

Выводы

Разработан ряд составов износостойкого материала и технология получения из него слитков и изделий методом СВС-литья, в том числе, и с градиентом концентрации упрочняющих частиц.

Список литературы

1. Горячева, И.Г. Контактные задачи в трибологии / И.Г.Горячева, М.Н. Добычин – Москва: Машиностроение, 1988. – 132 с.
2. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени. // Ж. физ. химии, 1938 г. Т. 12, № 1, С. 100-105.
3. Мерджанов А.Г. Новые элементарные модели горения второго рода. // Доклады АН СССР, 1977, Т.233, № 5, С.1133-1136.
4. Клубович В.В., Кулак М.М., Самолетов В.Г. Особенности структурообразования при СВС в плавящихся конденсированных смесях при воздействии центробежной силы // Литье и металлургия, 2007, № 1, с. 154-157.
5. Hirano T., Second Symposium for Functionally Gradient Materials, Jul. 1, 1988, Tokyo, The FGM Research Society, Kino Zairyo 8:15 (1988).
6. Lai W., Munir Z.A., McCoy B.J., Risbud S.H. Centrifugally-assisted combustion synthesis of functionally-graded materials // Scripta Materialia, 1997, Vol. 36, №3, P.331-334.
7. Yukhvid V. I., Vishnyakova G.A., Sylyakov S.L., Sanin V.N., Kachin A.R. Structural Macrokinetics of Alumotermic SHS Processes // Int. J. SHS, 1996, V.1, № 3, P.93-105.
8. Пат. 2889 ВУ, МПК В22D 13/06. Устройство для центробежного литья металлоизделий и наплавки покрытий / Клубович В.В., Кулак М.М., Самолетов В.Г.; № U 20050826, Заявл. 22.12.2005 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь, 2006, №3(50), С.166.
9. Клубович В.В., Кулак М.М., Платонов Л.Л., Румянцова И.Н., Самолетов В.Г. Получение материалов с градиентным распределением упрочняющих частиц методом СВС-литья // Весті Нацыянальнай Акадэміі Навук Беларусі, серыя фіз.-тэхн. навук, 2006, №3, С. 11-16.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЯ И СПЛАВА НА ЕГО ОСНОВЕ

Бетехтин В. И., Кадомцев А. Г., Нарыкова М. В., Амосова О. В.,
Скленичка В.*, Саксл И.**.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
**Institute of Physics of Materials Academy of Sciences of Czech Republic CZ-61662 Brno,*
Czech Republic

***Mathematical Institute Academy of Sciences of Czech Republic CZ-11567 Praha, Czech Republic*

Высокие механические свойства ультракристаллических материалов стимулируют исследование структурных особенностей, влияющих на формирование этих свойств. В данной работе изучалось влияние интенсивной пластической деформации при ранно-канальном угловом (РКУ) прессовании на дефектную структуру и механические свойства Al (99,99%) и сплава Al+0,2%Sc. Исходные заготовки, имевшие прямоугольное

сечение (10×10) мм² и длину 50 мм, подвергались различному числу проходов (с поворотом 90° после каждого прохода) при РКУ-прессовании.

Структурные исследования проводились методом электронной сканирующей микроскопии (ЭМ); методом EBSD; методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МРР) и дилатометрии. С помощью этих методов оценивался размер микрозерен, доля большеугловых ($\Theta > 15^\circ$) границ; параметры наноповреждений.

Для оценки прочностных свойств образцы растягивались в режиме ползучести при разных напряжениях и температурах 18 или 200°C. На опыте определялась долговечность (τ), а также минимальная скорость ползучести ($\dot{\epsilon}$). Кроме того, при акустических исследованиях, которые проводились методом составного вибратора [1], измерялся модуль Юнга (E); амплитудно-независимый декремент (δ); условный предел текучести на базе деформации $\approx 1-100$ нм.

Рассмотрим сначала экспериментальные данные, полученные для Al. Измерение долговечности образцов, полученных после разного числа проходов при РКУ-прессовании и испытанных в режиме ползучести, показало, что существенное (на порядок и более) уменьшение τ (и рост $\dot{\epsilon}$) наблюдается при переходе от одного (A_1) к четырем (A_4) проходам (рис. 1) [2]. Дальнейшее увеличение числа проходов практически не повлияло на τ и $\dot{\epsilon}$. Для структурных исследований были выбраны поэтому образцы (A_1) и (A_4). Установлено, что размер микрозерен в этих образцах одинаков, примерно 1 мкм. В то же время, при переходе от образцов (A_1) к (A_4) резко (в 3-6 раз) увеличилась доля большеугловых границ [2, 3]. Дальнейшее повышение числа проходов очень незначительно влияло на число границ с большими углами.

Полученные данные свидетельствуют о том, что долговечность и ползучесть ультракристаллического алюминия связана с числом границ с большими разориентациями. Можно предполагать, что увеличение степени интенсивной пластической деформации при переходе от (A_1) к (A_4) активизирует развитие в тройных стыках ротационных мод деформации, ведущих к локальным повреждениям и зарождению микронеиспλοшностей, что и приводит, очевидно, к уменьшению τ .

Для проверки этого предположения образцы (A_1) и (A_4) были исследованы методом МРР и дилатометрии¹⁾. Обнаружено, что в изученных образцах возникает малоугловое рассеяние, обусловленное наличием неоднородностей электронной плотности с одинаковым размером, но различной концентрацией. Для идентификации природы этих неоднородностей и оценки их концентрации методом МРР были измерены образцы (A_1) и (A_4) до и после воздействия на них высокого (1 ГПа) гидростатического давления, которое интенсивно влияет на неоднородности пустотной природы, и, как показали электронномикроскопические исследования [5], практически не сказывается на дислокационной структуре деформированного алюминия. Отметим, что аналогичный прием был использован ранее для выявления областей (ИСО) в матрице металлических аморфных сплавов [6].

На рис. 2 показаны типичные зависимости интенсивности от угла рассеяния для образцов (A_4) до и после наложения гидростатического давления. Видно, что давление заметно повлияло на интенсивность и угловой ход рентгеновского рассеяния; это свидетельствует в пользу его связи с наличием областей ИСО.

Предполагая сферическую форму областей (ИСО) и их пустотную природу, были, согласно [7], оценены средние размеры и концентрация нанопор, а также, соответственно, их объемные доли. Оказалось, что средние размеры нанопор в образцах (A_1) и (A_4) практически одинаковы и составляют $\approx 20-30$ нм, объемные доли отличаются и составляют, соответственно, $\approx 3,7 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-3}$. Приложение давления уменьшает размер

¹⁾ Изучение методом МРР проводилось в области сверхмалых углов рассеяния, в которых, как показано в [4], эффект двойных брэгговских отражений отсутствует.

и объемную долю нанопор. Важно подчеркнуть, что наблюдается хорошее совпадение рентгеновских и dilatометрических (плотностных) измерений. Так, для образца (A_4) уменьшение пористости за счет заживающего действия давления составило $2,7 \cdot 10^{-3}$ (оценка по данным МРР) и $3 \cdot 10^{-3}$ (прямое измерение плотности).

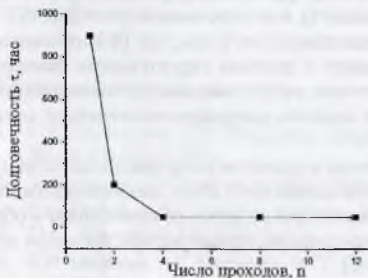


Рис. 1. Зависимость долговечности (τ) ультракристаллического алюминия от числа проходов (n) РКУ-прессования. Растяжение в режиме ползучести при $T = 200^\circ\text{C}$ и $\sigma = 15 \text{ МПа}$.

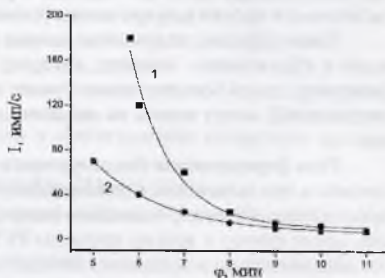


Рис. 2. Зависимость интенсивности (I) от угла рассеяния (ϕ) для ультракристаллического алюминия (образцы A_4) до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления

Полученные данные свидетельствуют о том, что деформация при РКУ-прессовании сопровождается образованием нанопор, которые локализируются, очевидно, в границах микрзерен.

Увеличение объемной доли нанопористости при переходе от одного к четырем проходам РКУ-прессования можно связать с тем, что при таком переходе резко (до 6 раз) увеличивается доля большугловых ($>15^\circ$) границ [2, 3], что ведет, очевидно, к возникновению в границах зерен и их тройных стыках ротационных мод деформации и высоких локальных напряжений, способствующих как образованию микронесплошностей [8], так и активизации диффузионных процессов, ведущих к образованию и коагуляции вакансий.

Полученные данные об увеличении нанопористости при переходе от образцов (A_1) к (A_4) позволяют объяснить эффект снижения почти на порядок долговечности образцов (A_4) по сравнению с (A_1) при растяжении указанных образцов в режиме ползучести (рис.1). Из данных рис. 1 видно, что резкое изменение механических свойств (в данном случае – долговечности) происходит при переходе от одного к четырем проходам РКУ-прессования; дальнейшее увеличение числа проходов до двенадцати на долговечность практически не влияет. Испытания на ползучесть (рис. 1) проводились при 200°C ; при нагреве до 200°C размер зерна увеличивался с 1 до 6 мкм [2]. В данной работе испытания в режиме ползучести проводились также и при 18°C , когда размер зерен оставался таким же, как при РКУ-прессовании, т. е. 1 мкм. Установлено, что долговечность образцов (A_1) более чем на 1,5 порядка выше, чем образцов (A_4), то есть эффект изменения долговечности даже больше, чем при температуре испытания 200°C .

Этот результат естественно связать с разной исходной (до испытания на ползучесть) нанопористостью. Отметим, что и для поликристаллического Al с размером зерен около 100 мкм ранее был обнаружен аналогичный эффект влияния на долговечность именно исходной пористости, при идентичности других элементов исходной дефектной структуры [9].

В [10] было показано, что переход от одного к четырем проходам РКУ-прессования сопровождается также увеличением модуля Юнга с 67 до 68,2 ГПа, амплитудно-независимого декремента с $63 \cdot 10^{-5}$ до $80 \cdot 10^{-5}$, условного предела микротекучести с 6,1 до 7,9 МПа; в этой же работе были высказаны соображения о причинах реверсии механических свойств при переходе от микро- к макроуровню деформации, при котором наблюдается эффект разупрочнения (уменьшение τ), а не упрочнения (рост E , δ , σ_s).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что РКУ-прессование ведет к образованию нанопор, которые, наряду с другими структурными факторами (например, долей большеугловых границ и стыков зерен с высоким уровнем локальных напряжений), могут влиять на механические свойства ультракристаллического алюминия.

Роль формирования большеугловых границ в развитии микронесплошностей проявилась и при испытании в режиме ползучести сплава Al+0,2%Sc, подвергнутого РКУ-прессованию. На рис. 3, 4 показано распределение границ зерен по ориентации в образцах, после одного и восьми проходов РКУ-прессования (после восьми проходов образец дополнительно испытывался на ползучесть).

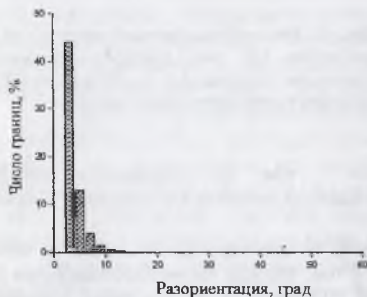


Рис. 3. Распределение границ по разориентации в образце Al+0,2%Sc после 1 прохода РКУ-прессования.



Рис. 4. Распределение границ по разориентации в образце Al+0,2%Sc после 8 проходов РКУ-прессования и испытания при $T = 200^\circ\text{C}$ и $\sigma = 10$ МПа.

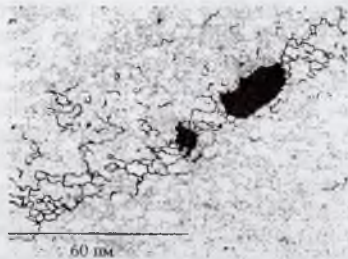


Рис. 5. Al+0,2%Sc после 2 проходов РКУ-прессования и испытания при $T = 200^\circ\text{C}$ и $\sigma = 10$ МПа. Черные линии – границы с $\Theta > 15^\circ$.

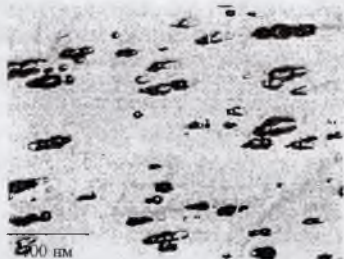


Рис. 6. Микропоры в сплаве Al+0,2%Sc после 8 проходов РКУ-прессования и испытания при $T = 200^\circ\text{C}$ и $\sigma = 10$ МПа.

Видно, что увеличение числа проходов резко увеличило число границ с большими разориентациями. Именно в области большеугловых границ наблюдались крупные поры (рис. 5), количество которых на завершающей стадии ползучести достаточно велико (рис. 6). Можно предполагать, что образование таких микронных пор связано, в частности, с диффузионным развитием и коалесценцией нанопор, зародившихся после РКУ-прессования.

Список литературы

1. С.П. Никоноров, Б.К. Кардашев. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. Наука, М (1985). 254 с.
2. V. Sklenicka, J. Dvorak, M. Svoboda. Mater. Sci. Eng. **389**, 696 (2004)
3. T.R. McNelley, D.L. Swisher, Z. Horita, T.G. Langdon. Ultrafine Grained Mater, II Eds Y.T. Zhu TMS, Warrendale, USA, 15 (2002)
4. В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев. ФТТ, **47**, 5, 801 (2005)
5. В.И. Бетехтин, М.М. Мышляев, А.И. Петров. ФММ, **36**, 4 (1973)
6. В.И. Бетехтин, А.М. Глезер, А.Г. Кадомцев. ФТТ, **40**, 1, 85 (1998)
7. A. Guinier, G. Fournet. Small-Angle Scattering of X-rays. J. Wiley. N.Y. (1955)
8. В.И. Владимиров, А.Е. Романов. Дисциплины в кристаллах. Наука, Л (1986). 221 с.
9. В.И. Бетехтин, А.И. Петров, А.Г. Кадомцев. ФММ, **40**, 4, 89 (1975)
10. В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, Б.К. Кардашев. ФТТ, **49**, 8, 142 (2006)

УДК 620.178.15:539.52

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛОС СДВИГА С НАНОЧАСТИЦАМИ В АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ

Глезер А. М., Манаенков С. Е., Пермякова И. Е.

*Институт металловедения и физики металлов, ФГУП «ЦНИИчермет
им. И.П. Бардина», Москва,
glezer@imph.msk.ru*

При отжиге аморфного состояния и получении при этом аморфно-кристаллических композитов, как известно, можно добиться уникального сочетания свойств, которые становятся даже лучшими, чем у обычных аморфных сплавов [1]. Механические свойства аморфных и аморфно-кристаллических сплавов тесно связаны с таким понятием, как полосы сдвига (ПС), за счет которых происходит процесс их гетерогенной пластической деформации. Во многом тем, как ПС взаимодействуют друг с другом и с выделяющимися частицами, определяется уровень механических характеристик в аморфно-кристаллических сплавах. Однако до настоящего времени этому вопросу не уделялось должного внимания в экспериментальных исследованиях. Целью настоящей работы являлось проведение статистического анализа результатов, полученных при электронно-микроскопическом изучении механизмов взаимодействия ПС с нановключениями кристаллической фазы в аморфно-нанокристаллических сплавах.