

S. N. Lezhnev, I. E. Volokitina

Karaganda state industrial university, Temirtau, Kazakhstan.
E-mail: irinka.vav@mail.ru

EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE OF A COMPOSITE ALLOY ON THE BASIS OF ALUMINUM AT ECAP

Abstract. In this article it is shown that, silumins belong to non-deformable foundry alloys, ECAP at 500°C showed the possibility of its plastic deformation up to 3 passes. But already after three passes of deformation of silumin AK9, modified by a ligature, containing nanostructured carbon in the form of fullerene black, significant refinement of the structure occurs, compared with the original one. Also the use of the ECAP allowed to achieve crushing of inclusions of silicon, which have technological heredity and are not subjected to plastic deformation.

Thus, increased strength characteristics of composites and the achieved level of plasticity at their modification by nanostructured carbon, and also due to ECAP, allow to use them for the purpose of obtaining blanks for the production of critical parts of machine building. Obtained properties, in a greater degree, are provided due to the dispersion of all structural components and the uniform distribution of the reinforcing agent in the form of nanostructured carbon.

Keywords: aluminum, ECAP, microstructure, mechanical properties, composite alloy.

УДК 621.771

С. Н. Лежнев, И. Е. Волокитина

Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ПРИ РКУП

Аннотация. В статье показано, что, несмотря на то, что силумины относятся к недеформируемым литейным сплавам, РКУП при 500°C показал возможность его пластического деформирования до 3 проходов. Но уже после трех проходах деформирования силумина АК9 модифицированного лигатурой, содержащей наноструктурированный углерод в виде фуллереновой черни происходит существенное измельчение структуры, по сравнению с исходной. Также применение РКУП позволило добиться дробления включений кремния, которые имеют технологическую наследственность и не подвергаются пластической деформации.

Таким образом, повышенные прочностные характеристики композитов и достигаемый уровень пластичности при их модифицировании наноструктурированным углеродом, а так же за счет РКУП, позволяют использовать их с целью получения заготовок для производства ответственных деталей машиностроения. Полученные свойства в большей степени обеспечиваются за счет диспергирования всех структурных составляющих и равномерного распределения упрочнителя в виде наноструктурированного углерода.

Ключевые слова: алюминий, РКУП, микроструктура, механические свойства, композиционный сплав.

Введение. Необходимость создания новых композиционных алюминиевых материалов и технологий их получения продиктована как получением конкурентоспособной продукции, так и ситуацией постепенного истощения природного элитного сырья, его удорожания. Наиболее дешевыми и надежными являются материалы на основе алюминиевых сплавов, подвергнутых модифицированию и армированию тугоплавкими дисперсными частицами. Среди отличительных свойств таких материалов можно выделить высокие антифрикционные и прочностные свойства,

жаропрочность, жесткость, малую плотность, которые обеспечивают существенное снижение массы изделий и конструкций, уменьшают расход материала на изделие с одновременным повышением надежности и увеличением ресурса их работы [1-3]. Формирование же нано- и субмикроструктур в таком материале приведет к значительному улучшению свойств. Простым и эффективным путем измельчения структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД)[4-6]. Методы ИПД открывают широкие перспективы в управлении свойствами и в формировании структуры материалов. С помощью одного из методов ИПД - равноканального углового прессования (РКУП), возможно объемное наноструктурирование, т.е. получение заготовок с заданной по всему объему структурой [7-10].

Однако на сегодняшний день получение изделий из материалов с наноструктурой в объемах промышленного производства остается трудновыполнимой задачей [11, 12]. Использование таких материалов в металлургической промышленности ограничено слабым знанием их полного комплекса механических и эксплуатационных свойств. Несмотря на большое число публикаций по тематике, связанной с исследованием структуры и свойств таких металлов [13-17], отмечается, что в настоящее время не существует строгого формального описания изменения их строения и свойств при ИПД, до сих пор недостаточно изученными остаются процессы и механизмы их формирования [18-20].

Поэтому задачей настоящих исследований является повышение износостойкости изделий из силуминов и их прочности за счет измельчения структуры материала путем модифицирования и последующей пластической деформации и термообработке.

Материал и методика исследования. В соответствии с задачей исследования изучалась возможность замены при создании новых материалов дорогостоящего фуллерена на более дешевый фуллеренсодержащий материал. Для получения разрабатываемых композитов использовалась литейно-деформационная технология (технология *in-suit*), включающая смешивание порошковых компонентов шихты и проведение механоактивации полученной смеси, экструдирования шихты с получением лигатуры и получение композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы при литье.

При проведении экспериментальных исследований для разработки сплавов применяли промышленный доэвтектический силумин АК9 (ГОСТ 1583-93). Выбор данного материала обусловлен доступностью, наличием хорошо развитых промышленных мощностей с их использованием в нашей стране, что облегчает внедрение и не требует дополнительного нового оборудования. Кроме того, наличие большого объема отходов (стружки), образующихся при обработке изделий, изготовленных из данных материалов, дает возможность использовать не только литейно-деформационную, но и порошковую технологии производства композитов на их основе.

Модифицирование и одновременное упрочнение сплава АК9 осуществляли наноструктурированным углеродом. В качестве модификатора использовали фуллереновую сажу, фуллереновую чернь, а также для сравнения фуллерен C_{60} и микрокристаллический графит.

Основные структурные составляющие в литом состоянии сплава АК9+С – это дендриты твердого раствора алюминия (α -фаза) и алюминиево-кремниевая эвтектика. Для стабилизации структуры подвергнем полученные заготовки отжигу. Учитывая, что отжиг обеспечивает выделение и коагуляцию равновесной фазы, деформирование отожженного сплава рекомендовано проводить при комнатной температуре, так как сплав будет обладать при этом достаточной пластичностью.

Известно также, что для некоторых силуминов рекомендуется проведение в качестве начальной термической подготовки сплава перед деформированием закалки, поэтому решено исследовать микроструктуру сплава и после закалки.

Поэтому для сплава АК9+С проведем две основные термические операции отжиг и закалку, температуры которых приведены в таблице 2.

После предварительной термической обработки образцы квадратного сечения 15x15x70мм подвергались РКУП в равноканальной ступенчатой матрице с углом стыка каналов 125° [21] по маршруту Вс с кантовкой заготовки на 90° вокруг продольной оси [22]. Эксперимент проводился на кривошипном горячештамповочном одностоечном прессе усилием 1000 кН модели ПБ 6330-02 при температурах 25°C, 500°C.

Все продеформированные заготовки после РКУП были промаркированы. Затем проводили металлографический анализ всех образцов в поперечном и продольном сечениях с использованием световой и сканирующей микроскопии. Оценивали механические свойства алюминия при испытаниях на микротвердость и на растяжение. Все образцы исследовали в их средней плоскости, чтобы избежать влияния периферийных областей. Подготовку шлифов для металлографического анализа осуществляли по стандартной методике. Исследования проводили на световом микроскопе Leica оборудованном микротвердомером с помощью которого измеряли микротвердость алюминия по Викерсу.

Результаты исследований. В работе [23] показано, что все полученные композиты системы Al-C имеют модифицированную структуру металлической основы с дисперсно распределенными включениями интерметаллидов. Так как проведенные результаты исследования не выявили принципиальных отличий в структурообразовании алюминиевых композитов, полученных с использованием дорогостоящих фуллеренов, в сравнении с композитами, полученными с использованием дешевых нанокремниевых материалов (фуллереновая сажа, фуллереновая чернь). А результаты исследования механических свойств выявили несущественные, но преимущества доэвтектического силумина АК9 модифицированный лигатурой, содержащей наноструктурированный углерод в виде фуллереновой черни и синтезированные частицы стеклокремниевидного углерода, образовавшиеся в процессе получения лигатуры. То дальнейшие исследования по изучению влияния процесса прессования алюминиевого композита в равноканальной ступенчатой матрице на механические свойства и структуру будем осуществлять именно для данного композита.

С целью устранения ликвации и выравнивания химического состава по сечению образца исследуемые образцы были подвергнуты отжигу и закалке. Исходная и полученная микроструктуры приведены на рисунке 1. Анализ макроструктуры показал, что на поверхности шлифа идентифицируется небольшое количество углеродных включений. При этом уменьшение количества углеродных включений в свободном состоянии в образцах композитов, видимо может быть объяснено расходом части нанокремниевидного материала, как более реакционно способного, на образование структурных составляющих с компонентами сплава, возможно карбидов, что может давать основание сделать предположение об увеличении степени усвоения углеродных частиц расплавом при использовании углеродсодержащего сырья ультрадисперсного состояния.

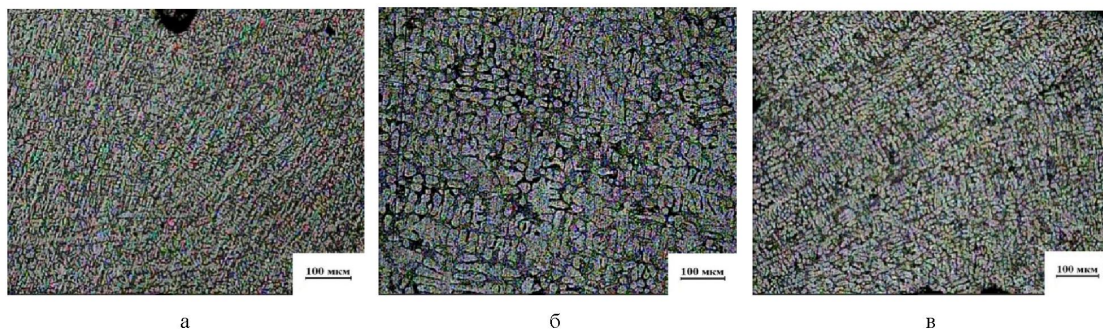


Рисунок 1 – Оптические фотографии микроструктуры сплава АК9+С после предварительной термической обработки:
а – исходная, средний диаметр зерна 11 мкм; б – отжиг, средний диаметр зерна 22 мкм,
в – закалка, средний диаметр зерна 13 мкм

Анализируя микроструктуру сплава АК9+С после модифицирования сплава АК9 (рисунок 1а), было выявлено, что кристаллы эвтектического кремния измельчились в 4 раза, а ширина дендритов алюминиевой α -фазы уменьшилась в 3–3,5 раза. Вышеприведенные результаты исследований процессов структурообразования композитов на основе алюминиевой матрицы, полученных с использованием нанокремниевых материалов, дают основание предположить, что аморфная, подобная стеклокремниевидной составляющая структуры лигатур при введении в расплав, способствуя увеличению количества центров кристаллизации, позволяет значительно модифицировать структуру сплава и тем самым повысить комплекс физико-механических свойств. Карбиды алюминия

и/или кремния, также являются центрами зародышеобразования при обработке расплава лигатурой, кроме того обеспечивают дисперсное упрочнение композита (рисунок 1б).

Металлографические исследования после проведенного отжига выявили, что полного растворения фаз в α -твердом растворе не произошло. Это вызвано тем, что концентрация химических элементов в сплаве превышает их предельную растворимость в алюминиевой матрице.

В результате нагрева под закалку происходит растворение некоторых фаз в основном твердом растворе, регистрируется эвтектика, в которой отдельные игольчатые кристаллы кремния раздроблены, но просматривается ее колониальное строение (рисунок 1в). В общем, микроструктура не однородна, просматриваются как дисперсные области, так и области с крупными иголками кремния.

В результате прессования силумина АК9 модифицированного лигатурой при комнатной температуре происходит его разрушение, поэтому решено проводить процесс РКУП при температуре 500°C и скорости деформирования 1 мм/с с нагревом заготовок до 500°C после каждого цикла деформирования. Нагрев силумина АК9+С модифицированного лигатурой до 500°C при РКУП показал возможность его пластического деформирования до 3 проходов, после чего образцы снова разрушались. Проведение трех циклов РКУП позволяет получать образцы без видимых разрушений. Заготовки, на которых возникали существенные трещины в процессе деформирования, явно не поддающиеся залечиванию к осуществлению следующих циклов деформирования не допускались.

Уже при визуальном макроанализе видно, что после первого прохода РКУП количество кремнистых включений становится меньше и структура становится более проработанной и равномерно распределенной.

Микроструктура полученных образцов после первого прохода и трех циклов РКУП представлена на рисунке 2.

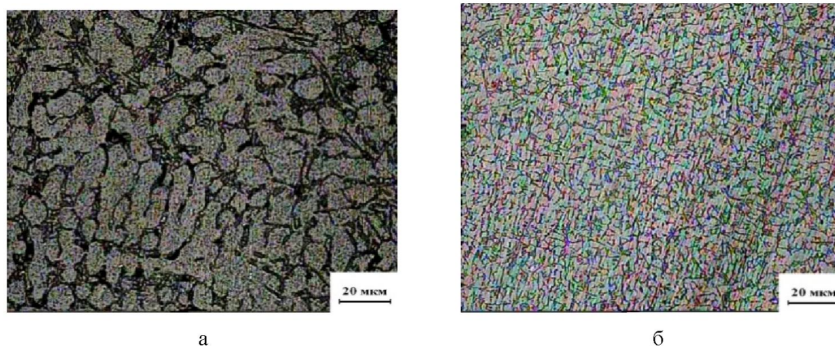


Рисунок 2 – Микроструктура сплава АК9+С после РКУП: а – первый проход, б – третий проход

После РКУП уже при трех проходах деформирования происходит существенное измельчение структуры алюминия, по сравнению с исходной и не только на поверхности, но и в центре заготовки. Так, исходный размер зерна, составляющий 22 мкм, после деформирования по предлагаемой технологии уменьшился до 3 мкм.

В образцах после первого прохода РКУП регистрируется достаточно тонко дифференцированная эвтектика, в которой отдельные игольчатые кристаллы кремния раздроблены, просматривается его колониальное строение. Границы между ними размыты и почти не определяются. В общем, микроструктура не однородна, наряду с дисперсными областями имеют место более грубые «иголочки» кремниевой фазы. С увеличением количества циклов уменьшается доля кремниевой фазы в общей структуре сплава, а алюминиевой, соответственно, увеличивается. Тонко дифференцированная составляющая эвтектики полностью отсутствует. Наблюдается вытеснение α -твердого раствора кремниевой фазой настолько, что в алюминиевой фазе начинают формироваться и выявляться границы зерен.

После трех проходов классических игольчатых кристаллов кремния практически не наблюдается. Они сильно раздроблены и сфероидизированы, их доля в общей структуре сплава заметно снизилась, и преобладающей стала алюминиевая фаза.

Изменение микротвердости сплава АК9+С с ростом степени деформации при РКУП коррелирует с эволюцией структуры. После РКУП микротвердость увеличивается почти в 2 раза по сравнению с исходным состоянием, от 451 МПа в исходном состоянии до 882 МПа, уже за три прохода, что можно объяснить большей степенью деформации и при небольшом изменении поперечного сечения исходной заготовки.

Выводы. Исследования показали, что уже после трех проходах деформирования силумина АК9 модифицированного лигатурой, содержащей наноструктурированный углерод в виде фуллереновой черни и синтезированные частицы стеклоуглерода, образовавшиеся в процессе получения лигатуры происходит существенное измельчение структуры, по сравнению с исходной и не только на поверхности, но и в центре заготовки. Так, исходный размер зерна, составляющий 22 мкм, после деформирования по предлагаемой технологии уменьшился до 3 мкм. При этом уже при визуальном макроанализе видно, что после первого прохода РКУП количество кремнистых включений становится меньше и структура становится более проработанной и равномерно распределенной. После трех проходов классических игольчатых кристаллов кремния практически не наблюдается. Они сильно раздроблены и сфероидизированы, их доля в общей структуре сплава заметно снизилась, и преобладающей стала алюминиевая фаза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lv Jinlongb, Luo Hongyuna, Liang tongxiangb. (2016) Investigation of microstructure and corrosion behavior of burnished aluminum alloy by TEM, EWF, XPS and EIS techniques, *Materials Research Bulletin*, 83, doi:10.1016/j.materresbull.2016.05.013.
- [2] Ali Safinajafabadia, Rasoul Sarraf-Mamoorya, Zahra Karimib (2012) Effect of organic dispersants on structural and mechanical properties of Al₂O₃/ZrO₂ composites. *Materials Research Bulletin*. 47:4210–4215 doi:10.1016/j.materresbull.2012.09.001.
- [3] Chichkan A.S., Chesnokov V.V., Gerasimov E.Yu., Parmon V.N. (2013) Production of nanoporous ceramic membranes using carbon nanomaterials, *Doklady Physical Chemistry*, 2:135–137. DOI: 10.1134/S0012501613060031
- [4] P. Frint, M.F.-X. Wagner, S. Weberl, S. Seipp, S. Frint, T. Lampke. (2017) An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 239:222–229, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.032.
- [5] Kurapov G., Orlova E., Volokitina I., Turdaliev A. (2016) Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51:451–457
- [6] Volodin A.M., Zaikovskii V.I., Kenzhin R.M., Bedilo A.F., Mishakov I.V., Vedyagin A.A. (2017) Synthesis of Nanocrystalline Calcium Aluminate C12A7 under Carbon Nanoreactor Conditions, *Materials Letters*, 189:210-212. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.11.112
- [7] Astafurova E.G., Zakharova G. G., Naydenkin E.V. (2010) Effect of equal channel angular pressing on the structure and mechanical properties of low carbon steel 10Г2ФТ, FMM, 3:275-284. (In Russian).
- [8] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Kurapov G.G., Volokitina I.E., Orlova E.P. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 2:95-102. (In Russian)
- [9] Lezhnev S., Volokitina I., Koinov T. (2014), Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49:621-630
- [10] Naizabekov A. B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Volokitina I.E. (2014) I Computer modeling of the rolling process of reinforcing steel, *Advanced Materials Research*, 1050: 1286-1291.
- [11] Mashekova A. S. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 5:107-121. (In Russian)
- [12] M. Saravanan, R.M. Pilla, K.R. Ravi, B.C. Pai, M. Brahmakumar. (2007) Development of ultrafine grain aluminium-graphite metal matrix composite by equal channel angular pressing. *Composites Science and Technology*, 67:1275–1279.
- [13] Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. (2013) Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC, *Journal of Materials Science*, 48: 4501-4509.
- [14] Abdulazeez T. Lawal. (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research Bulletin*, 73:308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037
- [15] Kawasakia M., Horitab Z., Langdona T. G. (2009) Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP, *Materials Science and Engineering A*, 524:143-150.
- [16] Fakhretdinova E.I., Raab G.I., Ganiev M.M. (2015) Development of force parameters model for a new severe plastic deformation technique – Multi-ECAP-Conform, *Applied Mechanics and Materials*, 698:386-390.
- [17] Raab G., Lapovok R. (2006) Modelling of Stress-Strain Distribution in ECAE by analytical-experimental method, *Ultrafine Grained Materials IV TMS Meeting*, 1:189-194.

- [18] Abdulazeez T. Lawal, (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research*, 73, 308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037.
- [19] Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C.F., Davies C.H., Pereloma E.V. (2006) Microstructure and Texture Evolution of bcc and fcc Metals Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, *Materials Science and Engineering*, 415:126-139.
- [20] Biao Chena, Shufeng Lib, Hisashi Imaib, Lei Jiab, Junko Umedab, Makoto Takahashib, Katsuyoshi Kondoh. (2015) Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests. *Composites Science and Technology*, 113:1–8.
- [21] Patent RF № 2181314. Ustroystvo dlya obrabotki metallov davleniyem. Raab G.I., Kulyasov G.V., Polozovskiy V.A., Valiyev R.Z., 2002.(In Russian)
- [22] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. (2015) Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die, *Metal Science and Heat Treatment*, 57:5-6. DOI:10.1007/s11041-015-9870-x
- [23] A. Naizabekov, D. Kuis, A. Volochko, A. Shegidevich, N. Svidunovich, S. Lezhnev, I. Volokitina E. Panin. (2015), Research of obtaining of composite materials based on aluminum matrix, 7th Announcement & Call for Papers NANOCON. Brno, Czech Republic.

REFERENCES

- [1] Lv Jinlongb, Luo Hongyuna, Liang tongxiangb. (2016) Investigation of microstructure and corrosion behavior of burnished aluminum alloy by TEM, EWF, XPS and EIS techniques, *Materials Research Bulletin*, 83, doi:10.1016/j.materresbull.2016.05.013.
- [2] Ali Safinajafabadia, Rasoul Sarraf-Mamoorya, Zahra Karimib (2012) Effect of organic dispersants on structural and mechanical properties of Al_2O_3/ZrO_2 composites. *Materials Research Bulletin*. 47:4210–4215 doi:10.1016/j.materresbull.2012.09.001.
- [3] Chichkan A.S., Chesnokov V.V., Gerasimov E.Yu., Parmon V.N. (2013) Production of nanoporous ceramic membranes using carbon nanomaterials, *Doklady Physical Chemistry*, 2:135–137. DOI: 10.1134/S0012501613060031
- [4] P. Frint, M.F.-X. Wagner, S. Weberl, S. Seipp, S. Frint, T. Lampke. (2017) An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 239:222–229, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.08.032.
- [5] Kurapov G., Orlova E., Volokitina I., Turdaliev A. (2016) Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51:451-457
- [6] Volodin A.M., Zaikovskii V.I., Kenzhin R.M., Bedilo A.F., Mishakov I.V., Vedyagin A.A. (2017) Synthesis of Nanocrystalline Calcium Aluminate C12A7 under Carbon Nanoreactor Conditions, *Materials Letters*, 189:210-212. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.11.112
- [7] Astafurova E.G., Zakharova G. G., Naydenkin E.V. (2010) Effect of equal channel angular pressing on the structure and mechanical properties of low carbon steel 10Г2ФТ, *FMM*, 3:275-284. (In Russian).
- [8] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Kurapov G.G., Volokitina I.E., Orlova E.P. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 2:95-102. (In Russian)
- [9] Lezhnev S., Volokitina I., Koinov T. (2014), Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 49:621-630
- [10] Naizabekov A. B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Volokitina I.E. (2014) I Computer modeling of the rolling process of reinforcing steel, *Advanced Materials Research*, 1050:1286-1291.
- [11] Mashekova A. S. (2016) Bulletin of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan [Vestnik Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan] 5:107-121. (In Russian)
- [12] M. Saravanan, R.M. Pilla, K.R. Ravi, B.C. Pai, M. Brahmakumar. (2007) Development of ultrafine grain aluminium-graphite metal matrix composite by equal channel angular pressing. *Composites Science and Technology*, 67:1275–1279.
- [13] Murashkin M.Yu., Sabirov I., Kazykhanov V.U. (2013) Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC, *Journal of Materials Science*, 48: 4501-4509.
- [14] Abdulazeez T. Lawal. (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research Bulletin*, 73:308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037
- [15] Kawasakia M., Horitab Z., Langdona T. G. (2009) Microstructural Evolution in High Purity Aluminum Processed by ECAP, *Materials Science and Engineering A*, 524:143-150.
- [16] Fakhretdinova E.I., Raab G.I., Ganiev M.M. (2015) Development of force parameters model for a new severe plastic deformation technique – Multi-ECAP-Conform, *Applied Mechanics and Materials*, 698:386-390.
- [17] Raab G., Lapovok R. (2006) Modelling of Stress-Strain Distribution in ECAE by analytical-experimental method, *Ultrafine Grained Materials IV TMS Meeting*, 1:189-194.
- [18] Abdulazeez T. Lawal, (2016) Synthesis and utilization of carbon nanotubes for fabrication of electrochemical biosensors, *Materials Research*, 73, 308–350, doi:10.1016/j.materresbull.2015.08.037.
- [19] Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C.F., Davies C.H., Pereloma E.V. (2006) Microstructure and Texture Evolution of bcc and fcc Metals Subjected to Equal Channel Angular Extrusion, *Materials Science and Engineering*, 415:126-139.
- [20] Biao Chena, Shufeng Lib, Hisashi Imaib, Lei Jiab, Junko Umedab, Makoto Takahashib, Katsuyoshi Kondoh. (2015) Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests. *Composites Science and Technology*, 113:1–8.
- [21] Patent RF № 2181314. Ustroystvo dlya obrabotki metallov davleniyem. Raab G.I., Kulyasov G.V., Polozovskiy V.A., Valiyev R.Z., 2002.(In Russian)

[22] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Volokitina I.E. (2015) Change in copper microstructure and mechanical properties with deformation in an equal channel stepped die, *Metal Science and Heat Treatment*, 57:5-6. DOI:10.1007/s11041-015-9870-x

[23] A. Naizabekov, D. Kuis, A. Volochko, A. Shegidevich, N. Svidunovich, S. Lezhnev, I. Volokitina E. Panin. (2015), Research of obtaining of composite materials based on aluminum matrix, 7st Announcement & Call for Papers NANOCON. Brno, Czech Republic.

С. Н. Лежнев, И. Е. Волокитина

Қарағанды мемлекеттік индустриялық университеті, Темиртау, Қазақстан

ТКББ ШАМАСЫНДА АЛЮМИНИЙДЫҢ НЕГІЗІНДЕ КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ ҚОРЫТПАНЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

Аннотация. Берілген мақалада, силуминдер деформацияланбайтын құю қорытпаларға жатпайтына қарамастан, ТКББ 500°C-де оның 3 өтулерге дейін пластикалық деформациялау мүмкіндігін көрсетті. Бірақ алғашқымен салыстыру бойынша, фуллеренді түрде наноқұрылымдау көміртегі бар түрлендірілген лигатурамен АК9 силуминді үш өтумен деформациялаудан кейін ғана, құрылымның маңызды ұсағуы болады. Сонымен де ТКББ қолдануда технологиялық түпнегізділігі болатын және пластикалық деформацияға ұшырамайтын кремнийді қосуды ұсақталудегеніне жету мүмкіндігі болды.

Қорыта келгенде, композиттердің жоғары беріктелген сипаттамалары және наноқұрылымдау көміртеппен оларды түрлендіруінде илемділіктің жетілетін деңгейі, сонымен қатар ТКББ есебімен, машина жасаудың жауапты бөлшектерін өндіру үшін дайындамаларды алу мақсатымен оларды пайдалануға рұқсат береді. Көптеген дәрежесінде алынған қасиеттер дисперсиялау есебінен барлық құрылымдық құрайтын және наноқұрылымдау көміртектің түрінде қатайтқыштың біркелкі үлестіруін қамтамасыздандыру.

Түйін сөздер: алюминий, ТКББ, микроқұрылым, механикалық қасиеттер, композициялық қорытпа.

Сведения об авторах:

Лежнев С.Н. – к.т.н., доцент, Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, sergey_lezhnev@mail.ru

Волокитина И.Е. – докторант PhD, магистр, Карагандинский государственный индустриальный университет, Темиртау, Казахстан, irinka.vav@mail.ru