

МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ АРМАТУРЫ

Иванов Ю. Ф., Ефимов О. Ю.*, Морозов М. М.*, Громова А. В.*, Коновалов С. В.*,
Козлов Э. В.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск,
yufi@mail2000.ru

**Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,*
gromov@physics.sibsiu.ru

Для повышения уровня эксплуатационных свойств арматуры из малоуглеродистых сталей в последнее время все чаще используют термомеханическое упрочнение [1–3]. Однако технологический процесс термоупрочнения арматуры является сложным из-за влияния многих факторов (скорость прокатки, марка стали, диаметр и температура арматуры, технологическая схема упрочнения и т.п.). Для целенаправленного управления им необходимо знание количественных закономерностей структурно-фазовых превращений в процессе термоупрочнения для каждой марки стали, диаметра заготовки и технологических параметров процесса. Анализ процесса термомеханической обработки стали проводится без учета структурных и масштабных уровней деформации, что не позволяет сформировать целостную физическую картину преобразований в дефектной подсистеме материалов. Все вышесказанное подчеркивает актуальность и своевременность настоящей работы.

Цель работы: выявление закономерностей и механизмов эволюции фазового состава и дефектной субструктуры углеродистой стали марки СтЗпс на различных масштабных уровнях для повышения эффективности технологии упрочнения арматуры различного диаметра в линии прокатного стана по режиму прерванной закалки [1–3].

Материалом исследований являлась стержневая арматура номинальным диаметром 12, 20, 25 мм из стали марки СтЗпс по ГОСТ 380 «Сталь углеродистая обыкновенного качества». Прокатка арматуры проводилась на мелкосортных станах 250-1 (арматура №12) и 250-2 (арматура №20, №25). После выхода из чистовой клетки стержни в линии стана подвергались принудительному охлаждению до температур 500–600°C, а затем доохлаждались на спокойном воздухе и резались на мерные длины. Термическое упрочнение проводилось по режиму прерванной закалки, технологические параметры которой варьировались изменением скорости прокатки и температуры раскатов на выходе из последней клетки. Структурно-фазовое состояние термоупрочненной арматуры на микро и мезоуровнях анализировалось методами дифракционной микроскопии тонких фольг.

В результате исследования фазового состава арматурных стержней стали марки СтЗпс, выполненного методами микродифракционного анализа тонких фольг, выявлено присутствие α -фазы (ОЦК кристаллическая решетка на основе железа, феррит), карбида железа (цементит, орторомбическая кристаллическая решетка, Fe_3C) и, в весьма незначительном количестве, γ -фазы (ГЦК кристаллическая решетка на основе железа, остаточный аустенит). Данные фазы находятся в определенном сочетании и формируют мартенситную (мартенсит отпуска) и бейнитную структуры, зерна структурно свободного феррита и пластины видманштеттова феррита, зерна перлита и «псевдоперлита» (зерна феррита, содержащие некоторое количество частиц цементита глобулярной и/или игольчатой (шпацинчатой) морфологий). Данные структуры определенным обра-

зом расположены в объеме арматурного прутка, формируя его служебные характеристики. На рис.1 приведены диаграммы, демонстрирующие изменение относительного содержания в стали представленных выше структур, в зависимости от расстояния до поверхности обработки в прутках различного диаметра. Отчетливо видно, что, независимо от диаметра прутка, поверхностный слой, обладающий максимальной микротвердостью, имеет структуру мартенсита отпуска. Второй максимум микротвердости, обнаруживаемый во втором переходном слое, связан с формированием бейнитно-мартенситной структуры. В образцах №12 и №25 относительное содержание данных структур заметно выше, чем в образце №20.

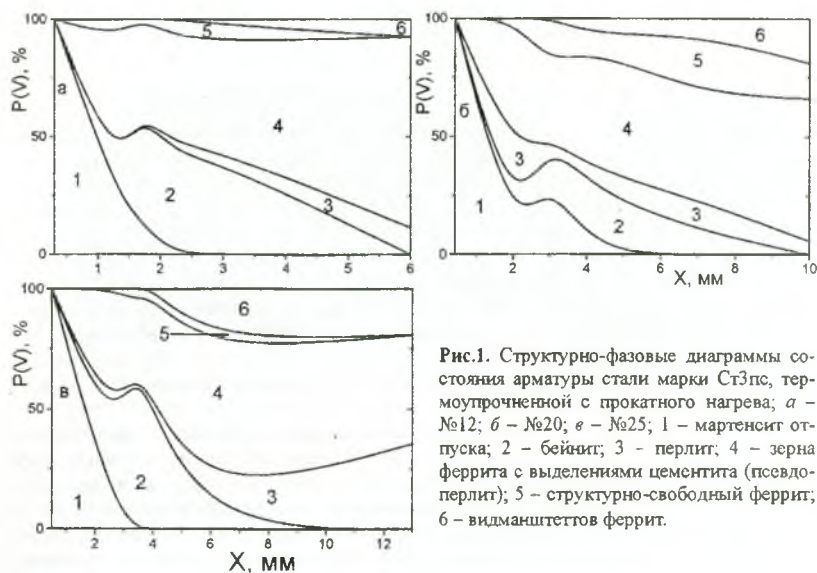


Рис.1. Структурно-фазовые диаграммы состояния арматуры стали марки СтЗпс, термоупрочненной с прокатного нагрева; а - №12; б - №20; е - №25; 1 - мартенсит отпуска; 2 - бейнит; 3 - перлит; 4 - зерна феррита с выделениями цементита (псевдоперлит); 5 - структурно-свободный феррит; 6 - видманшеттов феррит.

Электронно-микроскопический дифракционный анализ термоупрочненной арматуры показывает, что практически во всех выявленных структурно-фазовых составляющих стали обнаруживаются изгибные экстинкционные контуры. Присутствие изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопических изображениях структуры образца, полученных при анализе тонких фольг, указывает на наличие в материале дальнедействующих полей напряжений, одной из характеристик которых является кривизна-кручение кристаллической решетки. Установлено, что величина кривизны-кручения кристаллической решетки, а также амплитуда дальнедействующих полей напряжений определяются формирующейся структурой. Результаты данного анализа приведены в табл. 1.

Величина средних дальнедействующих полей напряжений максимальна в кристаллах бейнита; минимальна - в зернах структурно свободного феррита. Однако следует отметить, что данные средние величины не всегда правильно отражают реальную картину полей напряжений в материале. Отчетливо видно, что максимальные величины поля напряжений обнаруживаются в кристаллах мартенсита и в зернах феррита, сформировавшихся в результате динамической рекристаллизации мартенситной структуры стали.

Таблица 1. Кривизна-кручение кристаллической решетки (χ) и амплитуда дальнедействующих полей напряжений (σ) в структурных составляющих стали

Тип структуры	$\langle\chi\rangle, 10^3, \text{см}^{-1}$	$\langle\sigma\rangle, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$
Зерна феррита	0,87	392	401
Зерна феррита рекристаллизации	2,03	594	785
Пластинки видманштеттова феррита	1,34	486	513
Пластинчатый перлит	1,37	492	556
«Псевдоперлит»	0,97	414	471
Кристаллы мартенсита отпуска	1,59	530	664
Кристаллы бейнита	2,33	641	653

Дислокационный ансамбль, в котором формируются различные типы дислокационной субструктуры, относится к подуровню дислокационного ансамбля. Этот же структурный уровень включает в себя и различные формирования, образующиеся в дислокационном ансамбле – сетки, сгущения, ячейки, фрагменты, микрополосы, субграницы и т.д. Характеристики данных типов дислокационной субструктуры и расположение их относительно структурно-фазовых составляющих стали в обобщенном виде приведены в табл.2.

Таблица 2. Характеристики дислокационной субструктуры арматурного прутка стали Ст3пс

Тип структуры	хаос		сетки		Ячейки-сетки		ячейки	
	$\langle\rho\rangle, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	$\delta, \%$	$\langle\rho\rangle, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	$\delta, \%$	$\langle\rho\rangle, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	$\delta, \%$	$\langle\rho\rangle, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	$\delta, \%$
Зерна феррита	1,2	16	2,5	48	4,0	36		нет
Зерна феррита рекристаллизации	1,0	100		нет		нет		нет
Видманштеттов феррит		нет	2,7	100		нет		нет
Пластинчатый перлит	1,2	50	1,8	50		нет		нет
«Псевдоперлит»	1,6	37,5	2,5	50		нет	4,1	12,5
Мартенсит отпуска	1,5	12,5	2,9	62,5	3,2	12,5	3,2	12,5
Бейнит		нет	2,7	100		нет		нет

В таблице: $\langle\rho\rangle$ – скалярная плотность дислокаций в данном типе субструктуры; δ – относительное содержание данного типа дислокационной субструктуры.

Анализируя результаты, представленные в табл.2, можно отметить, что, независимо от структурно-фазовой составляющей стали, наиболее распространенным типом дислокационной субструктуры является сетчатая, содержащая, как отмечалось выше, дислокационные клубки и сгущения; наименее распространенной является ячеистая дислокационная субструктура. Наиболее высокая плотность дислокаций отмечается в ячеистой и ячеисто-сетчатой субструктуре, наименьшая – в субструктуре дислокационного хаоса.

Дислокационная субструктура исследуемой стали весьма тесно связана с карбидной фазой. Термоупрочнение стали посредством прерванной закалки в потоке быстрого стана сопровождается последовательным протеканием процесса закалки и следующего за ней отпуска арматуры под действием тепла объема прутка. Отогрев зака-

ленной стали сопровождается одновременным протеканием целого ряда процессов, основными из которых являются перераспределение атомов углерода между кристаллической решеткой и дефектами, распад твердого раствора с образованием частиц карбидной фазы, перераспределение дислокаций, выход на границы зерен, пакетов, кристаллов мартенсита и бейнита, протекание процесса динамической рекристаллизации. Образующиеся в процессе отпуска стали частицы карбидной фазы и частицы, сформировавшиеся непосредственно в процессе закалки, играют определяющую роль в стабилизации дислокационной субструктуры, препятствуя перемещению отдельных дислокаций, дислокационных образований, субграниц фрагментов и субзерен и границ кристаллов мартенсита, бейнита и пакетов мартенсита. Значимую роль в эффективности стабилизирующих свойств играют форма и размеры частиц, плотность их расположения, места формирования. Анализируя структуру стали можно выделить целый ряд дислокационных субструктур, сформировавшихся при взаимодействии с частицами карбидной фазы. А именно, структура дислокационного хаоса; клубки и сгущения дислокаций; сетчатая дислокационная субструктура и ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура.

Список литературы

1. Иванов Ю.Ф. Многоуровневая градиентная структура в стержне низкоуглеродистой стали малого диаметра, термоупрочненной с горячего проката / Ю.Ф.Иванов, А.Б.Юрьев, М.М. Морозов [и др.] // Физическая мезомеханика. - 2005. -Т.8. - №2.- С.61-68.
2. Юрьев А.Б. Закономерности формирования фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств арматуры при термическом упрочнении // А.Б. Юрьев, Ю.Ф. Иванов, М.М. Морозов [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2005. - № 6. - С.39-44.
3. Иванов Ю.Ф. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в арматуре из малоуглеродистой стали / Ю.Ф. Иванов, А.Б. Юрьев, М.М. Морозов [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 2005. - № 8. - С.23-26.

УДК 669.046: 539.3: 548.736

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ АРМАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Иванов Ю. Ф., Микрюков В. Р. *, Громов В. Е. *, Коновалов С. В. *

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск,
yufi@mail2000.ru

**Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,*
gromov@physics.sibsiu.ru

Установление механизмов изменения структурно-фазовых состояний арматуры при длительной эксплуатации, несомненно, актуально, так как позволяет управлять этими процессами, предотвращать разрушение конструкций, более обоснованно подходить к проблеме прогнозирования долговечности в процессе проектирования, строительства и эксплуатации конструкций и сооружений [1–4].

Цель работы: исследование физической природы и закономерностей деградации структурно-фазовых состояний арматуры из стали 35ГС при длительной эксплуатации в каркасе фундаментов промышленных зданий и сооружений.