



УДК 542.4

Поступила 05.10.2015

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ, ИХ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

FEATURES OF MACROHETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIALS SYNTHESIS WITH THE HELP OF INDUCTION MELTING, THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, С. В. ГРИГОРЬЕВ, М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, А. Е. ЗЕЛЕЗЕЙ,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь.

V. A. KALINICHENKO, S. V. GRIGOREV, M. L. KALINICHENKO, A. E. ZELEZEY,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Композиционные материалы с макрогетерогенной структурой являются довольно новым классом композитов и представляют несомненный интерес для применения в тяжело нагруженных узлах трения, позволяя иногда отказаться от подшипников качения. В настоящее время практическое применение нашли композиционные материалы с матрицей на основе медных сплавов. Научный и практический интерес представляют и сплавы на основе алюминия, что позволит снизить стоимость материала и их массу, а также расширить номенклатуру получаемых изделий. В работе рассмотрены способ синтеза композиционных материалов при индукционной плавке, их триботехнические свойства.

Composite materials with macroheterogeneous structure are a relatively new class of composites and are of great interest for application in heavy-duty friction, allowing sometimes to abandon bearings. Currently in practical use is made of composite materials with a matrix based on copper alloys. Scientific and practical interest and alloys based on aluminum, which will reduce the material cost and weight, as well as expand the range of products obtained. In work the method of synthesis of composite materials in induction melting, considered their tribological properties.

Ключевые слова. *Композиционные материалы, алюминиевые сплавы, медные сплавы, узлы трения, микроструктура, испытания на износостойкость.*

Keywords. *Composite materials, aluminum alloys, copper alloys, friction, microstructure, test the durability.*

Повышение износостойкости поверхностей деталей в узлах трения является одной из приоритетных задач машиностроения. Для решения данной задачи целесообразно переходить на управление процессом формирования микроструктуры на микро- и наноуровнях. Представляет научный интерес применение таких технологий для управления микроструктурой композиционных материалов с макрогетерогенной структурой, получаемых литейной технологией (твердо-жидким синтезом). Данные материалы обладают высокими эксплуатационными свойствами при использовании в тяжело нагруженных узлах трения [1]. В силу особенностей структуры и состава эти композиционные материалы показали наиболее эффективное применение при низких скоростях относительного движения в узлах трения и высокой удельной нагрузке [2]. Наибольшую нагрузку несут поверхностные слои, поэтому для повышения ресурса деталей важно обеспечить высокую износостойкость поверхностных слоев. Было изучено влияние модифицированных смазок и установлено их положительное влияние [3]. Однако разработанные материалы интересны и для условий отсутствия смазки, что происходит при аварийных состояниях. Поэтому необходимо разрабатывать методы повышения износостойкости поверхностных слоев материалов с макрогетерогенной структурой. Одним из методов управления микроструктурой поверхностных слоев является воздействие концентрированными потоками энергии, что создает условия для формирования структуры при неравновесных условиях, способствующих образованию микро- и наноразмерных фаз. Установлено, что применение лазерной обработки повышает триботехнические свойства материала [4].

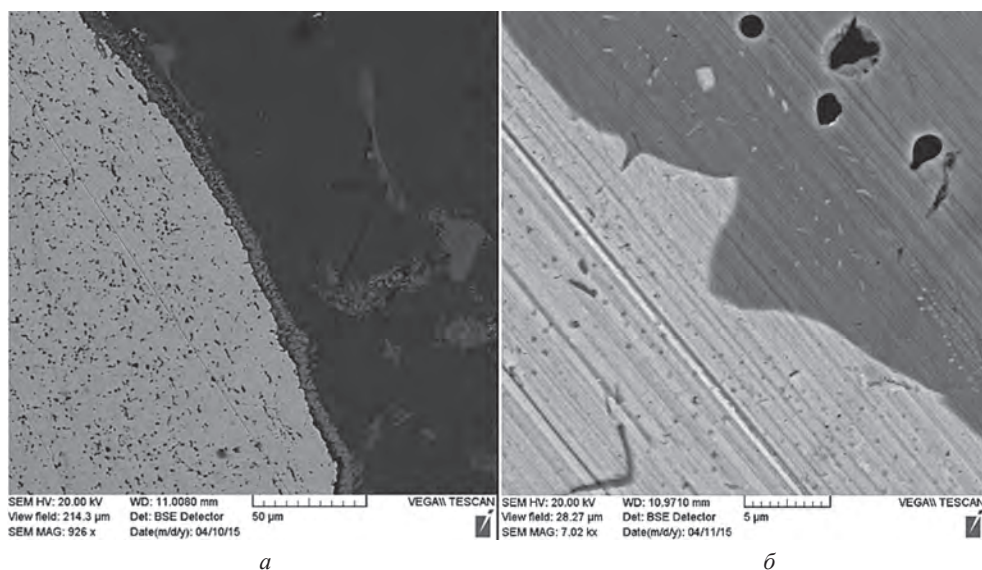


Рис. 1. Композиционные материалы, полученные с помощью индукционного нагрева: *а* – на основе сплава АК-7; *б* – на основе БрКМц3-1

Одна из практических задач – снижение стоимости продукции, что применительно к разрабатываемым сплавам заключается в сокращении времени синтеза. Для реализации поставленной задачи было решено использовать вместо стандартной литейной технологии производства данного типа материалов способ нагрева и синтеза композитов с применением индукционного нагрева. В качестве объекта исследований был выбран макронеоднородный композиционный материал на основе алюминиевого сплава АК-7 в первом случае и бронзы КМц3-1 во втором цикле экспериментов. Оба материала были армированы чугунными сферическими гранулами диаметром около 1,0 мм (ДЛЧ1.0).

Эксперименты проводили с помощью индукционного нагрева заранее подготовленной смеси гранул чугуна и сплавов, используя стандартную индукционную печь ИСТ-0,06. После обработки шлифы из образцов были изучены с применением оптической микроскопии (микроскоп «Микро 200») и электронного микроскопа VEGA II LMU, оборудованного микроанализатором INGA Energy 350 и приставкой «SpectroScan Max-GV».

В результате проведенных экспериментов установлено, что полученные материалы имеют типичную для литых композиционных материалов структуру (рис. 1), как для материала на алюминиевой, так и на бронзовой основе.

Для оценки качества полученного материала перед триботехническими испытаниями было принято решение провести детальный анализ микроструктуры для выяснения особенностей распределения химических элементов по сечению шлифа, особенно в зоне контакта «чугунная дробь – алюминиевая матрица». По характеру зон раздела фаз возможно оценить качество полученного композиционного материала и спрогнозировать вероятность его разрушения в процессе эксплуатации из-за трещинообразования либо выкрашивания армирующего элемента.

При оценке свойств композиционных материалов наибольшее внимание уделяется зоне раздела «чугунная гранула – алюминиевый сплав», поэтому эта граница фаз и была выбрана для исследований. Проведен анализ распределения элементов по линии выбранного участка (рис. 2), а также спектральный анализ элементов (рис. 3) и распределение их по линии (рис. 4).

Из анализа распределения материалов видно, что при индукционном синтезе наблюдается четко выраженная граница раздела «матрица-армирующая гранула», характерная и для литейного синтеза. Диф-

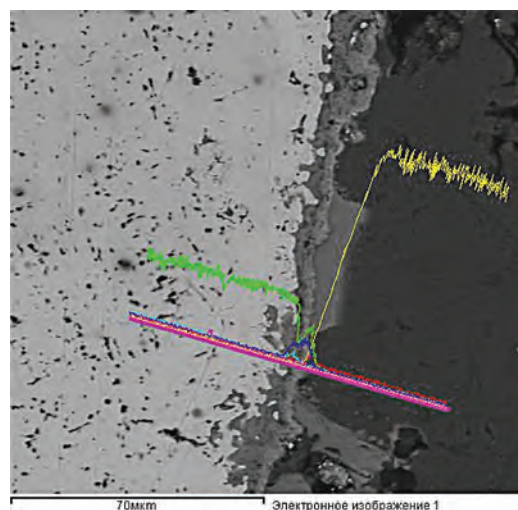


Рис. 2. Граница раздела «чугунная дробь – алюминиевый сплав» в композиционном материале, полученном с помощью индукционного нагрева

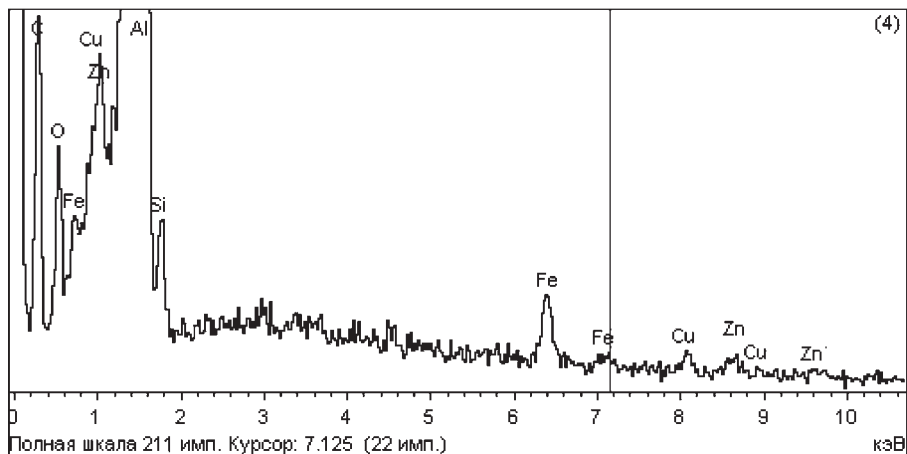


Рис. 3. Спектральный анализ элементов в образце рис. 2

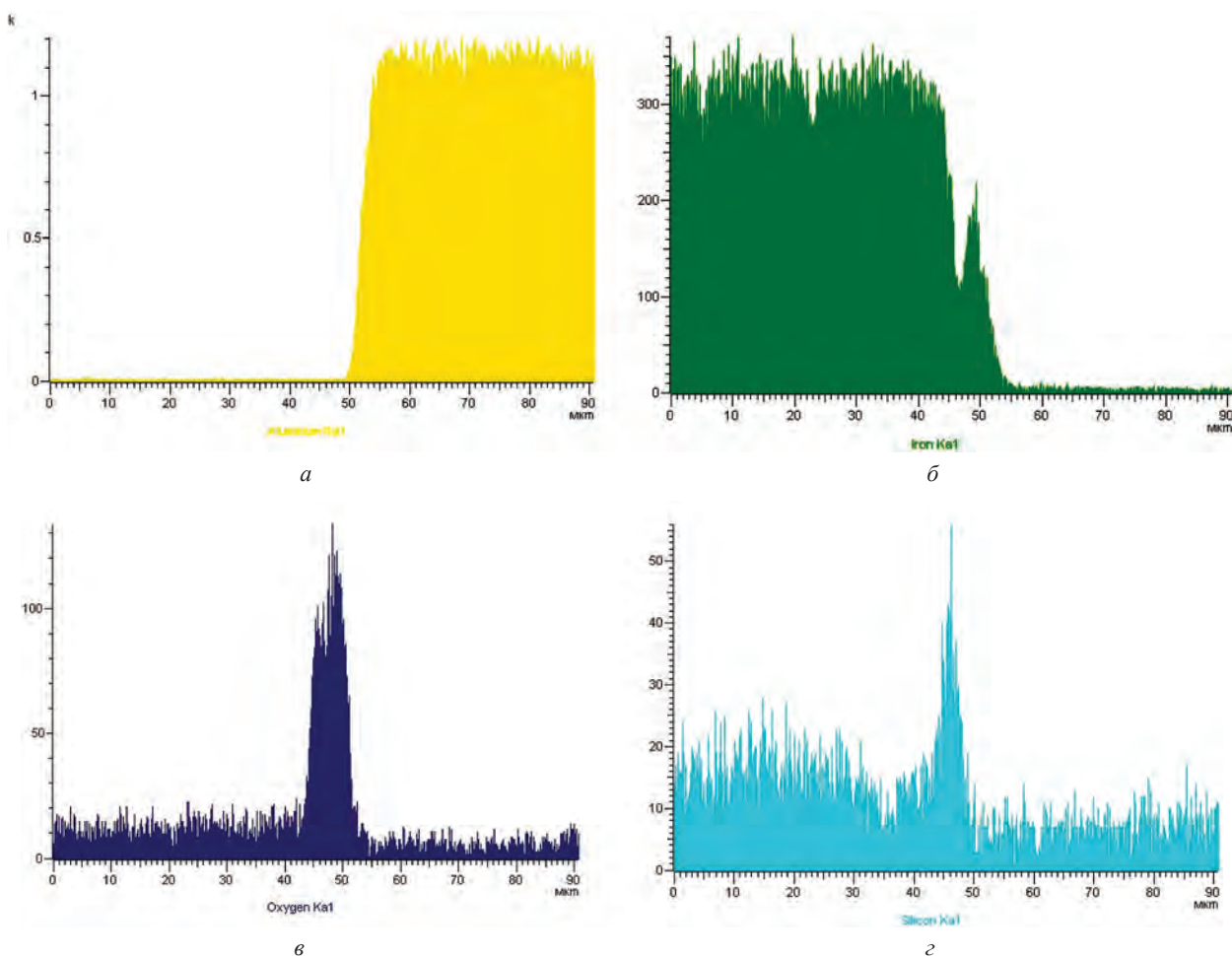


Рис. 4. Распределение элементов по линии в образце рис. 2: а – алюминий; б – железо; в – кислород; г – кремний

фузионная зона, образованная при взаимодействии матричного расплава и гранул, очень незначительна. Анализ распределения элементов (рис. 4) показывает, что в переходной зоне раздела содержится значительное количество кислорода (вероятнее всего, в виде оксидов), что при эксплуатации данного материала может негативно влиять на прочностные свойства. Возможно, появление значительного количества оксидов связано с захватом кислорода воздуха при индукционном нагреве. Однако необходимо отметить, что синтез композиционных материалов с макрогетерогенной структурой путем индукционного нагрева имеет хороший потенциал и возможность развития данной технологии.

Для сравнения следующим был испытан образец, синтезированный с матричным сплавом из бронзы Кмц3-1 (рис. 5). Для данного образца был также проведен спектральный анализ элементов (рис. 6) и установлены их суммарные концентрации (см. таблицу).

Анализ элементов материала, полученного с помощью индукционного нагрева по выбранным точкам (нормализован)

Спектр	Si	Mn	Fe	Cu	Итого
(1)	1,15	0,44	2,56	95,85	100,00
(2)	1,85	0,39	9,64	88,12	100,00
(3)	0,74	0,36	5,10	93,79	100,00
(4)	6,70	0,40	84,64	8,26	100,00
(5)	3,72	0,59	92,72	2,98	100,00
Среднее	2,83	0,44	38,93	57,80	100,00
Стандартное отклонение	2,44	0,09	45,57	47,75	
Максимальное	6,70	0,59	92,72	95,85	
Минимальное	0,74	0,36	2,56	2,98	

Анализ распределения элементов, проведенный для бронзового образца, показал, что в переходной зоне раздела в отличие от алюминиевого композита практически не наблюдается кислорода, что позволяет предположить о правильности выбранного направления и необходимости дальнейших исследований по данной тематике.

Проведенные триботехнические испытания полученных образцов показали (рис. 7), что алюминиевые композиции заметно уступают их медным аналогам, а также исходному сплаву АК-7. Однако, рассматривая композиционные материалы, полученные методами индукционной плавки и по стандартной технологии, можно с уверенностью отметить сходство их триботехнических свойств.

Необходимо отметить, что синтез композиционных материалов с макрогетерогенной структурой путем индукционного нагрева имеет хороший потенциал и возможность развития данной технологии. Однако, рассматриваемая технология требует дальнейшего изучения и доработки, так как в теле получаемых изделий (особенно в угловых зонах) встречаются места полного проплавления армирующего элемента, что негативно сказывается на их эксплуатационных свойствах. Но в тоже время разрабатываемая технология позволяет сократить время синтеза изделия из композиционного материала (например, для шпонки размером 220×45×50 мм используемой для термической стабилизации корпусов опор вала турбины) с 5 часов при использовании стандартной схемы литья до 25–35 мин при использовании индукционного нагрева.

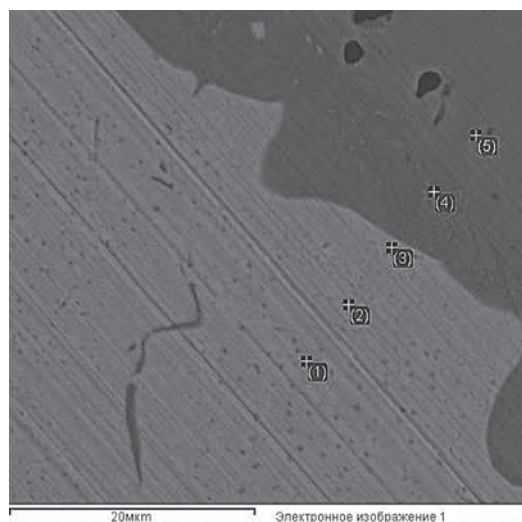


Рис. 5. Зона композиционного материала, полученного с помощью индукционного нагрева, и точки для анализа элементов

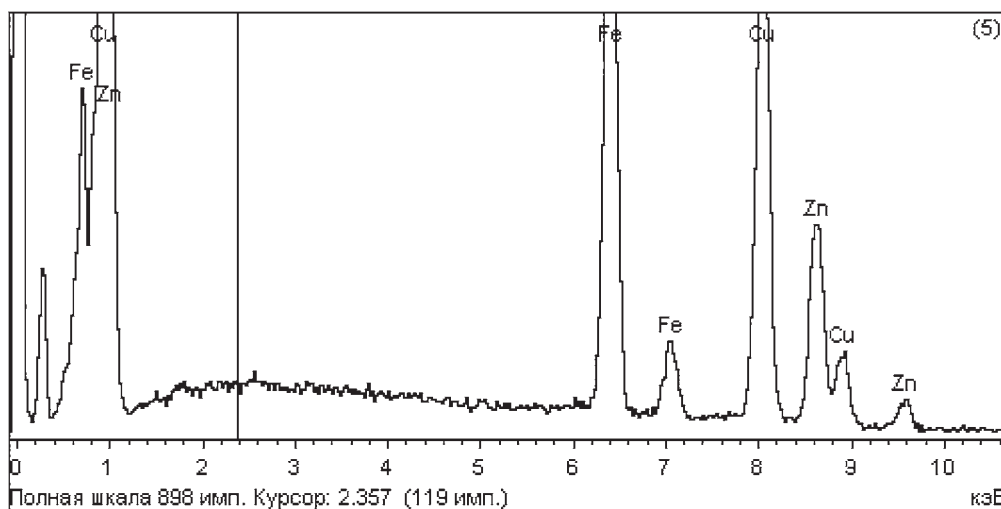


Рис. 6. Спектральный анализ элементов в образце рис. 5

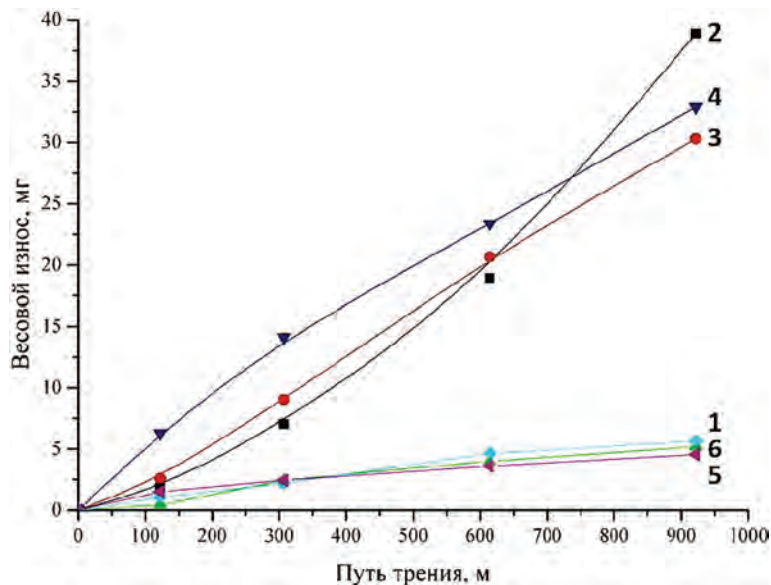


Рис. 7. Триботехнические испытания полученных образцов: 1 – исходный АК-7; 2 – композит с алюминиевой матрицей № 1; 3 – композит с алюминиевой матрицей № 2; 4 – БрКМц3-1 исходная; 5 – композиционный материал, полученный по стандартной технологии; 6 – композит с бронзовой матрицей, полученный индукционным нагревом

Литература

1. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Bergmann H. W., Kalinitchenko V. A. Structure of surface layers of metal matrix composites // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 1999. Vol. 30. P. 136–144.
2. Калининко А. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Формирование структуры поверхностного объема литых макронеоднородных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки // *Литье и металлургия*. 2003. № 2. С. 118–123.
3. Калининко В. А. Анализ структуры и свойств макронеоднородных композиционных материалов, полученных методами высокоэнергетического воздействия / Сб. науч. тр. X МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск: ФТИ. Кн. 2. С. 175–179.
4. Калининко А. С., Калининко В. А., Девойно О. Г. Микроструктурные изменения в поверхностных слоях макронеоднородных композитов при высокоэнергетическом воздействии // *Литье и металлургия*. 2013. № 2. С. 106–109.

References

1. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Bergmann H. W., Kalinitchenko V. A. Structure of surface layers of metal matrix composites. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 1999. Vol. 30, pp. 136–144.
2. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Ivanova R. K. Formirovanie strukturu poverhnostnogo obioma lituh makroheterogennuh kompozicionnuh materialov v uslovijah nizkoskorostnogo trenija bez smazki [The formation of the structure of the surface of the volume of cast macroheterogeneous composite materials in conditions of low friction without lubrication]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2003, no. 2, pp. 118–123.
3. Kalinichenko U. A. Analys strukturu i svoistv lituh makroheterogennuh kompozicionnuh materialov, poluchennuh metodami vysokoenergeticheskogo vosdeistvija [Analysis of the structure and properties of macroheterogeneous composite materials obtained by high-energy impact]. *Sbornik trudov X MNTK «Sovremennue materialy i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov»*. [Proceedings of the X international science-technical conference. Modern methods and technologies of creation and processing of materials. Minsk. Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2015. Book 2, pp. 175–179.
3. Kalinichenko A. S., Kalinichenko U. A., Devojno O. G. Mikrostrukturnie izmenenija v poverhnostnuh sloyah makroheterogennuh kompozitov pri vusokoenergeticheskom vozdeistvii [Microstructural changes in the surface layers of macroheterogeneous composites under high-energy impact]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2013, no. 2, pp. 106–109.

Сведения об авторе

Калининченко Владислав Александрович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь. E-mail: kvlad@bntu.by.

Information about the author

Kalinichenko Vladislav, Belarusian National Technical University. Nezavisimosty ave., 65, 220013, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: kvlad@bntu.by.