

УДК 53.09, P.A.C.S. 03.75.Hh

**Influence of geometry and grain size on the mechanical properties of Al 6101
under static loading of cylindrical samples**

**Влияние геометрии и размера зерна на механические свойства Al 6101
при статическом растяжении цилиндрических образцов**

D. K. Magomedova

Д. К. Магомедова

Saint Petersburg State University, Universitetsky pr. 28, Saint Petersburg, 198504, Russia
magmedva.dasha@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 198504, Санкт-Петербург,
Университетский пр., 28
magmedva.dasha@mail.ru

ABSTRACT

In this work, we study the influence of the geometry of cylindrical samples and the structure of the material (coarse and fine-grained) on the behavior of Al-6101 under static loading (tension) at room temperature. Three types of structure were investigated: coarse-grained during natural and artificial aging, as well as fine-grained, obtained by the method of equal channel angular pressing (ECAP). Cylindrical specimens were presented in three geometries: "classic" cylindrical and with additional grooves - thinning with respect to the center of the specimen up to 3 and 2 mm. Also, the values of mechanical properties (tensile strength and yield strength) were obtained for samples without undercut for comparison with the known tabular values of this material. It is shown that with a decrease in the grain size, the strength of the material increases, and also that specimens with a narrower working part turn out to be the least plastic, but show a higher strength. This study allows a more complete description of the fracture process for a given material.

KEYWORDS

Al 6101; static loading; mechanical properties; UFG material; nanostructure.

АННОТАЦИЯ

Проведено исследование влияния геометрии цилиндрических образцов и структуры материала (крупно- и мелкозернистой) на поведение Al-6101 при статическом нагружении (растяжении) при комнатной температуре. Исследовались три типа структуры: крупнозернистая при естественном и искусственном старении, а также мелкозернистая, полученная методом равноканального углового прессования (РКУП). Цилиндрические образцы были представлены в трех геометриях: «классические» цилиндрические и с дополнительными выточками – утонениями относительно центра образца до 3 и 2 мм. Также были получены значения механических свойств (предела прочности и предела текучести) для образцов без выточки для сравнения с известными табличными значениями данного материала. Показано, что при уменьшении размера зерна увеличивается прочность материала, а также что образцы с более узкой рабочей частью оказываются наименее пластичными, но показывают более высокую прочность. Данное исследование позволяет более полно описать процесс разрушения у данного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Al 6101; статическое нагружение; механические свойства; УМЗ материал; наноструктура.

Введение

Сплав Al-6101 широко применяется в качестве проводников для воздушных линий передач, так как обладает повышенной прочностью и электропроводностью по сравнению с другими алюминиевыми сплавами

электротехнического назначения. Данный сплав демонстрирует предел прочности в диапазоне от 255 до 330 МПа. Такой уровень свойств достигается в нем за счет использования традиционных видов термической или термомеханической обработки [1–4].

Большим коммерческим потенциалом обладает новый подход, основанный на достижении в проводниковых материалах повышенной прочности (предел прочности более 350 МПа) за счет формирования регламентированной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с помощью обработки, включающей интенсивную пластическую деформацию (ИПД) [5–8]. В более поздних работах предложенный подход был реализован в виде технологии с использованием новых методов ИПД для получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов (катанки и проволоки) с уровнем свойств, не имеющим мировых аналогов [5, 9–11].

В данной работе исследовано влияние геометрии и структуры образцов на поведение Al-6101 при статическом нагружении при комнатной температуре.

1. Материал и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается Al-6101, распространенный технический сплав, используемый в различных направлениях металлургии. В табл. 1 представлен химический состав рассматриваемого сплава.

Al-6101 был представлен в виде цилиндрических образцов с различными диаметрами поперечного сечения. Также рассматривалось три структурных состояния: крупнозернистый материал при естественном и искусственном старении, и мелкозернистый материал, полученный методом РКУП-К [1]. Подробно методика, материал и эксперимент описаны в работах [5–6].

На рис. 1 приведена используемая геометрия образцов: № 1 – без выточки (диаметр рабочей части 5 мм), № 2 – с выточкой (диаметр наименьшего сечения 3 мм) и № 3 – также с выточкой (диаметр наименьшего сечения 2 мм).

Использование в работе образцов разной геометрической формы было обусловлено установлением влияния геометрии на прочность и пластичность.

Часть исходных заготовок (крупнозернистый КЗ сплав) была подвергнута отжигу при температуре 550 °С в течение 2 часов и последующей закалке в воду комнатной температуры; после закалки они подвергались естественному старению (ЕС) в течение 6 суток. Другая часть также подвергалась отжигу при температуре 550 °С в течение 2 часов и дальнейшему отжигу в течении 12 часов при температуре 170 °С с последующей закалкой водой комнатной температуры – образцы с искусственным старением (ИС). Для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры часть заготовок была обработана ИПД методом равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-К).

Для проведения механических испытаний образцов на одноосное растяжение использовалась машина Shimadzu AG-50kNX с постоянной скоростью деформации $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Деформация образцов регистрировалась с помощью видеоэкстензометра. Для каждого состояния и геометрии было испытано не менее 3 образцов [12–15].

Таблица 1
Table 1

Химический состав сплава 6101 (wt.%)

Chemical composition of 6101 alloy (wt.%)

Предел / Limit	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	B	Ti + V + Cr + Mn	Al
Min	0,50	–	–	0,50	–	–	–	Ост. / rest of it
Max	0,60	0,30	0,01	0,60	0,02	0,01	0,015	

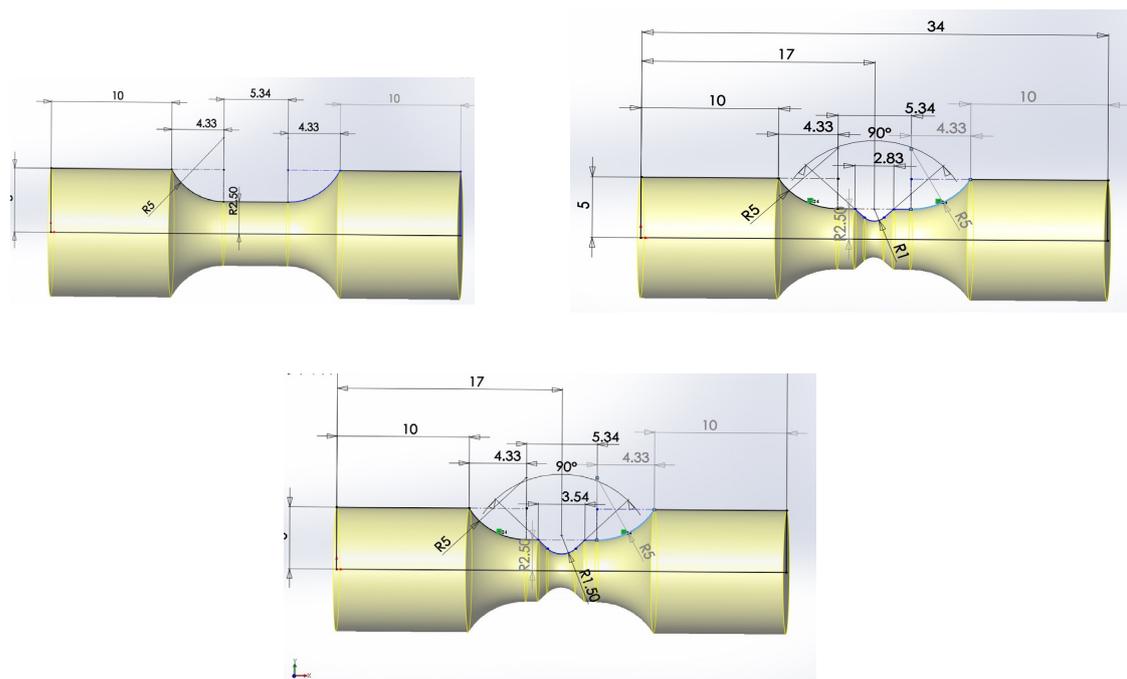


Рис. 1. Рисунки образцов с диаметрами рабочих частей 5, 3,5 и 2,8 мм

Fig. 1. Illustration of samples with a diameter of 5.0, 3.5 and 2.8 mm

2. Результаты

Для сравнительного анализа было рассмотрено различие крупно- и мелкозернистого сплава на диаграммах нагружения (рис. 2).

При анализе диаграмм можно утверждать, что образцы, подвергнутые искусственному старению, показывают более высокую пластичность. Это объясняется выделяющимися

β -частицами, которые ведут к упрочнению материала.

Сопоставительный анализ инженерных кривых растяжения показал, что КЗ образцы демонстрируют значительно большую прочность после ИС. Такое изменение прочностных характеристик является типичным для термоупрочняемых алюминиевых сплавов после ЕС и ИС, в том числе и для сплавов системы Al-Mg-Si [16–20].

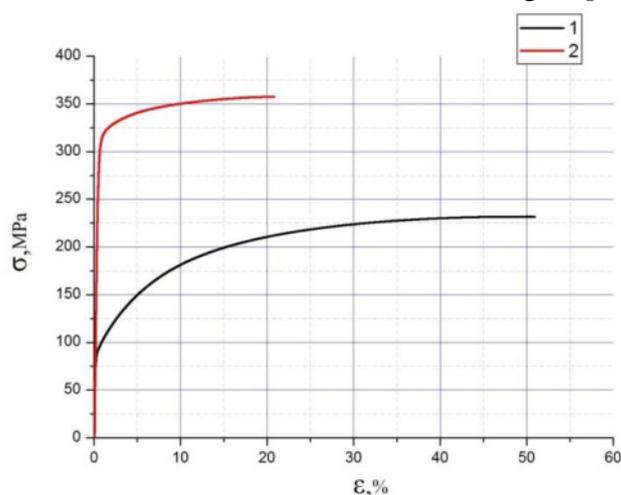


Рис. 2. Диаграммы растяжения для: 1 – крупнозернистого материала с естественным старением; 2 – мелкозернистого материала, полученного методом РКУП

Fig. 2. Stress-strain curves for: 1 – CG sample after NA; 3 – UFG sample produced by ECAP-C

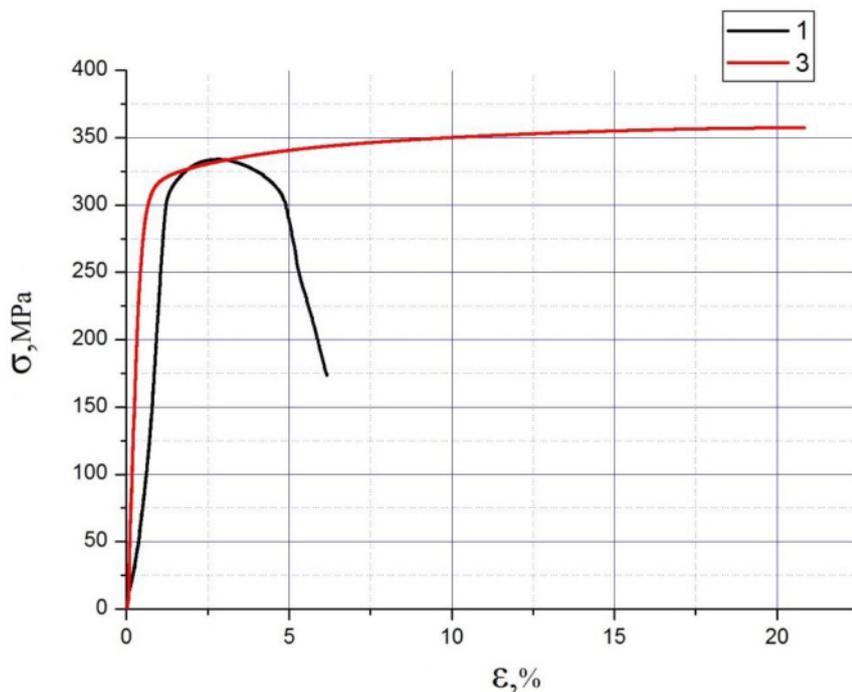


Рис. 3. Диаграммы растяжения для: 1 – крупнозернистого материала с искусственным старением; 3 – мелкозернистого материала, полученного методом РКУП

Fig. 3. Stress-strain curves for: 1 – CG sample after AA; 2 – UFG sample produced by ECAP-C

Табл. 2 описывает механические свойства, измеренные из кривых *напряжение–деформация* для образцов геометрии № 1 (без выточки).

Таблица 2
Table 2

Средние значения пределов текучести и прочности для КЗ ЕС, КЗ ИС и УМЗ образцов
Average values of yield stress and tensile strength for CG NA, CG AA and UFG samples

	Предел текучести, МПа / Yield stress, MPa	Предел прочности, МПа / Tensile strength, MPa
КЗ ЕС / CG NA	85 ± 3	232 ± 7
КЗ ИС / CG AA	238 ± 28	312 ± 3
УМЗ / UFG	304 ± 3	351 ± 16

Значения пределов прочности и текучести для КЗ ИС совпадают с табличными значени-

ями материала, следовательно, эксперимент является качественным для проведения дальнейших исследований.

Выводы

Проанализировав данные табл. 2, можем сделать следующие выводы для статического растяжения при комнатной температуре цилиндрических образцов Al-6101:

1. На прочность и пластичность материала влияет геометрия исследуемых образцов: образцы с более узкой рабочей частью оказываются наименее пластичными, но показывают более высокую прочность.

2. На прочность и пластичность также влияет структура материала: при уменьшении размера зерна увеличивается прочность.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследования проектом № 17-19-01311.

The author would like to thank the Russian Science Foundation for financial support of this research by Project №17-19-01311.

Список литературы

1. Tomson R. D., Hancock J. W. Ductile failure by void nucleation, growth and coalescence // *International Journal of Fracture*. 1984. V. 26, Iss. 2. P. 99–112. DOI: 10.1007/BF01157547.
2. Sabirov I., Murashkin M., Valiev R. Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development // *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. V. 560. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.020.
3. Thomason P. F. *Ductile fracture of Metals*. USA: Pergamon Press, 1990. P. 219.
4. Vinogradov A. Y., Hashimoto S. Fatigue in ultrafine-grained materials processed by equal-channel angular pressing // *Russ. Metall. (Metally)*. 2004. No. 1. P. 42–51.
5. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity / M. Yu. Murashkin et al. // *J. Mater. Sci.* 2016. V. 51, Iss. 1. P. 33–49. DOI: 10.1007/s10853-015-9354-9.
6. Argon A. S., Im J., Needleman A. Distribution of plastic strain and negative pressure in necked steel and copper bars // *Metallurgical Transactions A*. 1975. V. 6, Iss. 4. Article number 815. DOI: 10.1007/BF02672305.
7. European Standard, EN 50183. *Overhead Power Line Conductors – Bare Conductors of Aluminium Alloy with Magnesium and Silicon Content*. CEN: Bruxelles, Belgium, 2002.
8. Enhanced Mechanical Properties and Electrical Conductivity in Ultrafine-Grained Al 6101 Alloy Processed via ECAP-Conform / M. Murashkin et al. // *Metals*. 2015. V. 5, Iss. 4. P. 2148–2164. DOI: 10.3390/MET5042148.
9. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction* / F. Kiessling et al. Berlin: Springer, 2003. P. 735.
10. Valiev R. Z., Alexandrov I. V. *Nanostructured materials produced by severe plastic deformation*. Moscow: Logos Pub., 2000. P. 272.
11. Structure and properties of ultra-fine grained Al alloys produced by severe plastic deformation / M. V. Markushev et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. 1997. V. 234–236. P. 927–931. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00333-X.
12. Magomedova D. K., Murashkin M. Yu. Influence of grain size and second phase particles on the process of void initiation // *IOP Sci. Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. V. 991. Article number 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/991/1/012055.
13. Magomedova D. K., Murashkin M. Yu., Efimov M. A. Technique development for conducting mechanical tests to study the pore formation process in case of material fracture // *AIP Conference Proceedings*. 2018. No. 1959, Iss. 1. Article number 070021. DOI: 10.1063/1.5034696.
14. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation // *Progress in Materials Science*. 2000. V. 45, No. 2. P. 103–189.
15. Segal V. M. Materials processing by simple shear // *Mater. Sci. Eng. A*. 1995. V. 197, Iss. 2. P. 157–164. DOI: 10.1016/0921-5093(95)09705-8.
16. Karabay Sedat. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminum alloy conductors // *Mater. & Design*. 2006. V. 27, Iss. 10. P. 821–832. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.06.005.
17. Mondolfo L. F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Boston: Butterworths, 1979. P. 982.
18. Nanostructured wire rod research and development in Russia / V. Kh. Mann et al. // *Light Metal Age*. 2014. V. 72, No. 6. P. 26–29.
19. Structure and properties of ultra-fine grained aluminium alloys produced by severe plastic deformation / M. V. Markushev et al. // *Materials Science and Engineering A*. 1997. V. 234–236. P. 927–931.
20. Argon A. S., Im J. Separation of second phase particles in spheroidized 1045 steel, Cu-0.6pct Cr alloy, and maraging steel in plastic straining // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1975. V. 6, Iss. 4. P. 839–851. DOI: 10.1007/BF02672307.