

УДК 669.01:539.374.6

**ФОРМИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГРАНИЦ В ОЦК-МЕТАЛЛАХ  
ПРИ БОЛЬШИХ СТЕПЕНЯХ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ\****Беляевских А.С., аспирант кафедры «Термообработка и физика металлов»**Русаков Г.М., к.ф.-м.н., доцент кафедры «Термообработка и физика металлов»**Лобанов М.Л., д.т.н., профессор кафедры «Термообработка и физика металлов» (m.l.lobanov@urfu.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19)

**Аннотация.** Текстура сильно деформированных металлических поликристаллов представляется набором стабильных ориентаций зерен, которые сохраняются при последующей деформации (компоненты текстуры). Возможный набор стабильных ориентировок определяется симметрией деформации. По этой причине стабильные ориентировки связаны определенными кристаллографическими соотношениями, т.е. они могут быть совмещены набором дискретных поворотов. Некоторые повороты из этого набора являются близкими к специальным разориентациям. Текстура ОЦК-металла после большой одноосной деформации (экструзия) исследована ориентационной микроскопией. Специальные границы  $\Sigma 3a$ ,  $\Sigma 19a$ ,  $\Sigma 27a$ ,  $\Sigma 9$ ,  $\Sigma 11$  наблюдались между некоторыми деформированными зернами. Ориентировки этих зерен соответствовали основным компонентам текстуры деформации. Вероятность возникновения специальной разориентации – специальной границы определенного типа в пределах локальной области была обратно пропорциональной углу поворота вокруг общей оси  $\langle 110 \rangle$  кристаллической решетки соседствующих зерен.

**Ключевые слова:** текстура, границы зерен, специальные границы, специальные разориентации, деформация, экструзия, ориентационная микроскопия.

Большинство конструкционных и функциональных металлических материалов используется в виде поликристаллов. Неотъемлемой частью их структуры являются высокоугловые границы зерен, которые принято разделять на специальные (или близкие к специальным) и общего типа. В работах [1, 2] предполагается, что процессы рекристаллизации реализуются преимущественно за счет движения специальных (или полуспециальных) границ.

Объяснение рекристаллизационных процессов с использованием эволюции (возникновение, транспортировка, расщепление) специальных границ представляется вполне оправданным, поскольку только для подобных границ возможно описание их движения на уровне скольжения и переползания дислокаций. Также движение специальных границ достаточно просто объясняет формирование и развитие локальных текстур в поликристаллических материалах в процессах структурных превращений [1, 2].

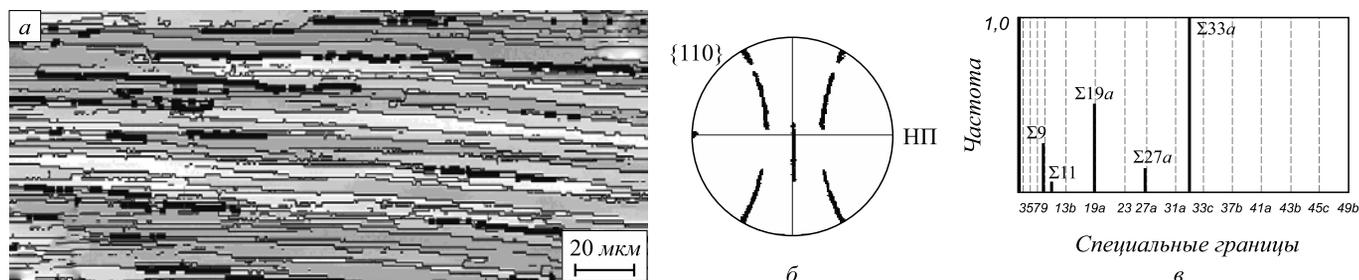
Формированию специальных границ должно предшествовать возникновение специальных разориентаций – взаимных расположений двух кристаллических решеток, совмещенных в общем узле, при некоторых дискретных поворотах которых возникает трехмерная решетка совпадающих узлов. Отношение объемов элементарных ячеек решетки совпадающих узлов и исходной решетки характеризуется параметром  $\Sigma n$  –

обратной пространственной плотностью совпадающих узлов, где  $n$  принимает значение 3, 5, 7, 9 и т. д., т. е. совпадает каждый третий, пятый и т. д. узел кристаллических решеток.

Кристаллогеометрический анализ показывает, что возникновение специальных разориентаций возможно между кристаллическими решетками зерен поликристаллов, которые приобрели стабильные ориентировки в результате больших направленных деформаций (волочение, экструзия, прокатка). Подобная ситуация реализуется с большей вероятностью, если стабильные ориентировки (основные компоненты текстуры поликристалла) имеют общую кристаллографическую ось, совпадающую с направлением деформации.

Методом ориентационной микроскопии (EBSD) было исследовано текстурное состояние трубки из ниобия, полученной методом экструзии со степенью деформации, превышающей 90 % (см. рисунок). Структура трубки состояла из вытянутых деформированных зерен, в целом характеризующихся наличием аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$  (см. рисунок, а, б). Однако в пределах локальных областей текстура может быть представлена набором рассеянных ориентировок  $\{001\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{112\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 110 \rangle$ , повернутых относительно друг друга вокруг оси  $\langle 110 \rangle$  на дискретные углы: 20,05, 26,53, 31,59, 38,94, 50,48, т. е., соответственно, находящихся в специальных разориентациях  $\Sigma 3a$ ,  $\Sigma 19a$ ,  $\Sigma 27a$ ,  $\Sigma 9$ ,  $\Sigma 11$  [3]. Это хорошо подтверждается полученным методом EBSD частот-

\* Работа выполнена в рамках проектной темы МОиН РФ (задание № 11.1465.2014/К).



Текстура ниобиевой трубки, изготовленной экструзией:

*a* – ориентационная карта с выделением (черным) всех специальных границ; *б* – ППФ {110}, полученная с области, приведенной на «*a*»; *в* – относительная частота фиксации специальных границ разных типов; НП – направление прессования

Texture of niobium tube produced by extrusion:

*a* – the orientation map of special boundaries (marked black); *б* – PPF {110}, obtained from the area shown on “*a*”; *в* – the relative frequency of fixation of special boundaries of different types; НП - direction of compression

ным распределением специальных границ (см. рисунок, *в*). Очевидно, что вероятность возникновения специальной границы – специальной разориентации определенного типа в пределах локальной области оказывается приблизительно обратно пропорциональной углу поворота вокруг оси <110> кристаллической решетки соседствующих зерен.

Естественно предположить, что подобные закономерности формирования специальных разориентаций и специальных границ реализуются и в других сплавах с ОЦК-решеткой, включая ферритные трубные стали.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русаков Г.М., Лобанов М.Л., Редикульцев А.А., Беляевских А.С. Специальные разориентации и текстурная наследственность в техническом сплаве Fe – 3 % Si // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 8. С. 827 – 838.
2. Демаков С.Л., Водолазский Ф.В., Водолазский В.Ф., Попов А.А. Текстурное торможение рекристаллизации в титановом сплаве ТС6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 10. С. 32 – 38.
3. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. – М.: Metallurgiya, 1987. – 214 с.

Поступила 23 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 3, pp. 210–211.

## THE SPECIAL GRAIN BOUNDARIES FORMATION IN BCC METALS DURING STRONG UNIAXIAL DEFORMATION

**Belyaevskikh A.S.**, Postgraduate of the Chair “Heat Treatment and Physics of Metals”

**Rusakov G.M.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Heat Treatment and Physics of Metals”

**Lobanov M.L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Heat Treatment and Physics of Metals” (m.l.lobanov@urfu.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Abstract.** The texture of strongly deformed metal polycrystals was represented by a set of stable grain orientations, which were preserved during the subsequent deformation (texture fibers). A possible set of stable orientations was determined by the deformation symmetry. For this reason, the stable orientations were bound by specific crystallographic relations, i.e. they might be superimposed by a set of discrete rotations. Some rotations in this set were close to special misorientation. Texture of bcc metal after strong uniaxial deformation (extrusion) was investigated by the orientation microscopy (EBSD). Special grain boundaries Σ33a, Σ19a, Σ27a, Σ9, Σ11 were observed between some deformed grains. The orientations of these grains formed the main of deformation texture fibers. The probability of appearance of special misorientation – of a certain type of special

boundaries within a local area was inversely proportional to the angle of rotation about the common axis <110> of the crystal lattice of adjacent grains.

**Keywords:** texture, grain boundaries, special grain boundaries, special misorientation deformation, extrusion, orientation microscopy.

### REFERENCES

1. Rusakov G.M., Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A., Belyaevskikh A.S. Special misorientations and textural heredity in the commercial alloy Fe – 3 % Si. *Physics of Metals and Metallography*. 2014. Vol. 115, no. 8, pp. 775–785.
2. Demakov S.L., Vodolazskii, F.V., Vodolazskii V.F., Popov A.A., Textural deceleration of recrystallization in titanium alloy TS6. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011. Vol. 52, no 9–10, pp. 487–492.
3. Kaibyshev O.A., Valiev R.Z. *Granitsy zeren i svoystva metallov* [Grain boundaries and properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 214 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed as part of the task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task no. 11.1465.2014 / K).

Received December 23, 2014