

Л. О. Ведерникова*, **Е. А. Макарова**, **В. И. Пастухов**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**lory_26@mail.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *М. Л. Лобанов*

ПОЛОСЫ СДВИГА В СТАБИЛЬНЫХ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ОРИЕНТИРОВКАХ МЕТАЛЛОВ С ОЦК-РЕШЕТКОЙ

Методом ориентационной микроскопии (*EBSD*) были исследованы кристаллографические особенности формирования полос сдвига (ПС) в стабильных при холодной прокатке ориентировках ОЦК-решетки (на примере Fe–3%Si и Mo). В кристаллах $\{111\}\langle 112\rangle$ формируются ПС с ориентировкой близкой к $\{110\}\langle 001\rangle$, находящиеся с матрицей в специальной разориентации близкой к $\Sigma 9$. В кристаллах $\{112\}\dots\{111\}\langle 110\rangle$ формируются ПС с ориентировками близкими к $\{110\}\langle 001\rangle$, находящиеся с матрицей в специальной разориентации, близкой к $\Sigma 5$. В кристаллах $\{110\}\langle 110\rangle$ формируются ПС с ориентировками близкими к $\{100\}\langle 001\rangle$, находящиеся с матрицей в специальной разориентации, близкой к $\Sigma 5$. В кристаллах $\{001\}\langle 110\rangle$ ПС не образуются. Показано, что во всех ориентировках образуются ПС двух типов, отличающиеся углами наклона к плоскости прокатки и степенью рассеяния ориентировки внутри полос.

Ключевые слова: текстура, полосы сдвига, ориентационная микроскопия, специальные разориентации, рекристаллизация.

L. O. Vedernikova, E. A. Makarova, V. I. Pastukhov

SHEAR BANDS IN STABLE ORIENTATIONS OF BCC-METALS AT DEFORMATION

The method of orientation microscopy (*EBSD*) was investigated by the crystallographic characteristics of shear bands (SBs) formation in the stable by cold rolling orientations of the BCC lattice (Fe–3% Si and Mo). In crystals $\{111\}\langle 112\rangle$ are formed of SB with the orientation approximate to $\{110\}\langle 001\rangle$, which is a matrix in a special orientation near to $\Sigma 9$. In crystals $\{112\}\dots\{111\}\langle 110\rangle$ SB are generated with orientations approximate to $\{110\}\langle 001\rangle$, which is a matrix in a special orientation near to $\Sigma 5$. In crystals $\{110\}\langle 110\rangle$ are formed of SB with orientations approximate to $\{100\}\langle 001\rangle$, which is a matrix in a special orientation near to $\Sigma 5$. In crystals $\{001\}\langle 110\rangle$ SBs are not formed. It is shown that in all orientations of SB are formed of two

types with different angles of inclination to the plane of rolling and the degree of scattering orientation within the bands.

Keywords: texture, shear bands, *EBSD*, special misorientation, recrystallization.

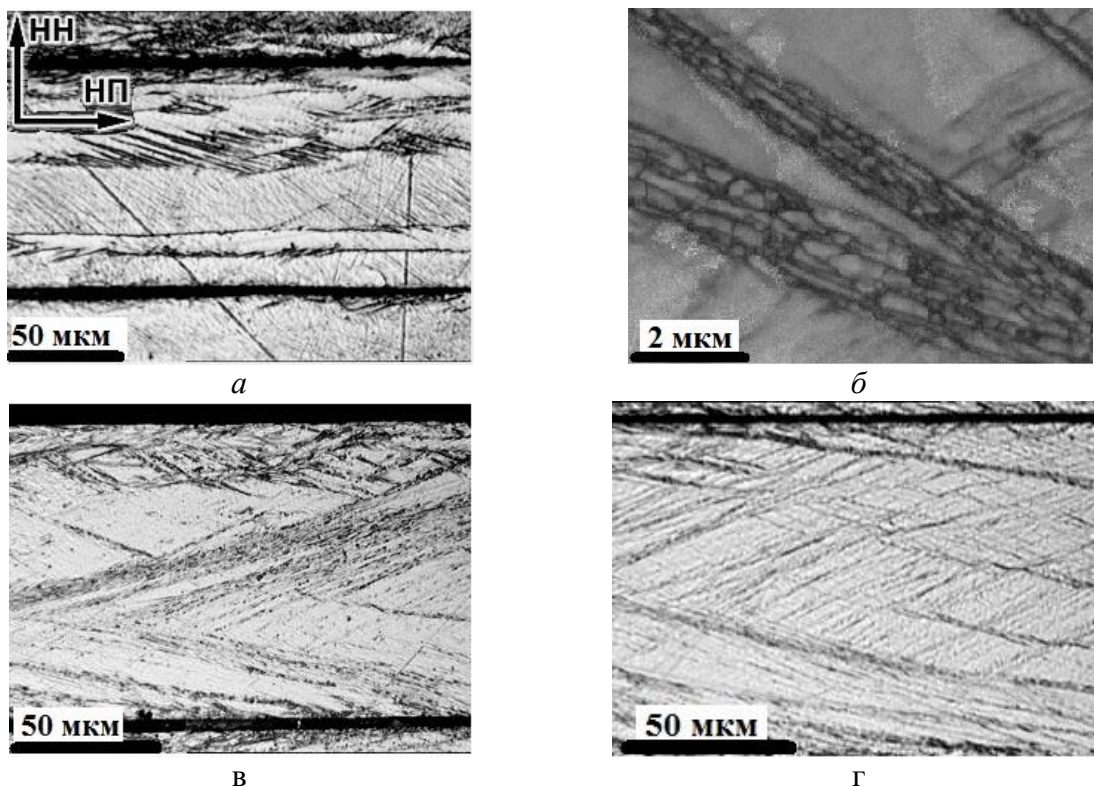
До настоящего времени полосы сдвига (ПС) остаются наименее понятным элементом мезоструктуры деформации металлических материалов. При этом имеется достаточно много экспериментальных данных [1–4] о морфологии ПС, их расположении в матрице и взаимосвязи ориентировок матрицы и кристаллитов внутри полос. Также имеются развитые теоретические представления относительно некоторых аспектов их формирования [5–7]. С практической точки зрения особый интерес вызывает образование ПС в материалах, в которых текстура рекристаллизации главным образом определяется ориентировками, возникающими в этих полосах [7; 8].

Целью данной работы являлось установление кристаллографических особенностей формирования ПС в кристаллах со стабильными ориентировками, формирующимися при холодной прокатке.

Исследования проводились на листах технического сплава Fe–3%Si и технического молибдена. Образцы подвергались прокатке с различными степенями деформации и градиентному отжигу. Моно- и поликристаллы исследовались с помощью растрового электронного микроскопа *TESCAN Mira 3 LMU* с приставкой *EBSD HKL Inca* и системой анализа *Oxford Instruments*.

Во всех деформированных кристаллах наблюдались ПС двух типов – ПС-I и ПС-II, которые отличались друг от друга углами наклона плоскости габитуса к плоскости прокатки.

В поликристаллах с ориентировкой $\{111\}\langle 112\rangle$ наблюдались ПС-II, угол наклона плоскости габитуса которых составлял $16\text{--}20^\circ$ и ПС-I, плоскость габитуса которых наклонена к плоскости прокатки под углами $35\text{--}40^\circ$. ПС-II образовывались при степенях деформации $30\text{--}50\%$ в развитой структуре, состоящей из деформационных полос, разделенных переходными полосами (на рисунке *a*). ПС-I формировались при больших степенях деформации в деформированной матрице, пересекая деформационные полосы от одной переходной полосы к другой. Ориентировка ПС, которые наблюдались в кристаллах с ориентировками близкими к $\{111\}\langle 112\rangle$, характеризовались ориентировкой $\sim (110)[001]$ (таблица). То есть данные ПС по отношению к окружающей матрице находились в специальной разориентации $\Sigma 9$ (ось поворота $\langle 110\rangle$, угол поворота $38,94^\circ$).



Типы полос сдвига в кристаллах с различными ориентировками;
 а – ПС-II (наклонные) в прокатанном кристалле $\{111\}\langle 112\rangle$, состоящем из деформационных полос; б – ПС-I в кристалле с ориентировкой $\{112\}\langle 110\rangle$; в, г – ПС-I типа «рыбья кость» в кристаллах с ориентировкой $\{110\}\langle 110\rangle$

В зернах с ориентировкой близкой к $\{112\}\langle 110\rangle$ также были обнаружены два типа полос сдвига, отличающиеся углом наклона к плоскости прокатки $\sim 23^\circ$ (ПС-II) и $\sim 40^\circ$ (ПС-I) (рисунок, б). Кристаллическая решетка внутри ПС имела ориентировку, близкую к $(110)[001]$, но отклоненную от идеальной госсовской на большие углы по сравнению с ориентировками ПС в $\{111\}\langle 112\rangle$ (таблица). По-видимому, ПС были связаны с матрицей специальной разориентацией, близкой к $\Sigma 5$ (ось поворота $\langle 100\rangle$, угол поворота $36,94^\circ$).

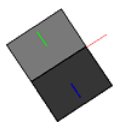





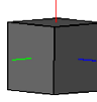
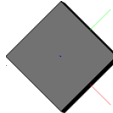

В кристаллах с ориентировкой $\{110\}\langle 110\rangle$ мезоструктура деформации была представлена в основном ПС, образующими характерный рисунок «рыбьей кости» (на рисунке в, г). При этом в разных зернах структура «рыбьей кости» несколько отличалась: в некоторых зернах, помимо сравнительно крупных («основных») ПС, наблюдались мелкие, «вторичные» ПС, иногда перерезающие друг друга. Диапазон углов наклона плоскостей габитуса ПС к плоскости прокатки составлял $\sim \pm 20\text{--}25^\circ$. Кроме подобных ПС, в некоторых кристаллах наблюдались более широкие полосы (15–25 мкм), расположенные к плоскости прокатки под углами $\sim 10\text{--}15^\circ$. По морфологии они больше напоминали деформационные полосы. *EBSD*-анализ показал, что кристаллическая решетка внутри данных ПС и элементы мезоструктуры, похожие на

полосы деформации, имеют ориентировку близкую к $\{100\}\langle 001\rangle$ (таблица). Также было выявлено, что кристаллическая решетка в ПС типа «рыбья кость» по отношению к матрице находится в практически точной специальной разориентации $\Sigma 5$.

В ходе исследований было отмечено, что ориентировка $\{001\}\langle 110\rangle$ не склонна к образованию ПС (и любых других элементов мезоструктуры) при любой степени деформации.

Все выявленные с помощью ориентационной микроскопии особенности ПС объединены и представлены в таблице.

Кристаллографические особенности формирования ПС

Ориентировка матрицы	Характеристики полос сдвига				Специальные разориентации
	Тип	Ориентировка внутри полосы	Угол наклона габитуса к плоскости прокатки	Рассеяние	
 $\{111\}\langle 112\rangle$	I	 $\{110\}\langle 100\rangle$	35–40°	±10°	$\Sigma 9$
	II	 $\{110\}\langle 100\rangle$	16–20°	±20°	~ $\Sigma 9$
 $\{112\}\langle 110\rangle$	I	 $\sim\{110\}\langle 100\rangle$	38–42°	±10°	~ $\Sigma 5$
	II	 $\sim\{110\}\langle 100\rangle$	22–25°	±20°	~ $\Sigma 5$
 $\{001\}\langle 110\rangle$	I	Не склонна к образованию полос сдвига			—
	II				
 $\{110\}\langle 110\rangle$	I	 $\{100\}\langle 001\rangle$	20–25°	±10°	$\Sigma 5$
	II		10–15°	±10°	

Если деформированные кристаллы подвергнуть отжигу, то в них начнется рекристаллизация. Проведенное исследование показало, что основное количество зародышей первичной рекристаллизации формируется в ПС. Причем новые кристаллиты имели с матрицей

специальные границы, соответствующие специальным разориентациям, возникающим при формировании ПС в процессе деформации.

Работа выполнена в рамках проектной темы МОиН РФ (задание № 11.1465.2014/К). Авторы выражают признательность за содействие Программе поддержки ведущих университетов РФ в целях повышения их конкурентоспособности № 211 Правительства РФ № 02.А03.21.0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. The deformation and shear bands in the Fe-3%Si alloy / В. К. Sokolov [и др.] // Textures and Microstructures. 1999. V. 32. Issue 1–4. P. 21–39.
2. Полосы сдвига в техническом сплаве Fe-3%Si-0.5Cu и кристаллографические аспекты их образования / М. Л. Лобанов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 7. С. 42–47.
3. Occurrence of shear bands in rotated Goss ($\{110\}\langle 110\rangle$) orientations of metals with bcc crystal structure / Т. Nguyen-Minh [и др.] // Scripta Materialia. 2012. V. 67. P. 935–938.
4. Русаков Г. М., Лобанов М. Л., Редикульцев А. А. Переориентация кристаллической решетки в полосах сдвига кристаллитов $\{112\}\langle 131\rangle$ сплава Fe–3%Si // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. №. 8. С. 141–143.
5. О возможности формирования областей с ориентацией $\{110\}\langle 001\rangle$ в процессе холодной деформации технического сплава Fe-3%Si / Г. М. Русаков [и др.] // Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 101. № 6. С. 653–659.
6. Model of $\{110\}\langle 001\rangle$ Texture Formation in Shear Bands during Cold Rolling of Fe-3 Pct Si Alloy / G. M. Rusakov [и др.] // Metallurgical and materials transactions. 2009. V. 40A. № 5. P. 1023–1025.
7. Ushioda K., Hutchinson W. B. Role of Shear Bands in Annealing Texture Formation in 3%Si-Fe Single Crystals // ISIJ Int. 1989. V. 29. P. 862–867.
8. Characterization of microstructure, texture and magnetic properties in twin-roll casting high silicon non-oriented electrical steel. / H.-Z. Li [et al.] // Materials characterization. 2014. V. 715–716. № 88. P. 158–163.