

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).

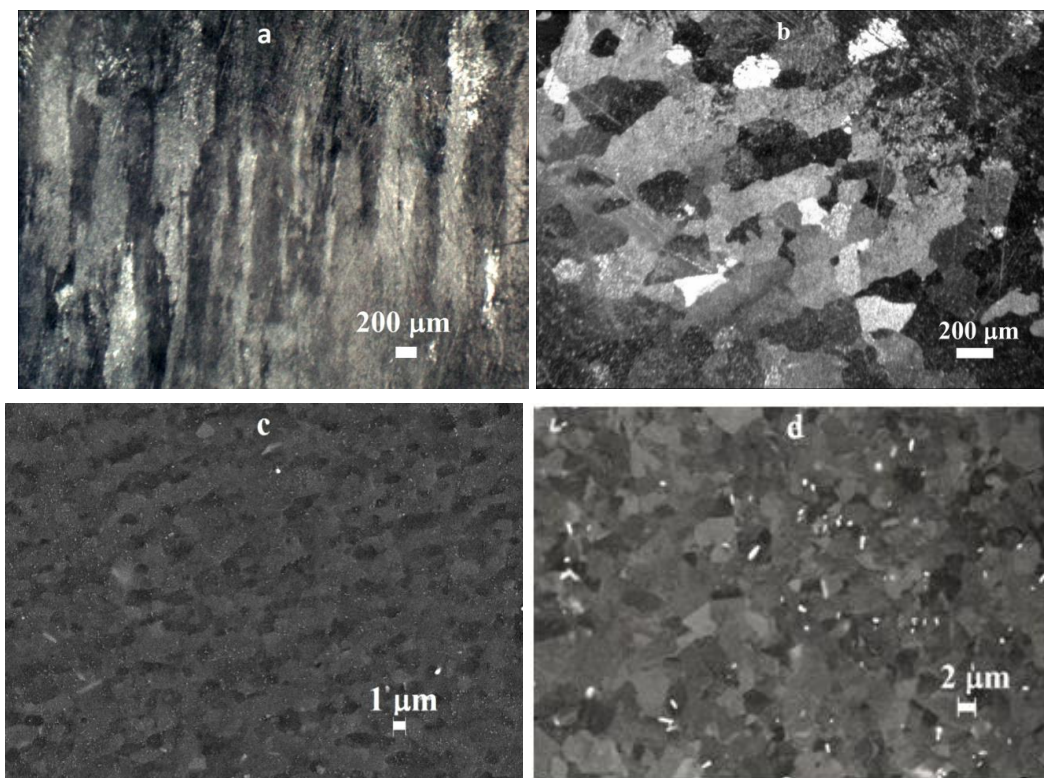


Рис. 1. Микроструктура технического алюминия АД1 до и после ИПДК и термообработки. а) состояние поставки; б) режим 2.2; с) режим 1.2 и 1.3; д) режим 1.4.

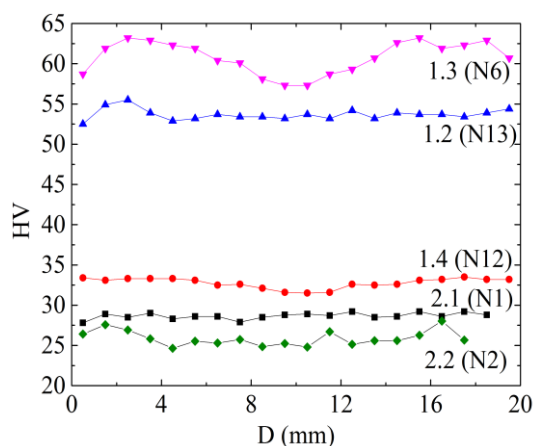


Рис. 2. Микротвердость по Викерсу вдоль диаметра l дисковых заготовок алюминия АД1 до и после ИПДК и термообработки.

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.

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'enkov, 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.