

3. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
4. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: изд. МИСИС, 2005. – 432 с.
5. Панин В.Е., Панин А.В. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 12. С. 5 – 10.
6. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
7. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 440 с.
8. Gleiter H. // Acta Materialia. 2000. Vol. 48. № 1. P. 1 – 29.
9. Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А. – В кн.: Труды Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'10)». – СПб.: изд. Политехнического ун-та, 2010. С. 288 – 290.
10. Чукин М.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 89 – 93.
11. Чукин М.В., Копцева Н.В., Никитенко О.А., Ефимова Ю.Ю. // Черные металлы. Специальный выпуск. 2011. С. 54 – 59.
12. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П., Никитенко О.А. // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 11 – 17.

© 2013 г. М.В. Чукин, А.Г. Корчунов,
М.А. Полякова, А.В. Лысенин, А.Е. Гулин
Поступила 6 июля 2012 г.

УДК 669.017:539.213

**В.А. Гришунин¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов²,
А.Б. Юрьев³, С.В. Воробьев¹**

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

³ ОАО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат»

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ*

Аннотация. Методами оптической и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследованы структура, фазовый состав, морфология поверхностей облучения и усталостного разрушения рельсовой стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком с плотностью энергии 10 и 20 Дж/см². Показано, что причиной увеличения (до 2,5 раз) числа циклов до разрушения рельсовой стали после облучения является формирование зубчатой границы раздела упрочненный слой – матрица.

Ключевые слова: рельсовая сталь, структура, фазовый состав, электронно-пучковая обработка.

INCREASE OF THE FATIGUE LIFE OF THE RAIL STEEL BY ELECTRON BEAM TREATMENT

Abstract. Studies of structure, phase composition, defect substructure, irradiation morphology and fatigue fracture surfaces of rail steel treated by high intensive electron beam with energy density 10 and 20 J/sm² are carried out by methods of scanning and transmission electron diffraction microscopy. It is shown that the reason of fatigue life increase (in 2.5 times) after irradiation is the formation of toothed separation boundary “strengthened layer – matrix”.

Keywords: rail steel, structure, phase composition, electron-beam treatment.

Структурное состояние и физико-механические свойства поверхностного слоя во многом определяют сопротивление усталостному разрушению, износостойкость и другие важные эксплуатационные свойства материалов [1, 2]. В этой связи дальнейшее развитие методов, направленных на модификацию поверхностных слоев материала, следует считать актуальным и перспективным направлением повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей и конструкций.

Широкий спектр выполненных исследований по воздействию потоков заряженных частиц (электронов, ионов) на твердое тело, по лазерной и плазменной обработке, по воздействию электромагнитным полем, импульсными токами высокой частоты, по электро-механической обработке и другим энергетическим воздействиям показал высокую перспективность этих методов в качестве инструмента для изменения поверхностных свойств металлов и сплавов [1, 2].

Одним из перспективных методов целенаправленной модификации структуры и фазового состава поверхностного слоя металлов и сплавов является электронно-пучковая обработка, обладающая большими возможностями для контроля количества подводимой

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (заявка № 12-1-12-000-2003-6211).

энергии, создания большой площади воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения энергии, высокой концентрацией энергии в единице объема материала, а соответственно, и большими возможностями перевода материала в высоконеравновесное состояние [3, 4].

Экспериментальные исследования структуры и фазового состава, формирующихся в сечении изделий в результате электронно-пучковой обработки, очень важны для понимания физической природы превращений; такая обработка позволяет целенаправленно изменять структуру и усталостные параметры изделий [5, 6]. При этом получение необходимого комплекса высоких прочностных и пластических свойств требует понимания физических механизмов и природы изменений структуры и фазового состава на всех масштабных условиях: от макро до нано.

Целью настоящей работы является выявление природы повышения усталостного ресурса рельсовой стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком, путем анализа и выявления закономерностей разрушения.

В качестве материала исследования использована рельсовая сталь Э76Ф, содержащая 0,76 % С; 0,1 % V; 0,4 % Si; 0,95 % Mn; до 0,025 % S; до 0,025 % P; до 0,02 % Al (по массе). Сталь подвергали термической обработке по режиму: нагрев до 900 °С, выдержка в течение 2 ч и охлаждение с печью. Усталостные испытания проводили на специальной установке для асимметричного консольного изгиба; параметры испытаний: напряжение нагрузки 20 МПа, частота повторения 20 Гц, температура испытания 293 К. Форма и размеры образцов для усталостных испытаний не отличались от описанных в работах [1, 5, 6]. Образцы имели концентратор напряжений в виде выреза полуокружностью радиусом 10 мм. Образцы облучали электронным пучком при следующих параметрах: длительность t импульса воздействия пучка электронов 50 мкс; количество N импульсов воздействия 3 имп.; частота f следования импульсов 0,3 с⁻¹; давление остаточного газа (аргона) в рабочей камере приблизительно 0,02 Па. Плотность энергии пучка электронов (E_s) составляла 10 и 20 Дж/см². Морфологию поверхности облучения и поверхности разрушения изучали методами сканирующей электронной микроскопии [7]. Фазовый состав и дефектную субструктуру поверхности облучения и приповерхностного слоя анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [8, 9]. Фольги для электронной микроскопии готовили методами одностороннего электролитического утонения пластинок, вырезанных параллельно поверхности облучения на электроискровом станке на разных расстояниях от поверхности облучения.

Электронно-пучковая обработка привела к плавлению поверхностного слоя, о чем свидетельствует

формирование на поверхности облучения структуры ячеистой кристаллизации (рис. 1), размер ячеек которой изменяется в пределах 0,3 – 0,6 мкм и слабо зависит от режима обработки. Анализ поперечных изломов образцов выявил столбчатое строение поверхностного слоя, средняя толщина которого увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов от 1 – 2 мкм при 10 Дж/см² до 10 – 12 мкм при 20 Дж/см².

Электронно-пучковая обработка (независимо от плотности энергии пучка электронов) приводит к формированию в поверхностном слое закалочной структуры, представленной α -фазой, γ -фазой и цементитом. С увеличением плотности энергии пучка электронов толщина поверхностного закаленного слоя возрастает от 10 мкм при $E_s = 10$ Дж/см² до 25 мкм при $E_s = 20$ Дж/см².

В объеме ячеек кристаллизации наблюдается пластинчатая структура кристаллов мартенсита с поперечными размерами, изменяющимися в пределах 50 – 70 нм (рис. 2).

Многоцикловые усталостные испытания выявили увеличение числа циклов до разрушения с ростом плотности энергии пучка электронов от 1,6 раза (при $E_s = 10$ Дж/см²) до 2,5 раз (при $E_s = 20$ Дж/см²). Ранее эффект увеличения числа циклов до разрушения после электронно-пучковой обработки для сталей различных структурных классов отмечался в работах [10 – 14].

Поверхность разрушения стали, не обработанной электронным пучком, имеет характерный для материалов с перлитной структурой вязкий излом (рис. 3, а) [7]. При исследовании поверхности излома стали, обработанной электронным пучком, выявлен подслои, содержащий большое количество микропор (рис. 3, б, поры показаны стрелками). Присутствие микропор указывает на то, что разрушение стали, обработанной электронным пучком, начинается не на поверхности образца, а в подповерхностном слое. Поры располагаются упорядоченным образом, формируя строчки, расположенные параллельно поверхности облучения. Размеры

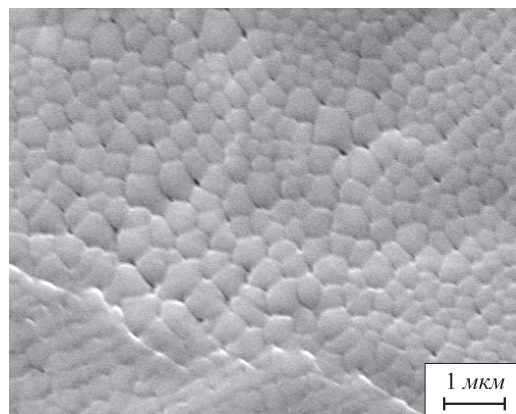


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение (сканирующая микроскопия) поверхности облучения рельсовой стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка 20 Дж/см²

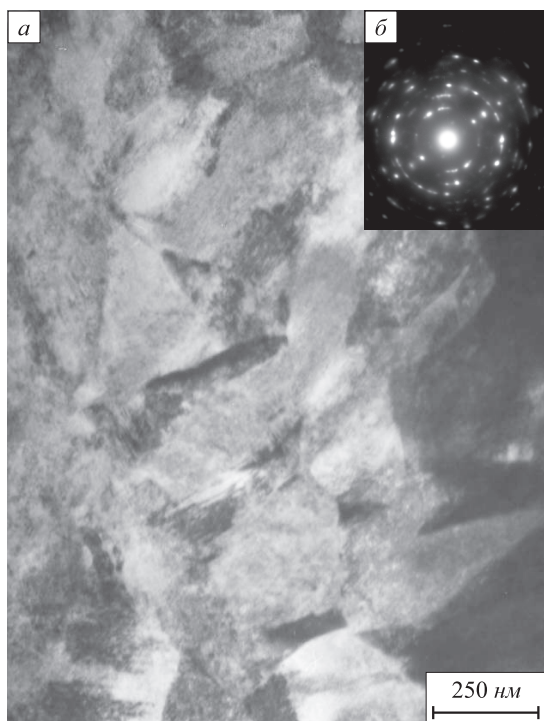


Рис. 2. Изображение (просвечивающая электронная микроскопия) структуры поверхностного слоя стали, облученной электронным пучком при плотности энергии пучка 10 Дж/см²: а – светлое поле; б – микроэлектрограмма

пор уменьшаются от 1 – 6 мкм (при $E_s = 10$ Дж/см²) до 0,3 – 1,0 мкм (при $E_s = 20$ Дж/см²). Следует отметить, что расстояние от поверхности облучения, на котором располагаются формируемые порами строчки, увеличивается от 10 до 25 мкм с увеличением E_s от 10 до 20 Дж/см², коррелируя с изменением усталостной долговечности стали.

Хорошо известно [15 – 17], что на границе раздела упрочненный слой – матрица в процессе нагружения формируются мощные концентраторы напряжений, релаксация которых может привести к трещинообразованию и преждевременному выходу из строя усталостно нагруженного материала. Наиболее ярко этот процесс выражен при плоской границе раздела таких слоев. Формирование зубчатого профиля границы раздела приводит к диспергированию концентраторов напряжений и способствует более однородному пластическому течению в подложке, повышая эксплуатационные характеристики поверхностно упрочненных конструкционных материалов [15 – 17].

Результаты, полученные методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, свидетельствуют, что порообразование в стали, обработанной электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см², протекает в слое, разделяющем поверхностный слой, упрочненный вследствие формирования мартенситной структуры, и основной объем стали с феррито-перлитной структурой. Граница раздела этих слоев проходит преимущественно по границе

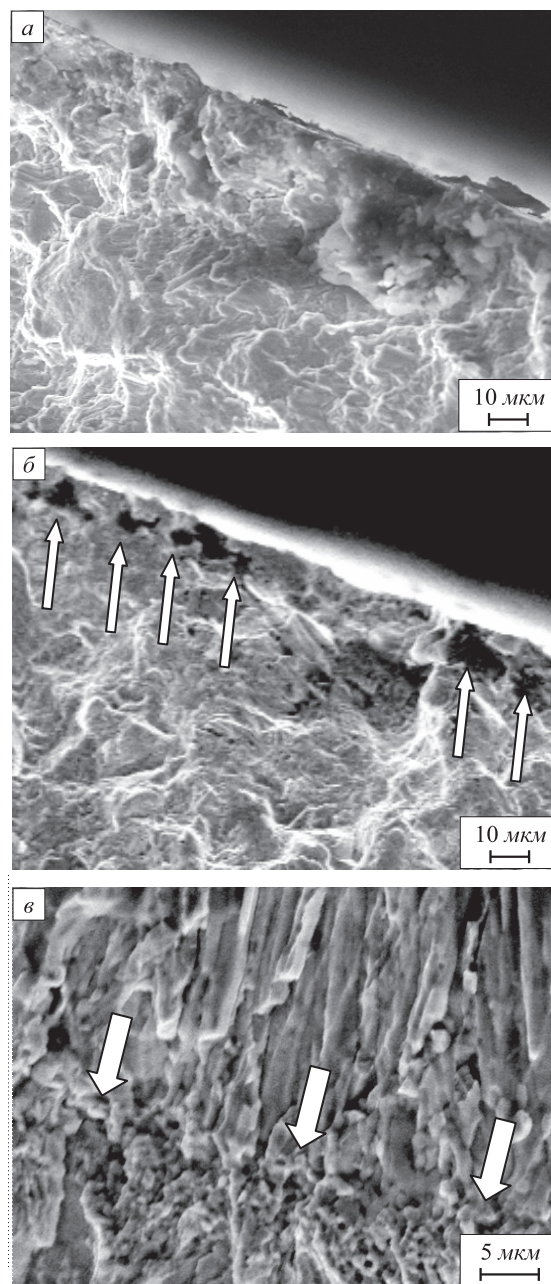


Рис. 3. Поверхность усталостного разрушения рельсовой стали в исходном состоянии (а), после облучения электронным пучком при $E_s = 10$ Дж/см² (б) и $E_s = 20$ Дж/см² (в). На поз. б стрелками показаны поры, расположенные в подповерхностном слое; на поз. в – переходный слой, разделяющий зону кристаллизации и зону термического влияния

раздела зерен и, следовательно, является относительно плоской, здесь могут формироваться мощные концентраторы напряжений, релаксация которых сопровождается растрескиванием упрочненного слоя.

В стали, обработанной электронным пучком при $E_s = 20$ Дж/см², слой, в котором наблюдается порообразование, располагается преимущественно на границе раздела слоя кристаллизации и слоя термического влияния (рис. 3, в). Слой кристаллизации имеет столбчатую структуру с субмикрокристаллическим поперечным размером столбиков. Следовательно, граница раздела

упрочненный слой – матрица имеет зубчатый профиль. Это приводит к диспергированию концентраторов напряжений и способствует более однородному пластическому течению в подложке, примерно в 2,5 раза повышая усталостную долговечность рельсовой стали, что соответствует результатам работ [15 – 17].

Выводы. Облучение поверхности рельсовой стали высокоинтенсивным электронным пучком позволяет многократно (до 2,5 раз) увеличить ее усталостную долговечность. Методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии исследованы структура, фазовый состав и морфология поверхностей упрочнения и усталостного разрушения. Установлено, что преимущественным местом формирования концентраторов напряжений является граница раздела слоя высокоскоростной кристаллизации и слоя термического влияния. Увеличение усталостной долговечности стали может быть обусловлено формированием зубчатого профиля границы раздела, что приводит к диспергированию концентраторов напряжений и повышает число циклов до разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / Под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 403 с.
2. Наноматериалы: структура, свойства, применение / А.М. Глезер, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.П. Шаркеев. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 424 с.
3. Ivanov Yu., Konovalov S., Gromov V. // The Arabian Journal for Science and Engineering. 2009. Vol. 34. № 2A. P. 233 – 243.
4. Ivanov Yu., Rotshtein V., Guenzel R. et al. // Surface and Coating Technology. 2002. № 150. P. 188 – 198.
5. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Горбунов С.В. и др. // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 112. № 1. С. 83 – 85.
6. Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2011. № 10. С. 62 – 67.
7. Энгеле Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.
8. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
9. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
10. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Горбунов С.В. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 61 – 65.
11. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В. // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75 – 82.
12. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Громов В.Е. и др. // Материаловедение. 2011. № 5. С. 43 – 47.
13. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Воробьев С.В. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 3. С. 28 – 34.
14. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Воробьев С.В. // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 4. № 6. С. 111 – 116.
15. Панин В.Е., Слосман А.И., Антипина Н.А., Литвиненко А.В. // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 1. С. 105 – 110.
16. Панин В.Е., Слосман А.И., Антипина Н.А. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2003. № 1. С. 30 – 36.
17. Панин В.Е., Панин А.В. // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 5. С. 7 – 15.

© 2013 г. В.А. Гришунин, В.Е. Громов,
Ю.Ф. Иванов, А.Б. Юрьев, С.В. Воробьев
Поступила 24 июля 2012 г.