

Высокоинтенсивная электронно-пучковая обработка в режиме оплавления поверхности предварительно закаленной стали 20Х13 приводит к формированию градиентной многофазной структуры. Слой, формирующийся в результате высокоскоростной кристаллизации (поверхностный слой толщиной не менее 5 мкм), характеризуется формированием зеренно-субзеренной структуры с размером зерен ~3 мкм и наличием областей с многофазной структурой, формирующихся в результате контактного плавления стали вдоль границы раздела карбид $M_{23}C_6$ / матрица. В слое, расположенном на глубине ~20 мкм (зона термического влияния), выявлено формирование структуры с высоким уровнем внутренних напряжений. Показано, что релаксация полей напряжений сопровождается фрагментацией мартенситной структуры и образованием микротрещин, располагающихся вдоль границы раздела карбид / матрица.

При анализе поверхности разрушения выявлено формирование многослойной структуры, обнаружены микротрещины, расположенные в слое термического влияния. Проведены исследования методами дифракционной электронной микроскопии структуры и фазового состава поверхностного слоя образцов стали, разрушенных в результате усталостных испытаний. В слое, расположенном на глубине ~20 мкм, выявлено формирование субзеренной и полосовой структуры с высокой плотностью концентраторов полей внутренних напряжений. Установлено, что концентраторы с максимальной амплитудой полей внутренних напряжений формируются у границы раздела частица карбидной фазы – α -матрица. Это позволило высказать предположение, что основной причиной повышения усталостной долговечности стали 20Х13 является растворение при электронно-пучковой обработке присутствующих в приповерхностном слое глобулярных частиц карбидов типа $M_{23}C_6$.

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).

ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДИСЛОКАЦИОННОЙ СУБСТРУКТУРЫ СТАЛИ Э76Ф ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

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

Сибирский государственный индустриальный университет. Новокузнецк, Россия.

gromov@physics.sibsiu.ru

**Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

yufi@mail2000.ru

Целью работы являлось исследование структурно-фазового состояния и выявление закономерностей модификации поверхностного слоя рельсовой стали Э76Ф, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным пучком.

В качестве материала исследования была выбрана рельсовая сталь Э76Ф. Образцы имели форму параллелепипеда размерами 8x12x16 мм³. Перед испытаниями образцы были поделены на четыре партии.

Первая партия образцов не облучалась, а остальные облучали электронным пучком на установке «СОЛО», разработанной и сконструированной в ИСЭ СО РАН (г. Томск) при фиксированных параметрах: длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50$ мкс; количество импульсов воздействия $N = 3$ имп.; частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере ~0,02 Па. Переменным пара-

метром обработки являлась величина плотности энергии пучка электронов E_S , которая для образцов партии №1 – $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$; партии №2 – $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$; партии №3 – $E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$

Морфологию поверхности облучения изучали методами сканирующей электронной микроскопии. Фазовый состав и дефектную субструктуру поверхности облучения анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Фольги для электронной микроскопии готовили методами одностороннего электролитического утонения пластинок, вырезанных параллельно поверхности облучения на электроискровом станке. Предварительная термическая

обработка стали привела к формированию поликристаллической структуры, представленной зернами структурно свободного феррита, зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии и, в небольшом количестве зернами «псевдоперлита» (зернами феррита, содержащими включения цементита пластинчатой и глобулярной формы, расположенными хаотически в объеме зерна). Зерна феррита и «псевдоперлита» содержат дислокационную субструктуру в виде сеток и хаотически расположенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций $\sim 4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Обработка стали электронным пучком привела к существенному преобразованию морфологии поверхности облучения. Исходно полированная поверхность после облучения электронным пучком при $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ покрывается сетью микрократеров.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см^2 и, далее, до 30 Дж/см^2 сопровождается снижением количества микрократеров, размеры их увеличиваются. В поверхностном слое формируется поликристаллическая структура, средний размер зерен которой при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 составляет $\sim 5 \text{ мкм}$. В объеме зерен наблюдается субзеренная структура в виде ячеек, размер которых изменяется в пределах от $0,25 \text{ мкм}$ до $0,55 \text{ мкм}$. Формирование такой структуры (структуры ячеистой кристаллизации) свидетельствует о плавлении поверхностного слоя и последующей высокоскоростной кристаллизации со скоростями $\sim 10^6 \text{ К/с}$. Увеличение плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см^2 и, далее, до 30 Дж/см^2 сопровождается увеличением ячеек кристаллизации и среднего размера зерен до $\sim 8,5 \text{ мкм}$. Одновременно с этим изменяется и форма ячеек кристаллизации: если при $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ ячейки кристаллизации имеют равноосную форму, то при $E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$ кристаллизация расплава протекает с образованием дендритной структуры. Полученные факты указывают на снижение скорости охлаждения стали с увеличением плотности энергии пучка электронов.

При облучении стали электронным пучком с $E_S = 10 \text{ Дж/см}^2$ структура ячеистой кристаллизации наблюдается не во всех зернах. Это, очевидно, связано с особенностями структуры исходного состояния, а именно, присутствием зерен, обогащенных углеродом (зерна перлита), и зерен с минимальным содержанием углерода (зерна феррита). При облучении стали электронным пучком с $E_S = (20 \dots 30) \text{ Дж/см}^2$ структура ячеистой кристаллизации формируется повсеместно, что указывает на формирование однородного по углероду жидкого раствора на основе железа.

Еще одна особенность структуры ячеистой кристаллизации выявляется при исследовании поверхности стали в обратно отраженных электронах. А именно, в узлах ячеек кристаллизации обнаруживаются включения черного цвета на сером фоне ячеек.

Независимо от плотности энергии пучка электронов в анализируемом слое формируется многофазная структура. Основной является α -фаза, представленная мартенситом. Наряду с α -фазой обнаруживаются остаточный аустенит, цементит и, предположительно, графит.

Таким образом, несмотря на сверхвысокие скорости закалки, реализующиеся при электронно-пучковой обработке, формирующаяся в поверхностном слое структура имеет фазовый состав, подобный (за исключением графита) фазовому составу стали, закаленной с печного нагрева.

Сверхвысокие скорости охлаждения сказываются на размерных характеристиках формирующейся структуры. Наряду со структурой ячеистой кристаллизации, содержащей наноразмерные кристаллы мартенсита, в поверхностном слое выявляются зерна со структурой пакетного мартенсита, поперечные размеры кристаллитов которых изменяются в пределах от 85 нм до 220 нм, что близко к поперечным размерам кристаллов мартенсита стали, закаленной с печного нагрева.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см² (и до 30 Дж/см²) приводит к формированию в поверхностном слое морфологически и размерно однородной мартенситной структуры, а именно, пакетного мартенсита. Размеры пакетов (ячеек кристаллизации) изменяются в пределах (0,8...1,0) мкм; поперечные размеры кристаллов мартенсита (80...200) нм. В небольшом количестве выявляется пластинчатый мартенсит. Следует отметить, что при закалке с печного нагрева в воде или масле в стали с содержанием углерода более 0,6 вес. % формируется преимущественно пластинчатый сдвоенный мартенсит. Формирование преимущественно пакетного мартенсита в поверхностном слое стали может быть связано как с высокой скоростью закалки, реализующейся при электронно-пучковой обработке стали, так и с обезуглероживанием расплава поверхностного слоя в результате формирования частиц графита. Частицы графита (участки, обогащенные углеродом) были выявлены методами сканирующей электронной микроскопии. При электронно-микроскопическом микродифракционном анализе структуры стали методом тонких фольг частицы графита также обнаруживаются по границам и в стыках границ ячеек кристаллизации (размеры частиц изменяются в пределах 70...145 нм).

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 и заявка 2012-1.1-12-000-2003-6211).

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ АРМАТУРЫ ПРИ СЛИТТИНГ-ПРОЦЕССЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ

**Волков К.В., Чинокалов В.Я., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф.,
Мясникова В.И., Громов В.Е.**

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

gromov@physics.sibsiu.ru

**Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,*

yufi@mail2000.ru

Перспективным энергосберегающим методом прокатки арматурного профиля является слиттинг-процесс, обеспечивающий продольное разделение заготовки в процессе прокатки. Знания закономерностей формирования структуры и фазового состава при прокатке – разделении и последующем упрочнении позволяют целенаправленно устанавливать оптимальные режимы обработок и формировать комплекс требуемых механических свойств [1].

Для этих целей методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии был проведен послойный анализ структуры, фазового состава и дефектной субструктуры стержневой арматуры диаметром 12 мм из стали Ст3пс, полученной прокаткой на мелкосортном стане 250-1 по технологии продольного разделения раската и последующего термического упрочнения [2]. Технология прерванной закалки включала два последовательных цикла принудительного охлаждения (0,37 и 0,25 с в 1 и 3 секциях установки термоупрочнения под давлением воды 20 и 15 атм. соответственно) с промежуточным отогревом (0,37 с после 1 секции). Обработка сформировала в сечении стержня структур-