

*Н. Ю. Мирошкин¹, В. А. Гулевский², А. А. Белов¹
С. Н. Цурихин¹, Н. А. Кидалов¹, К. К. Нургалиев¹*

**РАЗРАБОТКА ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Волгоградский индустриальный техникум

e-mail: mitlp@vstu.ru

Работа посвящена разработке технологии получения композиционного материала на основе алюминиевого сплава с заданной морфологией пор за счет применения в качестве порообразователей полых металлических сфер.

В ходе выполнения работы были проведены следующие исследования: выбор материала-формообразователя полых металлических сфер, формирующих структуру и физико-механические свойства пористого алюминия; исследование влияния вида связующего на равномерность токопроводящего покрытия по поверхности формообразователя; исследование влияния режимов электролиза на сплошность металлического покрытия по поверхности токопроводящего слоя формообразователя; получение пористого алюминия методом литейной технологии. Показано, что применение полых металлизированных сфер в качестве порообразователя позволило снизить плотность опытного образца из сплава АК12 на 40 %.

Ключевые слова: пористый металл, полые металлизированные сферы, алюминиевый сплав, электрохимическое покрытие.

*N. Y. Miroshkin¹, V. A. Gulevsky², A. A. Belov¹
S. N. Tsurikhin¹, N. A. Kidalov¹, K. K. Nurgaliev¹*

**DEVELOPMENT OF FOUNDRY TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION
OF AN ALUMINIUM-BASED POROUS COMPOSITE MATERIAL**

¹ Volgograd State Technical University

² Volgograd Industrial College

The work is devoted to the development of technology for obtaining composite material based on aluminium alloy with a given morphology of pores by using hollow metal spheres as pore formers.

In the course of work the following researches have been carried out: selection of material-former of hollow metal spheres forming the structure and physical and mechanical properties of porous aluminum; study of influence of binder type on uniformity of conductive coating on the surface of form-former; study of influence of electrolysis modes on continuity of metal coating on the surface of conductive layer of formformer; production of porous aluminum by foundry technology. It is shown that the use of hollow metallized spheres as a pore former allowed to reduce the density of the AK12 alloy prototype by 40%.

Keywords: porous metal, hollow metallised spheres, aluminium alloy, electrochemical coating.

В последние годы проявляется повышенный интерес к пористым материалам на основе алюминия, обладающим привлекательными свойствами. В процессе развития разных сфер промышленности перед многими отраслями возникали новые потребности в получении перспективных легких материалов с заданными технологическими свойствами. Одним из при-

меров таких материалов стал пористый металл, в частности, пористый алюминий [1]. Главное преимущество пористого алюминия перед классическим – это еще более низкий удельный вес, теплопроводность, способность поглощать акустические и электромагнитные колебания, способность деформироваться при постоянном напряжении. Пористый металл находит применение

ние в различных отраслях промышленности, таких как медицина, строительство, аэрокосмическая и авиационная промышленность [2, 3, 4].

Наиболее широкое распространение получили следующие технологии получения пористого алюминия: вспенивание (создание пор) расплава продувкой газами, введение в расплав порофоров и метод порошковой металлургии с последующим выжиганием полимерных порообразователей. Общие недостатки: сложность, многостадийность процесса получения такого материала, использование дорогостоящего оборудования и материалов, что приводит к увеличению стоимости готовой продукции и, как следствие, ограничению применения в различных отраслях промышленности. Также к числу ключевых недостатков можно отнести морфологическую неоднородность пор в теле отливки [3, 4]. Это является сдерживающим фактором при использовании данного материала при производстве деталей ответственного назначения, имеющих повышенные требования к однородности физико-механических свойств по всему объему изделия и идентичности свойств в рамках серийного производства. Для раскрытия потенциала пористого алюминия необходима технология, устраняющая данные недостатки. Задельные исследования в этом направлении были проведены специалистами кафедры «Машины и технология литейного производства» ВолгГТУ, в результате чего была разработана и запатентована технология получения пористого алюминия за счет использования в качестве порообразователя сфер из пенополистирола с различными огнеупорными неметаллическими покрытиями (глинозем, магнезит, кремнезем и др.) [5, 6]. Однако и данная технология имеет ряд недостатков: применение неметаллических материалов в качестве оболочки порообразователя приводит к засорению металла неметаллическими включениями; высокая вероятность получения неоднородного и неравномерного покрытия на гранулах пенополистирола; неметаллические покрытия на основе глинозема, магнезита, кремнезема при длительном хранении склонны к поглощению влаги из окружающей среды.

Избежать данных недостатков можно, используя в качестве оболочки порообразователя металлические покрытия, имеющие температуру плавления выше, чем у заливаемого в литейную форму расплава [7]. Таким образом, обеспечивается однородность формы и размера пор по всему телу пористого металла [8].

Материалы и методы исследования

В качестве формообразователя («порофора») полых металлических сфер, формирующих структуру и физико-механические свойства пористого алюминия использовали гранулированный пенополистирол. Данный материал удовлетворяет следующим требованиям: температура деструкции не более 300 °С, что позволяет использовать низкотемпературные печи для его выжигания при формировании полых металлических сфер; возможность получения материала «порофора» сферической формы с заданным размером от 2 до 8 мм; низкая плотность; высокий модуль упругости, обеспечивающий сохранение формы формообразователя после приложения нагрузки и снижение его износа во время выполнения технологических операций при получении полых металлических сфер.

Учитывая, что вспененный пенополистирол является диэлектриком, для обеспечения его металлизации необходимо нанесение токопроводящего покрытия, равномерность распределения которого по поверхности формообразователя зависит от вида применяемого связующего.

В качестве токопроводящего покрытия для нанесения на поверхность формообразователя полых металлических сфер был выбран графитовый порошок. Нанесение токопроводящего слоя на поверхность формообразователя полых металлических сфер варьировалось следующим образом: без связующего, путем помещения заготовок в прибор модели 022 (рис. 1); с предварительным погружением гранул вспененного пенополистирола в емкость, наполненную клеем марки БФ-2 и последующей обсыпкой графитовым порошком; с применением связующего в виде суспензии мелкодисперсного графита



Рис. 1. Общий вид прибора модели 022

в техническом спирте; нанесение суспензии на поверхность формообразователя при этом производилось методом окунания.

Наиболее эффективным способом нанесения металлических покрытий на поверхности материалов, к которым предъявляются высокие требования относительно равномерности распределения покрытия и его плотности, является электрохимический метод.

Нанесение медного покрытия на поверхность заготовок формообразователя диаметром 4 мм осуществлялось с использованием гальванической установки (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид гальванической установки для нанесения металлического покрытия

С целью определения наиболее эффективного режима нанесения медного покрытия на поверхности заготовок плотность тока варьировалась от 0,2 до 1,2 А/дм² (с шагом 0,2 А/дм²), продолжительность нанесения – 20 минут. Равномерность нанесения покрытия оценивалась визуальным методом.

Получение отливок из композиционного материала, представляющего собой алюминиевый сплав АК12 в качестве матрицы и полые металлизированные сферы в качестве наполнителя, осуществлялось методом гравитационной заливки в песчано-глинистую литейную форму (рис. 3, а) состава: 6 % (масс.) бентонитовой глины БС1Т₂, 94 % (масс.) кварцевого песка марки 2К₂О₂02. Влажность смеси составляла 4 %. Плавка алюминиевого сплава осуществлялась в камерной электрической печи сопротивления марки СНОЛ 80/12. Температура заливки составляла 760 °С. Отливки представляли собой цилиндры: диаметр основания составлял – 25 мм, высота – 20 мм. Для оценивания полученных результатов изготавливались контрольные цельнолитые (без укладки порообразователей в полость литейной формы) отливки из сплава АК12. В качестве формообразователя полых металлических сфер использовались гранулы вспененного полистирола диаметром 4 мм. Изготовление литейной формы с последующей укладкой в ее полость металлизированных сфер осуществлялось методом ручной формовки.



а



б

Рис. 3. Общий вид полуформы низа (а) и полученного КМ (б)

Результаты и их обсуждение

В результате исследований влияния способа нанесения электропроводящего покрытия на поверхность гранул пенополистирола установ-

лено, что наиболее эффективным способом является применение связующего в виде суспензии мелкодисперсного графита в техническом спирте (рис. 4).



Рис. 4. Фотоснимки гранул вспененного полистирола после нанесения токопроводящего слоя различными способами:

a – без применения связующего; *б* – с использованием клея БФ-2; *в* – с использованием суспензии графита в техническом спирте

Из рисунка видно, что только в случае применения технического спирта в качестве связующего материала между гранулой формообразователя и токопроводящим материалом достигается требуемая равномерность покрытия без существенного искажения геометрической формы заготовки.

Исследование влияния силы тока при электроосаждении медного покрытия на равномерность нанесения покрытия на поверхности формообразователя (рис. 5) показало, что увеличение плотности тока свыше $0,4 \text{ А/дм}^2$ при нанесе-

нии медного покрытия на поверхность заготовок из-за снижения рассеивающей способности электролита приводит к росту дендритов на покрытии, что недопустимо ввиду повышения шероховатости покрытия, а значит, снижения адгезии при взаимодействии с алюминиевым расплавом в процессе получения отливок из пористого алюминия. Снижение плотности тока ниже установленной величины в свою очередь приводит к росту равномерного покрытия по всей площади заготовки, однако повышает время выдержки заготовок в гальванической ванне.



Рис. 5. Образцы порообразователя после металлизации при различной плотности тока и времени выдержки 60 минут

Качество полученного композиционного материала (рис. 3, б) оценивалось путем сравнения теоретической (табл. 1) и экспериментальной плотностей опытных и контрольных (без укладки металлизированных сфер в полость литейной формы) образцов методом гидростатического взвешивания в дистиллирован-

ной воде на установке Hildebrand Electronic Densimeter H-300S (табл. 2).

Определение теоретической плотности композиционного материала производилось исходя из предварительного расчета: объема и массы отливки, металлизированных сфер, электрохимического покрытия и формообразователя (гранулы вспененного полистирола).

Таблица 1

Исходные данные для расчета теоретической плотности КМ

Наименование характеристики	Ед. измерения	Значение
Диаметр основания отливки	м	25×10^{-3}
Высота отливки	м	20×10^{-3}
Диаметр металлизированных сфер	м	$4,1 \times 10^{-3}$
Диаметр формообразователя	м	4×10^{-3}
Количество металлизированных сфер*	шт.	114
Толщина электрохимического покрытия	м	100×10^{-6}
Плотность сплава АК12 (матрица КМ)	кг/м ³	2650
Плотность ЭХП (покрытие наполнителя КМ)	кг/м ³	8940

*Определялось путем моделирования с использованием программного обеспечения «AutoCAD».

Таблица 2

Результаты определения теоретической и экспериментальной плотностей КМ и контрольного сплава

Наименование материала отливки	Плотность, кг/м ³	
	расчетная	экспериментальная
Алюминиевый сплав АК12	2650	2684
Композиционный материал	1648	1662

Таким образом, применение полых металлизированных сфер в качестве порообразователя позволило снизить плотность композиционного материала опытной отливки на 40 %.

Микроструктурный анализ композиционного материала показал, что при выбранном режиме ($0,4 \text{ А/Дм}^2$) нанесения медного электрохимического покрытия его толщина за 20 минут достигает порядка 80–100 мкм. Как видно на рис. 6, этой толщины достаточно для исклю-

чения деформации полый металлической гранулы (порообразователя) при взаимодействии с расплавленным алюминиевым сплавом в процессе заливки металла в форму и его кристаллизации.

Выводы

1. В качестве материала формообразователя порообразователей пористого алюминия выбран вспененный полистирол с температурой деструкции не более 300°C , что впоследствии позволило получить полые металлизированные заготовки сферической формы с внешним диаметром 4 мм.

2. Экспериментально установлено, что применение технического спирта в качестве связующего материала между гранулой вспененного полистирола и графита дает возможность сформировать равномерное токопроводящее покрытие, позволяющее нанести медное покрытие электрохимическим способом на поверхность формообразователя.

3. Показано, что металлизация гранул вспененного полистирола диаметром 4 мм после нанесения токопроводящего слоя в гальванической установке с плотностью тока $0,4 \text{ А/дм}^2$ в течение 20 мин привела к формированию

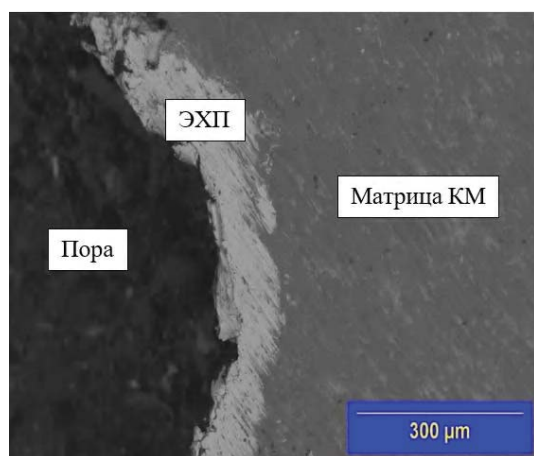


Рис. 6. Микроструктура композиционного материала, $\times 100$

равномерного медного электрохимического покрытия; увеличение плотности тока и времени выдержки при этом приводит к дефектам покрытия.

4. Применение полых металлизированных сфер в качестве порообразователя позволило снизить плотность опытного образца из сплава АК12 на 40 %.

5. Установлено, что нанесение медного электрохимического покрытия толщиной 80–100 мкм $\pm$ 5 мкм на поверхность формообразователя обеспечило сохранение целостности полых металлических сфер при взаимодействии с расплавленным алюминиевым сплавом в процессе заливки металла в форму и его кристаллизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shapovalov, V. I.* A new class of porous materials / V. I. Shapovalov, L. Gasar Boyko // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – N 6. – P. 407–410.

2. *Banhart, J.* Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams / J. Banhart // *Progress in Materials Science*. – 2001. – Vol. 46, № 6. – P. 559–632.

3. Method of manufacture of porous articles : pat. 5181549 USA : IPC C22C1/08 / V. I. Shapovalov, Current

Assignee USP HOLDINGS Inc. – № US07/693 920 ; application. 29.04.1991. ; publication. 26.01.1993.

4. Получение пористых литых заготовок вакуумной пропиткой с использованием в качестве порообразователя гранулированного пенополистирола / А. В. Кукса, Н. А. Кидалов, П. В. Рожков, А. В. Торошин // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст.* № 6 (109) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 7). – С. 115–119.

5. Пат. 128 136 Российская Федерация, МПК В22D 25/00. Устройство для изготовления пористых отливок вакуумной пропиткой / А. В. Кукса, Н. А. Кидалов, П. В. Рожков ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. – № 2012158182/02 ; заявл. 28.12.2012 ; опубл. 20.05.2013.

6. *Кукса, А. В.* Устройство для изготовления пористых отливок вакуумной пропиткой и экспериментальная оценка его работоспособности / А. В. Кукса, Н. А. Кидалов, П. В. Рожков // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст.* № 15 (118) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 8). – С. 126–128.

7. Энергопоглощающий материал, полученный пропиткой полых сфер / С. Н. Цурихин, В. А. Гулевский, Н. Ю. Мирошкин [и др.] // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 7(266) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 98–101.

8. Study of a Highly Porous Composite Material Based on an Aluminum Matrix with an Ordered Cellular Structure Formed by Hollow Copper–Graphite Spherical Granules / V. A. Gulevskiy, S. N. Tsurikhin, V. V. Gulevskiy [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 480–484. – DOI 10.1134/S2075113322020150.