

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛИ 20Х23Н18, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Сизов В.В., Воробьев С.В., Столбоушкина О.А., Иванов Ю.Ф.\*,  
Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.*  
[gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

*\*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*  
[yufi@mail2000.ru](mailto:yufi@mail2000.ru)

Целью настоящей работы являлся анализ фазового состава и состояния дефектной субструктуры, выявление механизма усталостного разрушения стали аустенитного класса 20Х23Н18, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным пучком в режиме оплавления поверхности.

В качестве материала для исследования была использована сталь аустенитного класса состава 20Х23Н18, образцы из которой подвергали усталостным испытаниям по схеме асимметричного консольного изгиба. Перед усталостными испытаниями часть образцов подвергали облучению высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛО» (ИСЭ СО РАН) при следующих параметрах: энергия электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 40 Дж/см<sup>2</sup>; длительность и частота следования импульсов воздействия пучка электронов 150 мкс и 0,3 Гц; количество импульсов воздействия пучка электронов – 3. Облучение осуществляли при остаточном давлении аргона в рабочей камере установки, равном ~0,02 Па. Исследования структуры стали в исходном состоянии и после усталостных испытаний осуществляли методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Методами просвечивающей электронной микроскопии изучали фольги, расположенные на расстоянии ~10 и ~80 мкм от поверхности (стороны образца, расположенной противоположно концентратору напряжений и подвергнутой обработке электронным пучком), а также фольги, включающие саму поверхность облучения.

Установлено, что сталь перед облучением высокоинтенсивным электронным пучком являлась поликристаллическим агрегатом. В объеме зерен выявлены микродвойники, группирующиеся в пачки параллельных пластин. В объеме зерна, свободного от микродвойников, наблюдается сетчатая дислокационная субструктура; скалярная плотность дислокаций ~4,0·10<sup>10</sup> см<sup>-2</sup>. Вдоль границ зерен и, реже, в объеме зерна располагаются частицы карбидной фазы (карбиды хрома М<sub>23</sub>С<sub>6</sub>). Электронно-пучковая обработка поверхности стали сопровождалась высокоскоростным плавлением и кристаллизацией поверхностного слоя толщиной до 10 мкм. Анализ поверхности облучения, выполненный методами сканирующей электронной микроскопии, выявил формирование разнотельной структуры. Размеры зерен поверхностного слоя изменяются в пределах от 10 мкм до 70 мкм. В объеме зерен обнаруживается структура ячеистой кристаллизации, размеры ячеек изменяются в пределах от 300 нм до 400 нм. Последующие усталостные испытания привели к разрушению образцов после ~2,2·10<sup>5</sup> циклов нагружения, что в ~1,5 раза превышает усталостную долговечность стали, не подвергавшейся обработке электронным пучком.

В результате обработки высокоинтенсивным электронным пучком и последующих усталостных испытаний формируется многослойная структура, организованная определенным образом. Выявляется поверхностный слой толщиной (50...70) мкм, отделенный от основного объема материала цепочкой микропор и микротрещин. Данный слой имеет несколько подслоев, а именно, поверхностный, толщиной десятые доли микрометра, и следующий за ним подслоем толщиной до 10 мкм, имеющий столбчатую структуру. Очевидно, что данный подслои сформировался в результате обработки стали электронным пучком и последующего усталостного нагружения.

Фазовый состав и состояние дефектной субструктуры разрушенных образцов изучали путем анализа сечений (тонких фольг), расположенных вблизи поверхности образца (слой № 1), на глубине ~10 мкм (сечение вблизи границы раздела расплав / твердое тело слой № 2) и ~80 мкм (сечение, принадлежащее слою, сформировавшемуся в результате термического влияния, оказываемого на образец при обработке электронным пучком слой № 3).

В объеме зерен поликристаллической структуры выявляются ячейки высокоскоростной кристаллизации. Структура ячеек кристаллизации выявляется в поверхностном слое стали и после усталостных испытаниях. Размеры ячеек изменяются в пределах от 450 нм до 550 нм. В объеме ячеек присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций или сеток. Вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации выявляются частицы второй фазы. Наряду с дислокационной субструктурой в объеме зерен поверхностного слоя стали присутствуют микродвойники. Микродвойники располагаются в зерне отдельными пластинками, либо пакетами по 2-4 микродвойника.

Усталостное нагружение стали сопровождается формированием полей напряжений, которые приводят к появлению изгибных экстинкционных контуров на светлопольных и темнопольных изображениях структуры тонких фольг. Структура, формирующаяся на глубине ~10 мкм (слой №2), существенным образом отличается от структуры поверхностного слоя (слой № 1). Во-первых, выявляется множественное микродвойникование, во-вторых, внутриверевная структура характеризуется присутствием полосовой субструктуры. Размеры фрагментов изменяются в пределах от 50 до 100 нм. О малом размере фрагментов свидетельствует квазикольцевое строение микрорентгенограммы, полученной с такого типа структуры. Субзерна имеют округлую форму; размеры субзерен изменяются в пределах от 100 до 400 нм. В объемах материала, содержащих полосовую и субзеренную структуру, выявляются микротрещины, указывающие на высокий уровень внутренних напряжений, присутствующих в стали.

В слое, расположенном на глубине ~80 мкм, выявляются зерна, в которых наблюдается преимущественно сетчатая дислокационная субструктура (скалярная плотность дислокаций  $\sim 4,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ); зерна, в которых присутствуют пакеты пластин микродвойников и взаимодействующие микродвойники нескольких систем двойникования; области с нанокристаллической структурой (размеры кристаллитов изменяются в пределах от 40 до 80 нм).

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что причиной усталостного разрушения образцов из стали 20Х23Н18 является формирование областей с критической субструктурой, не способной к дальнейшей эволюции, т.е. исчерпавшей ресурс пластичности (усталостной долговечности) материала. Показано, что области критической структуры не формируются в поверхностном слое, т.е. в слое, подвергнутом высокоскоростной термической обработке, инициированной воздействием высокоинтенсивного электронного пучка. Следовательно, вероятной причиной увеличения в ~1,5 раза усталостной долговечности стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком, является подавление процессов, способствующих формированию областей с критической структурой, т.е. областей, являющихся потенциальным местом формирования микротрещин.

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