СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.15-194.591:539.25

# СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗОРИЕНТАЦИИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ БЕЙНИТЕ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРГАНЕЦ-КРЕМНИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОМ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2019 г. Н. А. Терещенко<sup>*a*,</sup> \*, И. Л. Яковлева<sup>*a*</sup>, И. Г. Кабанова<sup>*a*</sup>, Д. А. Мирзаев<sup>*b*</sup>

<sup>а</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия <sup>b</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080 Россия

\*e-mail: labmet@imp.uran.ru Поступила в редакцию 25.12.2018 г. После доработки 29.01.2019 г. Принята к публикации 04.02.2019 г.

Методом ориентационной микроскопии (EBSD) исследованы специальные разориентации между кристаллами бейнита высокоуглеродистой марганец-кремнистой стали, полученного в процессе изотермического  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при температуре 300°С. Спектры специальных границ сопоставлены с теоретическими расчетами возможных углов и осей разворота  $\alpha$ -кристаллов, возникших в исходной  $\gamma$ -фазе при соблюдении трех типов ориентационных соотношений Курдюмова–Закса, Нишиямы–Вассермана и промежуточных. Показано, что специальные разориентации  $\alpha$ -кристаллов с учетом критерия Брендона удовлетворяют ориентационным соотношениям Нишиямы–Вассермана и Курдюмова–Закса.

*Ключевые слова:* высокоуглеродистая марганец-кремнистая сталь, низкотемпературное бейнитное превращение, структура, бейнит, ориентационные соотношения, специальные разориентации **DOI:** 10.1134/S0015323019070106

# введение

Среди разнообразных морфологических форм бейнита наибольший интерес в настоящее время представляет структура нижнего бескарбидного бейнита, так как она обеспечивает уникальное сочетание прочности. вязкости и трешиностойкости [1-4]. Известно [5], что для высокоуглеродистых инструментальных сталей типа AISI 52100 (ШХ15СГ) структура бескарбидного бейнита предпочтительнее традиционной для этих материалов структуры отпущенного мартенсита. При обсуждении факторов, способствующих достижению повышенного уровня механических свойств, исследователи выделяют такие особенности структуры как пересыщение α-фазы по углероду, дисперсность бейнитных кристаллов, наличие вязких прослоек остаточного аустенита [6]. Между тем сдвиговый механизм, присущий низкотемпературному бейнитному превращению, предполагает кристаллографически обусловленный набор взаимных разориентаций кристаллов α-фазы, что также может оказывать существенное влияние на подвижность дислокаций в бейнитном пакете [7].

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы исследовать природу границ между кристаллами низкотемпературного бейнита, полученного в высокоуглеродистой кремний-марганцевой стали в изотермических условиях. Для этого требуется провести кристаллографический анализ разориентаций  $\alpha$ -кристаллов после  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при выполнении различных ориентационных соотношений (OC), методом ориентационной микроскопии выявить специальные разориентации между кристаллами бейнита, установить взаимосвязь между появлением специальных разориентаций  $\alpha$ -фазы и реализацией определенного типа OC.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования служила сталь, химический состав которой включает в мас. %: 0.98 С, 1.52 Si, 1.91 Mn, 1.44 Cr, 0.11 V. Слиток массой 10 кг был подвергнут гомогенизации и прокован на заготовки в виде прутков. Термическая обработка прутков включала аустенитизацию при 900°С, перенос в печь с температурой 300°С и изотермическую выдержку в течение 10 и 30 ч. Из термически обработанных заготовок изготавливались образцы для проведения структурных исследований, при этом исследуемая плоскость ориентировалась перпендикулярно направлению ковки.



**Рис. 1.** Структура Fe–Si–Mn–Cr–V-стали, подвергнутой изотермической выдержке при  $300^{\circ}$ C в течение: а – 10; б – 30 ч (РЭМ-изображение структуры массивных образцов).

Исследование структуры массивных образцов проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) GUANTA-200 при напряжении 30 кВ. Изучение тонкой структуры методом просвечивающей электронной микроскопии проводили на фольгах на микроскопе JEM-200CX при напряжении 160 кВ.

Для метода ориентационной микроскопии (EBSD) объектом исследования служили тонкие фольги; их структурное состояние изучали на растровом электронном микроскопе JEOL-640; оснащенном приставкой EBSD HKL Inca с системой анализа Oxsford Instruments. На участке фольги площадью 1290 мкм<sup>2</sup> было отсканировано 49 000 точек размером 0.026 мкм<sup>2</sup> каждая.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и механизм образования бейнита. При температуре 300°С переохлажденный аустенит Fe—Si—Mn—Cr—V-стали обладает минимальной устойчивостью относительно распада по промежуточной ступени и склонен к бейнитному превращению, полнота которого увеличивается пропорционально продолжительности изотермической выдержки. На начальном этапе тонкие и



Рис. 2. Реечное строение бейнитного пакета Fe–Si– Mn–Cr–V-стали, подвергнутой изотермической выдержке при 300°С в течение 30 ч: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе  $\alpha$ -фазы (ПЭМ-изображение).

протяженные кристаллы бейнитной  $\alpha$ -фазы отчетливо выделяются на фоне остаточного аустенита (рис. 1а). По мере развития  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода отдельные кристаллы бейнита группируются в пакеты, между ними возникают более мелкие кристаллы. На завершающей стадии превращения  $\alpha$ -фаза, составляющая основу структуры стали, отличается крайней дисперсностью (рис. 16).

Внутренний контраст, присущий кристаллам бейнита на РЭМ-изображениях, свидетельствует о их сложном строении (рис. 1). При использовании просвечивающей электронной микроскопии можно видеть, что бейнитный пакет содержит однонаправленные рейки толщиной 0.2–0.1 мкм и менее (рис. 2а). Внутри одного пакета содержатся рейки различной кристаллографической ориентировки (рис. 2б). Фронтальный (поперечный) рост кристаллов бейнита осуществляется сдвиговым путем. По данным кристаллографического анализа, выполненного для исследуемой стали ранее [8], между α-фазой бейнита и остаточным аустенитом выполняются ОС Нишиямы–Вассермана и ОС Курдюмова-Закса, причем, вероятность реализации первых значительно выше.

Кристаллографический анализ разориентаций а-кристаллов после  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Взаимные разориентации кристаллов  $\alpha$ -фазы, возникших в исходном зерне аустенита, кристаллографически обусловлены сдвиговым характером бейнитного превращения. В общем случае набор конкретных разориентаций  $\alpha$ -кристаллов зависит от вида ОС, реализуемых в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода: Курдюмова–Закса, промежуточных и Нишиямы–Вассермана.

Кристаллографический анализ разориентации между  $\alpha$ -кристаллами, возникшими в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, проводили с помощью матриц ореинтационной связи  $\gamma$ – $\alpha$  по формуле, использованной в работах [9]:

$$H(\varphi)_{ij} = C_j T^{-1}(\varphi) C_j T(\varphi), \qquad (1)$$

где

$$T(\varphi) = \begin{pmatrix} \sqrt{1/2} & 0 & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/2} & 0 & \sqrt{1/2} \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \\ \sqrt{1/2} & 0 & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{2/3} & \sqrt{1/6} \end{pmatrix}$$

 – матрица ориентационной связи между γ- и α-решетками после γ → α-превращения;

$$C_i(C_j)$$
 – матрицы типа  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,

описывающие в общем случае 24 симметрических поворота в кубической решетке:  $i(j) = 1, 2, ..., 24; \phi - угол асимметрии.$ 

Значения угла ф, отвечающие ОС Курдюмова– Закса, промежуточным и Нишиямы–Вассермана составляют ~5.26°, ~2.63° и 0° соответственно.

Заметим, что поскольку ОС Нишиямы–Вассермана обладают более высокой симметрией, число симметрических поворотов для этого вида ОС сокращается вдвое – оно равно 12 (а не 24, как в общем случае). Поэтому число симметрических вариантов для указанных выше видов ОС составляет, соответственно: 24, 24, 12. Но число матриц разориентаций  $H(\varphi)$ , которые мы получаем для трех видов ОС при расчете по формуле (1), в каждом случае меньше на единицу – оно равно, соответственно: 23, 23, 11. Так как мы вычисляли разориентации пар  $\alpha$ -кристаллов (из их чисел 24, 24, 12), то не учитывали разворот кристалла с самим собой, когда  $\beta = 0$ . Для каждой матрицы разориентации  $H(\phi)$ , с учетом полного ряда ее симметрических вариантов, производили расчет значений углов  $\beta$  и осей разворота [UVW], используя известные математические формулы:

$$\beta = \arccos\{(h_{11} + h_{22} + h_{33} - 1)/2\}; \qquad (2)$$

$$U: V: W = [h_{12} - h_{21}]: [h_{23} - h_{32}]: [h_{31} - h_{13}], \quad (3)$$

где  $h_{kl}$  – элементы матрицы  $H(\phi)$ .

В полученных наборах симметрических вариантов значений параметров разориентации (угол и ось разворота), относящихся к одной матрице  $H(\phi)$ , выбирали только один вариант — с наименьшим значением угла  $\beta$ . Такой вариант считали типом разориентации.

В каждом виде ОС находились несколько повторяющихся вариантов пар (с одинаковыми значениями параметров  $\beta$  и  $\langle U V W \rangle$ ), которые мы объединяли в один тип. Таким образом, в целом были получены 16 типов разворотов для ОС Курдюмова–Закса, 20 – для ОС промежуточных и 5 – для ОС Нишиямы–Вассермана. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Распределение осей разориентаций пар  $\alpha$ -кристаллов после сдвигового  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с выполнением ОС Курдюмова–Закса (а), Нишиямы–Вассермана (б) и промежуточных (в) в обобщенном стереографическом треугольнике наглядно иллюстрирует рис. 3, где цифрами указаны углы разворота.

Анализ углов и осей разворота показывает, что в каждом из трех наборов разориентаций α-кристаллов, характерных для определенного вида OC, встречаются одинаковые или однотипные пары значений. Общее число одинаковых разориентаций для OC Курдюмова–Закса, промежуточных и Нишиямы–Вассермана достигает 7, 3 и 6 соответственно.

Доля одного единичного варианта в общем числе разориентаций в случае ОС Курдюмова– Закса и промежуточных составляет 1/23 часть, или ~4.35%, а в случае ОС Нишиямы–Вассермана – 1/11 часть, или ~9.1%. Число повторяющихся значений параметров разориентации для каждого отдельного типа разориентации характеризует его кратность, пропорционально которой должна повышаться экспериментальная частота наблюдения разориентации этого типа.

Экспериментальное наблюдение специальных разориентаций в бейните. Рис. 4 иллюстрирует результаты исследования Fe–Si–Mn–Cr–V-стали, подвергнутой изотермической выдержке при 300°C в течение 30 ч, с использованием различных технических возможностей сканирующего микроскопа. Изображение, приведенное на рис. 4а, получено при совмещении условий отражения для бейнита (белые точки) и аустенита (темные точки). Данный участок структуры включает 70% бей-

№ варианта	ОС Курдюмова-Закса		ОС промежуточные		ОС Нишиямы–Вассермана	
(типа)	Угол, град	Ось $\langle UVW \rangle$	Угол, град	Ось $\langle UVW \rangle$	Угол, град	Ось $\langle UVW \rangle$
1	10.53	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle$	5.56	(0 1 1)	13.76	≈⟨1 12 12⟩*
2	10.53	$\langle 1 \ 1 \ 1 \rangle$	11.42	(1 3 3)	19.47	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle$
3	14.88	≈⟨2 11 29⟩*	14.05*	(1 9 14)	50.05	≈⟨3 4 4⟩*
4	20.61	≈⟨599⟩	16.95	〈4 11 11〉	53.69	≈⟨1 3 3⟩**
5	20.61	≈⟨0 5 16⟩	19.76	≈⟨0 3 19⟩	60.00	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle^*$
6	21.06	≈⟨0 4 9⟩	19.88	$\approx \langle 0 \ 2 \ 9 \rangle$		
7	47.11	≈⟨3 6 7⟩*	40.62	≈⟨0 2 3⟩		
8	49.47	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle$	43.79	≈⟨1 8 15⟩		
9	49.47	$\langle 1 \ 1 \ 1 \rangle$	49.62	≈⟨7 8 8⟩		
10	50.51	≈⟨5 5 8⟩*	50.16	≈⟨12 14 17⟩*		
11	50.51	≈⟨4 13 16⟩*	50.32	≈⟨5 13 14⟩		
12	51.73	≈⟨6 11 11⟩	50.75	≈⟨7 11 11⟩		
13	57.21	≈⟨3 5 6⟩*	52.05	≈⟨5 16 18⟩		
14	57.21	≈⟨5 13 15⟩*	52.37	≈⟨4 17 28⟩		
15	60.00	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle^*$	54.40	≈⟨3 4 7⟩		
16	60.00	$\langle 1 \ 1 \ 1 \rangle$	54.74	$\langle 0 \ 1 \ 1 \rangle$	(0 1 1)	
17			55.41	≈⟨4 11 12⟩		
18			57.20	≈⟨3 11 12⟩		
19			60.00	(0 1 1)*		
20			60.2	≈⟨5 5 6⟩		

Таблица 1. Рассчитанные разориентации ОЦК-кристаллов, возникающих после сдвигового ГЦК → ОЦК-превращения при выполнении различных видов ОС

Обозначения: \* - кратность варианта равна 2; \*\* - кратность варианта равна 4.

нита и 30% аустенита, что согласуется с данными о фазовом составе в объеме стали, полученными методом рентгеноструктурного анализа [10]. Распределение фаз в структуре крайне неравномерное; размер областей с преобладанием бейнитной составляющей колеблется от 0.16 до 15 мкм. Карта ориентаций, полученная для бейнитной составляющей структуры, дает представление о пространственном распределении кристаллов  $\alpha$ -фазы, локальные области на ней окрашены в соответствии с их кристаллографической ориентацией (рис. 46). Совокупность ориентировок отдель-



**Рис. 3.** Распределение осей разориентаций пар  $\alpha$ -кристаллов после сдвигового  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с выполнением ОС Курдюмова–Закса (а), Нишиямы–Вассермана (б) и промежуточных (в) в обобщенном стереографическом треугольнике.

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ том 120 № 9 2019



**Рис. 4.** Сруктура стали Fe–Si–Mn–Cr–V, подвергнутой изотермической выдержке при 300°C в течение 30 ч: а – карта фаз (бейнит – светлые точки; остаточный аустенит – темные точки); б – карта ориентаций бейнита; в – экспериментально фиксируемые разориентации бейнитных кристаллов; г – распределение частоты разориентаций кристаллов бейнита по величине обратной плотности совпадающих узлов  $\Sigma_n$ .

ных кристаллов, сведенных в стереографический треугольник, отражает тенденцию к формированию текстуры при бейнитном  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении (рис. 4в). Взаимное расположение большинства экспериментально фиксируемых полюсов  $\alpha$ -фазы соответствует теоретически рассчитанному для ОС Курдюмова–Закса и Нишиямы–Вассермана (рис. 3а, 3б). Вместе с тем ориентация некоторых  $\alpha$ -кристаллов не удовлетворяет этим условиям. Их переориентация обусловлена, по-видимому, явлениями релаксации напряжений и отпуска бейнита в процессе изотермической выдержки при 300°С [8].

Среди множества разориентировок  $\alpha$ -фазы, представленных на рис. 4в, выделяются специальные разориентации кристаллов, образующих решетку совпадающих узлов. На рис. 4г приведено экспериментально наблюдаемое распределение разориентаций по величине обратной плотности совпадающих узлов  $\Sigma_n$  для значений до  $n \le 45$ . В

Таблица 2.	Развороты кубических кристаллов в специальных границах $\Sigma_n$ и удовлетворяющие критерию Брен
дона $\Delta$ вари	ианты разориентаций ОЦК кристаллов, возникающих после сдвигового ГЦК — ОЦК превращения
учетом раз.	личных ОС

$\Sigma_n$	Параметры разориентаций: угол, град, и ось поворота (U V W)		Отклонения параметров, град, и критерий Брендона			Частота возникновения, %	
	специальные границы в [11]	расчетные для превращения ГЦК → ОЦК, с учетом типа ОС и номера варианта согласно табл. 1	по углу	по оси	Δ, град	расчетная	эксперимен- тальная
3	60.00 [1 1 1]	Курдюмова—Закса, № 16, 60.00 (1 1 1)	0	0	8 66	8.70	27.2
		промежуточные, № 20 ~60.21 (5 5 6)	0.21	5.05	8.00		
11	50.48 [0 1 1]	Курдюмова—Закса, № 8 ~49.47 (0 1 1)	1.01	0	4.52	4.35	1.3
		промежуточные, № 16 ~54.74 (0 1 1)	4.26	0	4.32		
13 <i>a</i>	22.62 [0 0 1]	Нишиямы–Вассермана, №2 ~19.47 (0 0 1)	3.15	0	4.16	9.09	48.0
19 <i>b</i>	46.83 [1 1 1]	Курдюмова—Закса, № 9 ~49.47 (1 1 1)	2.64	0	2 4 4	4 25	0.9
		промежуточные, № 9 ~49.62 (7 8 8)	2.79	3.52	3.44	4.33	
29 <i>b</i>	46.40 [1 2 2]	Курдюмова-Закса, № 7 - ~47.11 (3 6 7)	0.71	4.40	2.78	8.70	4.6

современных моделях специальных границ, учитывающих динамические колебания кристаллической решетки, максимальное значение n, при котором граница считается специальной, ограничено  $n \leq 29$ . Согласно этим представлениям, набор специальных границ в исследуемой стали включает три наиболее часто фиксируемые компоненты  $\Sigma_{13}$ ,  $\Sigma_3$  и  $\Sigma_{29}$ , в незначительном количестве наблюдаются также границы типа  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_5$  и  $\Sigma_{19}$ .

В табл. 2 специальные границы с  $\Sigma_n$ , экспериментально наблюдаемые в бейните исследуемой стали, сопоставлены с разориентациями ОЦК-кристаллов, возникающими после сдвигового ГЦК  $\rightarrow$  ОЦК-превращения при соблюдении ОС различного типа. Предполагалось, что взаимосвязь между появлением специальных разориентаций  $\alpha$ -фазы и реализацией определенного варианта ОС имеет место, если отклонение их параметров удовлетворяет критерию Брендона для угла  $\theta$  (в нашем обозначении):  $\Delta \leq 15$  град/ $\Sigma_n^{1/2}$  [7]. Из данных табл. 2 следует, что каждая вторая из всех наблюдаемых специальных границ – граница типа  $\Sigma_{13}$ , возникает в результате выполнения

варианта № 2 ОС Нишиямы–Вассермана. Происхождение границы типа  $\Sigma_3$ , которая составляет практически треть от общего числа специальных границ, связано с ОС Курдюмова–Закса (вариант № 16). Появление специальных разориентаций  $\Sigma_{29}$ ,  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_{19}$  также обусловлено выполнением ОС Курдюмова–Закса (варианты 7–9), частота их фиксации заметно ниже.

Представляет интерес сравнить результаты настоящего исследования с данными работы [12]. При изучении взаимных разориентаций в реечном мартенсите низкоуглеродистой стали авторы [12] наблюдали специальные границы  $\Sigma_3$ ,  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_{33}$ ,  $\Sigma_{41}$  как следствие выполнения ОС Курдюмова– Закса. Как и в низкотемпературном бейните Fe–Si–Mn–Cr–V-стали, среди специальных границ, возникающих в результате выполнения ОС данного типа, наиболее часто фиксировалась компонента  $\Sigma_3$ . Устойчивое воспроизводство разориентации  $\Sigma_3$  между кристаллами  $\alpha$ -фазы в сталях различного химического состава обусловлено, вероятно, тем, что данная разориентация является двойниковой и воспроизводится точно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен кристаллографический анализ разориентаций  $\alpha$ -кристаллов после сдвигового  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения; с помощью матриц перехода определены возможные варианты углов и осей разворота  $\alpha$ -кристаллов, образующихся при соблюдении ОС Курдюмова–Закса, Нишиямы–Вассермана и промежуточных.

Описано формирование реечной структуры бейнита, возникающего в Fe–Si–Mn–Cr–V-стали сдвиговым путем в процессе изотермического превращения при 300°С. Установлено, что среди возможных вариантов ориентационной связи между  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазами, в исследуемый стали реализуется ограниченный набор углов и осей разворота, приводящий к появлению специальных разориентаций бейнитных кристаллов.

Методом ориентационной микроскопии (EBSD) определен спектр специальных разориентаций кристаллов бейнита в Fe–Si–Mn–Cr– V-стали, включающий компоненты  $\Sigma_3$ ,  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_{13}$ ,  $\Sigma_{19}$ ,  $\Sigma_{29}$ . Установлено, что наиболее часто фиксируемая разориентация  $\Sigma_{13}$  возникает как следствие выполнения ОС Нишиямы–Вассермана. Происхождение разориентаций  $\Sigma_3$ ,  $\Sigma_{11}$ ,  $\Sigma_{19}$ ,  $\Sigma_{29}$  обусловлено выполнением ОС Курдюмова–Закса.

Авторы выражают благодарность М.Л. Лобанову за ценные замечания при обсуждении работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме "Структура" Г.р. № АААА-А18-118020190116-6.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Bhadeshia H.K.D.H.* Bainite in steels. London: The Institute of Materials, 2001. 460 p.
- Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. Структура термически обработанной стали. М.: Металлургия, 1994. 228 с.

- Garcia-Mateo C., Sourmail T., Caballero F.G., Smanio V., Kuntz M., Ziegler C. Nanostructured steel industrialisation: plausible reality // Mater. Sci. Techn. 2014. V. 30. № 9. P. 1071–1078.
- 4. *Bhadeshia H.K.D.H.* Bainite in steels: theory and practice. Maney Publishing. Leeds. UK, 2015. 616.
- Thomas Sourmail, Ve'ronique Smanio. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 2639–2648.
- Терещенко Н.А., Яковлева И.Л., Мирзаев Д.А., Булдашев И.В. Образование бескарбидного бейнита в высокоуглеродистой кремнистой стали при изотермических условиях // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 24. С. 9–16.
- Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Структура и свойства границ зерен. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2012. 307 с.
- Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Мирзаев Д.А., Булдашев И.В. Структурный аспект изотермического бейнитного превращения в высокоуглеродистой марганец-кремнистой стали // ФММ. 2018. Т. 119. № 10. С. 1012–1017.
- 9. Кабанова И.Г., Сагарадзе В.В. Статистический анализ взаимных разориентаций кристаллов аустенита (мартенсита) после мартенситных  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma (\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha)$ -превращений // ФММ. 1999. Т. 88. № 2. С. 44–52.
- Терещенко Н.А., Яковлева И.Л., Мирзаев Д.А., Булдашев И.В. Особенности изотермического образования бескарбидного бейнита в высокоуглеродистой марганец-кремнистой стали // ФММ. 2018. Т. 119. № 6. С. 602–610.
- 11. *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. 214 с.
- Лобанов М.Л., Русаков Г.М., Редикульцев А.А., Беликов С.В., Карабаналов М.С., Струина Е.Р., Гервасьев А.М. Исследование специальных разориентаций в реечном мартенсите низкоуглеродистой стали методом ориентационной микроскопии // ФММ. 2016. Т. 117. № 3. С. 266–271.