

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg

О. В. ПАИТОВА<sup>1</sup>, Е. В. БОБРУК<sup>2</sup>, М. А. СКОТНИКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: skotnikova@mail.ru

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Уфа, Россия

Приведены результаты исследования свойств алюминиевого сплава Д16 системы Al-Cu-Mg. С помощью оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, испытаний на электропроводность изучена склонность сплава к естественному и искусственному старению после закалки и интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) под давлением 6 ГПа при комнатной температуре. Построены зависимости микротвердости и электропроводности от времени выдержки. Показано, что термическая обработка (закалка + ИПДК + естественное старение) приводит к повышению в 2,3 раза твердости сплава Д16 по сравнению со стандартной термической обработкой (Т4) при сохранении уровня электропроводности.

**Ключевые слова:** нанокристаллические материалы, ультрамелкозернистые материалы, интенсивная пластическая деформация, механические свойства, термообработка, фрактографический анализ

**Введение.** Недостаточная прочность сплавов на основе алюминия ограничивает возможности их применения в приборостроительной, машиностроительной, электротехнической и других областях при работе в условиях высоких механических нагрузок. Поэтому поиск путей повышения комплекса механических и электротехнических свойств при сохранении легкости конструкции, удельной прочности и электропроводности алюминиевых сплавов является актуальной задачей.

Современный подход, обеспечивающий повышение свойств сплавов, — это измельчение их зеренной структуры до ультрамелкозернистого и нанокристаллического состояний такими методами, как интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) [1—4], равноканальное угловое прессование [1, 5, 6], прокатка [7—11], сварка трением [12, 13].

Положительное влияние интенсивной пластической деформации на свойства сплавов связывают, как правило, с особенностями их строения: высоким коэффициентом диффузии, значительными искажениями кристаллической решетки, измельчением зерен и субзерен, увеличением межзеренных и межфазных границ раздела и плотности дислокаций.

Метод электропроводности позволяет контролировать структурное состояние сплавов, значительно различающихся по  $\mu$  (удельной электрической проводимости). При естественном старении сплавов значение  $\mu$  уменьшается, а при искусственном старении увеличивается [14].

В настоящей статье рассматриваются возможности оптимизации структуры и свойств заготовок из сплава Д16 после закалки с последующей ИПДК и старением.

**Материалы и методы исследования.** Материалом для исследования служил промышленный горячепрессованный пруткок диаметром  $20,0 \pm 0,25$  мм, высотой 1,5 мм из сплава Д16 стандартного химического состава (Al — 4,4 Cu — 1,4 Mg — 0,7 Mn, вес. %).

Исследования проводились как на образцах после ИПДК и старения, так и на предварительно закаленных образцах с последующей ИПДК и старением. Закалка заготовок выполня-

лась при температуре  $T \geq 495$  °С. Далее заготовки подвергались естественному старению (ЕС) при комнатной температуре в течение 5 суток и искусственному старению (ИС) при 185 °С в течение 10 ч [14]. ИПДК под давлением  $P = 6$  ГПа при комнатной температуре и числе оборотов  $n = 10$  проводилась на установке „Скрудж-200“ [1].

Фрактографические исследования разрушенных образцов были выполнены на растровом электронном микроскопе JSM-840 при ускоряющем напряжении 50 кВ. Микротвердость измерялась по методу Виккерса ( $HV_{0,05}$ ) на микротвердомере Duramin -1/-2 при нагрузке 0,05 кг в течение 10 с.

Удельная электропроводность ( $\mu$ ) определялась по ГОСТ 27333-87 с использованием вихретокового прибора ВЭ-27 НЦ с относительной погрешностью 2 %.

**Результаты и обсуждение.** Как показали результаты исследования, сплав Д16 в исходном состоянии (в состоянии поставки) был неоднородным, крупнозернистым, с размером зерен  $d_L = 62,9 \pm 35,7$  мкм и обладал низким пределом прочности  $\sigma_B = 200 \pm 10$  и микротвердостью 86,2  $HV_{0,05}$ , а также высокой пластичностью  $\delta = 25$  % и электропроводностью  $\mu = 45,8 \pm 0,2$  мСм/м. Физико-механические свойства сплава Д16 представлены в таблице.

| № п/п | Состояние                                     | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $d_L$ , мкм       | $\delta$ , % | Микротвердость $HV_{0,05}$ , ед. | Электропроводность $\mu$ , мСм/м |
|-------|---|------------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1     | Исходное (поставка)                           | $200 \pm 10$     | $120 \pm 6$          | $62,9 \pm 35,7$   | 25,0         | $86,2 \pm 4,1$                   | $45,8 \pm 0,2$                   |
| 2     | Закалка (495 °С)                              | $300 \pm 15$     | $220 \pm 11$         | —                 | 23,0         | $128,5 \pm 4,7$                  | $18,6 \pm 0,9$                   |
| 3     | Т6: Закалка (495 °С) + ИС (185 °С, 10 ч)      | $460 \pm 23$     | $420 \pm 21$         | $13,0 \pm 7,5$    | 12,0         | $133,9 \pm 5,7$                  | $23,4 \pm 1,0$                   |
| 4     | Т4: Закалка (495 °С) + ЕС (20 °С, 5 суток)    | $435 \pm 20$     | $280 \pm 14$         | $12,6 \pm 6,9$    | 19,0         | $140,6 \pm 4,7$                  | $17,6 \pm 0,7$                   |
| 5     | ИПДК ( $n=10, P=6$ ГПа) + ИС (185 °С, 10 ч)   | $505 \pm 25$     | $480 \pm 24$         | $0,070 \pm 0,008$ | 0,9          | $278,1 \pm 18,8$                 | $18,4 \pm 0,4$                   |
| 6     | ИПДК ( $n=10, P=6$ ГПа) + ЕС (20 °С, 5 суток) | $729 \pm 36$     | $550 \pm 25$         | $0,070 \pm 0,006$ | 3,0          | $325,3 \pm 16,1$                 | $17,2 \pm 0,8$                   |

Последующая закалка сплава Д16 приводила к повышению прочности ( $\sigma_B = 300 \pm 15$ ), микротвердости (128,5  $HV_{0,05}$ ) и к уменьшению электропроводности ( $\mu = 18,6 \pm 0,9$  мСм/м) (см. таблицу).

После старения закаленного сплава Д16 по режимам термической обработки (ТО) Т6 (закалка + ИС при 185°С в течение 10 ч) и Т4 (закалка + ЕС при комнатной температуре в течение 5 суток) размер зерен, по сравнению с исходным, уменьшился в среднем в 4,8 раза и составил  $d_L^{T6} = 13,0 \pm 7,5$  мкм и  $d_L^{T4} = 12,6 \pm 6,9$  мкм. При этом прочностные свойства и микротвердость в среднем увеличились в 2,2 и 1,6 раза соответственно по сравнению с исходным состоянием, а пластические свойства и электропроводность снизились в 1,6 и 2,2 раза соответственно (см. таблицу).

После предварительной закалки, ИПДК ( $n=10$ ) и последующего искусственного и естественного старения в сплаве Д16, по сравнению с исходным состоянием, размер зерен уменьшился в 899 раз и составил  $d_L^{n10} = 0,070 \pm 0,007$  мкм. При этом прочностные свойства и микротвердость в среднем увеличились в 3,1 и 3,5 раза, а пластические свойства и электропроводность снизились в 12,8 и 2,5 раза соответственно (см. таблицу). Относительное удлинение ( $\delta$ ) после ИС составляло 0,9 %, а после ЕС — 3 %.

На рис. 1, 2 представлены графики изменения микротвердости (рис. 1, а и 2, а) и электропроводности (рис. 1, б и 2, б) от времени выдержки при искусственном (рис. 1) и естественном (рис. 2) старении сплава Д16 после закалки и ИПДК ( $n=10$ ).

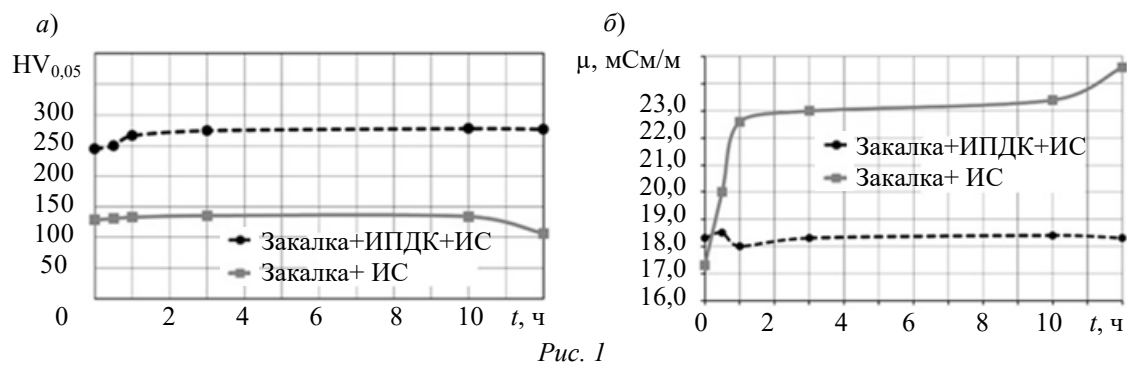


Рис. 1

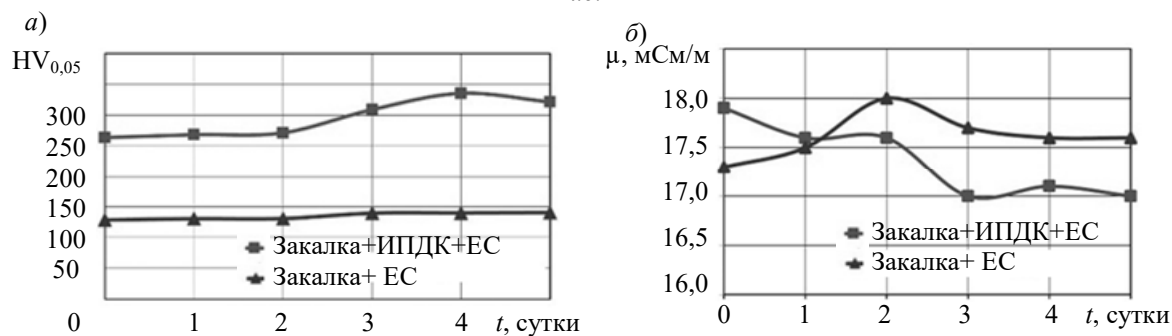


Рис. 2

Как показывает анализ графиков, после ИПДК (до начала старения) почти в 2 раза повышалась микротвердость сплава Д16 от 130 HV до 250 HV, что свидетельствует о значительных структурных изменениях при интенсивной пластической деформации.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что в сплаве Д16 после ИПДК ( $n=10$ ) сформировалась однородная структура, состоящая преимущественно из нанокристаллических (НК) зерен  $\alpha$ -твердого раствора размером 62—78 нм (рис. 3, а) и интерметаллидов  $\Theta$ (CuAl<sub>2</sub>), Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> (рис. 3, б).

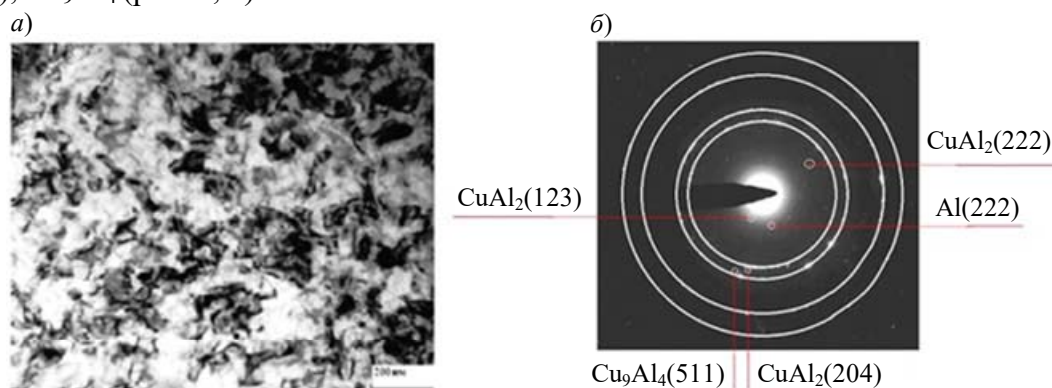


Рис. 3

После ИПДК дальнейшее искусственное старение в течение 10 ч слабо повышало микротвердость от 250 HV до 278 HV (см. рис. 1, а). При естественном старении через 5 суток наблюдалось значительное повышение микротвердости от 250 HV до 325 HV (см. рис. 2, а). Без предварительной ИПДК как искусственное, так и естественное старение оказывали слабое влияние на микротвердость.

На электропроводность ИПДК тоже оказывает положительное влияние — повышает  $\mu$  от 17,3 до 18,0 мСм/м (см. рис. 1, 2). После ИПДК дальнейшее искусственное старение слабо повышало электропроводность от 17,3 до 18,4 мСм/м (см. рис. 1, б). При естественном старении через 5 суток наблюдалось значительное снижение электропроводности от 18,4 до 17,0 мСм/м (см. рис. 2, а). Без предварительной ИПДК естественное и особенно искусственное старение приводили к значительному повышению электропроводности от 17,3 до

23,4 мСм/м (см. рис. 1, б), что согласуется с результатами работы [14], где при естественном старении сплавов значение  $\mu$  уменьшалось, а при искусственном увеличивалось.

Можно полагать, что значительная твердость и прочность сплава Д16 после ИПДК достигались за счет увеличения плотности дислокаций, объемной доли границ зерен, субзерен и межфазных границ раздела.

С помощью оптической металлографии при большом увеличении была произведена оценка концентрации частиц интерметаллидов в сплаве Д16 после старения: после ИС при 185 °С плотность частиц  $\Theta(\text{CuAl}_2)$ ,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  составила 7,5 %, а после ЕС при 20 °С — 3,5 %.

На рис. 4 представлены результаты фрактографического анализа структуры НК-образцов из сплава Д16, испытанных на растяжение после ИПДК и последующего ЕС (рис. 4, а, в, д) и ИС (рис. 4, б, г, е). По всей поверхности наблюдаются ямки двух типов.

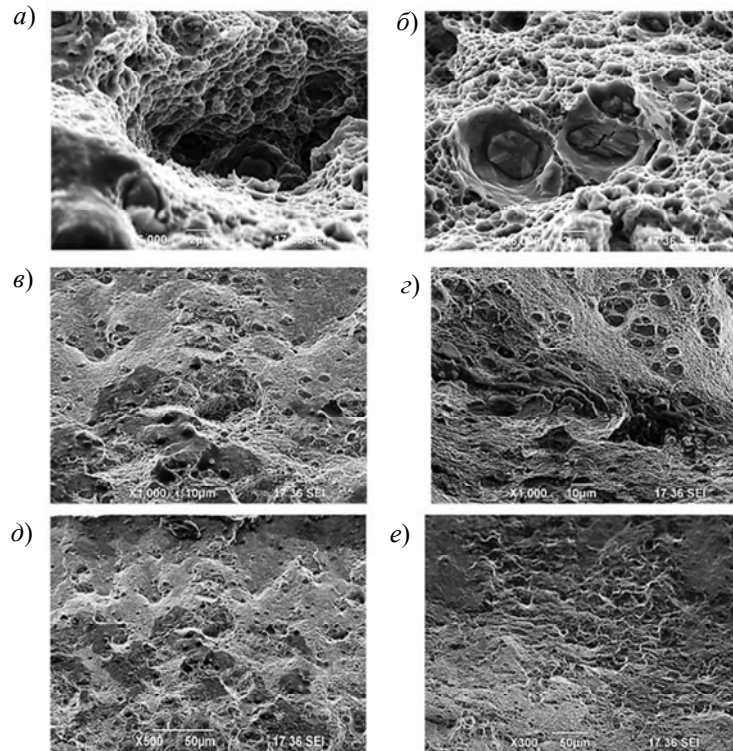


Рис. 4

*Ямки 1-го типа* — неглубокие, равномерно распределенные с поперечным размером 65—80 нм, соответствующим размеру НК-зерен  $\alpha$ -твердого раствора сплава Д16 после ЕС и ИС (рис. 4, д, е), занимают основную площадь (93—97 %) поверхности излома. Такие ямки представляют собой поверхности микропустот, образующихся в процессе порообразования в зоне значительной пластической деформации металла.

*Ямки 2-го типа* — глубокие, редкие с поперечным размером 6—8 мкм, после ЕС и ИС (см. рис. 4, в, г) занимают 3—7 % площади поверхности излома. В центре на дне таких ямок наблюдаются хрупкие частицы интерметаллидных фаз размером 1—5 мкм (см. рис. 4, а, б). Такие ямки образуются в результате зарождения трещин вдоль границ раздела частиц вторых фаз и матрицы.

Поскольку в сплаве Д16 после ИС, по сравнению с ЕС, частиц было больше, то на разрушенных образцах после искусственного старения ямок 2-го типа было больше (см. рис. 4, б), а прочность и пластичность ниже (см. таблицу).

Таким образом, можно полагать, что дисперсные частицы обособившихся хрупких интерметаллидов  $\Theta(\text{CuAl}_2)$ ,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  стали причиной множественного зарождения трещин в материале сплава Д16 при достижении предела прочности 729 и 505 МПа после ЕС и ИС соответственно. Магистральная трещина распространялась транскристаллитно с малой

и большой глубиной ямок по механизму вязкого чашечного разрушения. Сплав Д16 после ИС обладал меньшей способностью к пластическому деформированию и в 3,3 раза меньшим относительным удлинением по сравнению с ЕС (см. таблицу).

**Заключение.** По результатам исследования можно заключить, что оптимальная твердость ( $HV_{0.05} = 325,3 \pm 16,1$ ) при удельной электропроводности  $\mu = 17,3 \pm 0,8$  мСм/м в сплаве Д16 достигается при комбинированной обработке — закалка 495 °С + интенсивная пластическая деформация кручением + естественное старение (5 суток). В этом случае естественное старение, проходящее при комнатной температуре, сопровождается распадом пересыщенного твердого раствора с образованием зон Гинье — Престона. При этом сохраняются значительные искажения в кристаллической решетке  $\alpha$ -твердого раствора, в связи с чем наблюдается невысокая электропроводность.

Показано, что термическая обработка (закалка + ИПДК + ЕС) приводит к повышению в 2,3 раза твердости сплава Д16 по сравнению со стандартной термической обработкой (Т4) при сохранении уровня электропроводности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валиев Р. З., Александров И. В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000.
2. *Liu M., Roven H. J., Liu X., Murashkin M., Valiev R. Z., Ungar T., Balogh L.* Grain refinement in nanostructured Al-Mg alloys subjected to high pressure torsion // *J. of Materials Science*. 2010. Vol. 45. P. 4659.
3. *Roven H. J., Liu M., Murashkin M., Valiev R. Z., Kilmametov A. R., Ungar T., Balogh L.* Nanostructures and microhardness in Al and Al-Mg alloys subjected to SPD // *Materials Science Forum*. 2009. N 604—604. P. 179.
4. *Бобрук Е. В.* Особенности структуры и механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si, обработанных методами интенсивной пластической деформации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2011.
5. *Сегал В. М., Резников В. И., Дробышевский Ф. Е., Копылов В. И.* Пластическая обработка металлов простым сдвигом // *Изв. АН СССР. Металлы*. 1981. № 1. С. 115.
6. *Рааб Г. И.* Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных ультрамелкозернистых материалов // *Вестн. УГАТУ*. 2004. № 3(11). С. 67.
7. *Kolbasnikov N. G., Mishin V. V., Naumov A. A., Zabrodin A. V.* Research into structure and rheological and relaxation properties of nanocrystalline beryllium at temperatures of hot rolling and research into stress relaxation kinetics in different sorts of beryllium // *Nanotechnologies in Russia*. 2014. Vol. 9, N 7—8. P. 430.
8. *Kolbasnikov N. G., Mishin V. V., Shamshurin A. I., Zabrodin A. V.* Investigation of structure, rheological and relaxation properties, and stress relaxation kinetics in nanocrystalline beryllium at hot rolling temperatures // *Nanotechnologies in Russia*. 2014. Vol. 9, N 1—2. P. 65—72.
9. *Kodjaspirov G. E., Dobatkin S. V., Rudskoi A. I., Naumov A. A.* Production of ultrafine-grained sheet from ultralow-carbon steel by pack rolling // *Metal Science and Heat Treatment*. 2007. Vol. 49, N 11—12. P. 561.
10. *Kolbasnikov N. G., Mishin V. V., Shishov I. A., Kistankin I. S., Zabrodin A. V.* Development of nondestructive warm rolling schedules for nanocrystalline beryllium using mathematical simulation // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. N 10. P. 785—792.
11. *Kolbasnikov N. G., Matveev M. A., Zotov O. G., Mishin V. V., Mishnev P. A., Nikonov S. V.* Hot plasticity of microalloyed pipe steel in continuous casting and hot rolling // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44, N 2. P. 149—155.
12. *Panchenko O. V., Ivanov S. Y., Naumov A. A., Isupov F. Y., Popovich A. A.* Local mechanical properties estimation of friction stir welded Al-Mg-Si joints // *Proc. of the 28th Intern. Ocean and Polar Engineering Conf., Sapporo, Japan, 10—15 June 2018; International Society of Offshore and Polar Engineers*.
13. *Kol'tsova T. S., Shakhov F. M., Voznyakovskii A. A., Lyashkov A. I., Tolochko O. V., Nasibulin A. G., Rudskoi A. I., Mikhailov V. G.* Fabrication of a compacted aluminum-carbon nanofiber material by hot pressing // *Technical Physics*. 2014. Vol. 59, N 11. P. 1626—1630.

14. Арчакова З. Н., Балахонцев Г. А., Басова И. Г. и др. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1984.

#### Сведения об авторах

- Ольга Владиславовна Паитова** — аспирант; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; E-mail: olja.stern@gmail.com
- Елена Владимировна Бобрук** — канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет; E-mail: e-bobruk@yandex.ru
- Маргарита Александровна Скотникова** — д-р техн. наук, профессор; СПбПУ Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; E-mail: skotnikova@mail.ru

Поступила в редакцию  
25.02.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Паитова О. В., Бобрук Е. В., Скотникова М. А. Оптимизация структуры и свойств алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 476—482.

### OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE AL-CU-MG SYSTEM ALUMINUM ALLOY

O. V. Paitova<sup>1</sup>, E. V. Bobruk<sup>2</sup>, M. A. Skotnikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
195251, St. Petersburg, Russia  
E-mail: skotnikova@mail.ru

<sup>2</sup>Ufa State Aviation Technical University, 450008, Ufa, Russia

Results of experimental investigation of aluminum alloy D16 of the Al-Cu-Mg system are presented. Using optical metallography, scanning electron microscopy, and electrical conductivity tests, the tendency of the alloy to natural and artificial aging after quenching and intense plastic torsion deformation under 6 GPa pressure at room temperature is studied. Dependences of the alloy microhardness and electrical conductivity on holding time are revealed. It is shown that heat treatment (quenching + intense plastic torsion deformation + artificial aging) leads to a 2.3-fold increase in the hardness of the D16 alloy as compared to the standard HT (T4), while maintaining the level of electrical conductivity.

**Keywords:** nanocrystalline materials, ultrafine-grained materials, intensive plastic deformation, mechanical properties, heat treatment, fractographic analysis

#### REFERENCES

1. Valiyev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey* (Nanostructured Materials Obtained by Intense Plastic Deformation), Moscow, 2000, 272 p. (in Russ.)
2. Liu M., Roven H.J., Liu X., Murashkin M., Valiev R.Z., Ungar T., Balogh L. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, p. 4659.
3. Roven H.J., Liu M., Murashkin M., Valiev R.Z., Kilmametov A.R., Ungar T., Balogh L. *Materials Science Forum*, 2009, no. 604-604, p. 179.
4. Bobruk E.V. *Osobennosti struktury i mekhanicheskiye svoystva ul'tramelkozernistykh alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg-Si, obrabotannykh metodami intensivnoy plasticheskoy deformatsii* (Structural Features and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Aluminum Alloys of the Al-Mg-Si System Processed by Methods of Intense Plastic Deformation), Extended abstract of candidate's thesis, Ufa, 2011. (in Russ.)
5. Cegal V.M., Reznikov V.I., Drobyshevskiy F.E., Kopylov V.I. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1981, no. 1, pp. 115. (in Russ.)
6. Raab G.I. *Vestnik UGATU*, 2004, no. 3(11), pp. 67. (in Russ.)
7. Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Naumov A.A., Zabrodin A.V. *Nanotechnologies in Russia*, 2014, no. 7-8(9), pp. 430. (in Russ.)
8. Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Shamshurin A.I., Zabrodin A.V. *Nanotechnologies in Russia*, 2014, no. 1-2(9), pp. 65–72. (in Russ.)
9. Kodjaspirov G.E., Dobatkin S.V., Rudskoi A.I., Naumov A.A. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, no. 11-12(49), pp. 561.
10. Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Shishov I.A., Kistankin I.S., Zabrodin A.V. *Russian Metallurgy (Metallurgy)*, 2014, no. 10, pp. 785–792.
11. Kolbasnikov N.G., Matveev M.A., Zotov O.G., Mishin V.V., Mishnev P.A., Nikonov S.V. *Steel in Translation*, 2014, no. 2(44), pp. 149–155.

12. Panchenko O.V., Ivanov S.Y., Naumov A.A., Isupov F.Y., Popovich A.A. *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, June 10–15, 2018, Sapporo, Japan.
13. Kol'tsova T.S., Shakhov F.M., Voznyakovskii A.A., Lyashkov A.I., Tolochko O.V., Nasibulin A.G., Rudskoi A.I., Mikhailov V.G. *Technical Physics*, 2014, no. 11(59), pp. 1626–1630.
14. Archakova Z.N., Balakhontsev G.A., Basova I.G. et al. *Struktura i svoystva polufabrikatov iz alyuminiyevykh splavov* (Structure and Properties of Semi-Finished Products from Aluminum Alloys), Moscow, 1984. (in Russ.)

**Data on authors**

- Olga V. Paitova** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materales and Transport; E-mail: olja.stern@gmail.com
- Elena V. Bobruk** — PhD, Associate Professor; Ufa State Aviation Technical University; E-mail: e-bobruk@yandex.ru
- Margarita A. Skotnikova** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Machinery, Materales and Transport; E-mail: skotnikova@mail.ru

**For citation:** Paitova O. V., Bobruk E. V., Skotnikova M. A. Optimization of the Structure and Properties of the Al-Cu-Mg System Aluminum Alloy. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 476–482 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-476-482