

2012 г. С.В. Воробьев¹, В.В. Сизов¹, В.Е. Громов¹, Ю.Ф. Иванов², С.В. Коновалов¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

ГРАДИЕНТЫ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 20Х23Н18 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ*

Долговечность и надежность машин во многом определяются сопротивлением усталости отдельных деталей, так как в подавляющем большинстве случаев для деталей машин основным видом нагружения являются динамические, повторные и знакопеременные нагрузки, а основной вид разрушения – усталостный. Повышение усталостного ресурса нержавеющих сталей связывают с применением концентрированных потоков энергии, модифицирующих поверхность материалов [1]. Одним из перспективных методов, обладающим большими возможностями контроля подводимой энергии и перевода материала в неравновесное состояние, является электронно-пучковая обработка [2 – 6], обеспечивающая высокие (до 10^8 °С/с) скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя и формирование предельных (до 10^8 °С/м) градиентов температуры. В результате в поверхностном слое создаются условия формирования градиентов структуры и фазового состава.

Целью настоящей работы является сравнительный послойный анализ формирования градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры стали аустенитного класса 20Х23Н18 после обработки высокоинтенсивным электронным пучком.

В настоящей работе модификацию поверхностного слоя стали осуществляли высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Режим электронно-пучковой обработки: энергия электронов 18 кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50$ мкс; количество импульсов воздействия $N = 3$; частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹; плотность энергии пучка электронов $E_s = 20$ Дж/см². Градиенты структурно-фазового состояния стали исследовали методами оптической и просвечиваю-

щей дифракционной (метод тонких фольг) электронной микроскопии на расстояниях 0, 10, 80 и 200 мкм от поверхности обработки. Количественный анализ структуры стали осуществляли методами стереологии [7] и количественной электронной микроскопии [8]. Фазовый анализ стали проводили путем индирования микроэлектронограмм с использованием темнопольной методики [8, 9].

При усталостных испытаниях по схеме асимметричного консольного изгиба сталь в исходном состоянии разрушалась после $1,5 \cdot 10^5$ циклов нагружения, а обработанная сталь – после $3,3 \cdot 10^5$ циклов [10]. В исходном состоянии исследуемая сталь является поликристаллическим агрегатом. Средний размер зерен составляет 41,4 мкм (размеры реальных зерен изменяются в пределах 11,4 – 88,7 мкм). В объеме зерен выявляются хаотически распределенные дислокации и дислокации, формирующие сетки. Скалярная плотность дислокаций, определенная методом секущих, составляет приблизительно $4 \cdot 10^{10}$ см⁻². Характерным элементом зеренной структуры стали в исходном состоянии являются микродвойники; преимущественно обнаруживаются микродвойники одной системы двойникования, значительно реже – двух.

После электронно-пучковой обработки средний размер зерен составляет 21,3 мкм. Структура слоя, расположенного на расстоянии приблизительно 10 мкм, во многом близка структуре поверхностного слоя. Выявляется поликристаллическая структура, в объеме зерен которой присутствуют микродвойники в виде тонких пластинок, группирующихся в пачки. Вторым элементом субзеренной структуры наряду с микродвойниками являются дислокации. Эти дислокации формируют преимущественно сетчатую субструктуру или распределены хаотически по объему зерна. Скалярная плотность дислокаций составляет приблизительно $3,8 \cdot 10^{10}$ см⁻².

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (гос. контракт № 02.740.11.0538).

Слой стали, расположенный на глубине приблизительно 10 мкм, находится в упруго напряженном состоянии. На это указывают изгибные экстинкционные контуры, выявляемые в зернах при анализе структуры материала методом тонких фольг. Местами формирования контуров (концентраторов напряжений) являются границы микродвойников, границы раздела зерен, границы раздела частиц второй фазы и матрицы (рис. 1). Частицы второй фазы имеют глобулярную форму; размеры частиц изменяются в пределах 30 – 60 нм. Частицы, как следует из анализа микроэлектроннограмм, являются карбидами типа $Me_{23}C_6$ состава $(Fe, Cr)_{23}C_6$, что характерно для исследуемой стали.

Структура слоя, расположенного на глубине приблизительно 80 мкм, подобна структуре рассмотренных выше слоев, отличаются лишь количественные показатели. На рис. 2 приведены зависимости, демонстрирующие изменение скалярной плотности дислокаций $\langle \rho \rangle$, относительной объемной доли δ материала, занятого микродвойниками, и поперечных размеров изгибных экстинкционных контуров h по мере удаления x от поверхности облучения стали электронным пучком. Отчетливо видно,

что электронно-пучковая обработка стали, как и следовало ожидать, сопровождается формированием в материале градиентной структуры, характеризующейся закономерным изменением указанных параметров стали. Выделяется слой, расположенный на глубине приблизительно 80 мкм. Структура этого слоя стали характеризуется относительно высокими значениями скалярной плотности дислокаций и относительно большой долей материала, занятого микродвойниками. С другой стороны, величина поперечных размеров изгибных экстинкционных контуров минимальна в слое, формирующем поверхность облучения, и увеличивается с ростом расстояния от поверхности обработки. Увеличение скалярной плотности дислокаций и доли материала, занятого микродвойниками, способствует увеличению прочностных характеристик материала [10]. Увеличение среднего поперечного размера изгибных экстинкционных контуров соответствует снижению величины внутренних полей напряжений. Следовательно, можно констатировать, что электронно-пучковая обработка стали 20Х23Н18 при плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см² приводит к формированию подслоя с повышенными прочностными свойствами.

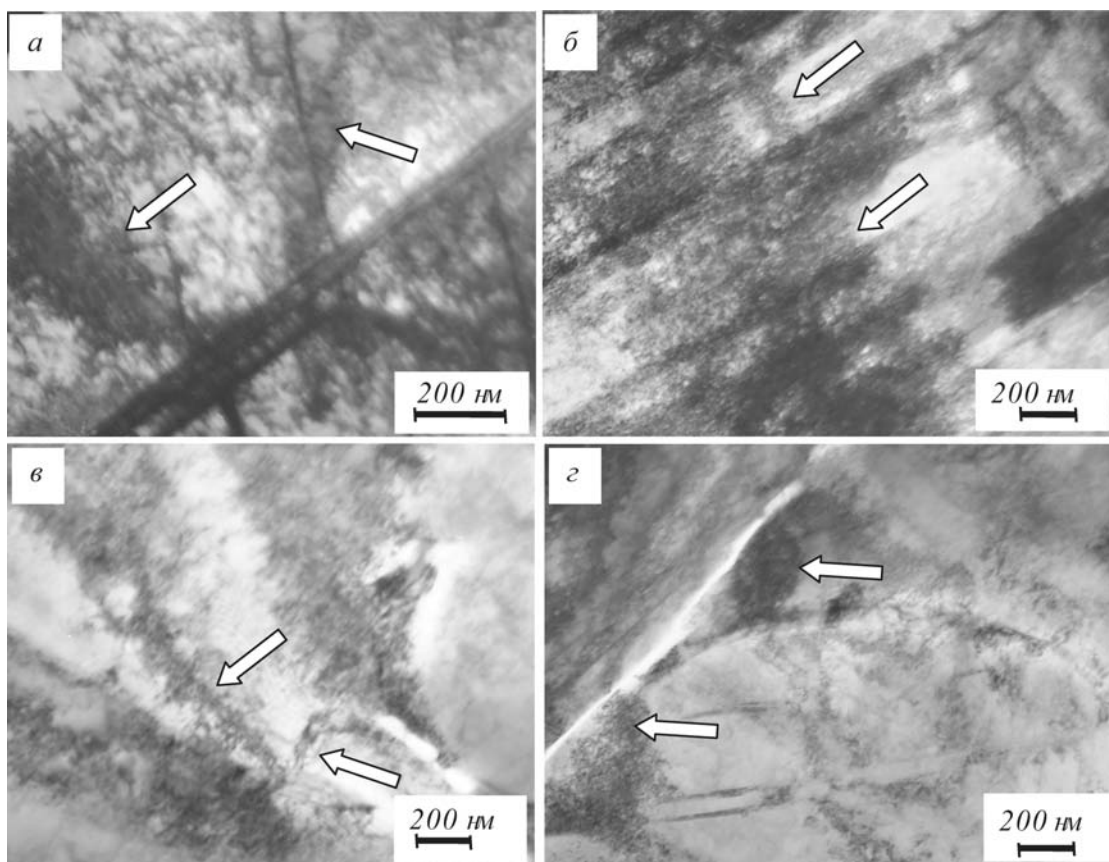


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20Х23Н18 в слое, расположенном на глубине приблизительно 10 мкм, при обработке электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см² (стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры)

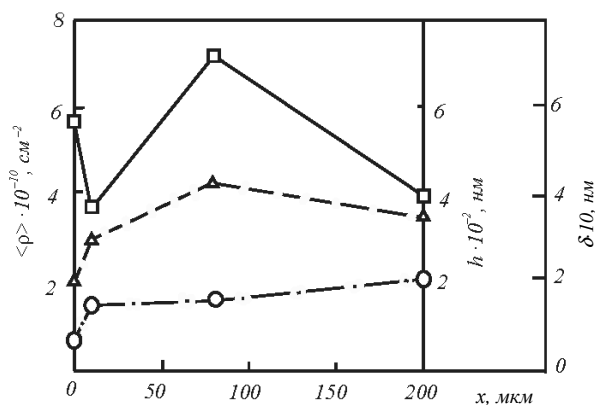


Рис. 2. Зависимости скалярной плотности дислокаций (—), относительной объемной доли занятого микродвойниками материала (---) и величины поперечных размеров изгибных экстинкционных контуров (- · - · -) от расстояния от поверхности обработки стали электронным пучком

Закономерным образом изменяется по мере удаления от поверхности облучения и тип дислокационной субструктуры стали (рис. 3). Выявлена сетчатая дислокационная субструктура и субструктура дислокационного хаоса. В стали, не обработанной электронным пучком (исходное состояние), оба типа дислокационной субструктуры присутствуют в равной степени. После электронно-пучковой обработки в поверхностном слое сетчатая дислокационная субструктура является единственным типом дислокационной субструктуры. По мере удаления от поверхности облучения количество сетчатой дислокационной субструктуры постепенно уменьшается.

Выводы. Электронно-пучковая обработка стали повышает ее усталостный ресурс в 2,1 раза и способствует формированию градиентов структуры и фазового состава, количественные характеристики которых закономерным образом изменяются по мере удаления от поверхности облучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. Поута, Г. Фоти и Д. Ждекобсона. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
2. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Горбунов С.В. и др. // Изв. вуз. Физика. 2011. № 5. С. 61 – 69.

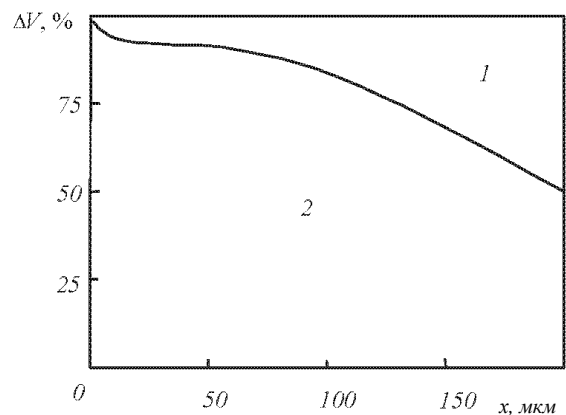


Рис. 3. Относительное содержание ΔV дислокационных субструктур стали 20Х23Н18, обработанной электронным пучком:
1 – субструктура дислокационного хаоса;
2 – ячеистая дислокационная субструктура

3. Иванов Ю.Ф., Горбунов С.В., Воробьев С.В. и др. // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 1. С. 75 – 82.
4. Горбунов С.В., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 61 – 65.
5. Громов В.Е., Горбунов С.В., Иванов Ю.Ф. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 10. С. 62 – 67.
6. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В. и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2011. № 1. С. 57 – 63.
7. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. — М.: Металлургия, 1977. — 208 с.
8. Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С. Электронограммы и их интерпретация. — М.: Мир, 1971. — 256 с.
9. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. — М.: Мир, 1968. — 574 с.
10. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. — Новокузнецк: изд-во «Интер Кузбасс», 2012. — 403 с.

© 2012 г. С.В. Воробьев, В.В. Сизов,
В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов,
С.В. Коновалов
Поступила 6 апреля 2012 г.