УДК 53.077:539.376

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 20Х13, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОМУ МОДИФИЦИРОВАНИЮ

© 2013 г. Ю. Ф. Иванов[1], Д. А. Бессонов[2], С. В. Воробьев[2], В. Е. Громов[2], К. В. Иванов[3], Ю. А. Колубаева[1], В. Я. Целлермаер[2]

[1]*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

[2]*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*

[3]*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

Поступила в редакцию 17.02.2012 г.

Электронно-пучковая обработка закаленной стали марки Ст 20Х13 (0.2% C, 13% Cr) с плотностью энергии пучка 10–30 Дж/см^2 приводит к увеличению усталостной долговечности в 1.9 раза. Методами растровой электронной микроскопии проведены исследования поверхности облучения, выявлено существенное измельчение зеренной структуры и изменение содержания Cr в поверхностном слое.

DOI: 10.7868/S0207352813010125

ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство деталей и выполненных из них конструкций и сооружений работает в условиях усталостного нагружения, т.е. при переменных механических (механическая усталость) и/или температурных (термическая усталость) нагрузках [1–3]. Специфика поведения материала при данном способе воздействия заключается в том, что в нестационарных условиях легче возникают повреждения, и разрушение происходит при действии нагрузок, значительно меньших по сравнению со стационарными условиями. Усталостные трещины зарождаются преимущественно в приповерхностном слое металла. Следовательно, состояние этого поверхностного слоя является немаловажным фактором, оказывающим влияние на характер усталостного поведения материала. Предварительное упрочнение (а в отдельных случаях – пластификация) поверхностного слоя за счет концентрированных потоков энергии [4–6] и использование импульсных электрических токов при усталостном нагружении [7–10] способны значительно повысить усталостный ресурс материала.

В [11–13] при исследовании нержавеющей стали марки Ст 08Х18Н10Т показано, что одним из методов кратного увеличения ее усталостной долговечности является обработка поверхности импульсными электронными пучками субмиллисекундной длительности воздействия. Указанная обработка обеспечивает сверхвысокую скорость нагрева (до 10^6 град/с) поверхностного слоя до заданных температур, формирование предельных по величине градиентов температуры (до 10^7–10^8 град/м) и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью 10^4–10^9 град/с. В результате в поверхностном слое создаются условия образования неравновесных структурно-фазовых состояний [14–16].

Целью настоящей работы является исследование структуры поверхности закаленной стали марки Ст 20Х13, подвергнутой электронно-пучковой обработке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследования использовали сталь марки Ст 20Х13, закаленную от температуры 900°С. Как и в работах [7–10], усталостные испытания проводили по схеме несимметричного консольного изгиба с амплитудой нагружения 20 МПа и частотой 20 Гц. Электронно-пучковую обработку осуществляли на установке “СОЛО” [14, 15, 17] при следующих режимах воздействия пучка электронов: длительность импульса воздействия $\tau = 50$ мкс; количество и частота следования импульсов облучения $N = 3$ и $f = 0.3$ Гц; плотность энергии пучка электронов $E_S = 10$, 20, 30 Дж/см^2. Переменной величиной при обработке поверхности стали электронным пучком была плотность энергии пучка электронов, которая измерялась микрокалориметром, помещенном в камеру установки “СОЛО” перед облучением материала при тестировании пучка электронов. Обрабатывали лицевую поверхность подготовленных для испытания образцов. Исследования поверхности после электронно-пучковой обработки проводили на растровых электронных микроскопах SEM-515 Philips и LEO

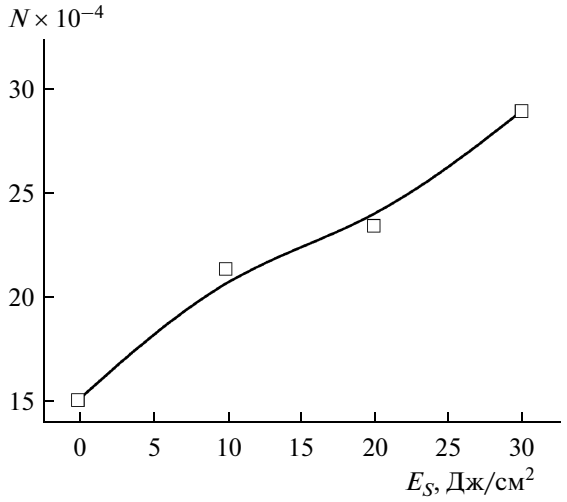

Рис. 1. Зависимость количества циклов N до разрушения стали марки Ст 20Х13 от плотности энергии пучка электронов (E_S).

EVO 50. Для количественного анализа структуры стали использовали методы стереологии [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Усталостные испытания образцов стали марки Ст 20Х13 в исходном состоянии и после электронно-пучковой обработки лицевой поверхности выявили, во-первых, существенное увеличение усталостной долговечности стали, обработанной электронным пучком, и, во-вторых, явно выраженную зависимость числа циклов до разрушения от плотности энергии пучка электронов (рис. 1). Усталостные трещины, как показали многочисленные эксперименты [1–3], преимущественно зарождаются в приповерхностном слое металла.

После обработки стали при плотности энергии пучка электронов $E_S = 10$ Дж/см^2, соответствующей режиму начального плавления [15], на ее поверхности исчезают дефекты (царапины), внесенные при полировке и формируется слой, размер зерен которого изменяется в пределах от 1.5 до 4 мкм (рис. 2а). В стали исходного состояния (до электронно-пучковой обработки) средний размер зерен равен 9.5 мкм. Следовательно, электронно-пучковая обработка сопровождается процессом динамической рекристаллизации, приводящим к существенному измельчению зеренной структуры стали. Одновременно с уменьшением размера зерен на поверхности стали образуются кратеры (рис. 2б). Причиной их образования могут быть легкоплавкие включения (например, сульфиды железа, обнаруженные микрорентгеноспектральным анализом), присутствующие в стали и испаряющиеся при электронно-пучковой обработке. На дне кратера выявляется картина

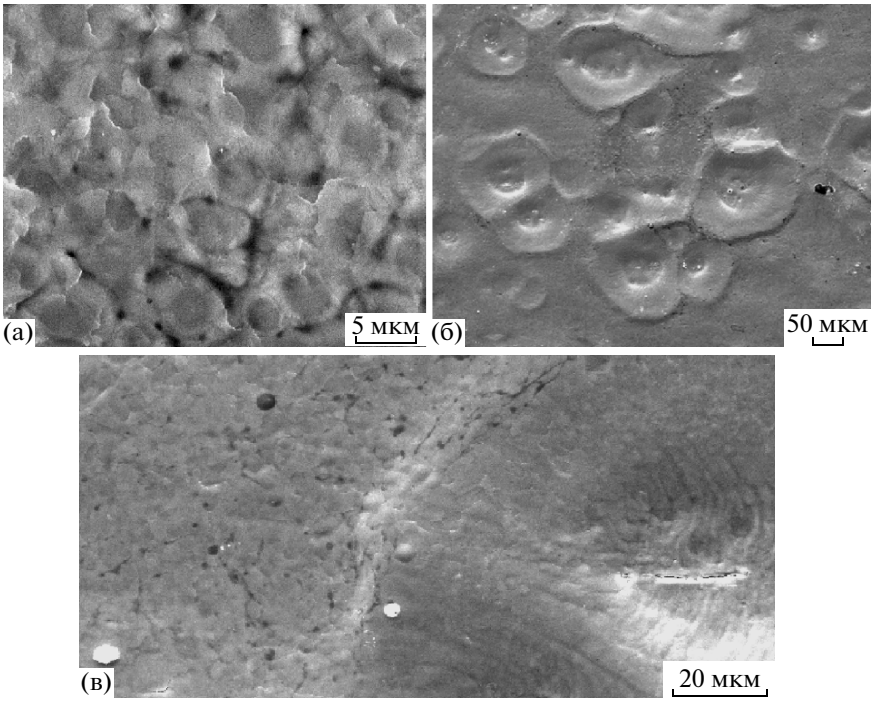

Рис. 2. Морфология поверхности стали марки Ст 20Х13 после электронно-пучковой обработки ($E_S = 10$ Дж/см^2).

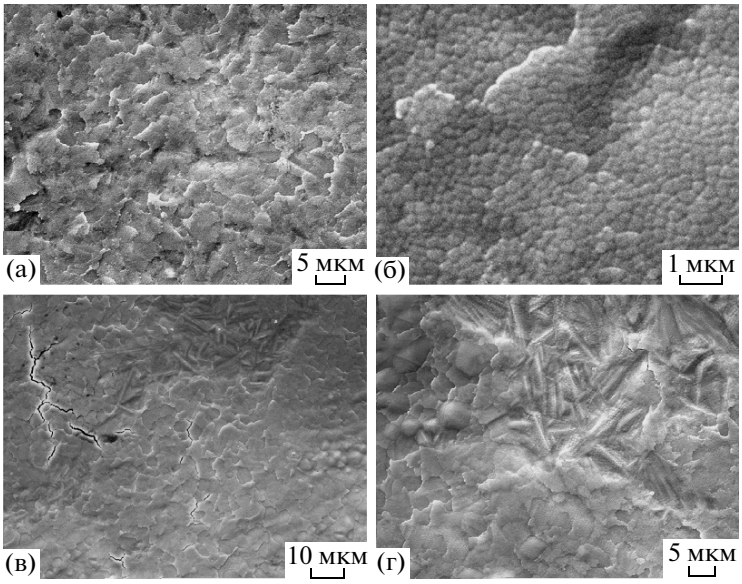

Рис. 3. Морфология поверхности стали марки Ст 20Х13 после электронно-пучковой обработки ($E_S = 20$ Дж/см^2).

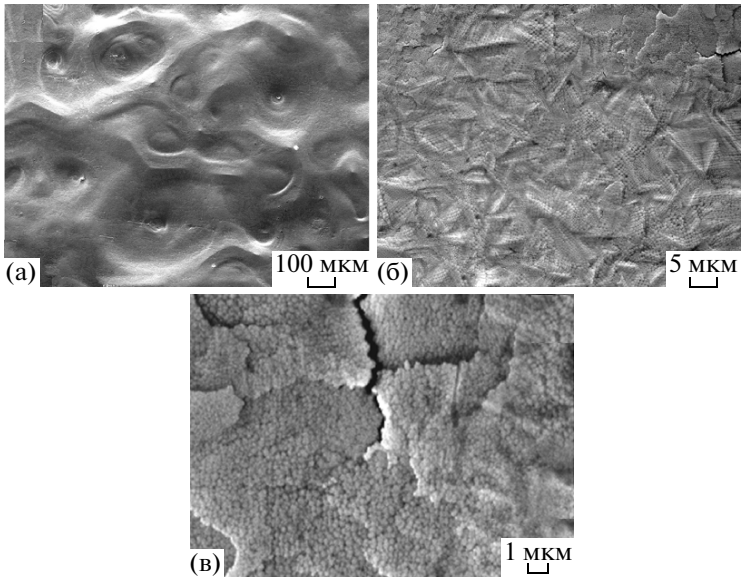

Рис. 4. Морфология поверхности стали марки Ст 20Х13 после электронно-пучковой обработки при плотности энергии пучка 30 Дж/см^2.

дендритной кристаллизации, в отдельных случаях обнаруживаются микротрещины (рис. 2в).

Электронно-пучковая обработка поверхности стали при плотности энергии пучка электронов $E_S = 20$ Дж/см^2, соответствующей режиму плавления поверхностного слоя толщиной 5–8 мкм, приводит к формированию структуры ячеистой кристаллизации (рис. 3а, б). Ячейки имеют округлую форму, средний размер ячеек 0.25 мкм.

Высокоскоростное охлаждение стали сопровождается формированием микротрещин на облученной поверхности, что свидетельствует о частичной релаксации термических напряжений, формирующихся в материале (рис. 3в). В подповерхностном слое стали протекает мартенситное превращение, о чем свидетельствует характерный микрорельеф на поверхности облучения (рис. 3г). Данный режим обработки также сопровождается образованием кратеров. Однако, по сравнению с

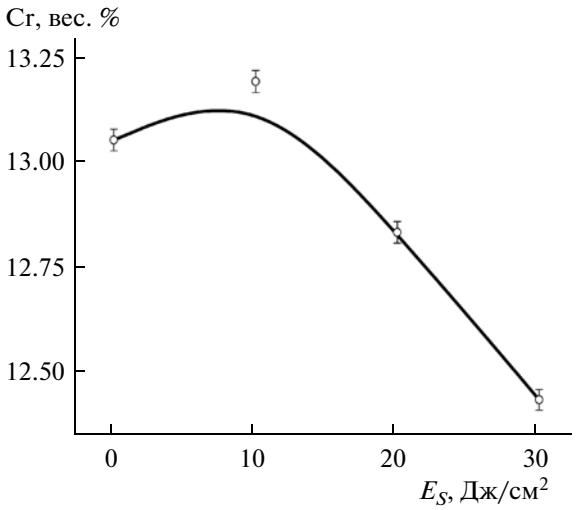

Рис. 5. Зависимость концентрации хрома в поверхностном слое стали от плотности энергии пучка электронов.

обработкой электронным пучком при плотности энергии $E_S = 10$ Дж/см^2, количество микрократеров незначительно снижается, края кратеров становятся пологими, уменьшается и их глубина. Это указывает на заполнение кратеров расплавом на стадии охлаждения материала.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до $E_S = 30$ Дж/см^2 не приводит к существенным изменениям структуры поверхности после ее обработки. Как и после обработки при плотности энергии пучка электронов $E_S = 20$ Дж/см^2, формируется структура ячеистой кристаллизации с несколько меньшим размеров ячеек (230 нм). Выявляются микротрещины, количество которых на облученной поверхности практически не изменяется по сравнению с обработкой при $E_S = 20$ Дж/см^2. На облученной поверхности формируется рельеф нескольких масштабных уровней. К первому из них отнесем макрорельеф (масштаб ~100–150 мкм), образующийся в результате формирования и последующего оплавления кратеров (рис. 4а). Ко второму отнесем микрорельеф, формирующийся в результате мартенситного превращения при высокоскоростной закалке стали (масштаб ~5–10 мкм) (рис. 4б). К третьему следует отнести рельеф, формируемый на уровне зерен поверхностного слоя и структуры ячеистой кристаллизации (масштаб ~0.25–5 мкм) (рис. 4в).

Элементный анализ проводили на микроанализаторе EDAX ECON IV (начиная с фтора, предел обнаружения составил 0.2 вес. %), встроенном в растровый электронный микроскоп SEM-515 Philips. Результаты элементного анализа поверхностного слоя толщиной ~3 мкм представлены на рис. 5. Отчетливо видно, что электронно-пучковая обработка стали в режиме плавления поверхностного слоя приводит к снижению концентрации хрома. Перераспределение концентрации хрома в поверхностном слое стали, кристаллизующемся из расплава, по-видимому, может быть обусловлено особенностями строения диаграммы состояния системы Fe–Cr [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в настоящей работе исследований установлено, что обработка поверхности предварительно закаленной стали марки Ст 20Х13 высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия приводит к существенному (в ~1.9 раза) увеличению усталостной долговечности материала. При этом наблюдается измельчение зеренной и субзеренной структур поверхностного слоя (формирование структуры ячеистой кристаллизации субмикронных размеров) и некоторому снижению концентрации хрома в поверхностном слое.

Чтобы ответить на вопрос о физических механизмах повышения усталостной долговечности стали, необходимы дополнительные исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры стали методами просвечивающей электронной микроскопии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Президиума РАН (грант № 27.4), РФФИ (грант № 10-07-00172-а) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.” (Госконтракт № 02.740.11.0538 и Соглашение № 14.B37.21.0071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поведение стали при циклических нагрузках / Ред. Даль В. М.: Металлургия, 1982. 568 с.
2. *Коцаньда С.* Усталостное растрескивание металлов. М.: Металлургия, 1990. 622 с.
3. *Терентьев В.Ф.* Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002. 248 с.
4. *Qian J., Fatemi A.* // Intern. J. Fatigue. 1995. V. 17. P. 15.
5. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф., Коган И.С. и др.* // Физика и химия обработки материалов. 1979. № 2. С. 136.
6. *Wang Hong W., Yang D.Z., Shi W.D., Patu S.* // Scripta Metallurgica et Materialia. 1995. V. 32. № 12. P. 2001.
7. *Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. и др.* Усталость сталей при импульсном токовом воздействии. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. 464 с.
8. *Воробьев С.В., Громов В.Е., Громова А.В. и др.* // Структура и свойства перспективных материалов. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 537.

9. *Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. и др.* Структурно-масштабные уровни многоцикловой усталости сталей при импульсном токовом воздействии. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2008. 270 с.
10. *Konovalov S.V., Atroshkina A.A., Ivanov Yu.F. et al.* // Mater. Sci. Eng. A. 2010. V. 527. № 12. P. 3040.
11. *Горбунов С.В., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф. и др.* // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 61.
12. *Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В. и др.* // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75.
13. *Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 10. С. 62.
14. *Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Gromov V.E.* // Arabian J. Sci. Eng. 2009. V. 34. № 2A. P. 233.
15. *Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A.* // Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques / Ed. Pauleua Y. Elsevier, 2006. P. 205.
16. *Лотков А.И., Псахье С.Г., Князева А.Г. и др.* Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / Ред. Ляхов Н.З., Псахье С.Г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 276 с.
17. *Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н.* // Структура и свойства перспективных металлических материалов / Ред. Потекаев А.И. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345.
18. *Чернявский К.С.* Стереология в металловедении. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
19. *Кубашевски О.* Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. Справочник. М.: Металлургия, 1985. 184 с.

Fatigue Strength of Hardened 20Cr13 Steel Subjected to Electron Beam Modification

Yu. F. Ivanov, D. A. Bessonov, S. V. Vorobiev, V. E. Gromov, K. V. Ivanov, Yu. A. Kolubaeva, V. Ya. Zellermaier

Electron beam treatment with beam energy density 10–30 J/cm^2 of quenched 20Cr13 (0.2% C, 13% Cr) steel leads to fatigue durability increase 1.9 times. The irradiation surface investigations are carried out by methods of scanning electron microscopy. The essential grain structure grinding and Cr content change are revealed in surface layer.