

**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ  
СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ИХ ДЛИТЕЛЬНОМ  
НАГРУЖЕНИИ**

**Бетехтин В.И.<sup>1</sup>, Нарыкова М.В.<sup>1</sup>, Кадомцев А.Г.<sup>1</sup>, Sklenicka V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Institute of Physics of Materials, Brno, Czech Republic  
Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru

Исследование особенностей структуры и механических свойств субмикрористаллических металлических материалов, полученных различными методами интенсивной пластической деформации (ИПД), является актуальным направлением в современном материаловедении. Известно, что полученные методами ИПД металлы и сплавы находятся в нестабильном, неравновесном состоянии. Поэтому для их практического применения важно изучить эволюцию структуры при испытаниях в условиях длительного нагружения.

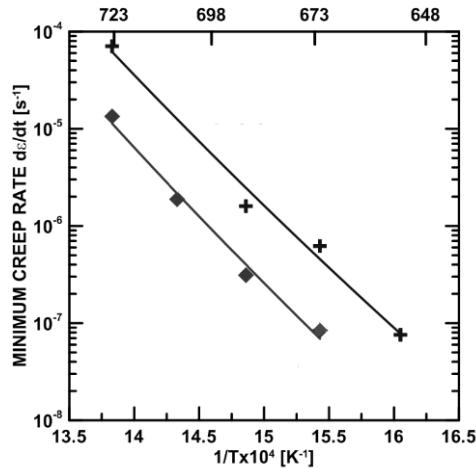


Рисунок 1 - Зависимость минимальной скорости ползучести  $d\varepsilon/dt$  от температуры  $T$  для Ti (state 1) и Ti<sub>сгю</sub>.

В настоящей работе анализируются данные, в основном, по долговечности при растяжении в режиме ползучести некоторых субмикро-кристаллических металлов и сплавов (Ti, Al, Cu и сплавы на их основе) с учетом эволюции их структуры.

Испытания на долговечность в режиме ползучести проводились в широком интервале температур и напряжений. Определялась долговечность, минимальная скорость ползучести и активационные параметры ползучести (рис. 1). При исследовании структуры основное внимание было уделено измерению размера зерна и параметров нано- и микропористости. Для определения их характеристик был использован комплекс методик – микроскопические и дилатометрические исследования, а также малоугловое рентгеновское рассеяние (МРР). С

помощью методов МРР и дилатометрии в [1] впервые было обнаружено образование при ИПД нанопор размером ~20-30 нм.

На рис. 2а приведены кривые ползучести для титана в исходном крупнозернистом состоянии и после различного числа проходов равноканального углового прессования (РКУП), а на рис. 2б – после криопробатки (T<sub>сгю</sub>) и поперечно-винтовой прокатки (state 1 и state 2). Как видно из рисунков, формирование субмикрористаллической структуры ведет к существенному уменьшению долговечности относительно исходного крупнозернистого состояния. Так, после двух проходов РКУП долговечность титана уменьшается от 170 до 75 часов. Сравнение кривых ползучести, приведенных на рис. 2б, показало, что наименьшей долговечностью обладают образцы, полученные методом криопробатки.

Основные результаты сводятся к следующему:

1. В процессе ползучести происходит разуплотнение материалов ( $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ ) и появляются поры с характерным размером ~1  $\mu\text{m}$  (рис.3).
2. В процессе ползучести происходит увеличение среднего размера зерна.

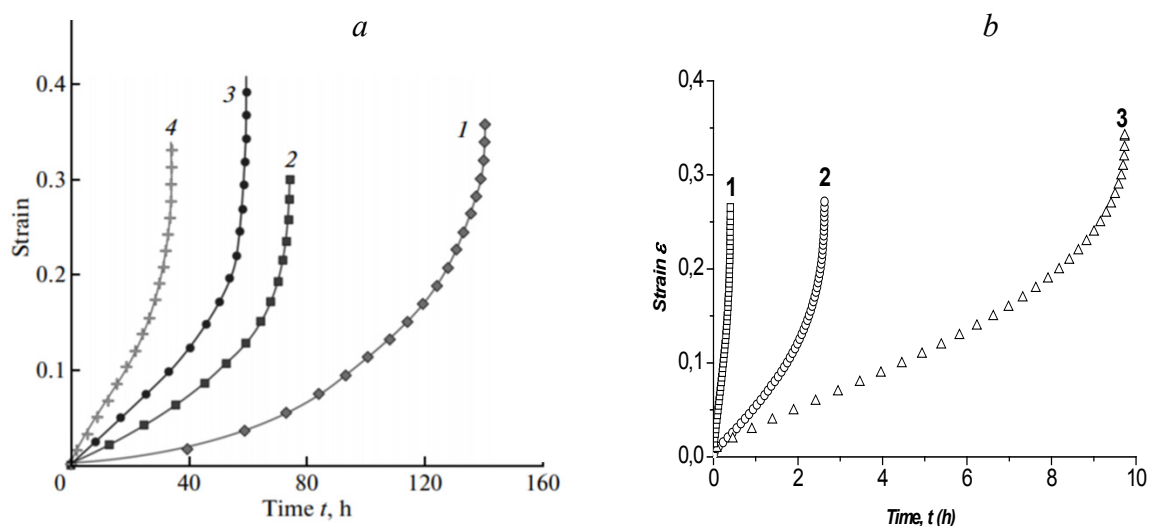


Рисунок 2 - Кривые ползучести для титана:  
 а – в исходном крупнозернистом состоянии (кривая 1) и после 2 (кривая 2), 4 (кривая 3) и 8 (кривая 4) проходов РКУП.  $T=673\text{ K}$ ,  $\sigma=150\text{ MPa}$ .  
 б – 1 – криопрокатка  $T_{\text{cryo}}$ , 2 – state 1, 3 - state 2.  $T=673\text{ K}$ ,  $\sigma=270\text{ MPa}$

В частности, для титана ВТ1-0, субмикроструктурная структура которого была получена методов поперечно-винтовой и продольной прокаток [2], средний размер зерна составил  $\sim 200\text{ nm}$ . После испытаний на долговечность при  $T=673\text{ K}$  и  $\sigma=200\text{ MPa}$  размер зерна увеличился до  $\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$  (рис. 4).

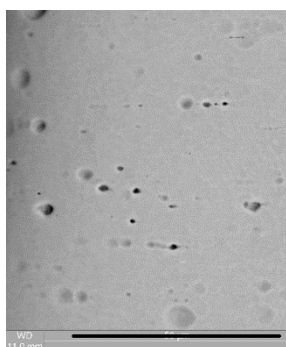


Рисунок 3- Микропоры, образовавшиеся в образце СМК ВТ1-0 после испытания на ползучесть.

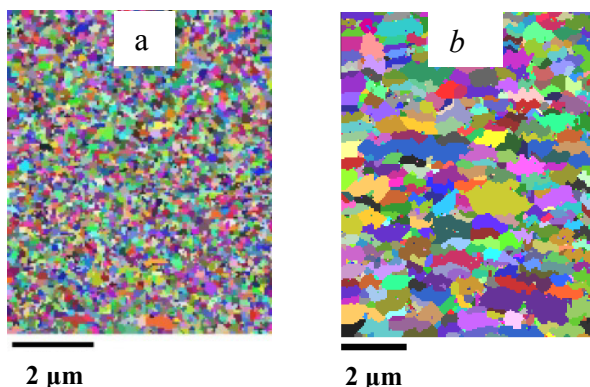


Рисунок 4 - Данные EBSD для ВТ1-0 (state 1) в СМК-состоянии (а) и после испытания на ползучесть (б) при  $T=673\text{ K}$  и  $\sigma=200\text{ MPa}$ .

Анализ полученных данных показал, что наблюдаемая микропористость (рис. 3) возникла как следствие развития нанопор, которые возникают в материале в результате интенсивной пластической деформации. Действительно, как было показано в [2,3], после РКУП и комбинированных прокаток, в материале образуются нанопоры. Так конкретно для титана после поперечно-винтовой и продольной прокаток средний размер зерна ( $D$ ), нанопор ( $d_n$ ) и концентрация ( $N$ ) составляют соответственно  $\sim 200\text{ nm}$ ,  $20\text{-}30\text{ nm}$  и  $10^{11}\text{ cm}^{-3}$ . После испытаний на долговечность при растяжении в режиме ползучести при  $T=673$  и напряжении  $\sigma=200\text{ MPa}$  средний размер зерна, микропор и концентрация составляют соответственно  $\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1\text{ }\mu\text{m}$  и  $10^{10}\text{ cm}^{-3}$ . Оценки показали, что площадь границ зерен  $S$  после ползучести уменьшилась в 10 раз, а концентрация микропор стала примерно в 10 раз меньше, чем концентрация исходных нанопор. В связи с этим можно предположить, что нанопоры превратились в микропоры только в том случае, если они находились на границах.

Существенно, что во всех случаях макроразрушение образцов происходит при достижении величины разуплотнения порядка  $10^{-2}$ . Дилатометрические и

микроскопические измерения показали, что  $V=N \cdot d^3$ , где  $V$  – объем пор, определенный денситометрическим методом, а их концентрация  $N$  и размер  $d$  – микроскопическим.

В пользу такой трактовки говорят данные о влиянии высокого гидростатического давления (~ 1.5 GPa) на образцы после интенсивной пластической деформации и последующей ползучести. На рис. 5 для примера приведены кривые ползучести для образцов Al (99.99%) и Cu-0.2% Zr, полученных после двух проходов РКУП и испытанных при  $T=673$  К и  $\sigma=150$  МПа. Видно, что приложение давления приводит к увеличению долговечности и понижению скорости ползучести. Данные МРР и дилатометрии показали, что действительно давление, как было показано и ранее [4], уменьшает величину нанопористости, что соответственно приводит к замедлению процесса роста микропор.

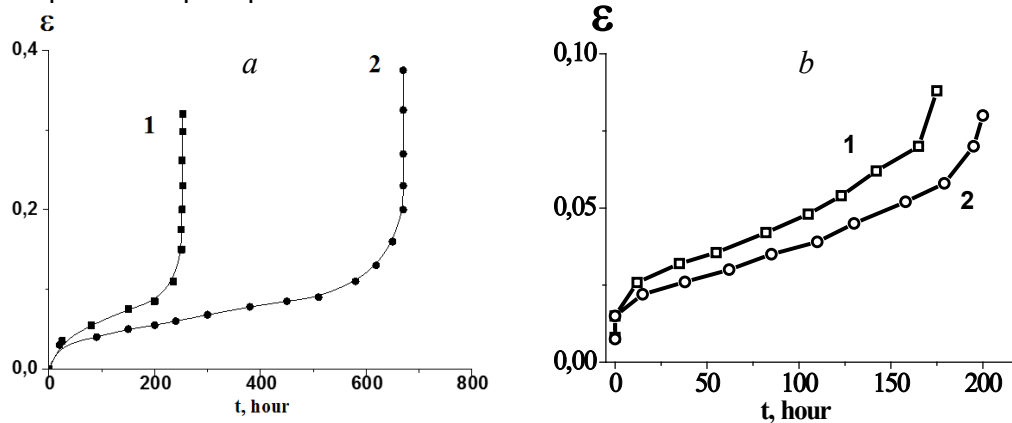


Рисунок 5 - Кривые ползучести Al (99.99%) – а и Cu-0.2% Zr – b после 2 проходов РКУП (кривая 1) и после обработки образцов высоким гидростатическим давлением (кривая 2).

Таким образом показано, что при ползучести микрокристаллических металлов, полученных ИПД, происходит развитие исходных нанопор, причем это относится только к тем нанопорам, которые находятся на границах зерен. Точнее, по-видимому, все нанопоры в исходном состоянии находятся на границах, но в процессе ползучести происходит частичная рекристаллизация материала и большая часть нанопор окажется внутри зерна.

Получены предварительные данные по особенностям кинетики разрушения при длительном нагружении в условиях усталости [2], включая гигацикловую усталость [5]. Проанализирована роль нанопористости при длительном нагружении в режиме усталости и ползучести.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00360.*

#### Список литературы.

1. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sclenicka V. И др. // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 10. С. 1787-1790.
2. Бетехтин В.И., Колобов Ю.Р., Sklenicka V. И др. // ЖТФ. 2015. Т.85. Вып. 1. С. 66-75
3. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В и др. // ПЖТФ. 2017. Т.43. Вып. 1. С. 38-44.
4. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sclenicka V. И др. //ПЖТФ. 2011. Т.37. Вып. 20. С. 75-76.
5. Плехов О.А., Нарыкова М.В., Кадомцев А.Г. и др. // В сб. XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 32-35.