

Структура и свойства алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ

Э. И. Фахретдинова^{1†}, Е. В. Бобрук^{1,2}, Г. Ю. Сагитова¹, Г. И. Рааб^{1,3}

[†]yelka89@mail.ru

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса 12, Уфа, 450000, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504, Россия

³Казанский Федеральный Университет, ул. Кремлевская 35, Казань, 420008, Россия

Исследована микроструктура, а также определены механические и электрические свойства заготовки сплава системы Al-Mg-Si после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ. Основной особенностью данного метода является совмещение двух разновидностей равноканального углового прессования (РКУП): метода РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК) и непрерывного процесса РКУП по схеме Конформ (РКУП-К). За один цикл обработки заготовки методом Мульти-РКУП-Конформ обеспечивается истинная деформация $e > 2,5$. Установлено, что один цикл обработки заготовки алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si методом Мульти-РКУП-Конформ позволяет сформировать в ней смешанную структуру, образованную преимущественно вытянутыми в направлении сдвиговой деформации субзернами. В структуре также отмечено формирование отдельных участков, содержащих равноосные зерна со средним размером 460 нм. Показано, что измельчение алюминиевой матрицы сопровождается образованием наноразмерных частиц вторичной упрочняющей фазы Mg_2Si . В результате обработки заготовок алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si методом Мульти-РКУП-Конформ условный предел текучести (σ_B) увеличились с 120 и 180 МПа до 221 и 243 МПа, а электрическая проводимость (IACS) повысилась с 51.3 до 54.3% по сравнению с состоянием поставки (T1).

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, алюминиевые сплавы, электропроводность, прочность, структура, динамическое старение

Structure and properties of aluminum alloy system Al-Mg-Si after processing by the method of Multi-ECAP-Conform

E.I. Fakhretdinova^{1†}, E.V. Bobruk^{1,2}, G.Yu. Sagitova¹, G.I. Raab^{1,3}

¹Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russia

²Saint Petersburg State University, 28 Universitetsky pr., Peterhof, Saint Petersburg, 198504, Russia

³Kazan Federal University, 35, Kremlevskay, Kazan, 420008, Russia

The microstructure of a billet from the Al-Mg-Si system after processing by the method of Multi-ECAP-Conform was investigated and its mechanical and electrical properties were defined. The main feature of this method is the combination of two techniques of equal channel angular pressing (ECAP): pressing with parallel channels (ECAP-PC) and continuous pressing according to the Conform scheme (ECAP-Conform). The level of true strain $e > 2.5$ is achieved for one cycle of processing of the billet by the method of Multi-ECAP-Conform. It was revealed that one processing cycle of an aluminum alloy billet of the Al-Mg-Si system by the Multi-pressing-Conform technique allows to form a mixed structure with the subgrains, dominantly elongated along the direction of shear deformation. Formation of separate zones, having equiaxed grains with an average size of 460 nm is observed in the structure. It was shown that the refinement of the aluminum matrix is accompanied with the formation of nanosized particles of secondary hardening phase of Mg_2Si . Evaluation of properties of the aluminum alloy after processing of a billet by the method of Multi-ECAP-Conform was made. It was revealed that as a results of formation of the UFG structure (cold work and disperse hardening) the conventional yield stress (YS) and tensile strength (UTS) increased from 120 and 180 MPa to 221 and 243 MPa and the electrical conductivity (IACS) increased from 51.3 to 54.3% in comparison with the as-received condition (T1).

Keywords: severe plastic deformation, aluminium alloys, electrical conductivity, strength, dynamic aging

Введение

В настоящее время провода для высоковольтных линий электропередач и самонесущие изолированные провода производят преимущественно из алюминия и сплавов на его основе [1]. Известно, что для продукции электротехнического назначения наиболее важными характеристиками являются прочность, пластичность и электропроводность [2]. Обеспечение условий одновременного увеличения указанных характеристик алюминиевых сплавов является важной задачей, которая, как было показано, например, в работах [3–5], может быть решена за счет придания проводниковым материалам ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с использованием методов интенсивной пластической деформации (ИПД).

Наиболее распространенным методом ИПД, используемым для получения металлов и сплавов с УМЗ структурой, является равноканальное угловое прессование (РКУП). На его основе в последнее время разработано несколько модифицированных методов, например, таких как РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК) и РКУП по схеме «Конформ» (РКУП-К) [6,7]. Эти методы направлены на устранение недостатков, присущих классическому методу РКУП, как-то необходимость многократного повторения циклов обработки материала/заготовки, ограниченный размер (как правило — длина) заготовки и низкий коэффициент использования материала (КИМ). Однако даже метод РКУП-К, обеспечивающий высокий КИМ, имеет ряд недостатков, связанных, прежде всего с необходимостью применения многоциклового обработки, что обуславливает повышенную трудоемкость процесса и увеличивает издержки на энергозатраты. В этой связи, был разработан новый метод ИПД — Мульти-РКУП-Конформ. Основной особенностью этого метода является совмещение метода РКУП-ПК и непрерывного процесса РКУП-К. За счет такого совмещения один цикл обработки обеспечивает достижение истинной деформации заготовки $\epsilon > 2,5$. Таким образом, использование метода Мульти-РКУП-Конформ, наряду с высоким значением КИМ, дает возможность исключить многоцикловую обработку заготовок или сократить их до минимума.

В данной работе рассмотрено влияние обработки Мульти-РКУП-Конформ на микроструктуру, уровень механических и электрических свойств алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si электротехнического назначения.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали термически упрочняемый сплав системы Al-Mg-Si типа АВЕ [2] следующего химического состава: Al-0.58Mg-0.54Si-0.003Cu-0.2Fe-0.1Zn (масс. %). Выбор данного материала обусловлен тем, что он используется в электротехнике для производства токопроводящих жил и кабелей. В качестве исходной заготовки использовали катанку диаметром 12 мм. Она была получена методом

непрерывного литья и прокатки на литейно-прокатных агрегатах фирмы PROPERZI (Италия) [1].

Для обработки ИПД исходных заготовок использовали экспериментальную установку Мульти-РКУП-Конформ, разработанную и изготовленную в НИИ ФПМ УГАТУ [8]. Процесс обработки этим методом реализуется следующим образом (рис.1а): металлическую заготовку 1 в виде прутка подвергают непрерывному угловому прессованию путем подачи ее на вход рабочего канала, образованного между вращающимся валком 2 с П-образной гравюрой и неподвижной ограничивающей основой (матрицей) 3, окружающей вращающийся валок и покрывающей часть длины канавки. Посредством вращения валка 2 и возникающих между гравюрой и заготовкой 1 сил трения обеспечивается продвижение заготовки через рабочий канал в направлении к выпускному отверстию в матрице 3.

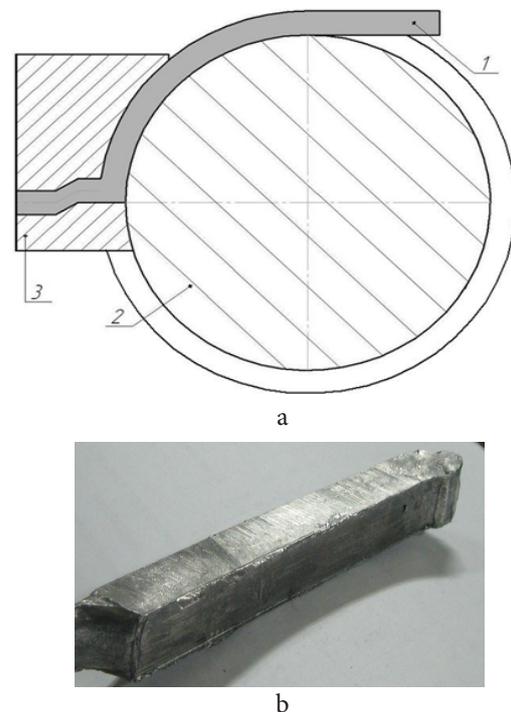


Рис. 1. Схема процесса Мульти-РКУП-Конформ (а): 1- заготовка, 2-колесо, 3- матрица; заготовка после обработки методом Мульти-РКУП-Конформ (б).

Fig. 1. Schematic illustration of the Multi-ECAP-Conform process (а): 1-billet, 2-wheel, 3- die; a billet processed by Multi-ECAP-Conform (b).

Исходные заготовки диаметром 12 мм и длиной до 200 мм подвергались термомеханической обработке, включающей отжиг при температуре 550°C в течение двух часов с последующим охлаждением в воду, и одному циклу обработки в экспериментальной установке Мульти-РКУП-Конформ при температуре 170°C.

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры заготовок сплава проводили на просвечивающем микроскопе JEM-2100 при ускоряющем напряжении 120 кВ. Средний размер структурных элементов определяли путем измерения размеров не менее 200 зе-

рен/частиц с помощью программы Grain-Size.

Измерения твердости были проведены на твердомере Duramin-2 по методу Виккерса (Hv) по 10 замеров при нагрузке 0.1 Н и длительности выдержки под нагрузкой 10 сек. В качестве индентора использовали четырехгранную алмазную пирамидку.

Статические испытания на растяжение цилиндрических образцов с рабочей частью $\text{Ø}3 \times 15$ мм проводили на универсальном динамометре Instron 8862 в соответствии с ГОСТ 1497—84. Характеристики прочности и пластичности материала определяли при растяжении образцов при комнатной температуре со скоростью деформации 1 мм/с.

Удельное электрическое сопротивление определяли согласно ГОСТ 7229—76 и ГОСТ 12177—79 с помощью испытательного оборудования, включающего психрометр аспирационный МВ - 4М (погрешность $\pm 2\%$), барометр — aneroid БАММ - 1 (цена деления $0,1 \times 10^3$ Па) и микроомметр БСЗ (класс точности 0,1).

Результаты исследования и их обсуждение

Электронно-микроскопический анализ показал, что в результате одного цикла Мульти-РКУП-Конформ формируется структура смешанного типа, образованная преимущественно вытянутой в направлении сдвиговой деформации субструктурой (рис.2а,б). Также отмечено формирование отдельных участков (объемная доля которых составляет примерно 30%), содержащих равноосные зерна с размером 460 ± 20 нм (рис.2с). Ранее в работах [6,9—12] было показано, что формирование структуры во время 2—4 цикла обработки ИПД в термически-упрочняемых сплавах системы Al-Mg-Si происходит за счет фрагментации исходных зерен, образования поперечных субграниц.

Также установлено, что в сплаве образуются наноразмерные выделения глобулярной формы вторичной упрочняющей фазы Mg_2Si со средним размером 20 нм (рис.2д). Как показано авторами работ, посвященных исследованиям распада твердого раствора в процессе ИПД, в сплавах этой системы наличие данной фазы свидетельствует о том, что формирование УМЗ структур сопровождается динамическим старением [3,4,6,9—12].

Твердость (HV) заготовок алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si в исходном закаленном состоянии составила 45 ± 3 HV. Формирование в материале смешанной структуры в результате обработки методом Мульти-РКУП-Конформ привело к повышению твердости до 91 ± 7 HV. Распределение твердости вдоль оси заготовки свидетельствует об однородности сформированной в процессе ИПД структуры (рис.3).

Результаты механических испытаний образцов после обработки ИПД представлены в табл.1. Для корректного сопоставления уровня свойств в таблице приведены значения после стандартной обработки T1 (T1 — закаленное+искусственно состаренное на максимальную прочность состояние алюминиевого сплава [13]). Полученные значения прочности хорошо согласуются с изменениями твердости. Максимальные значения условного

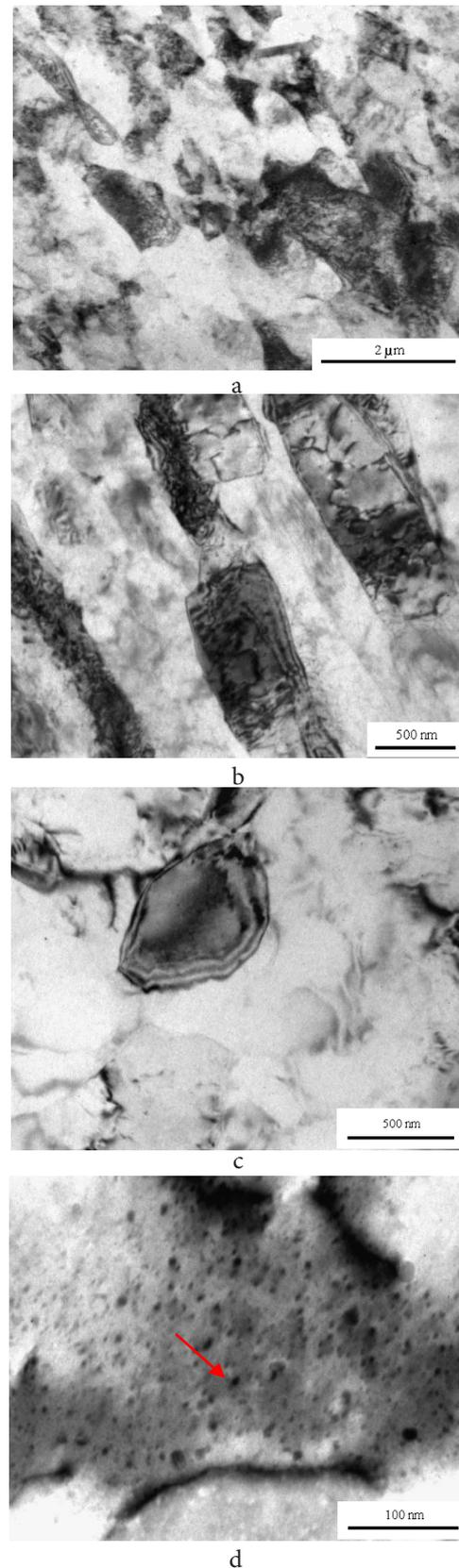


Рис. 2. Микроструктура алюминиевого сплава Al-Mg-Si после одного цикла обработки методом Мульти-РКУП-Конформ (а-с), наноразмерные выделения вторичной упрочняющей фазы Mg_2Si (д) (стрелкой указаны выделения Mg_2Si глобулярной формы).

Fig. 2. Microstructure of the Al-Mg-Si aluminum alloy after one cycle of processing by Multi-ECAP-Conform (a-c), nano-sized precipitates of the Mg_2Si secondary strengthening phase (d) (the arrow indicate Mg_2Si precipitates of the globular shape).

Таблица 1 – Механические и функциональные свойства алюминиевого сплава

Table 1 – Mechanical and functional properties of the aluminum alloy

Режим обработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ρ , Ом·мм ² /м	IACS**, %	HV
Processing regime	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ρ , Ohm·mm ² /m	IACS**, %	HV
Состояние поставки*/As-received*	180±4	120±3	30.0±1.0	0.0336	51.3±0.5	84±8
T1*	170±2	-	15.0±1.5	0.0350	49.2±0.5	80±8
Multi-ECAP-Conform	243±4	221±2	11.5±1.0	0.0386	54.3±0.5	91±9

*Данные из сертификата ТУ 16-705.493-2006/*Data from the certificate TU 16-705.493-2006

IACS - электропроводность согласно международному стандарту/IACS - electrical conductivity in accordance with the international standard

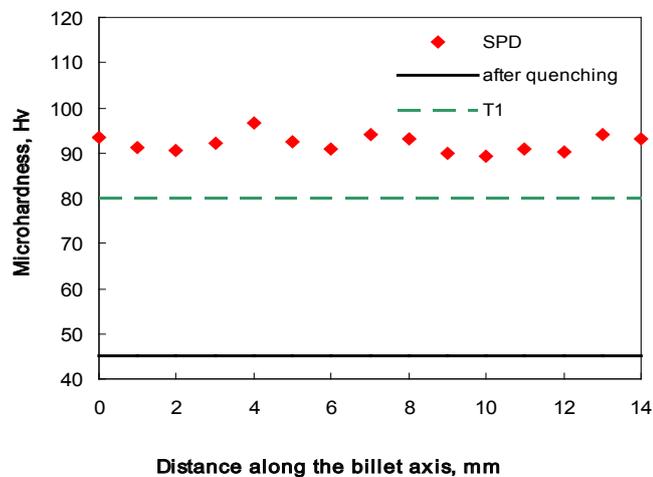


Рис. 3. Распределение твердости вдоль оси заготовки после обработки ИПД.

Fig. 3. Hardness distribution along the billet axis after SPD processing.

предела текучести и временного сопротивления достигнуты после обработки ИПД, которые соответственно на 84 и 35% выше значений в исходном состоянии.

Анализируя полученные значения удельной электрической проводимости, можно сделать вывод, что использование метода Мульти РКУП-Конформ позволяет получать пилотные образцы из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si с повышенными значениями электропроводности при достижении высоких значений прочности уже после одного цикла обработки (табл.1). Повышенные значения электропроводности, согласно работам [10—12], обеспечиваются за счет обеднения матрицы алюминиевого твердого раствора легирующими элементами и формирования наноразмерных выделений упрочняющей фазы.

Таким образом, проведенные исследования структуры и механических свойств алюминиевого сплава, подвергнутого ИПД — Мульти-РКУП-Конформ, позволили установить, что новый метод является весьма эффективным для повышения механических и электрических свойств алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si, что весьма привлекательно для его будущего применения.

Выводы

Установлено, что новый метод ИПД — Мульти-РКУП-Конформ позволяет сформировать в алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Si смешанную структуру. Отмечено формирование отдельных участков, содержащих равноосные зерна со средним размером 460 нм и субзерна, вытянутые в направлении сдвиговой деформации. Формирование такой структуры сопровождается распадом твердого раствора, в ходе которого образуются наноразмерные частицы упрочняющей фазы Mg₂Si с средним размером 20 нм.

Формирование смешанной структуры, сопровождающееся выделением вторичной упрочняющей наноразмерной фазы Mg₂Si, обеспечивает одновременное повышение прочности и электропроводности материала на 35% и 3% соответственно, по сравнению с состоянием поставки (T1).

Благодарности. Исследование микроструктуры и электропроводности было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01062) в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Исследование механических свойств и микротвердости было выполнено при поддержке проекта Российского фонда фундаментальных исследований №14-08-31301/14 мол_а.

Acknowledgements. The study of the microstructure and electrical conductivity was performed at Ufa State Aviation Technical University under support from a grant of the Russian Science Foundation (project No. 14-19-01062).

The study of the mechanical properties and microhardness was supported under the Russian foundation for basic research project No. 14-08-31301/14 mol_a.

Литература / References

1. D. I. Belyi. Aluminum alloys for electric conductors used

- in cable products. *Kabeli i Provoda (Cables and Wires)*. (in Russian) [Д.И. Белый. Кабели и провода. **1**, (332), 8—15 (2012).]
2. L. A. Vorontsova, V. V. Maslov, I. B. Peshkov. Aluminum and aluminum-based alloys in electrical products. Moscow. *Energiya* (1971) 224 p. (in Russian) [Л. А. Воронцова, В. В. Маслов, И. Б. Пешков. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. М. Энергия. (1971) 224 с.]
 3. M. Yu. Murashkin, I. Sabirov, V. U. Kazykhanov. *Journal of Materials Science*. **48**, 4501—4509 (2013). DOI 10.1007/s10853-013-7279-8
 4. I. Sabirov, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev. *Materials Science & Engineering A*. **560**, 1—24 (2013).
 5. I. V. Aleksandrov, R. G. Chembarisova, V. D. Sitdikov, G. I. Raab, V. U. Kazykhanov. *The Physics of Metals and Metallography*. **104** (3), 306—314 (2007).
 6. R. Valiev, M. Murashkin, E. Bobruk, G. Raab. *Mat. Trans.* **50** (1) 87—91 (2009).
 7. Georgy J. Raab, Ruslan Z. Valiev, Terry C. Lowe, Yuntian T. Zhu. *Materials Science and Engineering A*. **382**, 30—34 (2004).
 8. Patent applicaton No. 2013156136 dated 17.12.2013. Method of continuous equal-channel angular pressing of metallic rod-shaped billets. G. I. Raab, E. I. Fakhretdinova, V. M. Kapitonov, R. Z. Valiev [Заявка на изобретение №2013156136 от 17.12.2013. Способ непрерывного равноканального углового прессования металлических заготовок в виде прутка. Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, В.М. Капитонов, Р.З. Валиев.]
 9. M. Y. Murashkin, E. V. Bobruk, A. R. Kil'mametov, R. Z. Valiev. Structure and mechanical properties of aluminum alloy 6061 subjected to equal-channel angular pressing in parallel channels. *The Physics of Metals and Metallography*. **108** (4), 415—423 (2009). (in Russian) [М. Ю. Мурашкин, Е. В. Бобрук, А. Р. Кильмаметов, Р. З. Валиев. Физика металлов и металловедение. **108** (4), 415—423 (2009).]
 10. M. V. Markushev, M. Yu. Murashkin. *Materials Science and Engineering A*. **367** (1-2), 234—242 (2004).
 11. E Bobruk, I Sabirov, V Kazykhanov, R Valiev and M Murashkin. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 63012116 (2014).
 12. I. Sabirov, M. T. Perez-Prado, M. Murashkin, J. M. Molina-Aldareguia, E. V. Bobruk, N. F. Yunusova, R. Z. Valiev. *International Journal Material Forming*. **3** (1), 411—414 (2010).
 13. TU 16—705.493—2006 Rods from aluminum alloys. Technical specificatons (in Russian). [ТУ 16—705.493—2006. Катанка из алюминиевого сплава. Технические условия.]