

*М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова,
А.В. Лысенин, А.Е. Гулин*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ*

Аннотация. Формализован процесс получения заданной ультрамелкозернистой структуры и механических свойств углеродистой стали в методах интенсивной пластической деформации. Рассмотрены особенности применения стохастических и статистических математических моделей для описания процессов интенсивной пластической деформации с различным объемом информации о взаимосвязи параметров управления процессом и механическими свойствами углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой. Разработан критериальный подход для оценки эффективности процессов интенсивной пластической деформации углеродистых сталей.

Ключевые слова: углеродистые стали, пластическая деформация, эффективность, модель.

DEVELOPMENT OF EVALUATION CRITERIA OF THE PROCESS EFFECTIVENESS OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION OF STRUCTURAL CARBON STEELS

Abstract. The formation process of the required ultrafine structure and mechanical properties of carbon steel by severe plastic deformation is formalized. Peculiarities of stochastic and statistical mathematical models application for description of the severe plastic deformation processes with different information volume about interconnection of parameters of process control and mechanical properties of carbon steels with ultrafine structure are examined. The criteria approach for evaluation of the processes effectiveness of intensive plastic deformation carbon steels.

Keywords: carbon steels, plastic deformation, effectiveness, model.

Преимущество металлов и сплавов с нано- (НС) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурами перед их крупнокристаллическими аналогами в настоящее время уже не вызывает сомнений. Наиболее технологичными методами формирования УМЗ структуры являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Однако, для разработки технологических процессов производства изделий из металлов и сплавов с УМЗ структурой необходимо разработать методологический подход, позволяющий прогнозировать получение заданной структуры и механических свойств при определенной степени деформации в ходе ИПД. Фундаментальные основы теоретических закономерностей структурообразования и формирования механических свойств при больших деформациях изложены в работах А.М. Андриевского, А.М. Глезера, Р.З. Валиева, С.В. Добаткина, В.Е. Панина, В.В. Рыбина, Ф.З. Утяшева, Г. Гляйтера и других отечественных и зарубежных исследователей [1 – 8 и др.]. Современное состояние и

развитие процессов ИПД характеризуется существованием как хорошо изученных процессов (например, равноканальное угловое прессование (РКУП), интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК), винтовая экструзия и др.), так и появлением новых процессов деформационного наноструктурирования, что требует проведения многофакторных экспериментов для установления технических и технологических параметров. С этой точки зрения представляется целесообразным рассмотреть возможность количественной оценки происходящих изменений микроструктуры и механических свойств металлов и сплавов при различных процессах ИПД.

Поскольку конструкционная углеродистая сталь с НС и УМЗ структурами обладает уникальным сочетанием прочностных и пластических свойств, это делает ее перспективным конструкционным материалом для производства металлоизделий с повышенными эксплуатационными свойствами. В настоящей работе для оценки эффективности различных методов ИПД для формирования УМЗ структуры в конструкционных углеродистых сталях предлагается использовать систему критериев, учитывающих параметры управления и параметры состояния исходной заготовки, параметры микроструктуры стали и ее механических свойств.

Формализовать процесс получения заданной УМЗ структуры и механических свойств конструкционной

* Работа проведена в рамках реализации программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобразования РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.В37.21.0068 «Разработка фундаментальных принципов проектирования многостадийных процессов термомеханического наноструктурирования стальных заготовок большого диаметра»).

углеродистой стали можно, используя совокупность универсальных множеств, включающих блок входных переменных, блок объекта управления и блок выходных переменных. Функциональный блок входных переменных должен состоять из переменных, характеризующих показатели механических свойств стали в исходном состоянии, и управляющих переменных, характеризующих параметры управления процессом ИПД. Функциональный блок объекта управления должен включать переменные состояния, характеризующие параметры микроструктуры обрабатываемой стали, изменяющиеся в процессе ИПД. Функциональный блок выходных переменных должен включать переменные, характеризующие показатели механических свойств стали после осуществления процесса ИПД. Для формализации процедуры сравнения полученных после ИПД показателей механических свойств с теоретически возможными показателями механических свойств, которые можно получить в ходе данного процесса ИПД, следует использовать функциональный блок сравнения и оценки. Такой подход позволяет использовать различные виды моделей для математического описания взаимосвязи параметров управления, параметров микроструктуры и показателей механических свойств конструкционных углеродистых сталей в процессах ИПД (рис. 1).

Такие процессы ИПД, как РКУП, ИПДК, винтовая экструзия и др., характеризуются большим объе-

мом информации о взаимосвязи между параметрами управления процессом ИПД и механическими свойствами углеродистых сталей с НС и УМЗ структурами. Критерием I эффективности управления структурой и механическими свойствами сталей с НС и УМЗ структурами может являться стабильность осуществляемого процесса ИПД

$$I(U, V) = S = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i (\delta K_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n \lambda_i (\delta K_i)^2} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где U и V – совокупность параметров управления и состояния; S – стабильность процесса интенсивной пластической деформации; λ_i – коэффициент весомости; δK_i^0 – начальные возмущения показателей механических свойств и параметров микроструктуры стали; δK_i – возмущения показателей механических свойств и параметров микроструктуры углеродистой стали с НС и УМЗ структурами.

Целевые функционалы будут иметь вид

$$Mf^0(\bar{x}(S), S) = MI(U, V) = \int_{\Omega} \left(\frac{(\delta K_1)^2}{(\delta K_1^0)^2} \right) P dS; \quad (2)$$

$$Df^0(\bar{x}(S), S) = DI(U, V) = \int_{\Omega} \left\{ \frac{(\delta K_1)^2}{(\delta K_1^0)^2} - M \left[\frac{(\delta K_1)^2}{(\delta K_1^0)^2} \right] \right\} P dS, \quad (3)$$

где $Mf^0(\bar{x}(S), S)$ – математическое ожидание случайной величины $f^0(\bar{x}(S), S)$; Ω – множество событий, на которых определена вероятность P , причем $S \in \Omega$; $Df^0(\bar{x}(S), S)$ – дисперсия случайной величины $f^0(\bar{x}(S), S)$; δK_1^0 – начальные возмущения параметров микроструктуры стали; δK_1 – возмущения параметров микроструктуры углеродистой стали с НС и УМЗ структурами.

В ходе исследования методов ИПД параметры управления являются практически всегда детерминированными, однозначно определенными величинами, и выражаются действительными числами; например, количество циклов обработки и конструктивные параметры инструмента при РКУП, циклической деформации «осадка – экструзия – осадка» и др. С другой стороны, значения параметров состояния и механических свойств обрабатываемых углеродистых сталей в таких процессах являются случайными, недетерминированными величинами. Исходя из этого, стохастическую модель целесообразно применять для хорошо изученных процессов ИПД при условии достаточного количества необходимой технологической информации. Такая модель может быть использована для оптимизации процесса ИПД, т.е. для нахождения таких значений па-

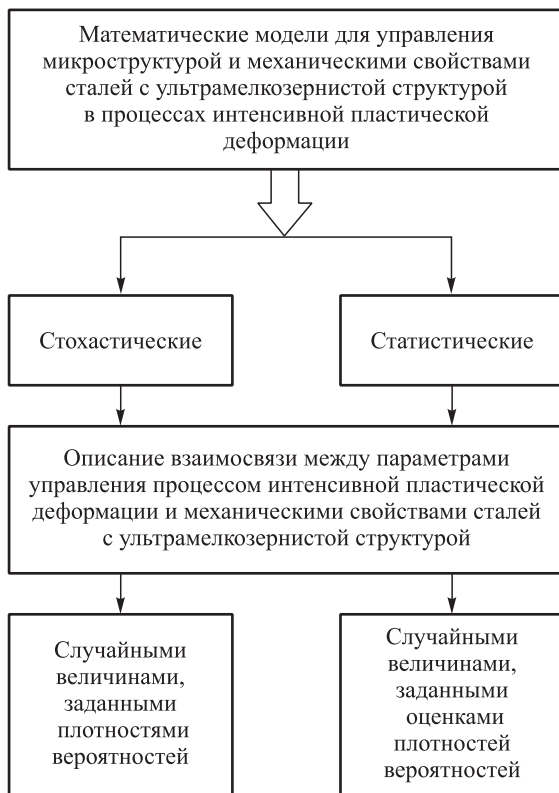


Рис. 1. Математические модели, используемые для описания взаимосвязи параметров управления, параметров микроструктуры и показателей механических свойств конструкционных углеродистых сталей в процессах ИПД

параметров, при которых функция, выбранная в качестве целевого функционала, примет максимальное или минимальное значение.

В статистической модели управления значения всех или отдельных параметров устанавливаются случайными величинами, заданными оценками плотностей вероятностей, полученными в результате обработки ограниченной экспериментальной выборки данных параметров. Формализация метода статистического моделирования сводится к построению для процесса управления структурой и свойствами конструкционных углеродистых сталей с НС и УМЗ структурами в процессах ИПД некоторого моделирующего алгоритма и его реализации с использованием программно-технических средств ЭВМ. В результате статистического моделирования получается серия частных значений искомых величин или функций, статистическая обработка которых позволяет получить сведения о поведении реального процесса структурообразования в стали в ходе осуществления процесса ИПД. Если количество необходимой информации достаточно велико, то полученные результаты моделирования приобретают статистическую устойчивость и с достаточной точностью могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик как результата функционирования объекта исследования. Для использования статистической модели управления необходимо провести ряд экспериментов для установления взаимосвязи показателей механических свойств со структурными параметрами стали с НС и УМЗ структурами при ИПД. Математическое описание в этом случае строится в виде регрессионных зависимостей показателей механических свойств от параметров микроструктуры конструкционных углеродистых сталей с НС и УМЗ структурами. Такая модель позволяет прогнозировать изменение параметров микроструктуры и показателей механических свойств конструкционной углеродистой стали после ее обработки новыми перспективными методами ИПД, не описанными ранее в известных технических решениях. Кроме того, представляется возможным определение закономерностей влияния микроструктуры на механические свойства углеродистой стали с НС и УМЗ структурами в таких условиях.

В обобщенной схеме оценки и прогнозирования структуры и свойств конструкционных углеродистых сталей в процессе деформационного наноструктурирования (рис. 1) учитывается, насколько эффективно тот или иной процесс ИПД функционирует в конкретных условиях при заданных входных переменных, переменных состоянии и параметрах управления.

В работе [9] для количественной оценки способности углеродистых конструкционных УМЗ сталей с феррито-перлитной структурой достижения требуемого уровня механических свойств при различных методах ИПД формализованы критерии оценки эффективности деформационного процесса наноструктурирования. Предлагается

использовать две группы критериев: к первой группе относятся критерии, характеризующие начальную способность стали воспринимать деформирующие воздействия, а ко второй – показатели, характеризующие степень изменения структурных составляющих конструкционной стали в ходе ИПД. Такой подход отражает конечные результаты функционирования процессов ИПД.

Комплексный критерий эффективности процесса ИПД может быть получен как сумма критериев для отдельно взятых моделей с соответствующими весовыми коэффициентами. Под нечетким множеством A понимается совокупность пар вида $(u, \mu_A(u))$, где $u_i \in U$. Для рассматриваемых типов задач U – множество элементов (обычное множество), $\mu_A(u)$ – функция принадлежности нечеткого множества A , определяется следующим образом: $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$. Для произвольного элемента u_i функция принадлежности определяет степень его принадлежности множеству U . В рассматриваемой задаче нечеткое множество A согласно определению, приведенному выше, состоит из двух пар (M - и D -модели) и может быть записано в виде

$$A = \bigcup_{i=1}^2 \mu_A(u_i) / u_i. \quad (6)$$

Для решения задачи стохастической оптимизации необходимо определить процедуру сравнения нечетких чисел на нечетком множестве. В теории нечетких множеств для этих целей определена некоторая четкая функция от нечетких аргументов, которая независимо от соотношения носителей нечетких чисел однозначно определяет отношение порядка между ними (индекс ранжирования). Значение индекса ранжирования для конкретной пары нечетких аргументов дает основание для решения вопроса о том, какое из двух чисел меньше.

В случае минимизации комплексного критерия оптимизации в качестве целевой функции необходимо выбрать нечеткое множество вида

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(Mf^0(\bar{x}(S), S))}{Mf^0(\bar{x}(S), S)}, \frac{\mu_A(Df^0(\bar{x}(S), S))}{Df^0(\bar{x}(S), S)} \right\}. \quad (7)$$

При численной реализации процедуры оптимизации для сравнения значений целевой функции, которые с математической точки зрения в данном случае представляют собой нечеткие множества, необходимо использовать соответствующие индексы ранжирования. Получаемое в результате решения задачи значение минимума целевой функции позволяет не только найти управление, обеспечивающее этот минимум, но и ответить на вопрос, с каким уровнем надежности получаемое распределение решения можно считать соответствующим тому распределению, которое необходимо достичь. Другими словами, с каким уровнем значимости выдвинутая гипотеза принимается.

Таким образом, критериальную оценку эффективности процесса ИПД конструкционных углеродистых сталей с точки зрения достижения необходимого уровня механических свойств составляют критерии, характеризующие статистическое оценивание параметров микроструктуры, и критерии, характеризующие изменение показателей механических свойств (K_z и K_σ , индексы «z» и «σ» – среднее значение параметра микроструктуры конструкционной стали и дисперсия данного параметра микроструктуры).

Критерий, характеризующий степень изменения дисперсии параметров микроструктуры конструкционной углеродистой стали в ходе обработки, определяется по формуле

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{исх}^{2j}}{\sigma_i^{2j}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{исх}^{2j}$ – дисперсия структурного параметра в исходном состоянии; σ_i^{2j} – дисперсия структурного параметра после n -го цикла обработки ИПД; $j = 1, \dots, m$ – количество параметров структуры; $i = 1, \dots, n$ – количество циклов обработки ИПД.

Условием эффективности наноструктурирования в процессе ИПД является $K_\sigma \rightarrow \max$.

Вторым критерием, характеризующим эффективность структурообразования и измельчения зерна при ИПД, является степень изменения параметра микроструктуры стали

$$K_z = \frac{z_{исх}^j}{z_i^j}, \quad (9)$$

где $z_{исх}^j$ – величина параметра микроструктуры стали в исходном состоянии; z_i^j – величина параметра

микроструктуры стали после n -го цикла обработки ИПД; $j = 1, \dots, m$ – количество параметров структуры; $i = 1, \dots, n$ – количество циклов обработки ИПД.

Условием эффективности наноструктурирования стали в процессе ИПД является $K_z \rightarrow \max$.

Критерий, характеризующий относительное изменение показателя механического свойства стали, формализуется в следующем виде:

$$K_y = \frac{y'_i - y'_{i-1}}{y'_{i-1}} 100 \%, \quad (10)$$

где $y'_i - y'_{i-1}$ – абсолютное изменение величины показателя механического свойства по переходам деформационного процесса; y'_{i-1} – величина показателя механического свойства стали после $(n-1)$ -го цикла обработки ИПД; y'_i – величина показателя механического свойства стали после n -го цикла обработки; t – количество механических свойств стали; $i = 1, \dots, n$ – количество циклов обработки ИПД.

Условием эффективности деформационного воздействия является $K_y \rightarrow \max$.

Для проверки разработанного подхода был проведен комплекс исследовательских работ по изучению изменения параметров микроструктуры и механических свойств конструкционной углеродистой стали марок 20 и 45 при различном количестве проходов РКУП [10 – 12]. Результаты оценки динамики изменения критерия K_z , характеризующего степень изменения параметров микроструктуры стали, и критерия K_σ , оценивающего степень изменения дисперсии параметров микроструктуры стали в ходе РКУП, представлены в таблице.

Наиболее существенное изменение критериев K_σ и K_z в сторону интенсивного уменьшения для межплас-

Значения критериев эффективности РКУП для конструкционной углеродистой стали марок 20 и 45

Критерии	Значение критерия, %, для			
	стали 20		стали 45	
	с 1 по 4 проход	с 4 по 8 проход	с 1 по 4 проход	с 4 по 8 проход
Изменение K_z :				
для межпластинчатого расстояния	33,3	5,2	40,7	14,3
для толщины ферритных пластин	40,8	22,2	38,8	20,1
для толщины цементитных пластин	20,0	0,5	42,2	10,0
для размера фрагментов феррита	23,0	13,3	25,0	17,6
для толщины деформационных полос	30,0	22,0	35,0	23,6
Изменение K_σ :				
для межпластинчатого расстояния	62,0	4,0	71,0	19,0
для толщины ферритных пластин	67,1	12,5	52,3	12,6
для толщины цементитных пластин	62,0	4,5	94,4	27,0
для размера фрагментов феррита	64,2	47,9	58,3	54,2
для толщины деформационных полос	60,2	44,7	83,0	62,8

тинчатого расстояния и его составляющих наблюдается в первых четырех проходах РКУП. Последующие проходы не вносят заметного влияния в динамику изменения значений критериев K_o и K_z для рассматриваемых параметров микроструктуры стали. Такие параметры микроструктуры стали, как размер фрагментов феррита и толщина деформационных полос с увеличением циклов обработки РКУП от одного до восьми уменьшаются практически равномерно. При этом для стали марок 20 и 45 нельзя выделить определенное число циклов обработки РКУП, при котором наблюдается наиболее заметное изменение данных параметров микроструктуры. Это объясняется тем, что с увеличением степени деформации растет число деформационных полос, и с каждым проходом увеличивается доля фрагментированного феррита в них.

Полученные данные могут быть использованы для определения технологических параметров процесса РКУП для формирования необходимой микроструктуры и уровня механических свойств конструкционной углеродистой стали марок 20 и 45 при условии их даль-

нейшего использования в процессах производства металлоизделий.

На рис. 2 представлена обобщенная схема критериального подхода к процессам ИПД для оценки эффективности этих процессов для конструкционных углеродистых сталей.

Выводы. Разработанная критериальная оценка эффективности процессов ИПД может быть использована для анализа как существующих, так и разработки новых методов деформационного наноструктурирования. Эта методика является универсальной и может быть адаптирована для любого процесса ИПД с учетом особенностей входных и выходных переменных, объекта управления и параметров управления объектом исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Академия, 2005. – 186 с.
2. Андриевский Р.А., Глезер А.М. // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 88. № 1. С. 50 – 73.

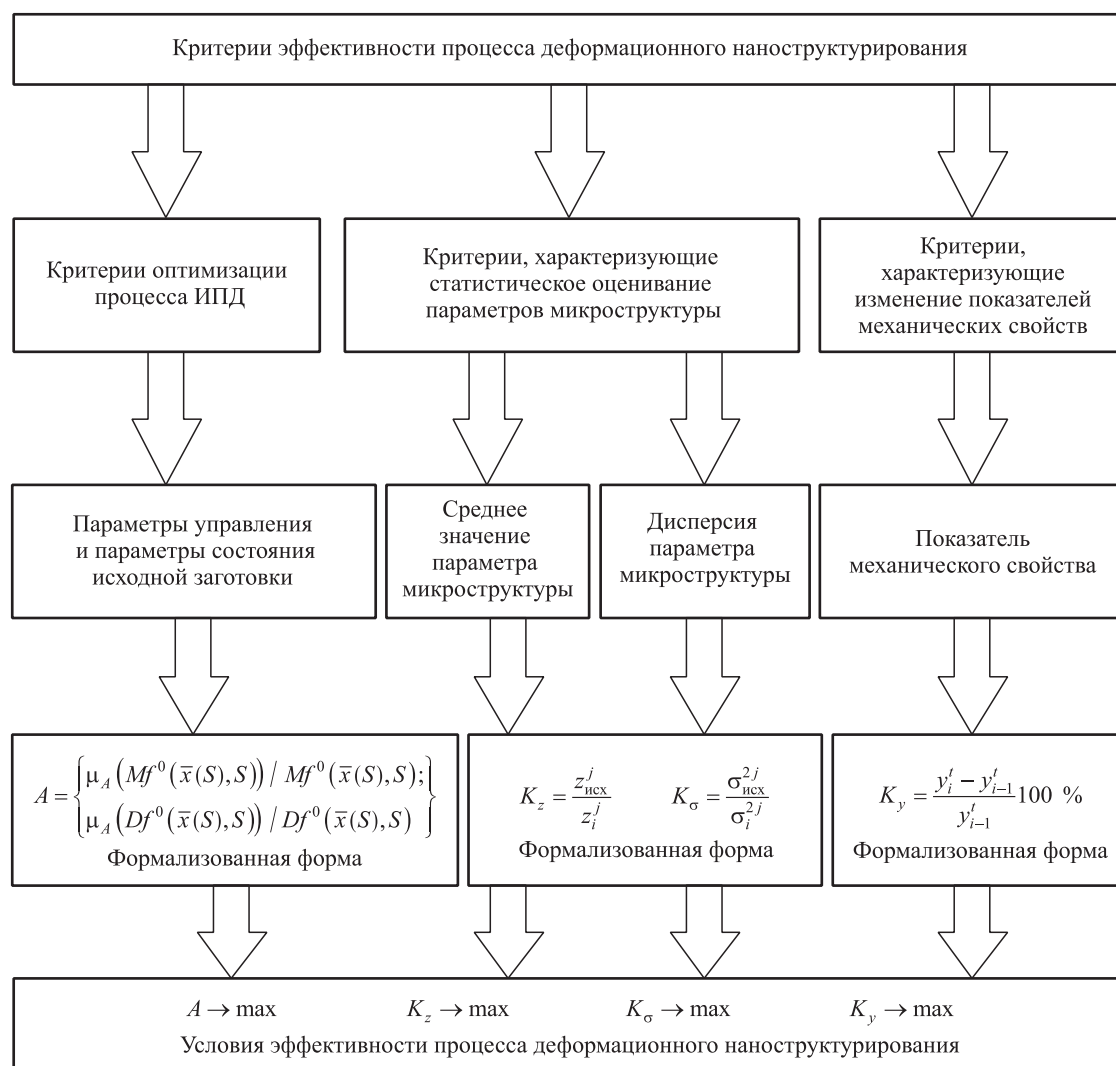


Рис. 2. Схема критериальной оценки эффективности процесса деформационной обработки конструкционных углеродистых сталей

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).