

05

Длительная и статическая прочность микрокристаллического титана ВТ1-0, полученного при равноканальном угловом прессовании

© В.И. Бетехтин¹, J. Dvorak², А.Г. Кадомцев¹, Б.К. Кардашев¹,
М.В. Нарыкова¹, Г.К. Рааб³, V. Sklenicka², С.Н. Фаизова³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

² Institute of Physics of Materials, AS CR, Brno, Czech Republic

³ Уфимский государственный авиационно-технический университет, Уфа,
Россия

E-mail: Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2014 г.

Впервые изучено влияние деформации при равноканальном угловом прессовании (РКУП) на долговечность титана, испытанного при растяжении в режиме ползучести. Установлено, что перевод за счет РКУП титана в микрокристаллическое состояние ведет к уменьшению долговечности, хотя характеристики статической прочности при этом повысились.

Одним из наиболее распространенных методов получения высокопрочных микрокристаллических металлических материалов является равноканальное угловое прессование (РКУП). Увеличение степени деформации (числа проходов) при РКУП ведет обычно к повышению статических характеристик прочности [1]. Однако микрокристаллические металлы и сплавы, полученные при РКУП или других методах больших пластических деформаций, являются по своей природе неравновесными. Поэтому для практического применения таких материалов важное значение приобретает оценка их механической устойчивости при длительном нагружении.

В данной работе и было изучено влияние РКУП на долговечность титана — металла, который в настоящее время имеет широкую сферу практического применения.

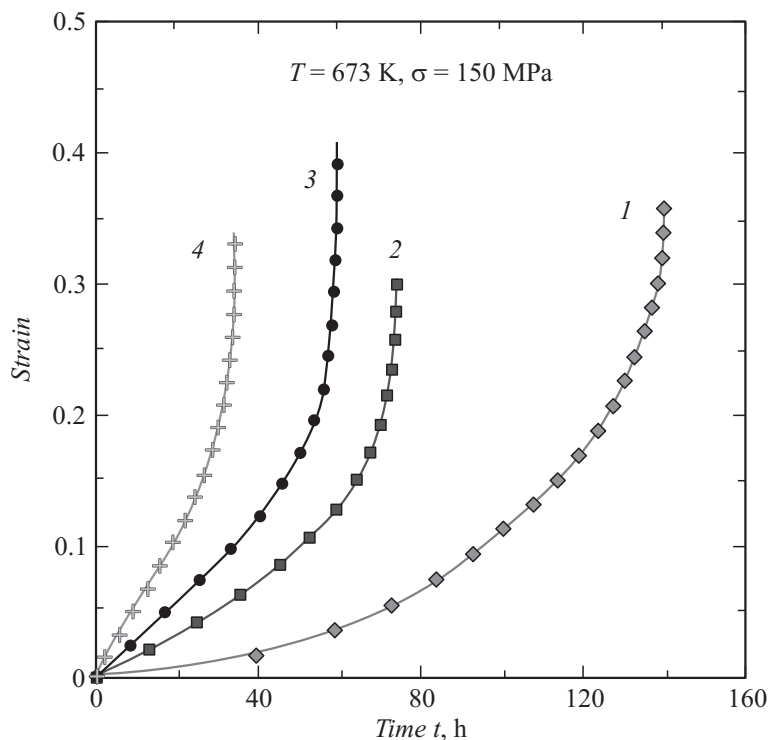


Рис. 1. Кривые ползучести титана в исходном состоянии (1), после 2 (2), 4 (3) и 8 (4) проходов при РКУП.

Исследовался технически чистый титан ВТ1-0 с содержанием примесей $\leq 03\%$. РКУП проводилось по маршруту B_C (с циклическим поворотом заготовки вокруг оси канала на 90° после каждого цикла) и углом пересечения каналов, и $\phi = 120^\circ$ при 673 K .

Для оценки долговечности (времени от момента нагружения до разрыва) образцы титана испытывались при растяжении в условиях ползучести при 673 K . Длина однородно деформированной части образцов была $\approx 15 \text{ mm}$, а площадь их поперечного сечения $3 \times 2 \text{ mm}^2$. На этих же образцах для сравнения проводились измерения статических характеристик прочности: микротвердости (H_v), модуля Юнга (E),

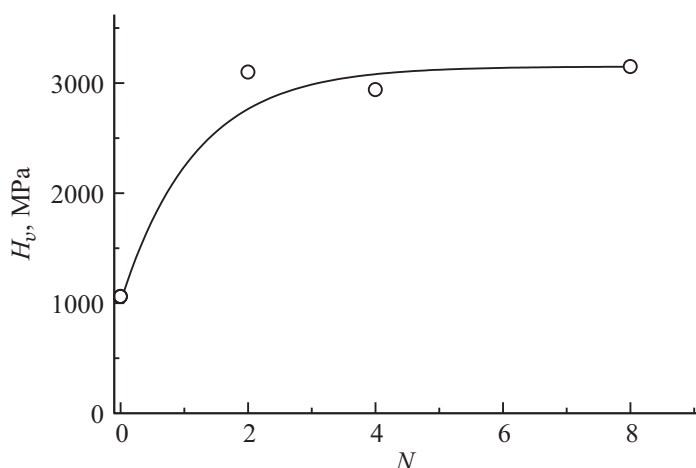


Рис. 2. Зависимость микротвердости титана H_v от числа проходов N при РКУП.

условного предела микротекучести (σ_A). Величины E и σ_A определялись акустическим методом составного вибратора [2], H_v — микротвердость по Виккерсу.

Для изучения влияния РКУП на дефектную структуру Ti проводились электронно-микроскопические исследования с использованием обратного электронного рассеяния, что позволило получить предварительные данные о размере зерен и их распределениях по разориентациям.

Рассмотрим экспериментальные данные. На рис. 1 показаны полученные при разном числе проходов кривые ползучести образцов титана до и после РКУП. Видно, что после РКУП долговечность титана заметно уменьшается. Так, после 2 проходов долговечность меняется с 170 до 75 часов, а после 8 проходов — до 30 h. При этом величины предразрывной деформации практически не зависят от числа проходов.

В отличие от долговечности статические характеристики прочности (H_v , σ_A , E) после РКУП растут. Особенно резко (в 3 раза) увеличилась после 2 проходов микротвердость (рис. 2). На рис. 3 приведены амплитудные зависимости модуля Юнга для образцов титана в исходном состоянии и после 2 проходов при РКУП. Зависимость $E(\varepsilon)$ измерялась последовательно при увеличении и уменьшении амплитуды колебательной деформации ε . Видно, что в обоих случаях наблюдается

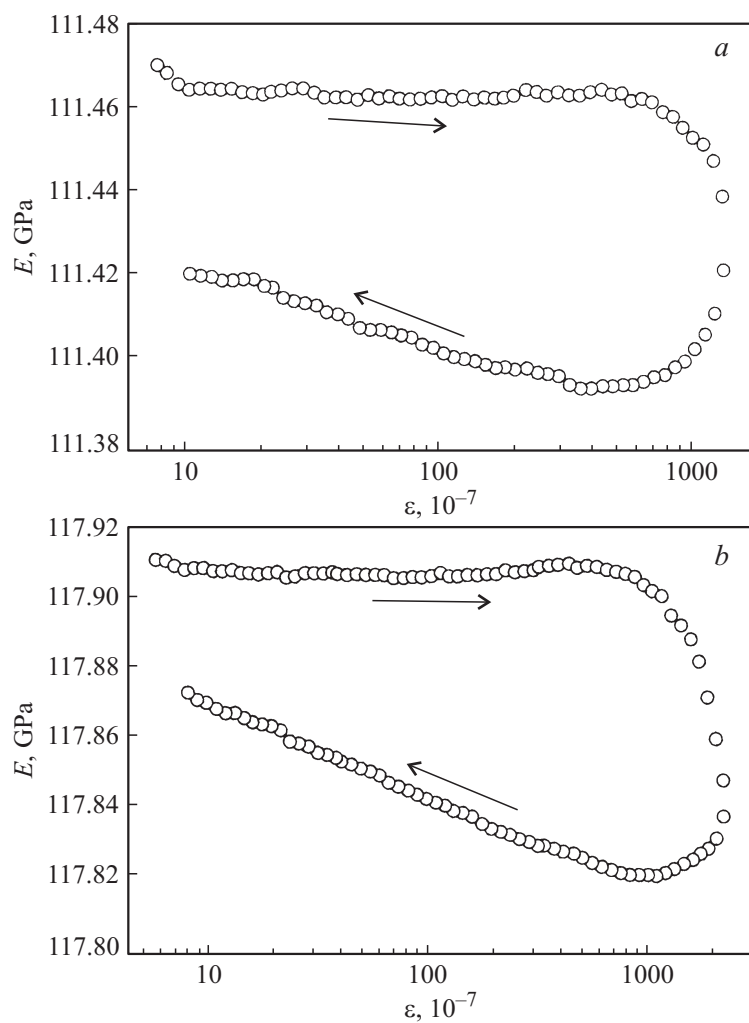


Рис. 3. Амплитудные зависимости модуля Юнга E для титана в исходном состоянии (*a*) и после 2 проходов РКУП (*b*). Измерения выполнены при комнатной температуре. Стрелки указывают направление изменения ε .

амплитудный гистерезис: кривые, измеренные при увеличении и уменьшении амплитуды, не совпадают друг с другом. При этом численное значение E изменилось с 111.4 (в исходном состоянии) до 117.9 GPa (после 2 проходов). После 2 проходов наблюдалось также увеличение условного предела микротекучности σ_A с 12.2 до 16 МПа (величина σ_A определялась на основе анализа амплитудно-зависимого изменения модуля [2]).

Электронно-микроскопические исследования показали, что РКУП ведет к уменьшению размера зерен и увеличению доли большеугловых ($> 15^\circ$) границ. Так, размер зерен после 8 проходов уменьшается с 12.1 до $0.75 \mu\text{m}$, а доля большеугловых границ растет до 57%.

С учетом этих и полученных ранее [2–4] результатов структурных исследований можно дать следующее объяснение полученным в работе данным о влиянии РКУП на длительные и статические характеристики прочности.

Как показано в [2–4], негативное влияние на долговечность микроструктурных металлов и сплавов, которые испытываются в режиме ползучести или усталости, оказывают образующиеся в процессе больших пластических деформации (в том числе и при РКУП) большеугловые границы зерен — источники высоких внутренних напряжений и нанопоры. При этом доля большеугловых границ и уровень нанопористости особенно резко увеличиваются при переходе от 1 к 4 проходам. Именно эти структурные дефекты и становятся, очевидно, зародышевыми „очагами“ развития разрушения при длительном нагружении в условиях ползучести или усталости. Раздельно вклад влияния на долговечность уровня нанопористости и доли большеугловых границ, которые сформировались в процессе РКУП, рассмотрен и проанализирован в [4,5].

Нанопоры и большеугловые границы по-разному сказываются на статических характеристиках прочности. Нанопористость, вероятно, практически не влияет на статические характеристики прочности, а увеличение доли большеугловых границ (как и уменьшение размера зерен) при РКУП ведет даже к повышению статической прочности.

В [2,6] было показано, что рост модуля E , который наблюдался для Al и его сплава после 2 проходов РКУП, может быть объяснен только повышением уровня дальнодействующих внутренних напряжений, связанных с увеличением доли большеугловых границ. С этим же, очевидно, связан и рост модуля после 2 проходов при РКУП для титана, обнаруженный в данной работе.

Таким образом, перевод титана в микрокристаллическое состояние с высокими характеристиками статической прочности привел к снижению механической устойчивости (долговечности) при длительных испытаниях. Это обстоятельство следует, очевидно, учитывать при оценке работоспособности микрокристаллического титана, а также, вероятно, и других микрокристаллических металлов и сплавов [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-00054).

Список литературы

- [1] *Валиев Р.З., Александров Г.В.* Наноструктурные металлы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
- [2] *Бетехтин В.И., Sklenicka V., Saxl I., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В.* // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 8. С. 1517–1523.
- [3] *Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sklenicka V., Saxl I.* // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 10. С. 1787–1790.
- [4] *Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sklenicka V., Нарыкова М.В.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 20. С. 75–79.
- [5] *Dvorak J., Sklenicka V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Kral P., Svoboda M.* // Mater. Sci. Eng. A. 2013. V. 584. P.103–113.
- [6] *Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Кардашев Б.К.* // ФТТ. 2006. Т. 48. В. 8. С. 1421–1426.