

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Б.Н. Семенов^{1,2*}, И.В. Смирнов¹, Ю.В. Судьенков¹, Н.В. Татарина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетский пр. 28, Санкт-Петербург, 198504, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

*e-mail: semenov@bs1892.spb.edu

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований механических свойств ультрамелкозернистого, с размером зерна 700 ± 200 нм, алюминия, полученного в результате интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) технического алюминия АД1 в комбинации с различными режимами термообработки. Показано, что микротвердость и прочность на разрыв ультрамелкозернистого материала превышают значения микротвердости и прочности на разрыв материала в состоянии поставки более чем в два раза, а относительное удлинение снижается более чем в два раза. При этом отмечается, что различные режимы отжига после ИПДК могут приводить как к охрупчиванию материала, так и повышению его пластичности.

1. Введение

Известно, что уменьшение зерна может приводить к существенному улучшению физико-механических свойств металлов и сплавов [1]. В связи с этим последние десятилетия широко исследуется новый тип металлических материалов с ультрамелкозернистой (от 100 нм до 1 мкм) и нанозернистой (до 100 нм) структурой [2, 3]. Мелкозернистую структуру получают газоконденсацией, механическим легированием, электроосаждением, интенсивной пластической деформацией [4].

Одним из способов измельчения зерна является интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) под высоким давлением [5]. Измельчение зерна происходит за счет создания большой деформации сдвига при высоком гидростатическом давлении и достаточно низкой гомологической температуре.

В данной работе исследуется влияние комбинации ИПДК и последующего отжига на механические свойства технического алюминия АД1.

2. Материал исследования и экспериментальные методики

Исследования проводились на образцах алюминия АД1, характеризуемого в состоянии поставки высокими антикоррозионными показателями и высокой пластичностью, но сравнительно малой прочностью. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Из алюминиевой плиты в состоянии поставки были вырезаны образцы диаметром 20 мм и толщиной 2.5 mm.

Интенсивная пластическая деформация кручением проводилась с помощью

пресса Walter Klement GmbH НРТ-07. Заготовки толщиной 2.5 mm нагружались давлением 6 GPa, после чего в условиях квази-гидростатического давления проводилось кручение 10 оборотов. После кручения получали диски диаметром 20 mm и толщиной 1.5 mm.

Таблица 1. Химический состав материала АД1 в %.

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
до 0.3	до 0.3	до 0.025	до 0.15	min 99.3	до 0.05	до 0.05	до 0.1	прочие, 0.05

Для определения влияния отжига на параметры материала после ИПДК было рассмотрено два режима: отжиг 1 час при $0.2 T_m$ и отжиг 1 час при $0.35 T_m$, T_m - температура плавления. Режимы обработки материала представлены в таблице 2.

Таблица 2. Режимы обработки технического алюминия АД1.

Маркировка	Режим
1.2	ИПДК: давление 6 GPa, 10 оборотов.
1.3	ИПДК: давление 6 GPa, 10 оборотов. Отжиг: 1 час при $0.2 T_{пл}$ °C
1.4	ИПДК: давление 6 GPa, 10 оборотов. Отжиг: 1 час при $0.35 T_{пл}$ °C
2.1	Состояние поставки
2.2	Отжиг: 2 часа при $0.7 T_{пл}$ °C

После ИПДК, термообработки и полировки однородность структуры дисков проверялась вдоль двух перпендикулярных диаметров с помощью измерения микротвердости по Виккерсу. Измерения микротвердости проводили в соответствии с ГОСТ 2999-75 на микротвердомере SHIMADZU HNV-G.

Из областей дисков с однородной структурой на электроэрозионном станке вырезались по два образца виде лопаток с шириной и длиной рабочей части 2 mm и 6 mm. Такие же образцы вырезались из материала в состоянии поставки, а также для материала после отжига при температуре $0.7 T_m$ в течение 2 часов. Отжиг проводился для рекристаллизации текстуры, полученной в результате прокатки.

Испытание образцов на квазистатическое растяжение проводилось на стандартной испытательной машине SHIMADZU AG-X plus при постоянной скорости деформации 0.0014 1/s. В ходе испытаний регистрировались время испытания, перемещение траверсы и сила растяжения. На диаграммах напряжение-деформация фиксировались предел текучести σ_y , предел прочности на разрыв σ_t и относительное удлинение δ .

Для определения упругих модулей и коэффициентов Пуассона измерялись продольные и стержневые скорости звука с применением оптоакустической методики, а также плотность [6, 7]. Стержневая скорость звука определялась в образцах $2\text{mm} \times 1.3\text{mm} \times 18\text{mm}$, вырезанных вдоль диаметра дисковых заготовок. Плотность материала измерялась по методу гидростатического взвешивания дисковых заготовок.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена микроструктура образцов до и после ИПДК и термообработки. До обработки структура материала состоит из зерен, вытянутых вдоль направления прокатки шириной $220 \pm 60 \mu\text{m}$ и длиной до 4-5 mm (Рис. 1a). Отжиг материала в

состоянии поставки приводил к рекристаллизации структуры с характерным размером зерна $160 \pm 70 \mu\text{m}$ (Рис. 1b).

В результате обработки ИПДК исходная крупнозернистая структура алюминия в состоянии поставки трансформируется в однородную ультрамелкозернистую структуру с размером зерна $700 \pm 200 \text{ nm}$ (Рис. 1c). При этом отжиг 1 час при температуре $0.2T_m$ после ИПДК не повлиял на размер зерна, а часовой отжиг при температуре $0.35T_m$ после ИПДК увеличил размер зерна до $2.4 \pm 0.6 \mu\text{m}$ (Рис. 1d).

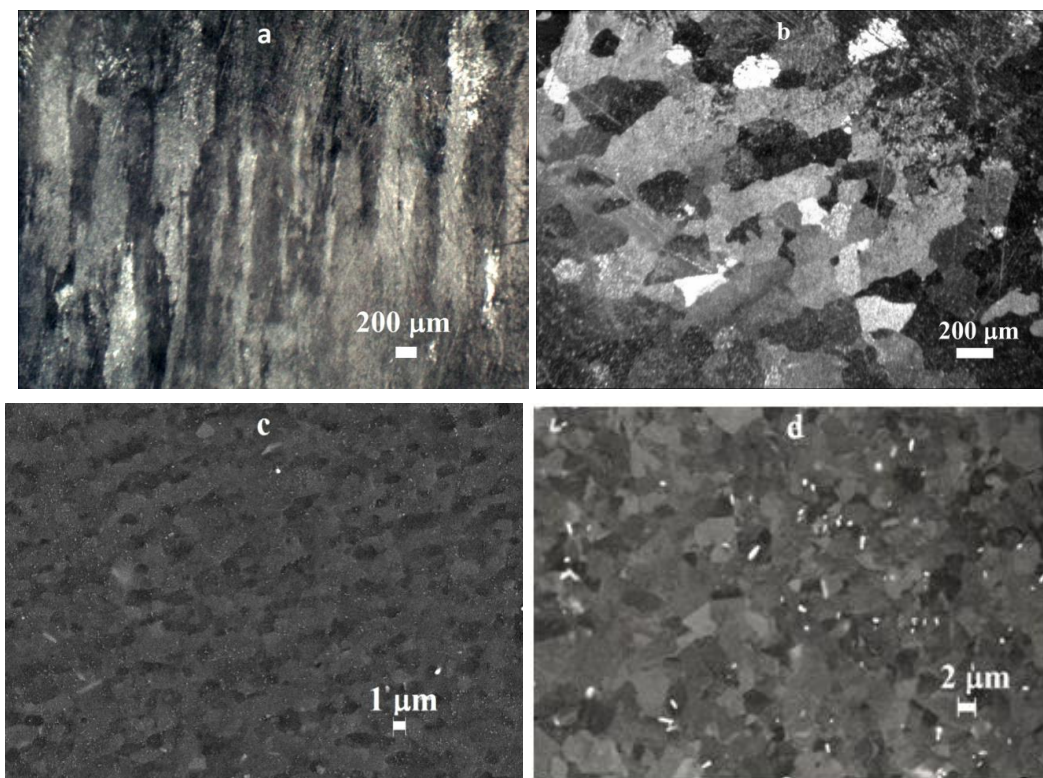


Рис. 1. Микроструктура технического алюминия АД1 до и после ИПДК и термообработки. а) состояние поставки; б) режим 2.2; в) режим 1.2 и 1.3; д) режим 1.4.

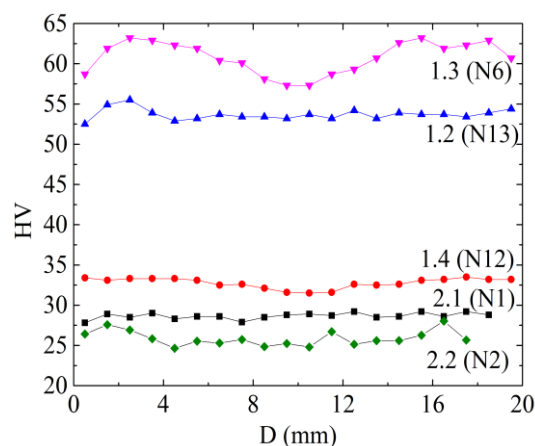


Рис. 2. Микротвердость по Викерсу вдоль диаметра l дисковых заготовок алюминия АД1 до и после ИПДК и термообработки.

Результаты измерения микротвердости дисковых заготовок представлены на Рис. 2. Структура материала после ИПДК достаточно однородна по всей длине диаметра заготовки, за исключением центральной части ($\sim \varnothing 2 \text{ mm}$) и края некоторых образцов. Однако в испытаниях на растяжение эти области не использовались.

Измельчение структуры повысило микротвердость алюминия в два раза (таблица 3), за исключением заготовок с режимом обработки 1.4. При этом наибольшую твердость показали заготовки после отжига при температуре $0.2 T_m$.

На Рис. 3а представлены диаграммы растяжения алюминия для различных режимов обработки.

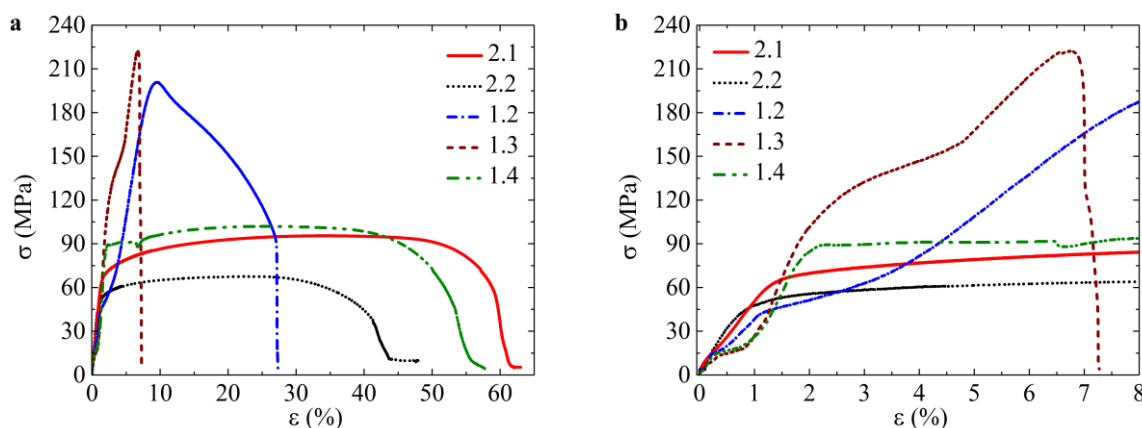


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов алюминия АД1 для различных режимов обработки ИПДК и термообработки. а) общий вид диаграмм; б) начальный участок диаграмм.

Для образцов с ультрамелкозернистой структурой наблюдается существенное увеличение прочности на разрыв и снижение относительного удлинения. Отжиг таких образцов при температуре $0.2 T_m$ в течение часа привел к квазихрупкому разрушению образцов без образования «шейки». При этом отжиг при температуре $0.35 T_m$ в течение часа привел практически к параметрам материала в состоянии поставки.

На Рис. 3б представлены увеличенные фрагменты диаграмм растяжения. На этих диаграммах наблюдается по меньшей мере два участка текучести у образцов после ИПДК. Данный эффект может быть обусловлен различием пороговых напряжений внутри- и межзеренных механизмов пластического течения.

Результаты измерений приведены в таблице 3. Для режимов 2.1 и 2.2 даны условные значения предела текучести для 0.2 %, а для режимов обработки 1.2 и 1.3 приведены значения условного предела текучести (0.2 %) для второго участка текучести.

Заметим, оценка предела текучести по измерениям микротвердости $\sigma_{0.2} \approx HV/3$ дает значения соответствующее соотношению Холла-Петча, то есть уменьшение размера зерна приводит к повышению предела текучести. Однако расчетные значения предела текучести существенно выше наблюдаемых напряжений на площадках текучести.

Таким образом, результаты измерений показывают, что уменьшение зерна до ультрамелкозернистого диапазона 500-900 nm увеличивает прочность материала более чем в два раза при двукратном снижении относительного удлинения.

4. Заключение

В данной работе исследовано влияние комбинации ИПДК и последующего отжига на механические свойства технического алюминия АД1.

Показано, что в результате ИПДК алюминия АД1 формируется однородная микроструктура с размером зерен 500-900 nm. При этом, микротвердость и прочность на разрыв ультрамелкозернистого материала превышает значения микротвердости и

прочность на разрыв материала в состоянии поставки более чем в два раза при снижении относительного удлинения также более чем в два раза.

Таблица 3. Параметры технического алюминия АД1 в зависимости от режима обработки материала. d – размер зерна, HV – микротвердость по Викерсу, σ_t – прочность на разрыв, ρ – плотность, c_L – продольная скорость звука, c – скорость звука в стержне, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, σ_y – предел текучести, δ – относительное удлинение.

Режим Параметр	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2
$d, \mu\text{m}$	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	2.4 ± 0.6	220 ± 60	160 ± 70
HV	54 ± 1	61 ± 0.3	33 ± 0.3	29 ± 0.5	26 ± 0.3
σ_t, MPa	200 ± 1	226 ± 4	102 ± 9	92 ± 4	56 ± 9
$\rho, \text{kg/m}^3$	2717 ± 6	2709 ± 4	2709 ± 4	2714 ± 6	2712 ± 6
$c_L, \text{m/s}$	6460 ± 20	6420 ± 20	6400 ± 20	6275 ± 20	6440 ± 20
$c, \text{m/s}$	5070 ± 20	5000 ± 20	5020 ± 20	5160 ± 20	5150 ± 20
E, GPa	70	67.7	68.3	72.3	72
ν	0.353	0.336	0.353	0.321	0.344
σ_y, MPa	44 ± 4	92 ± 20	83 ± 6	71 ± 4	40 ± 8
$\delta, \%$	25 ± 2	7 ± 1	58 ± 2	59 ± 3	44 ± 6

Диаграммы деформирования ультрамелкозернистого материала после ИПДК имеют несколько чередующихся участков текучести и упрочнения, что обусловлено различием энергии активации процессов пластического течения внутри и меж зерен.

Получено, что отжиг при температуре $0.2 T_m$ образцов после ИПДК не влияет на размер зерна, повышает прочность материала, но существенно снижает его пластичность. Отжиг же при температуре $0.35 T_m$ образцов после ИПДК приводил к росту зерна, снижению прочности и увеличению пластичности алюминия АД1.

Работа выполнена при частичной поддержке (Ю.В.С. и Н.В.Т.) Министерством образования и науки Российской Федерации (проект №14.Б25.31.0017), (Б.Н.С.) Российским научным фондом (проект 14-29-00199) и (И.В.С.) Санкт-Петербургским государственным университетом (проекты 6.38.243.2014 и 6.38.337.2015).

Сканирующая электронная микроскопия проводилась с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Нанотехнологии».

Литература

- [1] Т.Н. Johnson, С.Е. Feltner // *Metallurgical and Materials Transactions B* **1** (1970) 1161.
- [2] Р.З. Валиев, И.В. Александров, *Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства* (ИКЦ «Академкнига», М., 2007).
- [3] Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // *Успехи физических наук* **179** (2009) 337.
- [4] М.А. Meyers, А. Mishra, D.J. Benson // *Progress in Materials Science* **51** (2006) 427.
- [5] А.Р. Zhilyaev, T.G. Langdon // *Progress in Materials Science* **53** (2008) 893.
- [6] Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. *Ультразвуковые методы в физике твёрдого тела* (Мир, М., 1972).
- [7] Yu.V. Sud'nikov, Z.A. Valisheva, B.A. Zimin, In: *34th International Conference and NDT Exposition, DefectoscopY 2004* (Špindlerův Mlýn, Czech Republic, 2004), p. 277.

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRAFINE-GRAINED ALUMINIUM

B.N. Semenov^{1,2*}, I.V. Smirnov¹, Yu.V. Sudenkov¹, N.V. Tatarinova¹

¹St. Petersburg State University

Universitetskii pr. 28, Staryi Peterhof, St. Petersburg, 198504, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Polytechnicheskaya st. 29, St. Petersburg, 195251, Russia

*e-mail: semenov@bs1892.spb.edu

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of mechanical properties of ultrafine-grained aluminum with a grain size of 700 ± 200 nm resulting from the intensive plastic deformation by torsion of technical aluminum AD1 in combination with different modes of heat treatment. It is shown that microhardness and tensile strength of fine-grained material exceed the values of microhardness and tensile strength of the material as supplied more than two times and the elongation is reduced more than twice. It is noted that various modes of annealing after the intensive plastic deformation by torsion can lead to embrittlement of the material and increase its ductility.

Acknowledgement

YuVS, and NVT were supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant № 14.B25.31.0017). Also, BNS was supported by the Russian Science Foundation (Research Project 14-29-00199) and IVS was supported by Saint Petersburg State University (Research Projects 6.38.243.2014 and 6.38.337.2015)

The X-ray diffraction studies were conducted using the equipment of the Resource Centre for "X-ray Diffraction Studies" of SPbSU Science Park. The scanning electron microscopy was conducted exploiting the equipment of the Resource Centre for "Nanotechnologies" of SPbSU Science Park.

References

- [1] T.H. Johnson, C.E. Feltner // *Metallurgical and Materials Transactions B* **1** (1970) 1161.
- [2] R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov, *Bulk nanostructured metallic materials: production, structure and properties*. (Akademkniga, Moscow, 2007).
- [3] R.A. Andrievski, A.M. Glezer // *Physics-Uspokhi* **52**(4) (2009).
- [4] M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson // *Progress in Materials Science* **51** (2006) 427.
- [5] A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon // *Progress in Materials Science* **53** (2008) 893.
- [6] R. Truell, Ch. Elbaum, B.B. Chick, *Ultrasonic Methods in Solid State Physics* (Academic Press, New York and London, 1969).
- [7] Yu.V. Sud'enkov, Z.A. Valisheva, B.A. Zimin, In: *34th International Conference and NDT Exposition, Defectoscopy 2004* (Špindlerův Mlýn, Czech Republic, 2004), p. 277.