformation of 5.5 %; 2 – amplitude of deformation of 8 %; 3 – amplitude of deformation of 12 %

Влияние деформации на величину удельного электросопротивления показало, что при растяжении стали 09Г2 относительное удельное электросопротивление монотонно возрастает (рис. 3). Зависимость электросопротивления от степени повреждаемости имеет прямо пропорциональный характер и описывается корреляционным уравнением

$$\rho = 1,719 + 0,24\psi. \quad (6)$$

Наличие точечных и линейных дефектов в металле приводит к повышению удельного электросопротивления [15].

Независимо от амплитуды деформации, на рис. 4 можно выделить три стадии изменения электросопротивления в зависимости от повреждаемости: первичное повышение, стабилизация и вторичное повышение.

На второй стадии (стабилизации) наблюдается динамическое равновесие между процессами, повышающими и понижающими электросопротивление. Эта стадия отсутствует при односторонней деформации (растяжении). Известно [8, 16, 17 – 19], что одной из характерных особенностей циклической деформации является образование большого количества вакансий.

По И.А. Одингу [20] соотношение величин нормальных и касательных напряжений предопределяет условия преимущественного развития процессов коагуляции или осаждения вакансий и, как следствие этого, разрушение по касательной или по нормальной плоскостям. Это отражается на виде излома при разрушении: под углом 45° к оси образца или перпендикулярно.

До тех пор, пока будет существовать динамическое равновесие между процессами образования отдельных вакансий и их коагуляций, электрическое сопротивление будет постоянным при увеличении циклов деформирования.

Поскольку процесс генерирования дислокаций затухает с увеличением циклов деформирования, то и количество вакансий будет уменьшаться. Кроме того, с увеличением циклов деформирования эффект Баушингера снижается, что свидетельствует о затруднении процессов реверсивного движения дислокаций. Вследствие этого происходит скачкообразное увеличение электросопротивления. В работе [21] показано, что при многоциклового усталости разрушение происходит хрупко, т. е. отрывом под действием нормальных напряжений.

Таким образом, роль вакансий в циклической деформации проявляется не только в характере разрушения, но и в изменении электросопротивления.

**Выводы.** Установлено, что при циклическом пластическом изгибе коэрцитивная сила изменяется сложным образом с увеличением числа циклов изгиба. Это объясняется совокупным влиянием дислокационной структуры и характером распределения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое бруса и растягивающих напряжений в центральной части.

Установлен ступенчатый характер изменения электросопротивления при пластическом циклическом изгибе от числа циклов. Стадия стабилизации величины электросопротивления обусловлена динамическим равновесием между процессами возникновения дефектов структуры, приводящим к повышению электросопротивления, и объединением вакансий, приводящим к уменьшению электросопротивления.

Показана прямо пропорциональная зависимость между плотностью дислокаций и степенью повреждаемости стали при деформации растяжением. Предположено оценивать дефектность структуры стали по степени повреждаемости.

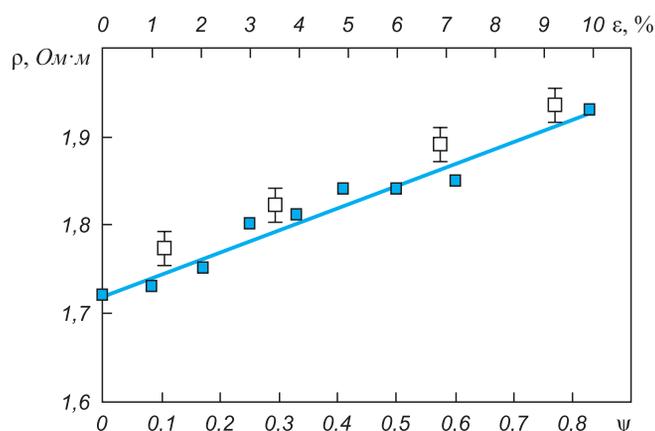


Рис. 3. Изменение удельного электросопротивления при растяжении стали 09Г2:

□ – прогнозная точка; ■ – экспериментальные данные

Fig. 3. Change of electrical resistivity at tensile of 09G2 steel.

□ – forecast point; ■ – experimental data

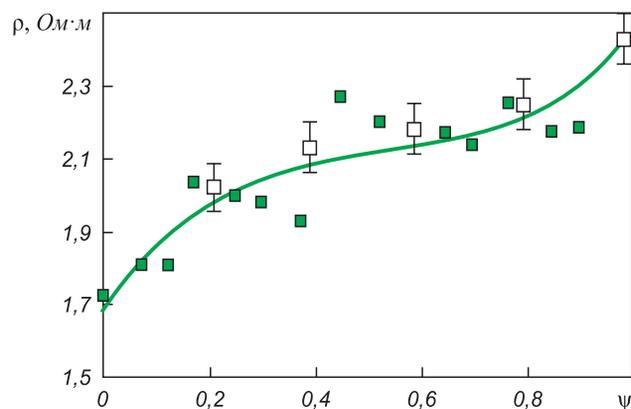


Рис. 4. Изменение удельного электросопротивления при циклической деформации изгибом стали СтЗсп с амплитудой деформации 5,5 %:

□ – прогнозная точка; ■ – экспериментальные данные

Fig. 4. Change of electrical resistivity at cyclic deformation by curve of 3sp steel with an amplitude of deformation of 5,5 %:

□ – forecast point; ■ – experimental data

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
2. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. – Самара: Изд-во Самарского гос. техн. ун-та, 2008. – 387 с.
4. Дронов В.С., Селиверстов Г.В. Кинетика развития усталостной повреждаемости в малоуглеродистой стали // Изв. Тул. ГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование. 2006. Вып. 7. С. 207 – 212.
5. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
6. Матвеев В.М., Безлюдько Г.Я., Козак И.Б. и др. Изменение коэрцитивной силы при статическом и усталостном нагружении образцов из стали ШХ15 // Проблемы прочности. 2012. № 3. С. 151 – 155.
7. Гальцев А.В. Закономерность проявления эффекта Баушингера в деформационно упрочненных после закалки металлах с ГЦК структурой на примере чистого никеля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2008. – 23 с.
8. Ueta M., Kauzig W. Generation of electron traps by plastic flow in alkali halides // Physical review. 1955. Vol. 97. No. 6. P. 1591 – 1595.
9. Hempel M., Kochendörfer A., Hillnhagen E. Einfluß der Kristallorientierung auf die Ausbildung von Gleitspuren an der Oberfläche bei gewechselbeanspruchter  $\alpha$ -Eisen-Einkristallproben // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1957. Vol. 57. Issue 8. P. 433 – 444.
10. Подгайский М.С., Максимов А.Б., Нескуб Ю.П. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 4. С. 131 – 133.
11. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов: Учебник для вузов. – М.: МГТУ, 2000. – 592 с.
12. Горкунов Э.С., Емельянов И.Г., Митропольская С.Ю. Определение напряженного состояния растянутого стержня по его измеренным магнитным характеристикам // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 5. С. 205 – 211.
13. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Задворкин С.М. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей // Физика металлов и металловедение. 2007. № 3. С. 1 – 6.
14. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Распределение прочности по толщине бруса при пластическом циклическом изгибе // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2005. № 2. С. 39 – 43.
15. Лухвич А.А. Влияние дефектов на электрические свойства металлов. – Минск: Наука и техника, 1976. – 104 с.
16. Dawson H.Y. Electric resistivity and shear modulus of copper during cyclic stressing // Journal of Applied Physics. 1968. Vol. 39. No. 7. P. 3022 – 3025.
17. Williams C.R., Lee Y.L., Rilly J.T. A practical method for statistical analysis of strain-life fatigue data // Int. J. Fatigue. 2003. No. 25. P. 427 – 436.
18. Shah M.B., Bose M.S.C. Magnetic NDT technique to evaluate fatigue damage // Physica status solidi (a). 1984. Vol. 86. No. 1. P. 275 – 281.
19. Lo C.C.H., Tang F., Biner S.B., Jilis D.C. Effects of fatigue-induced changes in microstructure and stress on domain structure and magnetic properties of Fe-C alloys // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. No. 9. P. 6520 – 6522.
20. Одинг И.А., Иванова В.С. Механизм зарождения трещин усталости в металлах и особенности их развития. – В кн.: Вопросы механической усталости. – М.: Машиностроение, 1964. С. 239 – 265.
21. Максимов А.Б. Исследование пластической деформации при циклическом растяжении – сжатии // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2010. № 1. С. 61 – 66.

Поступила 13 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 5, pp. 364–368.

## INFLUENCE OF DAMAGEABILITY OF LOW-ALLOYED STEEL ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

A.B. Maksimov, M.V. Gulyaev, I.S. Erokhina

Kerch State Marine Technical University, Kerch, Crimea, Russia

**Abstract.** The authors have investigated the influence of structure damageability of low-alloy and carbon steels, formed during the cyclic deformation by curve at the coercive force and electrical resistivity. Samples of low-alloy and carbon steel (09G2S, 10G2S1 and 3sp steel) were deformed cyclically according to the scheme of pure bending at a symmetrical cycle. The steel damageability was assessed by the ratio of the number of bending cycles to the number of bends at destruction. Increase of damage up to 0.2 – 0.3 was accompanied by intense hardening, and then the stabilization occurs. The coercive force with increasing degree of deformation under tension is growing on a decaying curve. The electrical resistance changes similarly. During cyclic deformation, the coercive force varies in a complicated way. This is due to the nature of the changes of dislocation structure and the occurrence of compressive stresses near the sample surface and the stretching tension in the center. During cyclic deformation, the resistivity initially increases slightly, then stabilizes and then abruptly increases. Such an abrupt change of the electrical resistance of steels at cyclic deformation is apparently caused by the occurrence of vacancies when the direction of deformation is changed. On the basis of the conducted research the authors have made the conclusion about the possibility of control of structure damageability according to the changes of physical and mechanical properties of steels.

**Keywords:** low-alloy and carbon steels, hardening, coercive force, resistivity, defect, point and line defects, cyclic bending, tension.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-5-364-368

## REFERENCES

1. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. *Priroda ustalosti metallov* [Nature of metals fatigue]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 456 p. (In Russ.).
2. Regel' V.R., Slutsker A.I., Tomashevskii E.I. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of strength of solids]. Moscow: Nauka, 1974, 560 p. (In Russ.).
3. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoi povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev* [Kinetics of fatigue damageability and fracture of surface layers]. Samara: Izd-vo Samarskogo gos. tekhn. un-ta, 2008, 387 p. (In Russ.).
4. Dronov V.S., Seliverstov G.V. Kinetics of development of fatigue damageability in low carbon steel. *Izv. Tul. GU. Ser. Pod'emno-transportnye mashiny i oborudovanie*. 2006, Issue 7, pp. 207–212. (In Russ.).
5. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [Physical nature of metals fracture]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.).
6. Matsevityi V.M., Bezlyud'ko G.Ya., Kozak I.B., Vakulenko K.B., Belous E.V. Change of coercive force under static and fatigue load-

- ing of samples of ShKh15steel. *Problemy prochnosti*. 2012, no. 3, pp. 151–155. (In Russ.)
7. Gal'tsev A.V. *Zakonomernost' proyavleniya effekta Baushingera v deformatsionno-uprochnennykh posle zakalki metallakh s GTsK strukturoi na primere chistogo nikelya: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Regularities of occurrence of the Baushinger's effect in strain hardened metals with the FCC structure after hardening on the example of pure nickel. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Belgorod, 2008, 23 p. (In Russ.).
  8. Ueta M., Kauzig W. Generation of electron traps by plastic flow in alkali halides. *Physical review*. 1955, vol. 97, no. 6, pp. 1591–1595.
  9. Hempel M., Kochendörfer A., Hillnhagen E. Einfluß der Kristallorientierung auf die Ausbildung von Gleitspuren an der Oberfläche biegewechselbeanspruchter  $\alpha$ -Eisen-Einkristallproben. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1957, vol. 57, no. 8, pp. 433–444.
  10. Podgaiskii M.S., Maksimov A.B., Neskub Yu.P. Influence of cyclic bending strain on dislocation structure of steel 10g2sl. *Russian metallurgy. Metally*. 1985, no. 5, pp. 126–128.
  11. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Mechanics of materials: Textbook for universities]. Moscow: MG TU, 2000, 592 p. (In Russ.)
  12. Gorkunov E.S., Emel'yanov I.G., Mitropol'skaya S.Yu. Determining the stress state of a stretched rod from its measured magnetic characteristics. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2008, vol. 49, no. 5, pp. 877–882.
  13. Gorkunov E.S., Smirnov S.V., Zadvorkin S.M., Mitropol'skaya S.Yu., Vichuzhanin D.I. Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels. *Physics of Metals and Metallography*. 2007, vol. 103, no. 3, pp. 311–316.
  14. Maksimov A.B., Gulyaev M.V. Distribution of strength through the thickness of the beam at cyclic plastic bending. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2005, no. 2, pp. 39–43. (In Russ.).
  15. Lukhovich A.A. *Vliyaniye defektov na elektricheskie svoystva metallov* [Influence of defects on electric properties of metals]. Minsk: Nauka i tekhnika. 1976, 104 p. (In Russ.).
  16. Dawson H.Y. Electric resistivity and shear modulus of copper during cyclic stressing. *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39, no. 7, pp. 3022–3025.
  17. Williams C.R., Lee Y.L., Rilly J.T. A practical method for statistical analysis of strain-life fatigue data. *Int. J. Fatigue*. 2003, no. 25, pp. 427–436.
  18. Shah M.B., Bose M. S.C. Magnetic NDT technique to evaluate fatigue damage. *Physica status solidi (a)*. 1984, vol. 86, no. 1, pp. 275–281.
  19. Lo C.C.H., Tang F., Biner S.B., Jilis D.C. Effects of fatigue-induced changes in microstructure and stress on domain structure and magnetic properties of Fe-C alloys. *J. Appl. Phys.* 2000, vol. 87, no. 9, pp. 6520–6522.
  20. Oding I.A., Ivanova V.S. Mechanism of fatigue cracks appearance in metals and peculiarities of their growth. *Voprosy mekhanicheskoi ustalosti*. Moscow: Mashinostroenie, 1964, pp. 239–265. (In Russ.).
  21. Maksimov A.B. The study of plastic deformation under cyclic tension – compression. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2010, no. 1, pp. 61–66. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.B. Maksimov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor  
(aleksandrms@yandex.ru)

**M.V. Gulyaev**, Cand. Sci. (Military), Assist. Professor of the Chair of Informatics and Applied Mathematics

**I.S. Erokhina**, Engineer, Lecturer

Received October 13, 2016