

УДК 669.04:53.097:539.376:539.388

УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ*

Воробьев С.В., к.т.н., доцент, соискатель ученой степени доктора наук
кафедры физики им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Методами современного физического материаловедения установлены количественные изменения структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры сталей различных структурных классов (08X18H10T, 20X13, 20X23H18, Э76Ф), подвергнутых электронно-пучковой обработке с плотностью энергии 10 – 40 Дж/см². Выявлен градиентный характер изменения структурно-фазовых состояний сталей после электронно-пучковой обработки, разрушенных при многоциклового усталости. Выявлены и проанализированы основные факторы и механизмы, определяющие повышение до 3,5 раз усталостной долговечности сталей после электронно-пучковой обработки. Показано, что изменение структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры сталей обусловлено измельчением зеренной и субзеренной структуры (стали 20X13 и 20X23H18), подавлением процессов, приводящих к формированию областей, являющихся потенциальным местом формирования микротрещин (сталь 20X13), формированием игольчатого профиля границы раздела, приводящего к более однородному пластическому течению в подложке (сталь Э76Ф).

Ключевые слова: усталость, структура, фазовый состав, дислокационная субструктура, электронно-пучковая обработка, стали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-261-263

Многовековое интенсивное использование металлов и сплавов в различных отраслях промышленности и техники выдвинуло в ряд актуальных проблему улучшения их эксплуатационных характеристик [1 – 3]. В настоящее время проблема улучшения эксплуатационных свойств решается многими методами, в том числе путем нанесения покрытий с помощью ионной имплантации и другими воздействиями концентрированными потоками энергии [4 – 8]. Одним из наиболее перспективных методов модифицирования структуры приповерхностного слоя изделий из различных материалов в настоящее время является импульсная электронно-пучковая обработка (ЭПО) [6 – 10]. По сравнению с другими методами упрочнения электронно-пучковая технология обладает большими возможностями контроля и регулирования количества подводимой энергии, отличается локальностью распределения энергии в приповерхностном слое обрабатываемого материала и высоким коэффициентом полезного действия. Сверхвысокие ($10^8 - 10^{10}$ К/с) скорости нагрева до температур плавления и последующего охлаждения тонкого ($10^{-7} - 10^{-6}$ м) приповерхностного слоя материала, весьма малая ($10^{-6} - 10^{-3}$ с) длительность воздействия высоких температур, формирование предельных (до $10^7 - 10^8$ К/м) градиентов температуры, обеспечивающих охлаждение приповерхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью $10^4 - 10^9$ К/с, создают условия для образования в приповерхностном слое аморф-

ной, нано- и субмикроструктурной структуры. Столь существенные изменения структурно-фазового состояния поверхностных слоев приводят к значительному улучшению физико-химических и прочностных свойств материала, недостижимому при традиционных методах поверхностной обработки [5 – 10].

Поскольку усталостное разрушение начинается преимущественно с поверхности, то упрочнение поверхностного слоя способно привести к повышению усталостных характеристик. Эта проблема особенно важна для стальных деталей машин и механизмов, поскольку формирование усталостных дефектов при их эксплуатации является одной из основных причин выхода изделий из строя. Вопросы сопротивления усталости и износу являются предметом самого тщательного рассмотрения с точки зрения как научных исследований, так и опытно-конструкторских и технологических разработок.

Авторским коллективом открытия [11] установлено значительное (до 3,5 раз) увеличение усталостной выносливости сталей различных структурных классов (стали 08X18H10T, 20X13, Э76Ф, 20X23H18), обработанных низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками с параметрами: плотность энергии пучка электронов 10 – 40 Дж/см², длительность импульса воздействия пучка электронов – 50 мкс, частота следования импульсов – 0,3 Гц.

Материалы и режимы обработки, обеспечивающие максимальное увеличение усталостной долговечности, приведены ниже:

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта государственного задания № 3.1496.2014/К.

Сталь	Плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	Количество циклов до разрушения стали без ЭПО, 10 ⁵	Максимальное увеличение числа циклов до разрушения после ЭПО, раз
08X18H10T	25	1,8	3,5
20X13	10	1,5	1,4
20X23H18	20	1,5	2,1
Э76Ф	20	2,15	2,5

Методами современного физического материаловедения выполнены комплексные исследования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, поверхности разрушения сталей после ЭПО и установлены факторы, объясняющие увеличение усталостной выносливости [10 – 15]. Впервые проведены количественные и качественные исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, поверхности разрушения сталей, подвергнутых многоциклового усталости до разрушения без и после электронно-пучковой обработки в различных режимах. Послойными электронно-микроскопическими исследованиями выявлен градиентный характер структурно-фазовых состояний, характеризующийся закономерным изменением фазового состава и параметров дефектной субструктуры по мере удаления от поверхности облучения.

Выявлены и подвергнуты анализу основные факторы и механизмы, определяющие усталостную долговечность сталей в исходном состоянии и после ЭПО. Установлено, что увеличение усталостной долговечности сталей, облученных электронным пучком, сопровождается комплексным изменением структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры на различных масштабных уровнях (от макро до нано). В том числе оно обусловлено:

- для стали 08X18H10T: измельчением зеренной и субзеренной структуры, растворением частиц карбидной фазы в поверхностном слое, инициированным электронно-пучковой обработкой;
- для стали 20X13: подавлением процессов, способствующих формированию областей с критической структурой, т.е. областей, являющихся потенциальным местом формирования микротрещин;
- для стали 20X23H18: существенным (примерно 2,3 раза) измельчением зеренной структуры стали, протеканием в стали процесса динамической рекристаллизации, инициированным высоким уровнем напряжений, возникающих в материале при высокоскоростном охлаждении, формированием в объеме зерен ячеек высокоскоростной кристаллизации стали, а также формированием подповерхностного слоя (расположенного на глубине приблизительно 80 мкм), обладающего повышенными прочностными характеристиками;
- для стали Э76Ф: формированием игольчатого профиля границы раздела, приводящего к дисперги-

рованию концентраторов напряжений и способствующего более однородному пластическому течению в подложке.

Выводы. На основании полученных результатов по увеличению усталостного ресурса сталей 08X18H10T, 20X13, Э76Ф, 20X23H18, подвергнутых ЭПО, можно рекомендовать технологию электронно-пучковой обработки стальных изделий на предприятиях металлургической, машиностроительной и авиационной промышленности, использующих конструкции, машины и агрегаты, работающие в режимах циклических знакопеременных нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перетягко В.Н., Темлянец М.В., Филиппова М.В. Развитие теории и практики металлургических технологий. В 3-х т. / Под ред. В.Н. Перетягко, Е.В. Протопопова, И.Ф. Селянина. Т. 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
2. Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Бойков Д.В. Новая технология производства рельсовой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 25 – 29.
3. Sosnin O.V., Gromova A.V., Ivanov Y.F., Konovalov S.V., Gromov V.E., Kozlov E.V. Control of austenite steel fatigue strength // International journal of fatigue. 2005. Vol. 27. №. 10-12. P. 1186 – 1191.
4. Konovalov S.V., Atroshkina A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Evolution of dislocation substructures in fatigue loaded and failed stainless steel with the intermediate electropulsing treatment // Materials Science and Engineering: A. 2010. Vol. 527. № 12. P. 3040 – 3043.
5. Fang Y., Chen X., Madigan B., Cao H., Konovalov S. Effects of strain rate on the hot deformation behavior and dynamic recrystallization in China low activation martensitic steel // Fusion Engineering and Design. 2016. Vol. 103. P. 21 – 30.
6. Игин В.И., Коваль В.А., Коваль Н.Н. и др. Поверхностное упрочнение сплавов на основе железа при воздействии интенсивного импульсного электронного пучка // Изв. вуз. Физика. 1985. № 6. С. 38 – 43.
7. Ivanov Yu., Rotshtein V., Proskurovsky D., Orlov P., Polestchenko K., Ozur G., Goncharenko I. Pulsed electron-beam treatment of WC–TiC–Co hard-alloy cutting tools: wear resistance and microstructural evolution // Surface and coating technology Surface and Coating. 2000. Vol. 125. P. 251 – 256.
8. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V. Electron-beam modification of the pearlite steel // Arabian journal for science and engineering. 2009. Vol. 34. № 2A. P. 219 – 229.
9. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. и др. Эволюция структуры силумина, подвергнутого обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и последующему усталостному нагружению до разрушения // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 9. С. 1318 – 1321.
10. Ivanov Y., Alsaraeva K., Gromov V., Konovalov S., Semina O. Evolution of Al-19.4 Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue // Materials science and technology. 2015. Vol. 31. № 13A. P. 1523 – 1529.
11. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В. и др. Явление увеличения усталостной долговечности сталей под воздействием низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (диплом №460). – В кн.: Сборник «Научные открытия – 2014». Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез. – М.: Изд-во РАЕН, 2015. С. 5 – 7.
12. Ivanov Yu. F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobyov S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Multicyclic fatigue of stainless steel treated

by a high-intensity electron beam: surface layer structure // Russian physics journal. 2011. Vol. 54. № 5. P. 575 – 583.

13. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015. – 272 p.
14. Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция фазового состава и дефектной субструктуры рельсовой стали, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным

пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 82 – 88.

15. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А. и др. Масштабные уровни структурно-фазовых состояний и усталостная долговечность рельсовой стали после электронно-пучковой обработки // Успехи физики металлов. 2013. Т. 14. № 1. С. 67 – 83.

Поступила 3 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 4, pp. 261–263.

INCREASE OF FATIGUE LIFE OF STEELS OF DIFFERENT STRUCTURE CLASSES BY ELECTRON BEAM TREATMENT

S.V. Vorob'ev

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The methods of modern materials science to quantitative changes in structural and phase states and dislocation substructure of steels of different structural classes (08Cr18Ni10Ti, 20Cr13, 20Cr23Ni18, E76F), under graver-electron-beam processing, the energy density 10 – 40 J/cm² have been established. The gradient type has revealed the nature of changes in structural and phase states in steels after electron-beam processing, destroyed during high-cycle fatigue. The authors have identified and analyzed the main factors and mechanisms that determine the fatigue life of steels after electron-beam processing up to 3.5 times. The article presents the results of the change in the structural-phase states and faulty substructure of the steel due to grinding grain and subgrain structure (for 20Cr13 and 20Cr23Ni18 steels), suppression of the processes leading to the formation of zones, potential for microcracks formation (for 20Cr13 steel), the formation of needle-profile interface leading to a more homogeneous plastic flow in the substrate (for E76F steel).

Keywords: fatigue, structure, phase, composition, dislocation substructure, electron beam treatment, steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-261-263

REFERENCES

1. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V., Filippova M.V. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tekhnologii: monografiya: v 3-kh t. T. 2. Plastichnost' i razrushenie stali v protsessakh nagreva i obrabotki davleniem* [Theory and practice development of metallurgical technologies: monograph: in three volumes. Vol. 2. Plasticity and steel destruction in heat processes and forming operations]. Peretyat'ko V.N., Protopopov E.V., Selyanin I.F. eds. Moscow: Teploekhnika, 2010, 352 p. (In Russ.).
2. Kozyrev N.A., Protopopov E.V., Aizatulov R.S., Boikov D.V. New production technology for rail steel. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 2, pp. 110–113.
3. Sosnin O.V., Gromov A.V., Ivanov Y.F., Kononov S.V., Gromov V.E., Kozlov E.V. Control of austenite steel fatigue strength. *International journal of fatigue*. 2005, vol. 27, no. 10–12, pp. 1186–1191.
4. Kononov S.V., Atroshkina A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Evolution of dislocation substructures in fatigue loaded and failed stainless steel with the intermediate electropulsing treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, vol. 527, no. 12, pp. 3040–3043.
5. Fang Y., Chen X., Madigan B., Cao H., Kononov S. Effects of strain rate on the hot deformation behavior and dynamic recrystallization in China low activation martensitic steel. *Fusion Engineering and Design*. 2016, vol. 103, pp. 21–30.
6. Itin V.I., Koval' B.A., Koval' N.N., Lykov S.V., Mesyats G.A., Proskurovskii D.I., Rotshtein V.P., Chukhlantseva I.S. Surface strain-hardening of iron alloys with an intense pulsed electron beam. *Soviet Physics Journal*. 1985, vol. 28, Is. 6, pp. 470–475.
7. Ivanov Yu., Rotshtein V., Proskurovsky D., Orlov P., Polestchenko K., Ozur G., Goncharenko I. Pulsed electron-beam treatment of WC-TiC-Co hard-alloy cutting tools: wear resistance and microstructural evolution. *Surface and coating technology Surface and Coating*. 2000, vol. 125, pp. 251–256.
8. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V. Electron-beam modification of the pearlite steel. *Arabian journal for science and engineering*. 2009, vol. 34, no 2A, pp. 219 – 229.
9. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kononov S.V., Alsarava K.V. Structural evolution of silumin treated with a high-intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015, vol. 79, Issue 9, pp. 1169–1172.
10. Ivanov Yu., Alsarava K., Gromov V., Kononov S., Semina O. Evolution of Al-19.4 Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue. *Materials science and technology*. 2015, vol. 31, no 13A, pp. 1523–1529.
11. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Vorob'ev S.V., Sizov V.V. Phenomenon of steel fatigue life increase under low-energy electron beams (Certificate no. 460). In: *Nauchnye otkrytiya – 2014. Sbornik kratkikh opisaniy nauchnykh otkrytii, nauchnykh idei, nauchnykh gipotez*. [Collected papers “Scientific discoveries – 2014”. Collected short descriptions of scientific discoveries, scientific ideas, scientific hypothesis]. Moscow: Izd-vo RAEN, 2015, pp. 5–7. (In Russ.).
12. Ivanov Yu. F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobyov S.V., Kononov S.V., Gromov V.E. Multicyclic fatigue of stainless steel treated by a high-intensity electron beam: surface layer structure. *Russian physics journal*. 2011, vol. 54, no. 5, pp. 575 – 583.
13. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015, 272 p.
14. Grishunin V.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Y.F., Teresov A.D. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013, vol. 7, no. 5, pp. 990–995.
15. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Grishunin V.A., Raikov S.V., Kononov S.V. Scale levels of structural phase states and fatigue life of rail steel after electron-beam treatment. *Uspekhi fiziki metallov*. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 67–83. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the grant of the state task no. 3.1496.2014/K.

Information about the authors:

S.V. Vorob'ev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Candidates for a degree of Dr. Sci. (Eng.) of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

Received February 3, 2015