



УДК 542.4

DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-114-118

Поступила 18.10.2018

Received 18.10.2018

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ И АРМИРУЮЩИХ ЧУГУННЫХ ГРАНУЛ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ

*А. С. КАЛИНИЧЕНКО, В. А. ШЕЙНЕРТ, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, А. Г. СЛУЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.
E-mail: akalinichenko@bntu.by*

Увеличение эксплуатационной надежности узлов трения является одной из приоритетных задач машиностроения, что требует создания эффективных триботехнических материалов. В первую очередь, это относится к подшипникам скольжения, которые применяются в различных узлах трения в широком диапазоне условий работы и должны иметь малый коэффициент трения, высокую износостойкость и сопротивление усталости, а также хорошую теплопроводность, прирабатываемость, смачиваемость маслом, коррозионную стойкость и обрабатываемость, низкий коэффициент линейного расширения и невысокую стоимость. Полностью удовлетворить перечисленным требованиям в реальных условиях проблематично, поэтому в технике используют разные антифрикционные материалы, наилучшим образом отвечающие конкретным условиям работы. В частности, были разработаны литые композиционные материалы (ЛКМ), которые нашли применение в различных узлах трения, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. В настоящее время хорошо развиты теоретические основы механики армированных композиционных материалов, существенные успехи достигнуты и в их материаловедении. Однако имеется еще много проблем, связанных с выбором оптимальной технологии, обеспечивающей достижение на практике предсказываемых теорией свойств композитов, управление межфазным взаимодействием компонентов для повышения стабильности структуры и свойств ЛКМ, с разработкой новых видов армирующих элементов, позволяющих поднять уровень эксплуатационных характеристик композита.

В данной работе обобщены результаты научных и экспериментальных исследований по разработке литейной технологии (твердожидким синтезом) получения композиционных материалов с макрогетерогенной структурой. Были изучены структуры композитов при разных способах синтеза, а также при различном химическом составе чугунных гранул. Показана перспективность применения в качестве армирующей фазы гранул из белого ванадиевого чугуна.

Ключевые слова. Композит на медной основе, макрогетерогенная структура, чугунные гранулы, синтез композитов, литейные методы.

Для цитирования. Калиниченко, А. С. Технологические особенности получения композитов на основе меди и армирующих чугунных гранул методом литья / А. С. Калиниченко, В. А. Шейнерт, В. А. Калиниченко, А. Г. Слуцкий // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 114–118. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-114-118.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCTION OF COPPER-BASED COMPOSITES REINFORCED WITH CAST IRON GRANULES BY MEANS OF CASTING

A. S. KALINICHENKO, V. A. SHEINERT, V. A. KALINICHENKO, A. G. SLUTSKY, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimasti ave. E-mail: akalinichenko@bntu.by

Increasing the operational reliability of friction units is one of the priorities for mechanical engineering, which requires the creation of effective tribotechnical materials. First of all, this applies to sliding bearings, which are used in various friction units in a wide range of operating conditions and must meet a number of requirements: low coefficient of friction, high wear resistance and fatigue resistance, as well as good thermal conductivity, workability, corrosion resistance and machinability, low coefficient of linear expansion and low cost. It is problematic to satisfy these requirements in real conditions; therefore, different friction materials that are best suited to specific conditions have been developed. In particular, cast composite materials (LCM) have been developed, which have found application in various friction units operating in severe operating conditions. Currently, the theoretical foundations of the mechanics of reinforced composite materials are well developed, and a significant progress has been achieved in their material science. However, there are still many problems associated with the choice of optimal technology ensuring the achievement in practice of the predicted composites properties by theory, control of interfacial interaction to im-

prove the stability of the structure and properties of CM, with the development of new types of reinforcing elements that can raise the level of composite performance.

In the present work results of scientific and experimental studies on the development of casting technology (solid-liquid synthesis) for obtaining composite materials with macroheterogeneous structure have been summarized. The structures of composites are studied for different methods of synthesis, as well as for different chemical composition of cast iron granules. The prospects of using white vanadium cast iron granules as a reinforcing phase are shown.

Keywords. Copper-based composites, macroheterogeneous structure, cast iron granules, synthesis of composites, casting methods.

For citation. Kalinichenko A. S., Sheinert V. A., Kalinichenko V. A., Slutsky A. G. Technological features of production of copper-based composites reinforced with cast iron granules by means of casting. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 114–118. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-114-118.

Увеличение эксплуатационной надежности узлов трения является одной из приоритетных задач машиностроения. Это, в свою очередь, требует создания эффективных триботехнических материалов. В первую очередь, это относится к подшипникам скольжения, которые применяются в различных узлах трения в широком диапазоне условий работы [1–3]. Подшипники скольжения широко используются в узлах трения и должны иметь малый коэффициент трения, высокую износостойкость и сопротивление усталости, а также хорошую теплопроводность, прирабатываемость, смачиваемость маслом, коррозионную стойкость и обрабатываемость, низкий коэффициент линейного расширения и невысокую стоимость. Полностью удовлетворить перечисленным требованиям в реальных условиях проблематично, поэтому в технике используют разнообразные антифрикционные материалы, наилучшим образом отвечающие конкретным условиям работы [4, 5].

В частности, были разработаны литые композиционные материалы (ЛКМ), которые нашли применение в различных узлах трения, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. В качестве армирующих элементов структуры применяли как тугоплавкие неметаллические соединения, так и металлы (сплавы), а основу расплавляемых матриц составляли металлы и сплавы с более низкими температурами плавления [6]. В настоящее время хорошо развиты теоретические основы механики армированных композиционных материалов, существенные успехи достигнуты и в их материаловедении. Однако имеется еще много проблем, связанных с выбором оптимальной технологии, обеспечивающей достижение на практике предсказываемых теорией свойств композитов, управлением межфазным взаимодействием составных элементов материалов для повышения стабильности структуры и свойств ЛКМ, с разработкой новых видов армирующих элементов, позволяющих поднять уровень эксплуатационных характеристик композита [7, 8].

В настоящей работе обобщены результаты научных и экспериментальных исследований по разработке литейной технологии (твердожидким синтезом) получения композиционных материалов с макрорегетерогенной структурой. Одним из преимуществ применения литейных технологий является более низкая стоимость композитов в сравнении с материалами, получаемых методами порошковой металлургии. Композиционные материалы для подшипников скольжения на основе медных сплавов, упрочненных чугунами гранулами, были разработаны с учетом результатов работ [7, 8]. Данные композиционные материалы нашли применение для узлов трения, работающих при достаточно тяжелых условиях эксплуатации, таких, как опорные поверхности корпусов подшипников паровых турбоагрегатов [9]. Применение разработанных композиционных материалов позволило решить проблему нормализации тепломеханического состояния ряда паровых турбоагрегатов на белорусских тепловых станциях.

Известно, что с использованием литейных технологий композиционные материалы получают двумя способами: соединением твердой и жидкой фаз, а также соединением различных компонентов, находящихся в жидком состоянии (получение псевдосплавов). Использование для армирования композиционных материалов чугуновых гранул позволяет как снизить стоимость подшипников скольжения, так и обеспечить широкий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств за счет управления структурой чугуновых гранул, которая зависит от режимов термообработки. С целью изучения влияния исходной структуры гранул на свойства конечного изделия были проведены комплексные исследования роли способа получения чугуновых гранул на структуру готового композита.

На первом этапе работы была проведена модернизация узла грануляции лабораторной установки, предназначенной первоначально для получения быстроохлажденных модификаторов-раскислителей на основе алюминия (рис. 1). По такой технологической схеме в лабораторных условиях выполнены эксперименты и изготовлены опытные партии чугуновых гранул. В процессе гранулирования склонность чугуна к графитизации при эвтектическом превращении подавляется и высокоуглеродистая фаза кристалли-

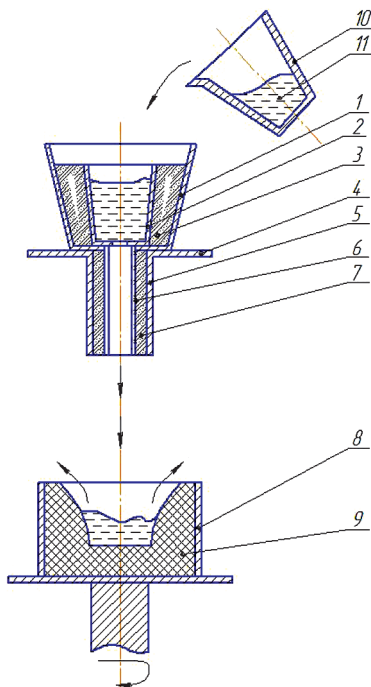


Рис. 1. Схема модернизированного узла для литья чугуных гранул: 1 – металлоприемник; 2 – огнеупорный тигель в донной части; 3 – теплоизоляция; 4 – опорное кольцо металлоприемника; 5 – нижний направляющий патрубок; 6 – кварцевая трубка; 7 – огнеупорная набивка; 8 – вращающийся гранулятор; 9 – профилированная огнеупорная набивка; 10 – разливной ковш; 11 – жидкий чугун

зуется в виде цементита. Это приводит к формированию в гранулах типичной микроструктуры доэвтектического белого чугуна, содержащей перлит и ледебурит. Данный характер затвердевания был подтвержден результатами металлографического анализа чугуных гранул, которые проводили с использованием электронного микроскопа VEGA II LMU, оборудованного микроанализатором INGA Energy 350 и приставкой «SpectroScan Max-GV». На рис. 2 представлены микроструктуры чугуных гранул двух фракций.

Анализ структур показал, что чем меньше размер гранул, тем более дисперсной является структура чугуна. Микротвердость опытных чугуных гранул характеризуется высокими значениями (от 7450 до 9450 МПа) и зависит от размера фракции. Такое высокое значение микротвердости свойственно для структуры белого чугуна, что подтверждается результатами металлографического анализа.

На следующем этапе исследований в лабораторных условиях были отработаны варианты получения композитов на основе бронзы, армированной быстроохлажденными чугуными гранулами, с использованием высокоскоростной индукционной плавки. Была разработана комплексная установка для управления процессом нагрева и избирательной плавки компонентов получаемого композита, что позволило регулировать параметры работы инвертора, контролировать температуру в зоне нагрева и температуру плавления компонентов. Для этого был проведен предварительный термический анализ бронзы, используемой в качестве матрицы в исследуемом композите, и установлена температура начала ее плавления, которая для данного сплава составила 1006 °С. Исходя из этого показателя, была принята рабочая температура процесса, равная 1080 °С, которая находится между температурой солидус для железоуглеродистого сплава – армирующего компонента (примерно 1150 °С) и температурой ликвидус для бронзовой основы. Такая технологическая схема позволяет эффективно управлять процессом нагрева исходных компонентов до температуры плавления бронзы, осуществлять пропитку полученной жидкой фазой армирующих чугуных гранул в течение заданной временной выдержки, а также удалять образовавшиеся газы в процессе охлаждения композита по заданному режиму [10]. Схема управления процессом получения композитов показана на рис. 3.

По разработанной методике выполнена серия экспериментов получения композитов. В качестве шихты использовали компактные слитки бронзы и чугуные гранулы различных фракций в требуемых соотношениях. При этом использовали различные варианты загрузки исходных материалов. Эксперименты показали, что вариант, при котором вначале загружается бронза, а сверху засыпаются чугуные гранулы, является более предпочтительным, так как позволяет эффективнее осуществлять пропитку армирующего материала жидкой бронзой. Кроме того, облегчается удаление газов в процессе формирования композита. Общий вид полученного композита показан на рис. 4.

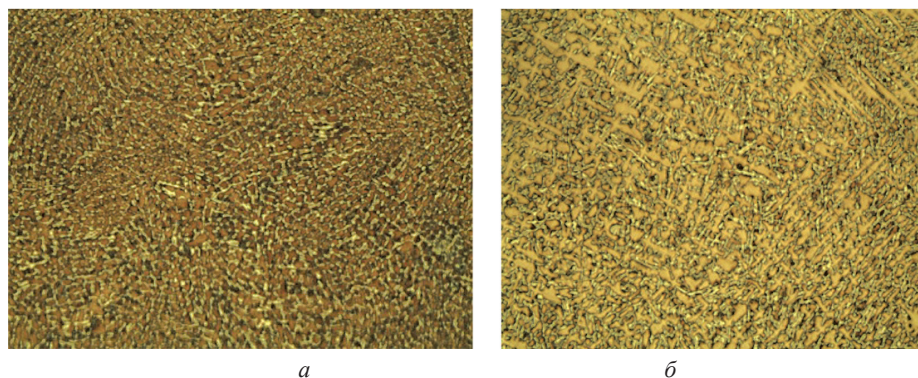


Рис. 2. Микроструктура гранул различной фракции. $\times 500$: а – 2 мм; б – 4 мм

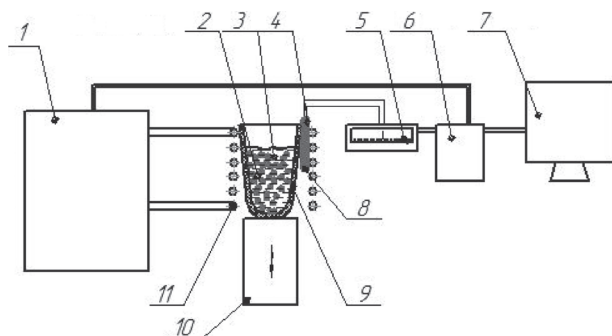


Рис. 3. Схема управления процессом плавки на высокочастотной индукционной установке: 1 – высокочастотная индукционная установка; 2, 3 – шихта; 4 – кварцевый наконечник; 5 – электронный термометр; 6 – коммутатор; 7 – компьютер; 8 – термопара ПР10; 9 – тигель; 10 – подвижный стол; 11 – водоохлаждаемый индуктор



Рис. 4. Общий вид полученного композита

Для оценки эффективности пропитки полученных образцов композита армирующими гранулами их разрезали как в продольном, так и в поперечном направлениях. При этом на продольных срезах изучали макроструктуру, а на поперечных – микроструктуру (рис. 5).

Из рисунка видно, что армирующие чугунные гранулы равномерно распределены по высоте композита (рис. 5, а), а в микроструктуре чугуна четко просматривается графитная фаза, которая образовалась за счет отжига гранул в процессе их пропитки при температуре 1080 °С. Такая структура характерна для ковкого чугуна, который служит хорошим конструкционным материалом (рис. 5, б).

Травление шлифа позволило выявить структуру металлической основы армирующих чугунных гранул в опытном композите. Структура состоит из перлита и включений феррита, не превышающих 10–15%, и расположенных вокруг хлопьевидного графита (рис. 5, в). Микротвердость армирующих чугунных гранул составляет в среднем 3500 МПа, а бронзовой матрицы в 3 раза меньше – 1220 МПа.

На рис. 6 приведена структура композиционного материала, армированного серийными отожженными гранулами ДЛЧ-1. На нетравленном шлифе видна структура мелкого графита. Металлическая основа состоит из перлита и феррита в центральной зоне гранулы и чисто ферритной составляющей на наружной поверхности, которая контактирует с бронзовой матрицей. Чугун при этом имеет невысокую микротвердость (2550 МПа), характерную для такого вида термической обработки.

Можно ожидать, что более высокие значения твердости гранул в опытном композиционном материале будут способствовать повышению физико-механических свойств и износостойкости готовых изделий.

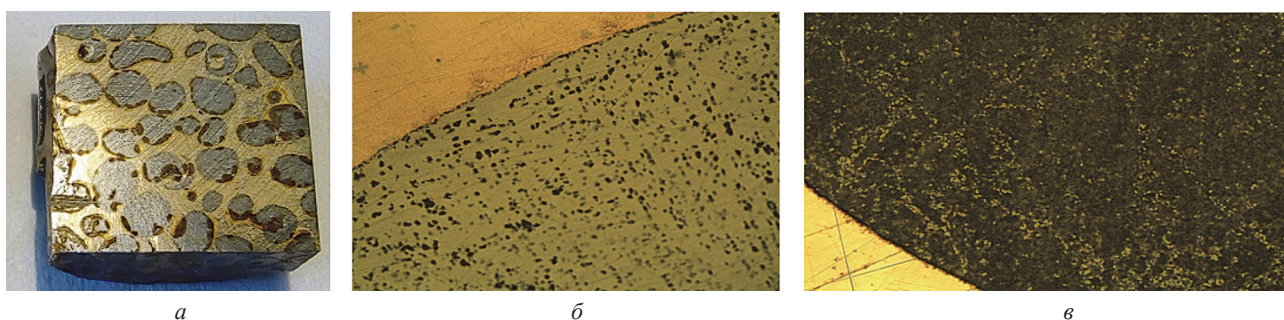


Рис. 5. Макроструктура (а) и микроструктура (б) образца композита с чугунными гранулами: а – продольный срез; б – не травлено. $\times 200$; в – травлено. $\times 200$

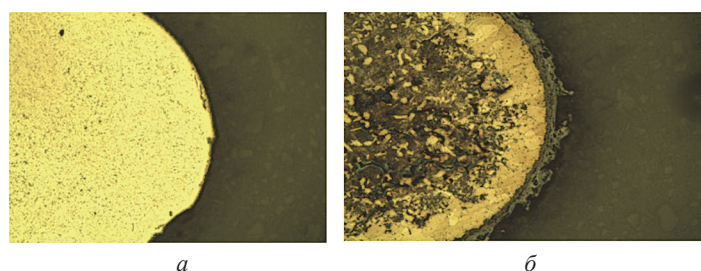


Рис. 6. Микроструктура армирующих чугунных гранул (ДЛЧ-1) серийного литого композита: а – $\times 200$; б – травлено. $\times 200$

Перспективным материалом для армирования композиционных материалов, получаемых твердожидким синтезом, является белый ванадиевый чугун с инверсной структурой (разработки которого ведутся на базе Филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт») [11]. Применение в качестве армирующего материала гранул из такого чугуна позволит существенно повысить износостойкость разрабатываемых композиционных материалов.

На основании полученных результатов подана патентная заявка на способ изготовления износостойкого композиционного материала с макрогетерогенной структурой для подшипников скольжения, обеспечивающего высокие физико-механические и триботехнические свойства при работе в условиях удельных нагрузок до 450 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подшипники скольжения. [Электронный ресурс]. режим доступа: <http://samip.ru/wp-content/uploads/>
2. [Электронный ресурс] режим доступа: http://www.technoel.ru/article_info.php?articles_id=5. Дата доступа 08.03.2016.
3. Halstead R. Considerations for Step Motors in Space Applications. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://www.alldrivesandcontrols.co.uk/wp-content/uploads/Considerations-for-Step-Motors-in-Space-Applications.pdf>. Дата доступа: 08.03.2016.
4. Черногоров Е. Подшипники скольжения. Челябинск, 2013. 10 с.
5. Цимбал И. Р. Обеспечение эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. С.-Петербург, 2009. 23 с.
6. [Электронный ресурс] режим доступа: <http://metal-archive.ru/litye-materialy/103-makroheterogennye-kompozity-armirovannye-granulami.html>. Дата доступа: 28.08.2018.
7. Затуловский С. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Литые композиционные материалы. Киев: Техника, 1990. 240 с.
8. Кезик В. Я. Формирование структуры поверхностного объема литых макрогетерогенных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки / В. Я. Кезик, А. С. Калининченко, Р. К. Иванова // Литые и металлургия. 2003. № 2. С. 118–123.
9. Кобзарь Ю. В., Калининченко А. С., Воронов Е. О. Опыт применения композиционных материалов с макрогетерогенной структурой для нормализации тепломеханического состояния паровых турбин // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. 2013. № 3. С. 79–86.
10. Калининченко В. А. Особенности получения макрогетерогенных композиционных материалов методами индукционной плавки, их структура и свойства / В. А. Калининченко, С. В. Григорьев, М. Л. Калининченко, А. Е. Зелезей // Литые и металлургия. № 4. 2015. С. 146–150.
11. Калининченко А. С. Влияние условий получения быстроохлажденных гранул на основе железа на свойства композиционных материалов, формируемых литейной технологией / А. С. Калининченко, В. А. Шейнерт, В. А. Калининченко, А. Г. Слуцкий // Литые и металлургия. 2017. № 1. С. 136–143.

REFERENCES

1. <http://samip.ru/wp-content/uploads/>
2. http://www.technoel.ru/article_info.php?articles_id=5.
3. Halstead R. Considerations for Step Motors in Space Applications. <http://www.alldrivesandcontrols.co.uk/wp-content/uploads/Considerations-for-Step-Motors-in-Space-Applications.pdf>. Data: 08.03.2016.
4. Chernogorov E. Podshipniki skol'zhenija [Sliding bearings]. Cheljabinsk, 2013, 10 p.
5. Cimbal I. R. Obespechenie jekspluatacionnyh svojstv par trenija priborov, rabotajushhih v jekstremal'nyh uslovijah [Ensuring the operational properties of friction pairs of devices operating in extreme conditions]. Avtoreferat dissertacii uch. st. kand. tehn. Nauk. S. Peterburg, 2009, 23 p.
6. <http://metal-archive.ru/litye-materialy/103-makroheterogennye-kompozity-armirovannye-granulami.html>
7. Zatulovskij S. S., Kezik V. Ja., Ivanova R. K. Litye kompozicionnye materialy [Cast Composites]. Kiev, Tjehnika Publ., 1990, 240 p.
8. Kezik V. Ya., Kalinichenko A. S., Ivanova R. K. Forming of the structure of surface vilume of the cast macroheterogeneous composition materials in conditions of low speed friction without lubricant. *Foundry production and metallurgy*, 2003, no. 2, pp. 118–123.
9. Kobzar' Ju. V., Kalinichenko A. S., Voronov E. O. Opyt primeneniya kompozicionnyh materialov s makroheterogennoj strukturoj dlja normalizacii teplomehanicheskogo sostojanija parovyh turbin [Experience of using composite materials with macroheterogeneous structure for the normalization of the thermal mechanical state of steam turbines]. *Jenergetika. Izvestija Vuzov i jenerguticheskij ob'edinenij SNG = Energy. News of universities and energy associations of the CIS*, 2013, no. 3, pp. 79–86.
10. Kalinichenko V. A., Grigorew S. V., Kalinichenko M. L., Zelezey A. E. Features of macroheterogeneous composite materials synthesis with help of induction melting, their structure and properties. *Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 4, pp. 146–150.
11. Kalinichenko A. S., Sheinert V. A., Kalinichenko V. A., Slutsky A. G. The effect of preparation conditions of rapidly solidified iron based granules on properties of composite material formed by casting technology. *Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 1, pp. 136–143.