

INFLUENCE OF AL 6101 ALLOY STRUCTURE ON PORE FORMATION IN STATIC TENSION AS A STRUCTURAL CHANGE DURING DEFORMATION*Daria Kurbanovna Magomedova*Saint Petersburg State University, Universitetsky Pr. 28, Saint Petersburg, 198504, Russia
magmedva.dasha@mail.ru

ABSTRACT

In this work, the influence of the material structure (coarse- and fine-grained) on the formation of pores under static loading at room temperature as a structural change during deformation is studied. To improve the properties of metallic materials, the methods of thermal hardening and aging, as well as the methods of severe plastic deformation (SPD), are used. These methods are interesting due to the profound change in the structure, physical and mechanical properties, and phase composition. To evaluate the impact of these methods of material processing, modern researchers are studying the application of various types of loading, further processing, as well as the study of changes in the surface and internal structure of objects obtained using these methods. Previously, it was proved that with a decrease in the grain size, the pore sizes of the material, formed during static tension at room temperature, decrease: the coarse-grained state corresponds to pores with a size of 3–7 μm , and for the ultrafine-grained state, 1–2 μm . In this paper, this study is supplemented by a new result: the type of heat treatment of coarse-grained material (natural aging) entails the formation of pores throughout the entire loading area of the material, in contrast to artificially aged coarse-grained material or material with an ultrafine-grained structure, where the pores are located near the fracture area.

KEYWORDS

Al 6101; static loading; mechanical properties; UFG material; nanostructure; pore formation; ECAP-C.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВА AL 6101 НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОР ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ КАК НА СТРУКТУРНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИИ*Дарья Курбановна Магомедова*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28
magmedva.dasha@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Исследовано влияние структуры материала (крупно- и мелкозернистой) на образование пор при статическом нагружении при комнатной температуре как на структурное изменение в процессе деформации. Для улучшения свойств металлических материалов применяют методы термозакалки и старения, а также методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Эти

методы интересны глубоким изменением структуры физико-механических свойств и фазового состава. Чтобы оценить влияние данных методов обработки материала, современными исследователями изучается применение различных видов нагружения, дальнейшей обработки, а также изучение изменения поверхностной и внутренней структуры объектов, полученных с помощью данных методов. Ранее было доказано, что при уменьшении размера зерна уменьшаются размеры пор материала, образованные при статическом растяжении при комнатной температуре: крупнозернистому состоянию соответствуют поры размером 3–7 мкм, для ультрамелкозернистого состояния – 1–2 мкм. В данной работе это исследование дополнено новым результатом: тип термической обработки крупнозернистого материала (естественное старение) влечет образование пор по всей области нагружения материала, в отличие от искусственно-состаренного крупнозернистого материала или материала с ультрамелкозернистой структурой, где поры располагаются вблизи области разрушения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Al 6101; статическое нагружение; механические свойства; УМЗ материал; наноструктура; порообразование; РКУП-К.

Введение

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Si [1, 3], применяемые в промышленности, отличаются высоким уровнем технических характеристик после проведения упрочняющей термической обработки (заковки и старения) [1–5]; к числу сплавов этого состава относится сплав марки 6101. Чистый алюминий имеет малую прочность и не может быть использован в качестве конструкционного материала [2, 4]. Однако прочность его резко возрастает под влиянием добавок других элементов, термической и механической обработки. Для улучшения свойств металлических материалов применяют методы термозаковки и старения, а также методы ИПД, к которым относится метод РКУП-конформ [5, 7–10, 14, 17]. Эти методы интересны глубоким изменением структуры, физико-механических свойств и фазового состава. Главное достоинство этих методов – приобретение после их применения материалом многократного увеличения прочностных характеристик с сохранением высоких показателей пластичности [15, 18, 20].

1. Материал и методы исследования

В качестве материала исследования был выбран технический термоупрочняемый

алюминиевый сплав 6101, который относится к системе Al-Mg-Si, из которого на станках ЧПУ изготавливались цилиндрические образцы, общий вид которых представлен на рис. 1 [11, 12].

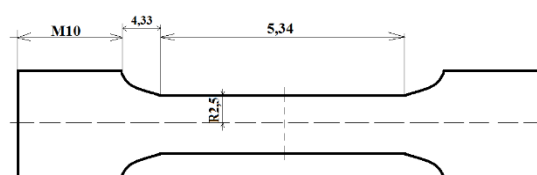


Рис. 1. Общий вид образца

Fig. 1. General form of a specimen

Рассматривалось три способа обработки данного сплава, которые повышают его прочностные свойства:

1) *естественное старение* (ЕС) – отжиг при температуре 550 °С 2 часа с последующей закалкой в воде комнатной температуры, далее на протяжении 6 суток материал естественно упрочнялся;

2) *искусственное старение* (ИС) – отжиг при температуре 550 °С 2 часа с последующей закалкой в воде комнатной температуры, далее на протяжении 12 часов материал подвергался старению путем отжига при температуре 170 °С;

3) *обработка РКУП-конформ для получения УМЗ состояния* – прутки исходным диа-

метром 10 мм подвергались РКУП-конформ по следующим режимам: отжиг 550 °С на 2 часа, закалка в воде комнатной температуры, и сразу проводилось 4 цикла РКУП-конформ при комнатной температуре по маршруту Вс, угол сопряжения каналов 130° [17].

Механические испытания на растяжение проводились с целью определения качественных и эксплуатационных характеристик материала, в частности, прочности и пластичности [5, 8, 11, 12, 14, 17, 20].

В данной работе исследование посвящено влиянию микроструктуры на образование пор, где образование пор рассматривается как определение первого этапа процесса разрушения: сначала образуются поры, далее они сливаются, образуя трещины, и только потом происходит слияние трещин и разделение материала на части (разрушение) [11, 12].

Для этого разрушенные образцы, т.е. каждый исходный образец уже представлял собой 2 разделенные части, разрезались вдоль оси на электро-эрозионном станке ARTA 123-PRO с прецизионной точностью 1–2 мкм. Также отрезалась часть, соответствующая области захвата, т.е. рассматривалась рабочая часть образца (длиной 5–7 мм). Далее поверхность среза шлифовалась и полирова-

лась до шероховатости поверхности в 50 нм. Т.е. в данном случае представляла интерес структура материала, но уже внутри самого излома. Структура поверхности осевого сечения образцов исследовалась с помощью электронной микроскопии.

2. Результаты исследования

Структура поверхности осевого сечения образцов исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), которая осуществлялась на электронном микроскопе Zeiss Supra 40VP с применением режима secondary electrons (SEI).

В более ранних работах было представлено, что размерам крупнозернистого состояния соответствуют поры размером 3–7 мкм, для УМЗ – 1–2 мкм [11, 12].

В данной работе представлены сведения о том, что было выявлено влияние структуры на пористость материала при статическом разрушении, т.е. были не просто зафиксированы и измерены поры, образованные при статическом растяжении, но и показана наглядная зависимость изменения структуры в одном случае.

На рис. 2 представлены снимки поверхности осевого среза разрушенных образцов с различными структурами.

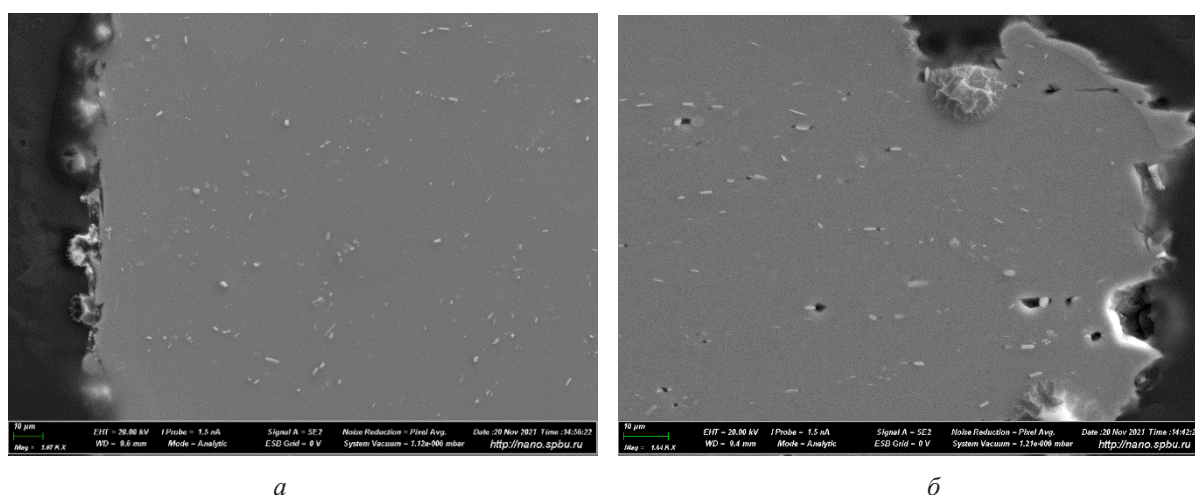


Рис. 2. Снимок осевого среза образцов с ИС структурой в области:
а – среза по границе рабочей части; б – разрушения

Fig. 2. Image of an axial cut of samples with CG-AA structure in the area:
а – a cut along the border of the working part; б – destruction

Как видно из рис. 2, образованные при растяжении поры располагаются вблизи области разрушения. В целом, это закономерно и соответствует исследованиям процессов статического разрушения в металлах.

Общая картина расположения пор в УМЗ материале соответствует картине с ИС струк-

турой (рис. 3), т.е. по границе среза рабочей части поры не выявлены, в отличие от области разрушения, где наличие пор легко фиксируется.

Совершенно иная картина наблюдается для образцов с ЕС структурой, представленной на рис. 4.

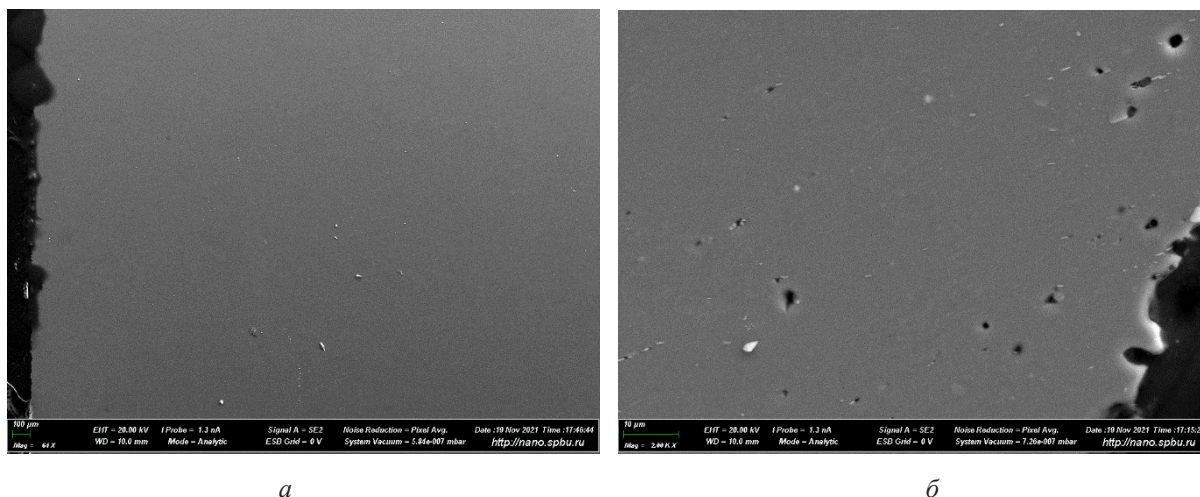


Рис. 3. Снимок осевого среза образцов с УМЗ структурой в области:
а – среза по границе рабочей части; *б* – разрушения

Fig. 3. Image of an axial cut of samples with UFG-ECAP structure in the area:
a – a cut along the border of the working part; *b* – destruction

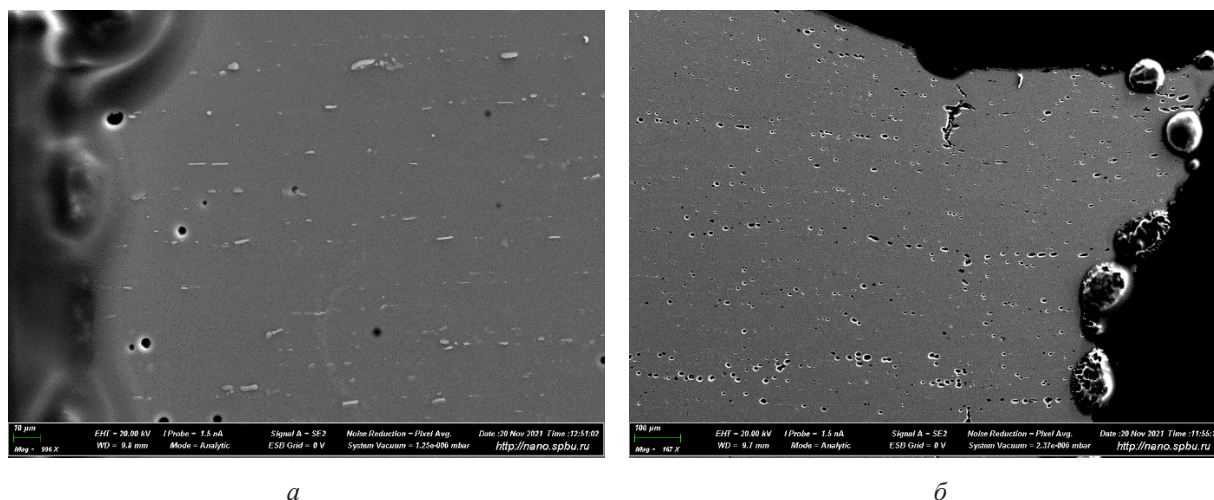


Рис. 4. Снимок осевого среза образцов с ЕС структурой в области:
а – среза по границе рабочей части; *б* – разрушения

Fig. 4. Image of an axial cut of samples with CG-NA structure in the area:
a – a cut along the border of the working part; *b* – destruction

В случае ЕС структуры можно наблюдать наличие пор, образованных при растяжении, по всей рабочей части образца. Также можно утверждать, что вся структура рабочей части образца имеет гораздо более пористую структуру. Это объясняется тем, что критические напряжения, соответствующие ЕС структуре материала, гораздо ниже критических напряжений для ИС и УМЗ структуры [11, 12].

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что сплав Al 6101 показывает более высокую прочность при предварительном измельчении зеренной структуры методом РКУП. Тип старения для крупнозернистого сплава не влияет на размер пор.

Также можно сделать вывод, что для применения в промышленности конструкций из данного материала следует учитывать изменения в структуре по всей области применения нагрузок именно в материалах, полученных с помощью естественного старения, в отличие от материалов с ИС и УМЗ структурой.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает благодарность Междисциплинарному ресурсному центру нанотехнологий СПбГУ и Ресурсному центру прикладной аэродинамики СПбГУ.

The author thank the Interdisciplinary Resource Centre for Nanotechnology of SPbU and the Resource Centre for Applied Aerodynamics of SPbU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev R. Z., Alexandrov I. V. Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation. Moscow: Logos Pub., 2000. 272 p.
2. Karabay S. 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-aluminium alloy conductors / Materials & Design 2006. V. 27, Iss. 10. P. 821–832. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.06.005.
3. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity / M. Yu. Murashkin et al. // Journal of Materials Science. 2016. V. 51, Iss. 1. P. 33–49. DOI: 10.1007/s10853-015-9354-9.
4. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultra-fine grained Al alloy processed via ECAP-PC / M. Yu. Murashkin et al. // Journal of Materials Science. 2013. V. 48, Iss. 13. P. 4501–4509. DOI: 10.1007/s10853-013-7279-8.
5. Mondolfo L. F. Aluminum alloys: structure and properties. Boston: Butterworths, 1979. P. 982.
6. Fatigue properties of ultra-fine grained Al-Mg-Si wires with enhanced mechanical strength and electrical conductivity / A. Medvedev et al. // Metals. 2018. V. 8, Iss. 12. Article number 1034. DOI: 10.3390/met8121034.
7. Vinogradov A. Y., Khasimoto S. Fatigue in ultra-fine-grained materials processed by equal-channel angular pressing / Russ. Metall. 2004. No. 1. P. 42–51.
8. Influence of morphology of intermetallic particles on the microstructure and properties evolution in severely deformed Al-Fe alloys / A. Medvedev et al. // Metals. 2021. V. 11, Iss. 5. Article number 815. DOI: 10.3390/met11050815.
9. 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. P. 815–824. DOI: 10.1007/BF02672305.
10. Sabirov I., Murashkin M. Yu., Valiev R. Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development // Materials Science and Engineering: A. 2013. V. 560. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.020.
11. 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. V. 1959. Article number 070021. DOI: 10.1063/1.5034696.
12. Magomedova D. K., Murashkin M. Yu. Influence of grain size and second phase particles on the process of void initiation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 991. Article number 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/991/1/012055.
13. Valiev R. Z., Murashkin M. Y., Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity // Scripta Materialia. 2014. V. 76. P. 13–16. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.12.002.
14. Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of Al-Mg-Si system / E. V. Bobruk et al. // Reviews on Advanced Materials Science. 2012. V. 31, No. 2. P. 109–115.

15. Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAP-conform processing and drawing / D. V. Gunderov et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. V. 562. P. 128–136. DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.007.

16. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation / R. Z. Valiev et al. // *JOM*. 2006. V. 58, No. 4. P. 33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7.

17. 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.

18. Enhancement of catalytic activity and oxidative ability for graphitic carbon nitride / G. Lin et al. // *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. V. 650. P. 210–217. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2016.06.001.

19. Architected hybrid conductors: Aluminium with embedded copper helix / R. Lapovok et al. // *Materials & Design*. 2020. V. 187. Article number 108398. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108398.

20. European Standard, EN 50183. Overhead Power Line Conductors – Bare Conductors of Aluminium Alloy with Magnesium and Silicon Content. CEN: Bruxelles, Belgium, 2002.