

composition of amorphous graphite of the Noginsk deposit of the Krasnoyarsk Territory. *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruktсии: sbornik nauchnykh trudov* [Advanced materials, technologies, design: collection of research papers]. Issue 7. Krasno-

yarsk: SAA, 2001, pp.19-20.

14. Khodakov G.S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow: Publishing house of literature on construction engineering, 1972. 238 p.

Исследование зависимости качества природного скрытокристаллического графита от режимов подготовки / Баранов В.Н., Довженко Н.Н., Гильманшина Т.Р., Лыткина С.И., Худонов С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 54–59.

Baranov V.N., Dovzhenko N.N., Gilmanshina T.R., Lytkina S.I. Khudonogov S.A. Research on the dependence of the quality of natural cryptocrystalline graphite on its modes of preparation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 54–59.

УДК 621.762:669

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД31

Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Показана возможность изготовления пористого материала на алюминиевой основе путем реализации наиболее рациональной схемы переработки стружковых отходов производства, исключая их переплав. В ее основе лежат приемы, характерные для процессов порошковой металлургии и обработки давлением, а также базовые принципы, заложенные в технологии получения пеноалюминия. Дана оценка уровня достигаемых механических характеристик и характера сформированной структуры материала.

Ключевые слова: алюминиевая стружка, отходы производства, механическое легирование, брикетирование, горячая экструзия, вспенивание, пористость, механические свойства, структура.

Введение

Одной из задач, стоящих перед производителями, занятыми в сфере производства прессованной продукции из алюминиевых сплавов, является рациональная переработка образующихся на определенных переделах, связанных с резкой металла, стружковых отходов. Чем мельче стружка, тем технически труднее, энергетически затратнее, материально, с точки зрения выхода годного, бесперспективнее и, как следствие этого, экономически невыгоднее перерабатывать ее путем переплавки. В этой связи, ранее в работах [1, 2], был рассмотрен подход, основанный на предварительном компактировании стружки сплава АД31 в брикеты с последующей экструзией их через матрицу с заданными размерами и формой рабочего отверстия методом совмещенной прокатки-прессования [3]. В результате были получены пресс-изделия и проволока из практически беспористого анизотропного структурно неоднородного материала, свойства которого обусловлены ориентировани-

ем волокон (вытянутых стружек) в одном направлении. Однако более целесообразным, на наш взгляд, является изыскание достаточно доступных способов переработки алюминиевой стружки в высокопористые полуфабрикаты, наиболее очевидный из которых предполагает использование в своей основе общих технологических принципов получения так называемого пеноалюминия из вторичного сырья [4].

Материалы и методы исследования

Целью работы являлось составление и практическое опробование принципиальной схемы переработки стружки (опилки) алюминиевого сплава АД31, образующейся при резке прессованных профилей, в высокопористые полуфабрикаты произвольной формы. В качестве порофора решено было использовать промышленный гидрид титана TiH_2 , для которого содержание водорода в этой фазе составляет по объему больше 60% (~4 мас %), а температура интенсивного разложения (дегидрирования) находится в интервале 650–700°C.

Смешивание алюминиевой стружки и порошка гидроксида титана производили в планетарной шаровой мельнице Retsch PM400 в 3 этапа с разными интервалами времени – 5, 30 и 50 мин. Предварительные эксперименты и анализ имеющихся в литературе сведений по этому вопросу показали, что из-за существования высокой вероятности получения материала со связанными между собой порами вместо изолированных содержание вводимого в алюминиевую основу гидроксида титана (порофора) не должно превышать 2% (по массе), которое и было принято в работе. В этом случае, при обеспечении заданного температурного режима вспенивания, выделяющийся водород не успевает раствориться в матричном расплаве и создает достаточное давление для образования пор. Последующее быстрое охлаждение (50°С/мин) не дает пузырькам всплыть на поверхность, «замораживая» высокую пористость.

Компактирование смеси алюминиевой стружки с порошком TiH₂ проводили односторонним горячим прессованием при нагреве пресс-формы до температуры 400±20°С. Давление прессования во всех случаях составляло 200 МПа, время выдержки под нагрузкой равнялось 5 мин. Полученные консолидированные прессовки имели форму цилиндров диаметром 40 мм и высотой 30 мм.

Ход дальнейших экспериментов показал, что пытаться проводить процесс вспенивания прессовок в чистом виде не имеет смысла, т.к. в результате реализуемого интенсивного теплового воздействия образование пор в материале не происходит, а наблюдается лишь частичное подплавление отдельных фрагментов алюминиевой стружки, которое выражается в появлении капелек расплава на поверхности прессовки. Это говорит о том, что степень связности частиц стружки с порошком TiH₂ у прессовок после обычного горячего компактирования ещё недостаточна для того, чтобы обеспечить протекание требуемых для образования пор процессов. Усилить указанные связи можно, осуществляя дальнейшую горячую пластическую деформацию прессовок, например экструзию их через матрицу с заданным рабочим отверстием.

Учитывая, что при экструзии алюминиевых заготовок можно обеспечить изотермические условия деформирования, в экспериментах прессовку из смеси алюминиевой стружки и порошка гидроксида титана, с предварительно нанесенной на все контактные поверхности с инструментом смазкой, после помещения ее в контейнер нагревали вместе

с инструментальной оснасткой, смонтированной на столе вертикального гидравлического пресса усилием 1 МН, до температуры порядка 450°С. После чего осуществляли непосредственно процесс экструзии. В ходе ее давление от траверсы пресса через пуансон и пресс-шайбу передается на прессовку, происходит ее распрессовка и выдавливание через очко матрицы с оставлением пресс-остатка высотой ориентировочно 5–7 мм. Далее пресс-изделие отделяют от пресс-остатка и охлаждают на воздухе.

В работе экструзией получали прутки диаметрами 6 мм (коэффициент вытяжки μ при этом приблизительно составлял 56), 8 мм ($\mu \approx 32$) и 12 мм ($\mu \approx 14$). При этом независимо от того, с каким коэффициентом вытяжки осуществляется горячая экструзия и какое время смешивания принято при формировании смеси перед горячим прессованием, прутки могут экструдироваться по описанному выше технологическому режиму достаточно устойчиво.

После экструзии от полученных прутков отбирались образцы, на которых изучали механические характеристики материала и его структурные особенности. При выборе места вырезки образцов с цилиндрических образцов на сжатие с построением графической зависимости «напряжение течения – степень деформации сдвига при сжатии». Напряжение течения $\sigma_{сж}$ рассчитывали делением текущих значений усилия деформирования P на площадь поперечного сечения F в соответствующий момент времени: $\sigma_{сж} = P/F$.

Степень деформации сдвига находили по формуле $\lambda = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h}$, где h_0 и h – высота осаживаемого образца до и после деформирования с определенным обжатием соответственно.

Само сжатие образцов, начальная высота которых составляла $h_0=8,5-10$ мм, осуществляли на универсальной электромеханической испытательной машине LFM-400 с установленными на ней плоскими бойками. Весь ход испытания выводился на экран дисплея и в конечном итоге регистрировался и оформлялся соответствующим специальным протоколом. После обработки всех протоколов полученные результаты были сгруппированы в виде указанных выше зависимостей отдельно для разных значений коэффициентов вытяжки при экструзии (рис. 1, а) и разного времени перемешивания компонентов при приготовлении смеси перед горячим прессованием (рис. 1, б).

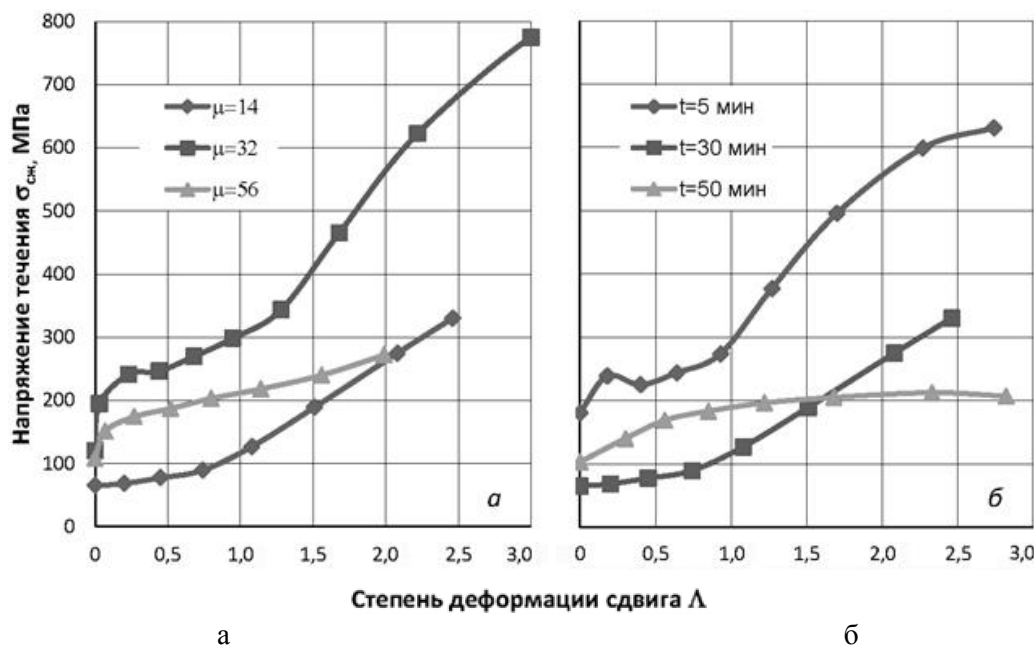


Рис. 1. Изменение прочностных характеристик образцов прутков, полученных: а – с разным значением коэффициента вытяжки μ (время перемешивания при формировании исходной смеси составляло 30 мин); б – из смесей, сформированных при разном времени перемешивания t (диаметр прутка составлял 12 мм)

Из рис. 1, а видно, что наибольшим сопротивлением деформации обладает пруток $\varnothing 8$ мм, полученный с коэффициентом вытяжки $\mu=32$. По-видимому, именно при этой вытяжке удается обеспечить наиболее устойчивые связи между отдельными частицами алюминиевой стружки, определяющими общую прочность формируемых пресс-изделий.

Время перемешивания при составлении смеси алюминиевой стружки с порошком гидрида титана, влияние которого показано на рис. 1, б, принципиального значения на уровень прочностных характеристик пресс-изделий не оказывает, поскольку наибольшие значения их приходятся на минимально принятое в работе время перемешивания, равное 5 мин.

Характерная микроструктура полученных пресс-изделий на примере горячепрессованного прутка $\varnothing 12$ мм приведена на рис. 2. Видно, что материал прутка обладает некоторой остаточной пористостью, причем расположение пор и их величина достаточно неоднородны.

Последующую стадию получения высокопористого алюминия – вспенивание прекурсора проводили с помощью горелки Namilux, пламя которой обеспечивает необходимое тепловое воздействие для достижения требуемой температуры при высокой скорости нагрева.

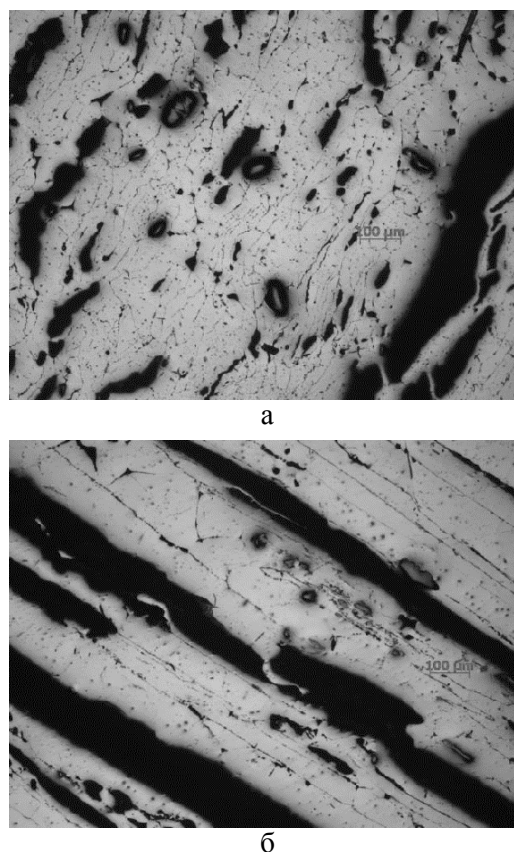


Рис. 2. Микроструктура прутка $\varnothing 12$ мм в поперечном (а) и продольном (б) направлениях, $\times 200$

Моделирование процесса вспенивания производили на образцах пресс-изделий, как и ранее полученных с разным значением коэффициента вытяжки и с использованием для приготовления смесей разного времени перемешивания. На **рис. 3** для наглядности приведены общие виды образцов пресс-изделий до и после осуществления процесса вспенивания.



а



б

Рис. 3. Внешний вид образцов пресс-изделий после горячей экструзии (а) и осуществления процесса вспенивания (б)

Установлено, что в процессе интенсивного высокотемпературного воздействия образец разбухает, одновременно теряя цилиндрическую форму. При этом, как видно из приведенного на **рис. 4** разреза образца пресс-изделия, после вспенивания выделяющийся водород не успевает сформировать полностью сферические поры, а растворяется в жидком алюминии с последующей его диффузией из образца.

Наличие относительно больших по размерам пустот и их крайняя неравномерность

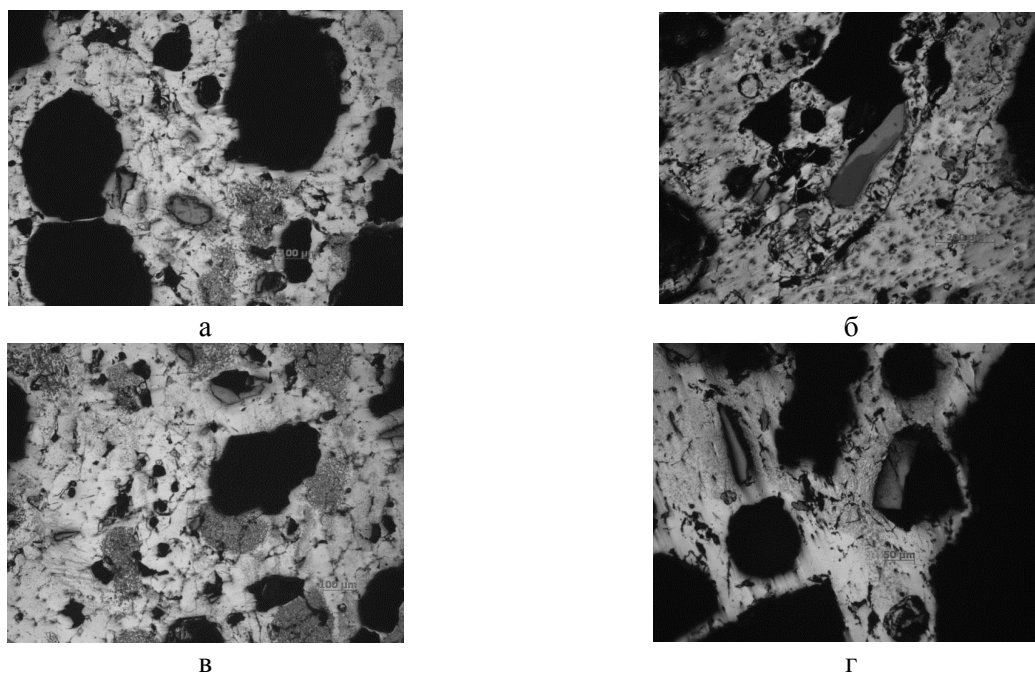
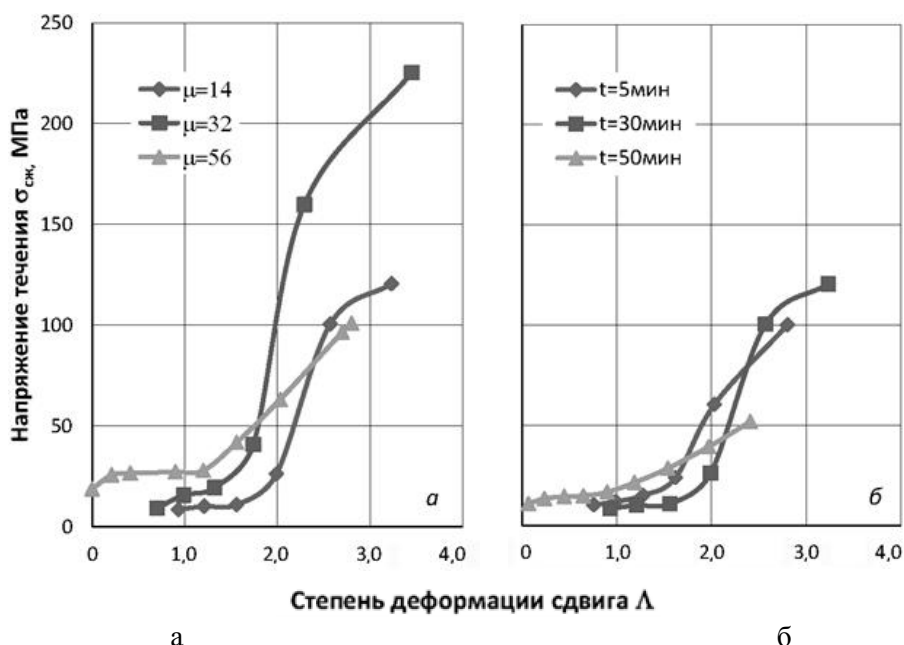
распределения по сечению объясняются наличием в объеме пресс-изделия крупных и неоднородных скоплений частиц TiH_2 , из которых моментально образуется большое количество газа. При этом выделяющийся водород не успевает весь раствориться в матрице, в результате чего поры получаются сравнительно большими и не совсем правильной формы. Более наглядно это прослеживается на фотографиях микроструктур отдельных областей пресс-изделия после вспенивания, которые приведены на **рис. 5**.



Рис. 4. Поперечный разрез образца пресс-изделия после вспенивания

Поскольку в работе ставилась задача – создать модель высокопористого материала на основе алюминия предположительно конструкционного назначения, была произведена оценка прочностных характеристик образцов пресс-изделий после вспенивания на сжатие. Построенные по результатам проведенных испытаний диаграммы в тех же координатах «напряжение течения – степень деформации сдвига» в зависимости от упоминавшихся ранее варьируемых параметров приведены на **рис. 6**.

Из анализа приведенных на **рис. 6** графиков следует, что с увеличением степени деформации сдвига при сжатии, одновременно с закрытием пустот, происходит рост сопротивления материала деформации, который отчетливо проявляется после достижения величины Λ значений порядка 1,5–2,0. При этом, как и ранее, наибольшей прочностью обладают высокопористые образцы прутков, полученные при коэффициенте вытяжки $\mu=32$ (**рис. 6, а**). Время перемешивания по-прежнему существенного влияния на прочность не оказывает (**рис. 6, б**).

Рис. 5. Микроструктуры поперечного сечения отдельных областей пресс-изделия после вспенивания, $\times 200$ Рис. 6. Изменение прочностных характеристик образцов прутков после вспенивания:
а – полученных с разным значением коэффициента вытяжки μ ;
б – полученных из смесей, сформированных при разном времени перемешивания t

Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для получения высокопористого материала на основе алюминия можно в ряде случаев использовать стружковые отходы производства, отвечающие определенным требованиям по сортности и степени загрязненности.

2. Смешивание стружковых алюминиевых

отходов и порообразующего порошка TiH_2 , содержание которого не должно превышать 2%, целесообразнее производить в высокоэнергетических мельницах, типа планетарной, обеспечивающей устойчивое проникновение частиц порошка в матричный сплав.

3. Компактирование сформированной смеси необходимо проводить при температурах не ниже $300\text{--}350^\circ\text{C}$. При этом давление горячего прессования должно быть не ниже $180\text{--}200$ МПа,

что обеспечивает получение прессовок относительной плотностью 90–95%.

4. Для интенсификации процесса взаимного проникновения частиц порошка вещества – порофора в матричный сплав, способствующего лучшему протеканию процесса последующего вспенивания, прессовки рекомендуется подвергать дополнительной горячей экструзии с коэффициентом вытяжки, лежащем в интервале значений от 30 до 40.

5. Нагрев прекурсора выше температуры разложения порофора (TiH₂) при выбранном температурно-скоростном режиме лучше производить в соответствующей форме для образования пористой структуры. При этом температура вспенивания должна находиться выше температуры ликвидуса матричного сплава, а скорость нагрева должна составлять порядка 150–200°C/мин.

При соблюдении всех перечисленных условий предложенная технология позволит полу-

чать высокопористый алюминий с пористостью от 20 до 40%, размерами пор от 1,0 до 3,0 мм и прочностью материала порядка от 20 до 40 МПа.

Список литературы

1. Исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных из сыпучей стружки сплава системы алюминий-магний-кремний / Загиров Н.Н., Сидельников С.Б., Иванов Е.В., Аникина В.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 50–56.
2. Ковалева А.А., Аникина В.И., Загиров Н.Н. Анализ формирования структурных зон в стружковом материале из сплава АД31, полученного обработкой давлением // Техника и технология. 2014. №7(3), С. 304–308.
3. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
4. Иванов Д.О., Аксенов А.А., Иванов А.А. Исследование и моделирование пеноалюминия, полученного из вторичного алюминиевого сырья с использованием метода механического легирования // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2007. №6. С. 56–61.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

A TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING A HIGHLY POROUS MATERIAL FROM AD31 ALUMINUM ALLOY CHIP WASTES

Zagirov Nikolay Nailich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Kovaleva Angelina Adolfovna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-75. E-mail: angeli-kovaleva@yandex.ru.

Olkhovik Aleksey Yakovlevich – Master's Degree Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-37-31.

Koval Olga Evgenievna – Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 206-36-75.

Abstract. This paper shows the possibility of making an aluminum-based porous material through the implementation of the most efficient scheme of processing chip production waste, excluding their remelting. It is based on techniques that are typical of the processes of powder metallurgy and metal forming, as well as on the basic principles laid down in the technology of foam aluminum production. A level of achieved mechanical characteristics and the nature of the formed structure of the material were assessed.

Keywords: Aluminum chips, production waste, mechanical alloying, briquetting, hot extrusion, foaming, porosity, mechanical properties, structure.

References

1. Zagirov N.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V., Anikina V.I. The study of the structure and properties of deformed semi-finished prod-

- ucts made from shovelling aluminum-magnesium-silicon alloy chips. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010, no. 2, pp. 50-56.
2. Kovaleva A.A., Anikina V.I., Zagirov N.N. Analysis of the formation of structural zones in chip materials produced from the AD31 alloy by metal forming. *Tekhnika i tekhnologiya* [Engineering and technology]. 2014, no. 7(3), pp. 304-308.
3. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i spлавov: monografiya* [Combined methods of treatment of nonferrous metals and alloys: a monograph]. Moscow: MAKS Press, 2005, 344 p.
4. Ivanov D.O., Aksenov A.A., Ivanov A.A. Research and modeling of foam aluminum produced from recycled aluminum raw materials using a method of mechanical alloying. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [News of universities. Nonferrous metallurgy], 2007, no. 6, pp.56-61.

Технологическая оценка возможности получения высокопористого материала из стружковых отходов алюминиевого сплава АД31 / Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 59–64.

Zagirov N.N., Kovaleva A.A., Olkhovik A.Ya., Koval O.E. A technological assessment of the possibility of producing a highly porous material from AD31 aluminum alloy chip wastes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 59–64.