

## ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ЗЕРЕННОЙ И ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ

### НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СПЛАВА V-Cr-ZrO<sub>2</sub>

В.Л. Радишевский<sup>1</sup>, И.В. Смирнов<sup>1,2</sup>, К.В. Гриняев<sup>1,2</sup>

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. И.А. Дитенберг

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: [rvl@myttk.ru](mailto:rvl@myttk.ru)

## FEATURES RELAXATION GRAIN AND DEFECT STRUCTURE OF NANOSTRUCTURED ALLOY

### V-Cr-ZrO<sub>2</sub> ALLOY

V.L. Radishevskiy<sup>1</sup>, I.V. Smirnov<sup>1,2</sup>, K.V. Grinyayev<sup>1,2</sup>

Scientific Supervisor: docent, Dr. I.A. Ditenberg

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenina pr., 36, 634050

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskoy pr., 2/4, 634055

E-mail: [rvl@myttk.ru](mailto:rvl@myttk.ru)

**Abstract.** *The study of parameters of the defect structure near the recrystallization temperature of the dispersion-strengthened alloy V-Cr-ZrO<sub>2</sub> after deformation by torsion under pressure is presented.*

**Введение.** Формируемые в металлических материалах методами больших пластических деформаций (БПД) субмикроструктурные и наноструктурные состояния характеризуются высокой плотностью дефектов кристаллического строения, оказывающих влияние на комплекс физико-механических свойств [1]. Изучение стабильности указанных структурных состояний в условиях деформационного и/или термического воздействия по-прежнему остается актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование особенностей зеренной и дефектной структуры наноструктурированного дисперсно-упрочненного ванадиевого сплава после отжигов вблизи температуры рекристаллизации.

**Материалы и методы исследования.** Исследование проведено на дисперсно-упрочненном сплаве V-8,75%Cr-1,17%Zr-0,14%W-0,01%C-0,02%O-0,01%N (вес. %) после БПД кручением на наковальнях Бриджмена (N = 1, P = 7 ГПа). После деформации выполнены часовые отжиги в вакуумной печи типа СШВЛ при температурах 700 и 800 °С. Структурные исследования осуществлены с использованием просвечивающей электронной микроскопии на приборе Philips CM30 (300 кВ). Тонкие фольги подготовлены по методике [2] в сечениях, нормальных плоскости наковален (ПН). Аттестация дефектной структуры проведена с использованием методики темнопольного анализа дискретных и непрерывных разориентировок [3].

**Результаты.** Структурная аттестация изучаемого сплава после деформации кручением под давлением подробно проведена в работе [2]. На рисунке 1 а представлено светлопольное изображение микроструктуры. Показано, что субмикроструктурное состояние характеризуется сильной анизотропией зеренной структуры: размеры зерен в направлениях параллельных ПН находятся в

интервале 70–700 нм, в то время как в направлении оси кручения (ОК) их размеры достигают 50–200 нм.

Проведенный в настоящей работе отжиг при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  не оказал какого-либо влияния на зеренную и дефектную структуру изучаемого материала, при этом сохраняется аналогичное представленному на рисунке 1 а анизотропное субмикроструктурное состояние. В тоже время после повышения температуры отжига до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1 б) на фоне анизотропной микроструктуры появляются почти равноосные зерна размерами от 50 до 500 нм.

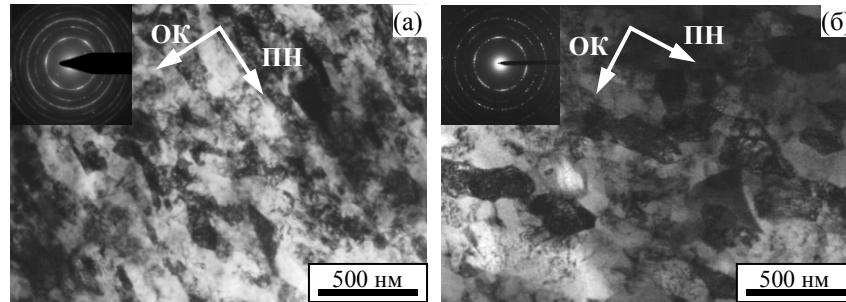


Рис. 1. Микроструктура сплава  $V-Cr-ZrO_2$  после большой пластической деформации кручением на наковальнях Бриджмена (а) [2] и отжига при  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б).

На рисунке 2 представлены гистограммы распределения зерен по размерам изучаемого сплава после деформации (рис. 2 а, б) и последующего отжига при  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 2 в, г). Как видно (рис. 2), после отжига при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  размеры зерен и характер их распределения в направлениях параллельных и перпендикулярных ПН сопоставимы.

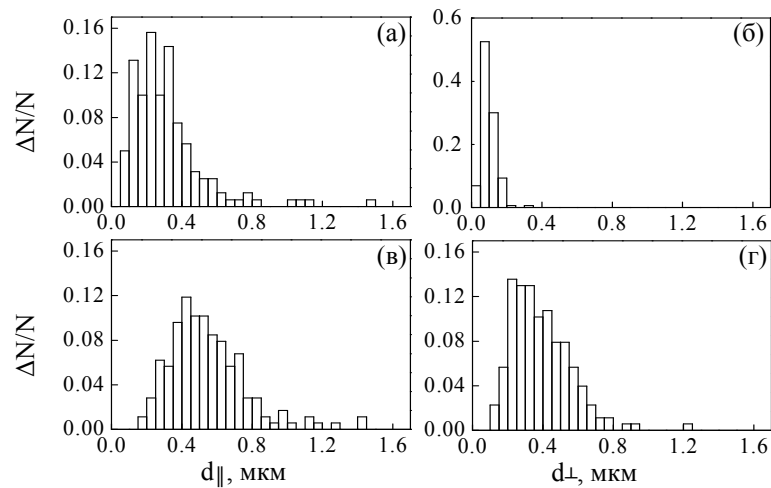


Рис. 2. Гистограммы распределения зерен по размерам сплава  $V-Cr-ZrO_2$  после деформации (а, б) и отжига при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в, г). Размеры  $d_{\parallel}$  вдоль ПН (а, в), размеры  $d_{\perp}$  вдоль ОК (б, г).

Дефектная структура субмикроструктурного состояния после деформации характеризуется кривизной кристаллической решетки ( $\chi_{ij}$ ) от 10 до 40 град/мкм [2], соответствующие оценки величин локальных внутренних напряжений составляют  $\sigma_{лок} \approx E/75 - E/45$ .

На рисунке 3 а представлен пример темнопольного анализа особенностей тонкой дефектной структуры после отжига при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что при наклоне гониометра на угол  $\Delta\varphi \approx 1,5^{\circ}$ , контур экстинкции перемещается на расстояние  $\Delta r \approx 180\text{ нм}$ . В соответствие с [3], компонента кривизны

кристаллической решетки  $\chi_{21}$  может быть определена по формуле  $\chi_{21} \approx \Delta\varphi \cdot \sin(\beta) / (\Delta r)$  (рис. 3 б). С учетом угла между вектором действующего отражения  $g$  типа  $\langle 110 \rangle$  и направлением проекции оси наклона гониометра (ПОН)  $\beta = 87,5^\circ$ , компонента кривизны кристаллической решетки  $\chi_{21}$  достигает  $\approx 8$  град/мкм. В случае если кривизна обусловлена только изгибом фольги, ширина контура  $L_{теор} \approx \gamma_0 / \chi_{21} \approx 60$  нм, где  $\gamma_0 \approx 0,5^\circ$  – угловой размер дифракционного максимума в бездефектном кристалле. Однако экспериментальное значение  $L_{экс} \approx 100$  нм. Таким образом, почти 1.5–кратное уширение контура экстинкции свидетельствует о наличии структурной кривизны кристаллической решетки, а не связано с изгибом или короблением тонкой фольги.

Согласно [3], по формуле  $\sigma_{лок} \approx \chi_{ij} \cdot E \cdot \Delta h / 2$  ( $E$  – модуль Юнга,  $\Delta h$  – характерные размеры зоны высокой кривизны кристалла) из экспериментальных данных о  $\chi_{ij}$  и  $\Delta h$  можно оценить величину локальных внутренних напряжений. Учитывая, что  $\chi_{ij} \approx 8$  град/мкм, а  $\Delta h \approx 0,18$  мкм, максимальные значения  $\sigma_{лок}$  не превышают  $E/80$ . Таким образом, представленный результат свидетельствует о начале интенсивных процессов релаксации дефектной структуры при  $T = 800$  °С.

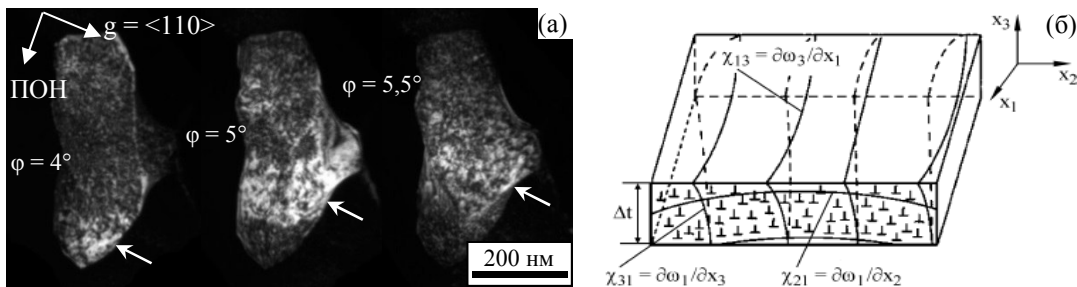


Рис. 3. Пример анализа непрерывных разориентировок изучаемого сплава после отжига при  $T=800^\circ\text{C}$  (а); схема структурного состояния с кривизной кристаллической решетки (б) [3].

**Выводы.** Установлено, что в наноструктурированном дисперсно-упрочненном сплаве V–Cr–ZrO<sub>2</sub> при температуре 800 °С активизируются процессы релаксации, которые сопровождаются ростом зерен, существенным снижении значений кривизны кристаллической решетки и величин локальных внутренних напряжений.

*Исследования проведены с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования НИ ТГУ.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З, Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические системы – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398с.
2. Smirnov I.V., Ditenberg I.A., Grinyaev K.V., Radishevsky V.L. Features of formation of nanocrystalline state in internal-oxidized V-Cr-Zr-W and V-Mo-Zr system alloys during deformation by torsion under pressure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 116. – № 1. – I. 012037. – P. 1–5.
3. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., Коротаев А.Д., Денисов К.И. Эволюция кривизны кристаллической решетки в металлических материалах на мезо и наноструктурном уровнях пластической деформации // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – №. 3.