

05

Влияние гидростатического давления на дефектную структуру и долговечность ультракристаллического Al

© В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, V. Sclenicka, М.В. Нарыкова

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

Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of the Czech Republic, CZ 61662 Brno, Czech Republic

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

В окончательной редакции 9 июня 2011 г.

Приведены результаты исследования влияния гидростатического давления на структуру и долговечность ультракристаллического алюминия, полученного методом равноканального углового прессования. Показано, что наблюдаемый в эксперименте прирост долговечности связан с залечиванием нанопор, а его уменьшение при увеличении числа проходов — с увеличением доли большеугловых границ.

Одним из наиболее распространенных методов создания ультракристаллической структуры металлов и сплавов является в настоящее время равноканальное угловое прессование (РКУП). Полученные этим методом металлические материалы обладают повышенными механическими свойствами (пределом текучести, микротвердостью), причем данные характеристики механических свойств обычно повышаются при росте числа проходов РКУП [1,2]. Однако при длительных испытаниях, например при деформации в режиме ползучести, поведение ультракристаллических материалов становится иным. Это заключается в том, что с увеличением числа проходов РКУП наблюдается уменьшение долговечности образцов, испытанных в режиме ползучести [3]. В [4] обнаруженный эффект связывается в основном с тем, что в процессе РКУП увеличивается нанопористость¹. Задача данной работы и заключалась в выяснении природы сложного характера зависимости долговечности от числа проходов.

¹ Образование нанопор и микротрещин в процессе деформации металлов при РКУП отмечалось также в работах [5,6].

В качестве объектов исследования были выбраны образцы Al (99.99%), подвергнутые, как и в [4], от 1 до 12 проходов РКУП. Половина полученных образцов испытывалась в режиме ползучести в нейтральной среде. Вторая половина образцов подвергалась действию гидростатического давления до 1.4 GPa, а затем испытывалась при тех же условиях ползучести. Все испытанные образцы подвергались микроскопическим, рентгеновским и дилатометрическим исследованиям для определения параметров структуры.

Смысл обработки давлением заключается в следующем. Известно [7], что воздействие гидростатического давления величиной 1–10 GPa не приводит к изменению дислокационной и блочной структуры, во всяком случае в Al и, по всей видимости, в других ГЦК-металлах. С другой стороны, приложение давления приводит к существенному уменьшению пористости [4]. Таким образом, появляется возможность разделения факторов, влияющих на механические свойства материалов.

На рис. 1 приведены характерные кривые ползучести Al образцов после РКУП (1) и после РКУП и приложения гидростатического давления 1.4 GPa (2) для двух (а) и четырех (b) проходов. Видно, что дополнительная обработка высоким давлением существенно влияет на ползучесть, а именно приводит к увеличению долговечности образцов и снижению скорости ползучести. Следует отметить, что при увеличении числа проходов эффект упрочнения за счет обработки давлением резко уменьшается.

Таким образом, необходимо объяснить эти два эффекта — общий прирост долговечности и его уменьшение при увеличении числа проходов РКУП.

Что касается первого эффекта — общего прироста долговечности, то есть все основания считать, что он связан с увеличением плотности и соответственно уменьшением нанопористости образцов после приложения давления. Действительно, было установлено, что пористость образцов после РКУП составляла 0.1–0.3%, что связано с наличием нанопор с размерами ~ 30 nm, а приложение давления 1–1.4 GPa приводит к уменьшению их размеров и соответственно уменьшению полной пористости в 2–3 раза.

Известно, что пористость влияет практически на все механические свойства материалов, особенно на параметры ползучести и длительной прочности [8]. В связи с этим кажется вполне обоснованным предположение, что прирост долговечности обработанных высоким давлением образцов связан именно с уменьшением в них пористости.

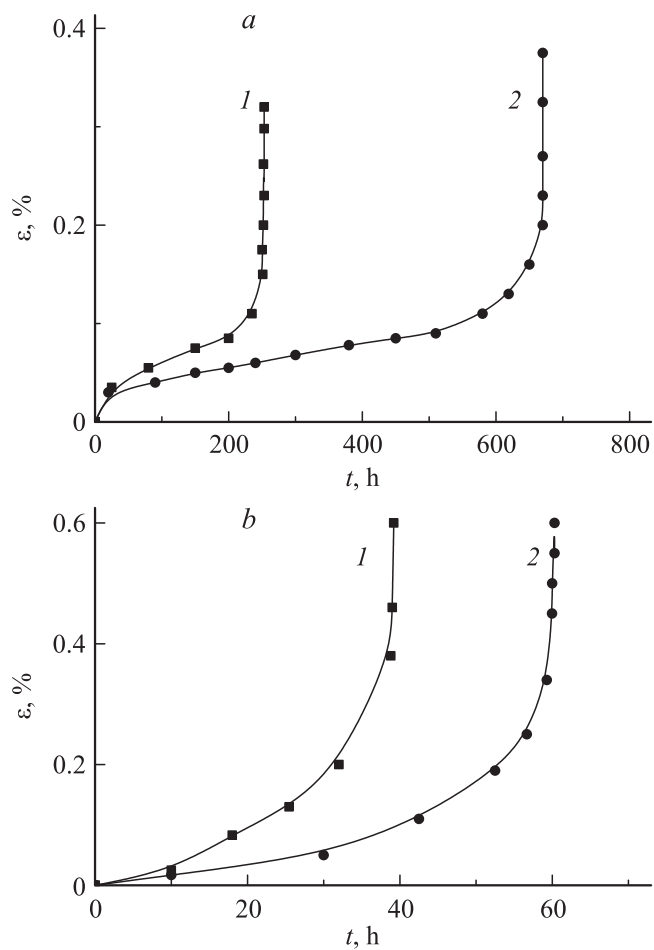


Рис. 1. Кривые ползучести образцов Al (Al 99.99%; $\sigma = 15$ МПа, 473 К) после РКУП (1) и после РКУП и приложения гидростатического давления 1.4 ГПа (2) для двух (а) и четырех (б) проходов.

Что касается второго эффекта — уменьшения прироста долговечности при увеличении числа проходов РКУП, то он, очевидно, связан с накоплением при этом иных структурных дефектов. Для

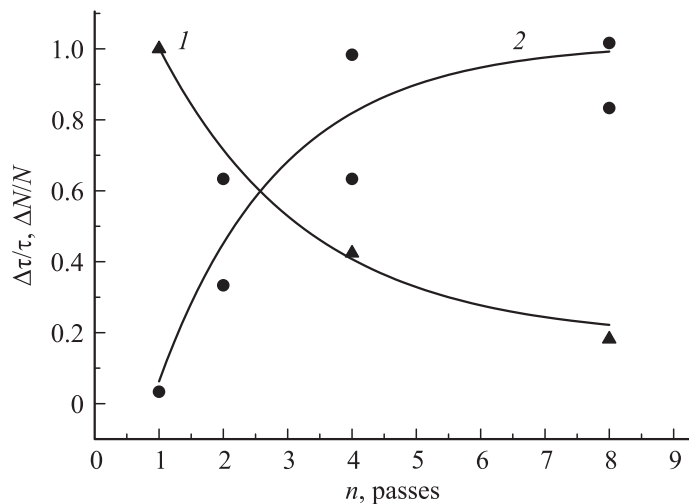


Рис. 2. Графики прироста долговечности после приложения давления (1) и числа большеугловых границ (2) в зависимости от числа проходов РКУП.

их выявления были проведены измерения размера микрочастиц, их разориентации, характера разрушения образцов. Анализ полученных результатов показал следующее:

— во-первых, приложение гидростатического давления практически не повлияло на эти характеристики;

— во-вторых, единственным параметром, который существенно зависит от числа проходов РКУП, является число границ микрочастиц с большими разориентациями — более 15 градусов.

Полученный результат позволяет предположить, что именно накопление большеугловых границ и приводит к снижению эффекта упрочнения после приложения гидростатического давления. Отмечалось [9], что образование новых трещин может проходить именно на наиболее разориентированных границах и тройных стыках зерен, где напряжения максимальны. В пользу этого говорят данные обработки изменения числа большеугловых границ и прироста долговечности в зависимости от числа проходов РКУП (рис. 2). Видно, что графики зависимости числа большеугловых границ и прироста долговечности практически зеркально симметричны, т.е. увеличение числа таких границ приводит

к пропорциональному уменьшению долговечности. Отметим, что зависимость числа большеугловых границ от числа проходов для такого же ультракристаллического Al была получена авторами данной работы в [4,10], при этом для оценки ориентаций зерен использовался метод обратного электронного рассеяния.

Таким образом, полученные данные позволяют объяснить оба обнаруженных эффекта действия давления. Помимо этого, становится ясно, что при РКУП имеют место, как минимум, два фактора, снижающих долговечность, особенно при большом числе проходов. Существенно, что предварительные данные, полученные на другом материале — Cu–0.2 wt.% Zr, полностью подтверждают данные для алюминия.

Полученные результаты представляют несомненный интерес и с практической точки зрения, так как позволяют правильно выбирать число проходов РКУП для получения оптимальных механических свойств, особенно при ползучести и усталостных испытаниях, т.е. при длительных испытаниях, определяющих работоспособность материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-02-00596-а).

Список литературы

- [1] *Reihanian M., Ebrahimi R., Tsuji N., Moshksar M.M.* // Mater. Science. Eng. A. 2008. V. 473. P. 189–194.
- [2] *Валиев Р.З., Александров Г.В.* Наноструктурные металлы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
- [3] *Sclenicka V., Dvorak J., Svoboda M.* // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. 387–389. P. 696–701.
- [4] *Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sklenicka V., Saxl I.* // ФТТ. 2007. В. 10. С. 1787–1790.
- [5] *Lapovok R., Tomys D., Mang J., Estrin Y., Lowe T.C.* // Acta. Mater. 2009. V. 57. P. 2909–2918.
- [6] *Маркушев М.В.* Материалы V Междунар. конф. „Прочность и разрушение материалов и конструкций“. Оренбург, 2008. Т. 1. С. 150–159.
- [7] *Бетехтин В.И., Мышляев М.М., Петров А.И.* // ФММ. 1973. Т. 36. С. 863–865.
- [8] *Sclenicka V., Betechtlin V.I., Petrov A.I., Kadomcev A.G., Kucharova K.* // Scripta Metallurgica. 1991. V. 25. P. 2159–2164.
- [9] *Андреевский Р.А., Глезер А.М.* // УФН. 2009. Т. 179. № 4. С. 337–358.
- [10] *Saxl I., Ilucova L., Svoboda M., Sclenicka V., Betechtlin V.I., Kadomcev A.G., Kral P.* // Mater. Sci. Forum. 2007. V. 567–568. P. 193–196.