

PACS: 68.55.jm

И.В. Александров<sup>1</sup>, В.Д. Ситдигов<sup>1</sup>, Я.Т. Бонарски<sup>2</sup>

## ЭВОЛЮЦИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В МЕДИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет  
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия  
E-mail: iva@mail.rb.ru

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения ПАН,  
ул. Реймонта, 25, г. Краков, 30-059, Польша  
E-mail: nmbonars@imim-pan.krakow.pl

*Представлены результаты экспериментальных рентгеноструктурных исследований эволюции кристаллографической текстуры в объеме медных заготовок, подвергнутых интенсивной пластической деформации (ИПД), реализованной кручением под высоким давлением, равным 5 GPa, в открытых бойках при комнатной температуре. Установлены закономерности формирования преимущественных ориентировок, сделаны выводы о влиянии осадки и числа оборотов ИПД кручением на характер текстурообразования в исследованных зонах. Показано, что в ходе нагружения заготовок формируется текстура осадки, а затем при кручении активизируется главным образом сдвиговая мода деформации. Установлено, что состояние после 10 оборотов частично рекристаллизовано, что свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в заготовках, подвергнутых большому числу оборотов при ИПД кручением.*

### Введение

Последние годы характеризуются чрезвычайно высоким интересом ученых всего мира к методу ИПД, позволяющему формировать наноструктурные состояния в объемных заготовках из различных металлов и сплавов [1–3]. При этом под ИПД принято понимать очень большие пластические деформации ( $e > 10$ ), реализованные в условиях высоких приложенных давлений и при относительно низких температурах, в результате которых в объемных заготовках формируются ультрамелкозернистые и наноструктурные равноосные структуры зеренного типа, содержащие преимущественно большеугловые границы зерен с высокой плотностью дефектов [1–3].

Процесс ИПД сопровождается активным кристаллографическим скольжением, неконсервативным движением дислокаций и кристаллографиче-

ским двойникованием. Это приводит к переориентации зерен и формированию кристаллографической текстуры [4–6]. В то же время кручение под высоким давлением характеризуется весьма неоднородной деформацией вдоль радиуса заготовок в форме дисков. В связи с этим актуальным является изучение эволюции кристаллографической текстуры и ее однородности в ходе ИПД кручением под высоким давлением.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных рентгеноструктурных исследований процессов формирования кристаллографической текстуры при ИПД кручением под высоким давлением в различных зонах, располагающихся вдоль радиуса деформируемых медных заготовок.

## 2. Методика моделирования

Исходные заготовки отожженной меди (99.98%) диаметром 10 mm и толщиной 0.7 mm были подвергнуты ИПД кручением под давлением 5 GPa в открытых бойках при комнатной температуре. Различный уровень степени накопленной деформации достигался за счет варьирования числа оборотов при кручении ( $N = 1, 5$  и  $10$ ). Съемку полюсных фигур (ПФ) проводили методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра системы Philips X'Pert. Диаметр облучаемой зоны соответствовал 0.6 mm.

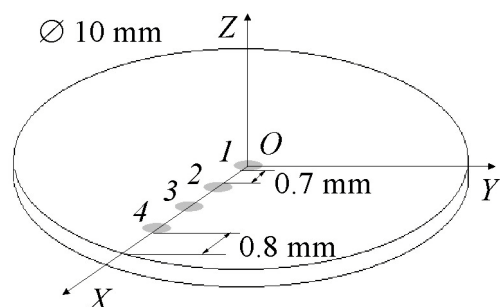


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая выбранные зоны исследования в заготовках

Результаты экспериментальных исследований были представлены в виде полных ПФ, рассчитанных с использованием пакета программ LaboTEX [7]. При этом изучались зоны, расположенные вдоль радиуса дисков. Съемку проводили в плоскости кручения (рис. 1). Деформацию осуществляли при комнатной температуре.

Для наиболее наглядного представления и удобства анализа ПФ, полученные в плоскости  $XOY$ , поворачивались вокруг оси  $OY$  (рис. 1) против часовой стрелки на угол  $90^\circ$ , чтобы направление сдвига располагалось в горизонтальном направлении в плоскости ПФ, а оси ПФ — в плоскости  $ZOY$ .

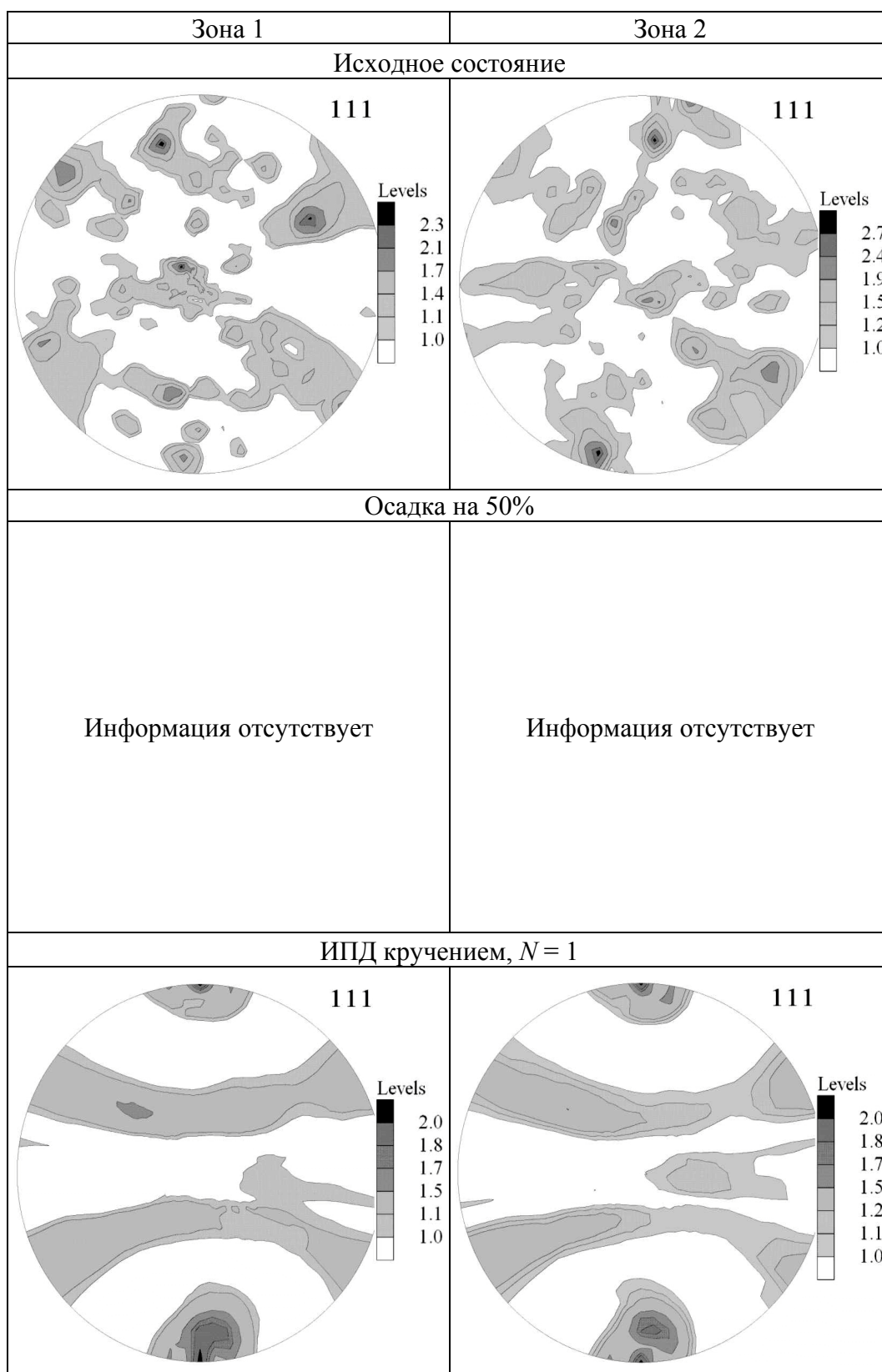
## 3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные ПФ, соответствующие кристаллографической текстуре чистой меди в различных исследованных состояниях, представлены на рис. 2.

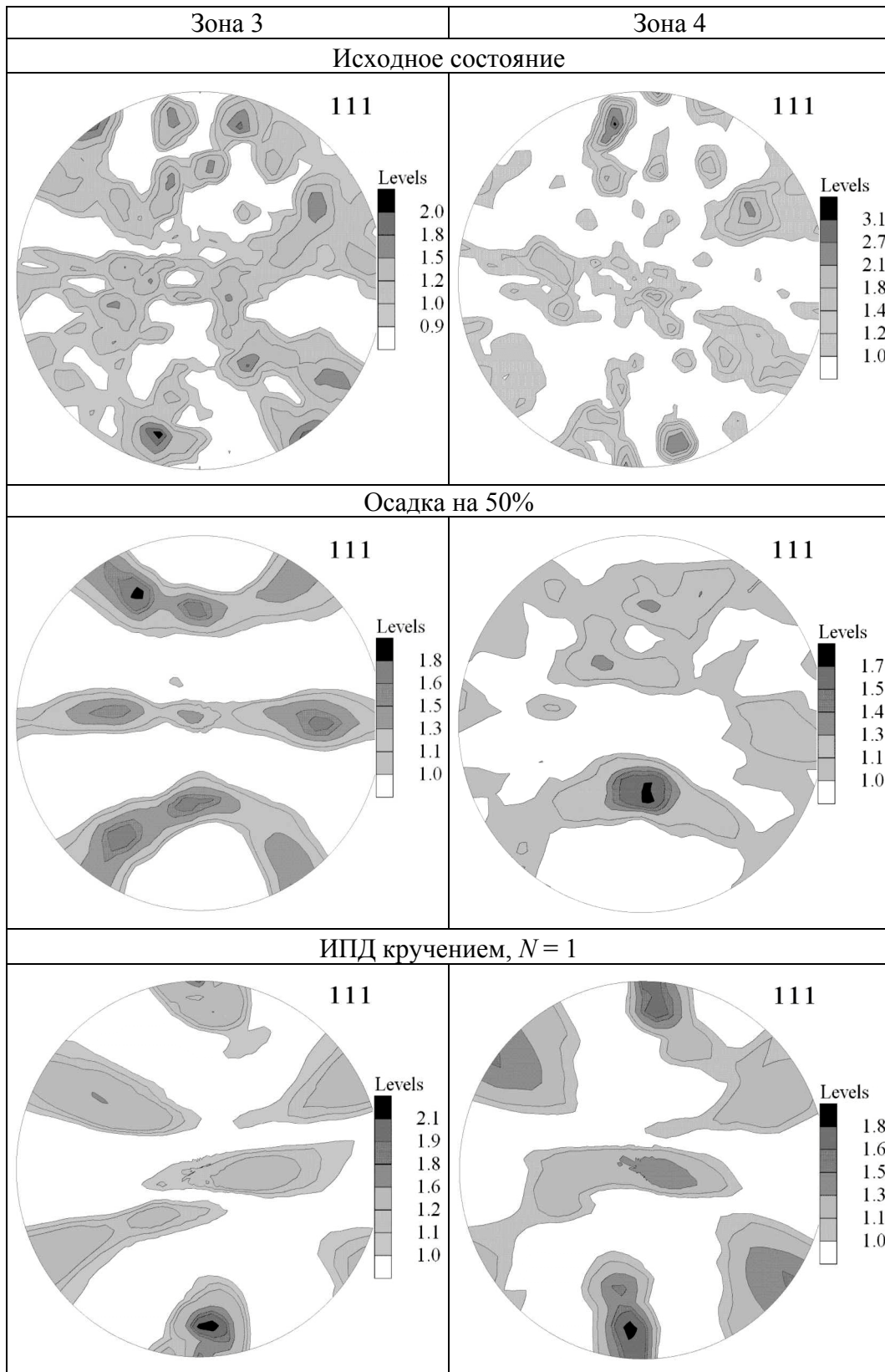
*Исходное состояние.* Вид ПФ, соответствующих различным зонам в исходной заготовке, свидетельствует о хаотичном расположении текстурных максимумов.

*Состояние после осадки.* При осадке заготовки, нагруженной в ходе ИПД кручением без поворота бойков, ее толщина уменьшилась на  $\sim 50\%$ . При этом в зоне 3 сформировалась текстура осадки (рис. 2), которая соответствует

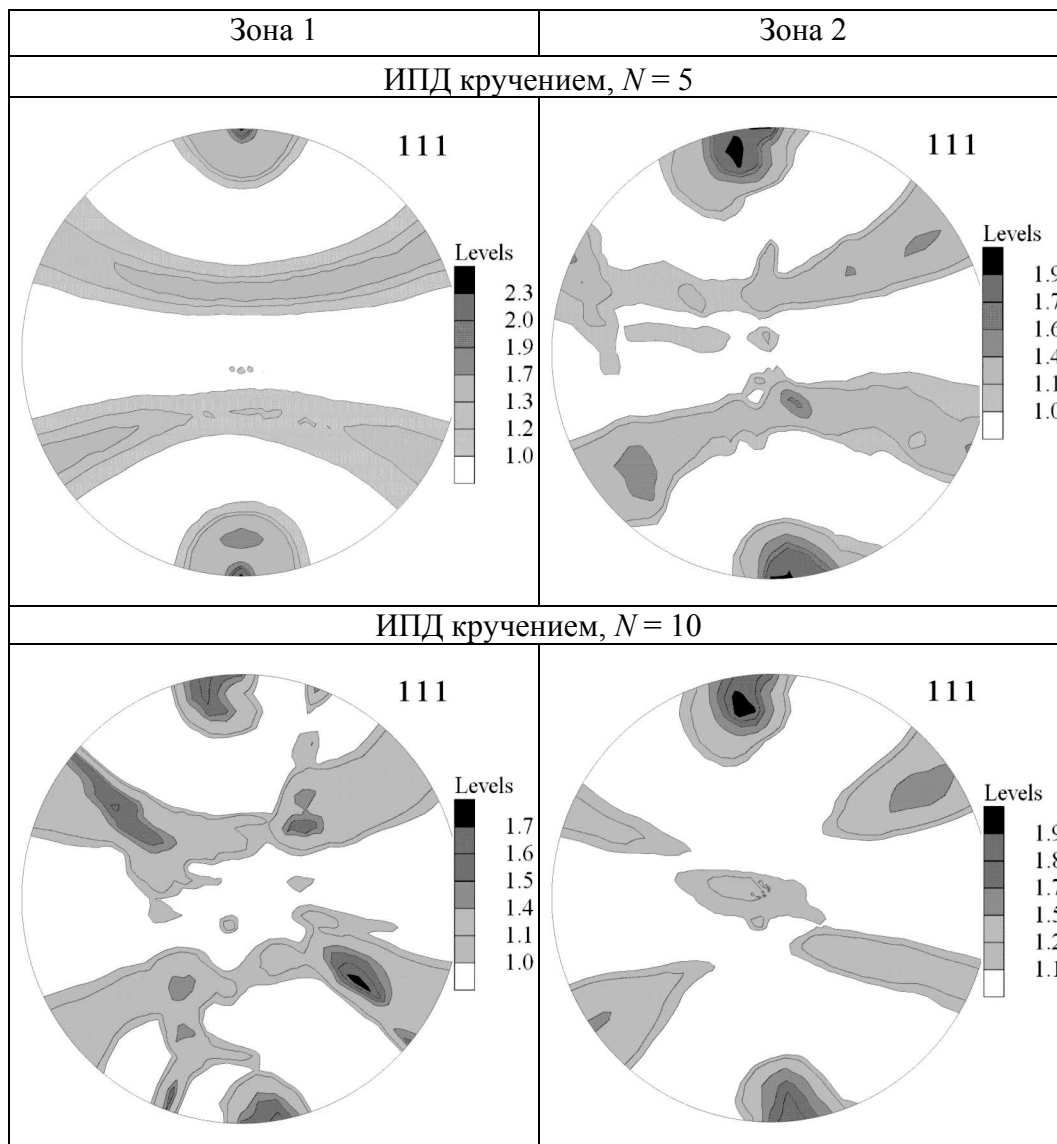
Рис. 2. Экспериментальные ПФ (111)



Продолжение рис. 2



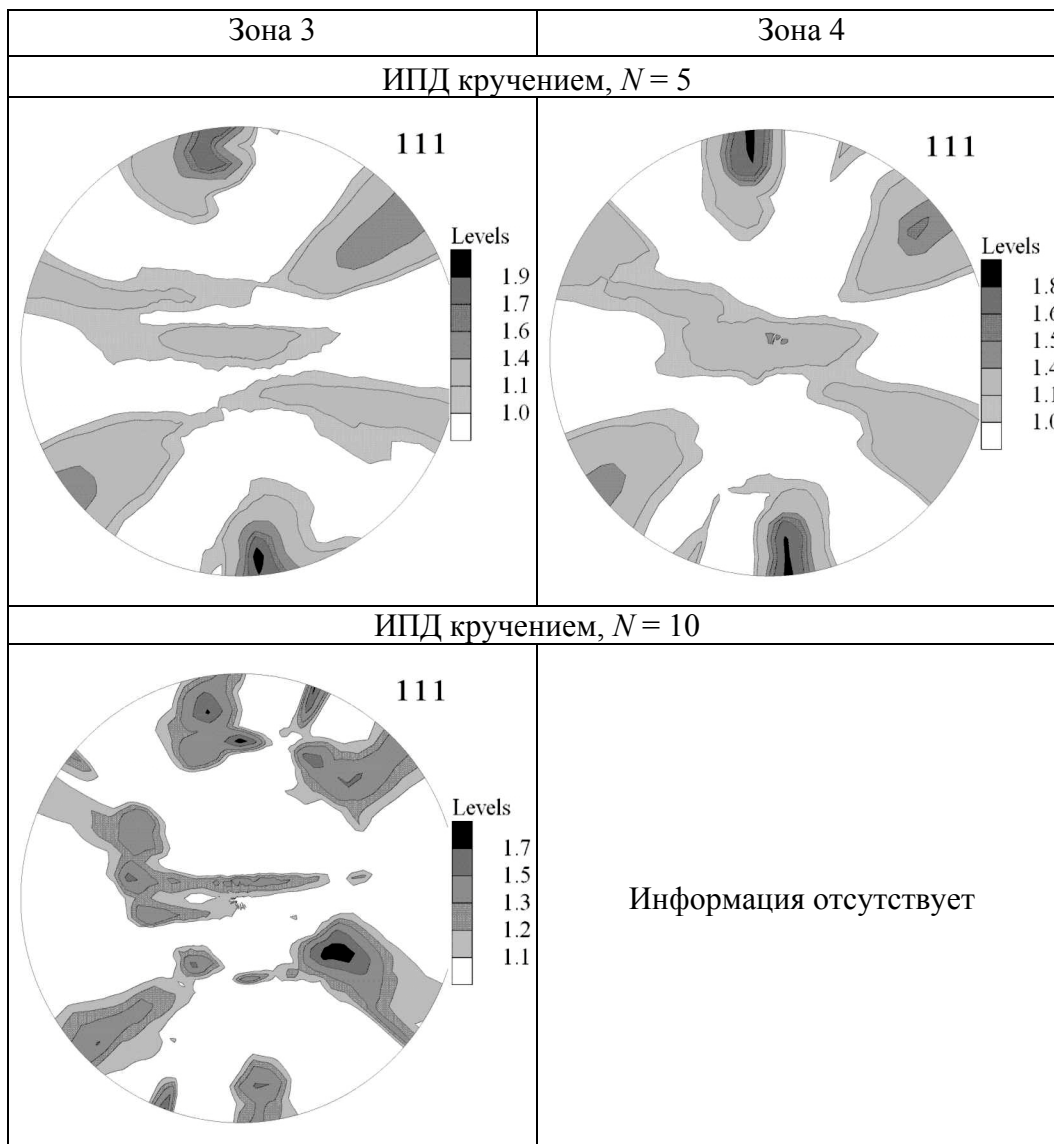
Продолжение рис. 2



текстуре осадки, представленной в работе [8]. В зоне 4 кристаллографическая текстура носит следы текстуры осадки. Однако в силу свободного течения материала на периферии открытых бойков положения и интенсивности текстурных максимумов несколько изменяются.

*Состояние после ИПД кручением с разным числом оборотов.* При ИПД кручением под высоким давлением во всех выбранных зонах исследованных заготовок с  $N = 1, 5$  и  $10$  произошло формирование текстуры простого сдвига (рис. 2) [9]. При этом на ранних стадиях ИПД кручением наблюдалось формирование компонент  $A_1^*$ ,  $A_2^*$ ,  $A$ ,  $B$  и  $C$ , характерных для текстуры простого сдвига (рис. 3,а) [4].

Окончание рис. 2



В то же время для зоны 1 после  $N = 1$  характерно некоторое размытие компонент текстуры сдвига. Это связано с тем, что центральная область заготовки претерпевает деформацию в меньшей мере, чем периферийная область. Данная зона также характеризуется образованием зоны ухудшенной проработки структуры и наименьшим значением величины микротвердости по отношению к зонам, удаленным от центральной области [11]. При увеличении числа оборотов в зонах 2 и 3 формируются более ярко выраженные компоненты текстуры простого сдвига.

После ИПД кручением, реализованным с 10 оборотами, наблюдается наложение текстуры рекристаллизации на текстуру простого сдвига (рис. 2 и 3). Процесс рекристаллизации связан с поглощением старых зерен новыми равноосными зернами с большеугловыми границами. Он активизируется при

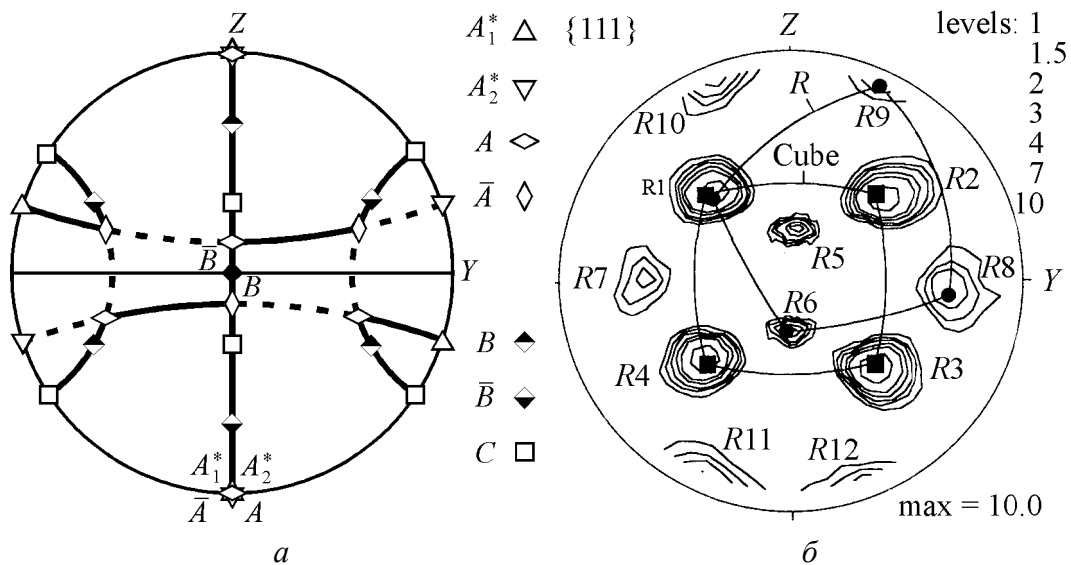


Рис. 3. Положения идеальных ориентировок, соответствующих состоянию после простого сдвига (а) и рекристаллизованному состоянию (б) в чистой меди

достижении определенной степени деформации. В рассматриваемом случае об этом свидетельствует текстура, характерная для состояния с  $N = 10$ . При этом, помимо компонент текстуры простого сдвига, на ПФ (111) наблюдается формирование доминирующих компонент  $R1(\bar{1}11)[113]$ ,  $R2(120)[\bar{2}11]$ ,  $R3(023)[3\bar{3}2]$  и  $R4(\bar{1}22)[\bar{2}21]$ , характерных для текстуры рекристаллизации (рис. 3,б) [10].

### Выводы

Экспериментальные исследования процессов текстурообразования в меди, подвергнутой ИПД кручением, показали, что в ходе нагружения заготовок сначала формируется текстура осадки, а затем по мере увеличения числа оборотов активизируется сдвиговая мода деформации. После больших степеней деформации ( $N = 10$ ) состояние частично рекристаллизовано, что свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в ходе ИПД.

1. P.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
2. M.J. Zehetbauer, R.Z. Valiev, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Wiley-VCH, Weinheim (2004).
3. Z. Horita, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Trans. Tech. Publications, Fukuoka (2005).
4. S. Li, I.J. Beyerlein, M.A.M. Bourke, Mater. Sci. Eng. **A394**, 66 (2005).
5. L.S. Tóth, Adv. Eng. Mater. **5**, 308 (2003).
6. I.J. Beyerlein, C.N. Tomé, Mater. Sci. Eng. **A380**, 171 (2004).
7. K. Pawlik, P. Ozga, LaboTex: The Texture Analysis Software (1999).

8. C.A. Bronkhorst, S.R. Kalindindi, L. Anand, Textures and Microstructures **14–18**, 1031 (1991).
9. M.G. Stout, J.A. O'rourke, Metall. Trans. **20A**, 125 (1989).
10. U.F. Kocks, C.N. Tomé, H.-R. Wenk, Texture and Anisotropy, Cambridge University Press, Cambridge (1998).
11. C. Xu, Z. Horita, T.G. Langdon, Acta Mater. **55**, 203 (2007).

*I.V. Александров, В.Д. Ситдіков, Я.Т. Бонарськи*

### ЕВОЛЮЦІЯ КРИСТАЛОГРАФІЧНОЇ ТЕКСТУРИ В МІДІ ПІСЛЯ ІНТЕНСИВНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ КРУЧЕННЯМ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ

Представлено результати експериментальних рентгеноструктурних досліджень еволюції кристалографічної текстури в об'ємі мідних заготовок після інтенсивної пластичної деформації (ПД), реалізованої крученням під високим тиском величиною 5 GPa, у відкритих бойках при кімнатній температурі. Встановлено закономірності формування переважних орієнтувань, зроблено висновки про вплив осадки і кількості обертів при ПД крученням на характер текстуроутворення в досліджених зонах. Показано, що під час навантаження заготовок формується текстура осадки, а потім при крученні активізується головним чином зсувна мода деформації. Встановлено, що стан після 10 обертів частково рекристалізований, що свідчить про здійснення динамічної рекристалізації в заготовках, які зазнали велику кількість обертів при ПД крученням.

*I.V. Alexandrov, V.D. Sitdikov, Ya.T. Bonarsky*

### THE EVOLUTION OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE IN COPPER SUBJECTED TO SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY TORSION UNDER HIGH PRESSURE

The represented are results of experimental X-ray research of crystallographic texture evolution in the bulk of copper ingots subjected to severe plastic deformation (SPD) by torsion under high pressure of 5 GPa in the open anvils at room temperature. The objective laws of the preferred orientation development have been determined and conclusions about the influence of compression and number of SPD turns by torsion on the character of texture development in the areas under study have been made. It was shown that the texture of the compression is formed first in the process of the ingot loading, and then in the process of SPD torsion the shear mode of deformation is mainly activated. It has been found out that after 10 turns the state is partially recrystallized, which proves the presence of the dynamic recrystallization in the ingots subjected to a large number of turns during the SPD by torsion.

**Fig. 1.** Scheme illustrating the selected research areas of ingots

**Fig. 2.** Experimental PFs (111)

**Fig. 3.** Locations of the ideal texture components at simple shear (*a*) and recrystallized state (*b*) in pure copper