

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 621.454.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>

Поступила в редакцию 30.05.2019
Received 30.05.2019

А. Ф. Ильющенко^{1,2}, Е. Е. Петюшик¹, О. К. Кривонос¹

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь
²Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Беларусь

**ВВЕДЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДОБАВОК ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ
ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Рассмотрен возможный способ введения наноразмерных порошков в энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы (ЭГКМ). На примере полидисперсного наноразмерного углерода изучены основные способы введения наноразмерных компонентов в дисперсные и высоковязкие коллоидные системы, проведена оценка их эффективности, выявлены ограничения. Установлены основные факторы, влияющие на равномерность распределения наноразмерных компонентов в объеме композиционного материала, и пути нивелирования их влияния. Предложена технологическая схема повышения равномерности распределения наноразмерных компонентов за счет их предварительного осаждения на поверхность преобладающей по количеству дисперсной составляющей материала при одновременном ограничении роста ее удельной поверхности. Данный процесс может использоваться в качестве способа последующего снижения вязкости энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала на стадии смешивания его жидкой и твердой фаз.

Исследованы степень изменения фактора формы, удельной поверхности и распределения наноразмерной алмазосодержащей добавки по поверхности частиц аммониевой соли хлорной кислоты в зависимости от режимов смешивания компонентов в гравитационном смесителе. Установлены приемлемые технологические режимы смешивания.

Определены основные задачи дальнейшего исследования явлений, возникающих на границе фаз при введении в дисперсную среду изготавливаемого ЭГКМ наноразмерных добавок.

Ключевые слова: энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы, наноразмерные добавки, удельная поверхность, вязкость, дисперсная среда, технологические режимы смешивания

Для цитирования: Ильющенко, А. Ф. Введение наноразмерных добавок при модифицировании энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала / А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №2. – С. 135–142. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>

A. Ph. Ilyushchanka^{1,2}, Ya. Ya. Piatsiushyk¹, A. K. Kryvanos¹

¹State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Belarus
²O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

INTRODUCTION OF NANOSCALE ADDITIVES IN THE PROCESS OF MODIFICATION OF ENERGY-SATURATED HETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The article describes a possible way of introducing nanoscale powders into energy-saturated heterogeneous composite materials (ECM). By the example of polydispersed nanoscale carbon, the main well-known methods for introducing nanoscale components into dispersed and high-viscosity colloidal systems have been studied, their effectiveness has been evaluated, and limitations have been revealed. The main influencing factors on the uniform distribution of nanoscale components in the volume of the composite material and the ways of leveling their influence have been found. A technological scheme has been proposed for increasing the distribution uniformity of nanoscale components due to their preliminary deposition on the surface of the material prevailing in quantity of dispersed component while limiting the growth of its specific surface as a method of further reduction of the viscosity of the energy-saturated heterogeneous composite material at the stage of mixing its liquid and solid phases.

The rate of change of the form factor, specific surface and distribution of the nanoscale diamond-containing additive over the particle surface of ammonium salt of perchloric acid has been studied depending on the modes of mixing the components in a gravity mixer. Acceptable technological mixing modes have been found.

The main tasks of further study of phenomena arising at the phase boundary when introducing nanoscale additives into the dispersed medium of ECM have been determined.

Keywords: energy-saturated heterogeneous composite materials, nanoscale additives, specific surface, viscosity, dispersed medium, technological mixing modes

For citation: Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Introduction of nanoscale additives in the process of modification of energy-saturated heterogeneous composite material. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 135–142 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-135-142>

Введение. Современные энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы (ЭГКМ) широко представлены веществами, применяемыми в горнодобывающей промышленности, авиа-, машино-, тракторостроении и других отраслях. Как правило, данные материалы получают из двух и более компонентов путем перемешивания их полидисперсных фракций и последующего формования. Эти фракции чаще всего имеют микрометровый размер [1].

В зависимости от агрегатного состояния составных компонентов и технологии изготовления ЭГКМ можно классифицировать на материалы, получаемые из веществ, которые представлены: только твердой фазой, предполагающей после перемешивания проведение формования полученной композиции (от свободной засыпки до прессования);

твердой и жидкой фазой, после перемешивания которых композиционный материал формуется, как правило, литьевым способом (от свободного литья до литья под давлением). При этом жидкая фаза может либо вводиться в состав ЭГКМ при нормальной температуре, либо возникать после нагревания на одном из технологических этапов изготовления композиционного материала из компонентов смеси.

В статье рассмотрен ЭГКМ, изготавливаемый на полимерной основе, жидкая фаза в котором присутствует при нормальной температуре. В целях повышения эксплуатационных характеристик таких ЭГКМ в их состав вводят различные добавки, например энергетические добавки, катализаторы, стабилизаторы, антиоксиданты [2] и др. С развитием нанотехнологий в состав ЭГКМ стали вводить добавки наноразмерного уровня – алюминий типа Alex, ультрадисперсный алмаз или алмазосодержащую шихту, полученные детонационным синтезом [3], диоксид титана, а также другие наноразмерные компоненты.

Постановка задачи исследования. Основными характеристиками ЭГКМ, определяющими технологический способ и режимы его изготовления, являются его плотность и равномерность распределения компонентов по всему объему композиционного материала. Требуемая плотность упаковки достигается посредством подбора размера фракций применяемых компонентов, а равномерность распределения вводимых компонентов – режимами перемешивания [4].

Эти технологические правила характерны для фракций твердой фазы микрометрового размера. Известно, что с уменьшением размеров фракций компонентов твердой фазы до уровня $10 \text{ нм} < R < 100 \text{ нм}$ существенно меняются их свойства [5]. Для оценки значимости этих изменений с учетом приведенных характеристик ЭГКМ проводился сравнительный морфологический анализ крупной фракции (240–360 мкм) аммониевой соли хлорной кислоты (основного компонента ЭГКМ) и ультрадисперсной алмазосодержащей шихты (энергетическая добавка и антиоксидант).

Съемка морфологии поверхности отобранных компонентов осуществлялась на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira (производство Tescan, Чехия). Результаты морфологического анализа поверхности частиц аммониевой соли хлорной кислоты и размеров частиц алмазосодержащей шихты представлены на рис. 1.

В ходе проведенного морфологического анализа установлено, что частицы выбранной наноразмерной добавки (рис. 1, *b*) имеют размер 20–40 нм и в отличие от компонентов микрометрового размера (рис. 1, *a*) представлены агломератами, которые при механическом перемешивании компонентов ЭГКМ не разрушаются. При незначительном количестве вводимых наноразмерных компонентов (от десятых долей до нескольких мас.%) наличие таких агломератов и их неравномерное распределение в гетерогенной структуре ЭГКМ является основной причиной нестабильности эксплуатационных свойств композиционного материала.

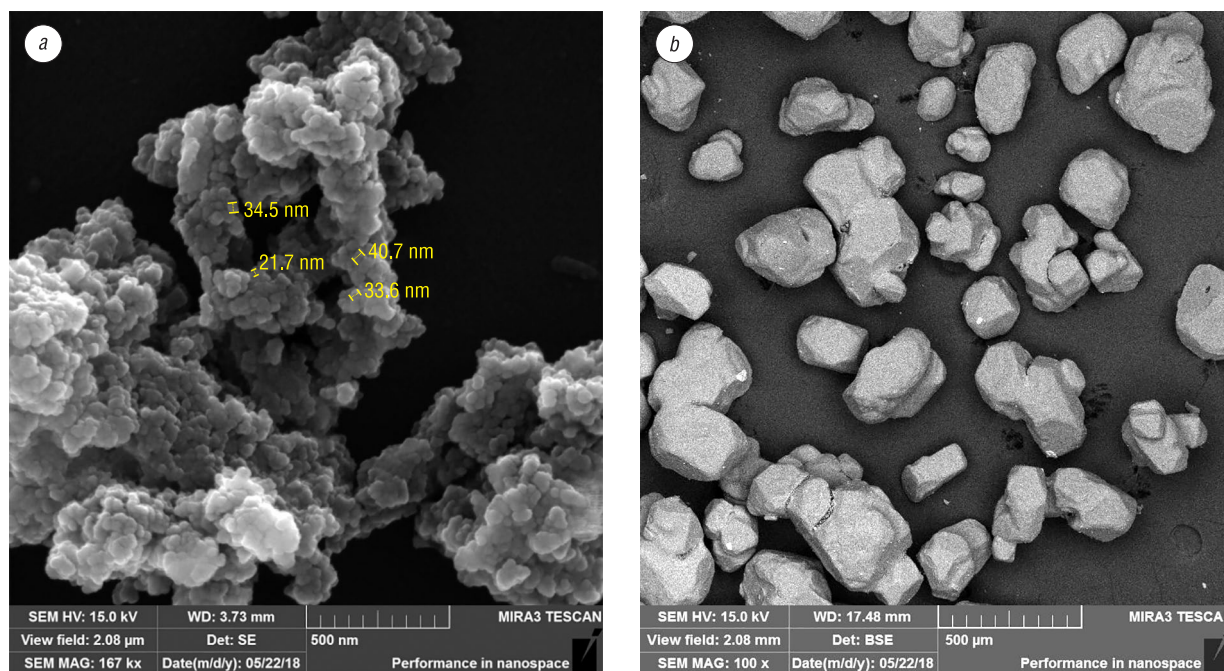


Рис. 1. Вид частиц ультрадисперсной алмазосодержащей шихты (a) и аммониевой соли хлорной кислоты (b)
 Fig. 1. The appearance of particles of ultra-dispersed diamond-containing charge mixture (a) and ammonium salt of perchloric acid (b)

Режимами перемешивания также достигаются равномерность смачивания поверхности и заполнение пустот в упаковке частиц твердой фазы полимерным материалом, чем обеспечиваются требуемые физико-механические характеристики ЭГКМ после его полимеризации. В то же время с уменьшением размеров фракций пропорционально увеличивается площадь поверхности, подлежащая смачиванию компонентами жидкой фазы. Это подтвердилось при изучении степени изменения размера площади поверхности частиц твердой фазы с введением в состав ЭГКМ наноразмерной добавки путем измерения удельной поверхности частиц твердой фазы ЭГКМ.

Определение удельной поверхности алмазосодержащей шихты и аммониевой соли хлорной кислоты проводили методом BET на анализаторе площади поверхности и размера пор SA 3100 фирмы BECKMAN COULTER (США). Согласно результатам исследования, удельная поверхность отобранного образца алмазосодержащей шихты составила $424,71 \text{ м}^2/\text{г}$, а аммониевой соли хлорной кислоты – $0,475 \text{ м}^2/\text{г}$.

С учетом полученных значений удельной поверхности установлено, что введение ультрадисперсной алмазосодержащей шихты в количестве 0,5 мас.% в ЭГКМ, состоящий из полимера и аммониевой соли хлорной кислоты в соотношении 20/80, и массой 3 кг увеличивает поверхность смачивания почти в 7 раз. Это пропорционально снижает вязкость композиционного материала [6] и увеличивает количество энергии, необходимой для его перемешивания. Таким образом, формование такого высоковязкого высоконаполненного полимерного материала невозможно без специального технологического оборудования.

На основании изложенного сформулирована основная задача исследования – определение способа и разработка технологических режимов получения ЭГКМ, имеющего в своем составе наноразмерные компоненты.

Формулирование гипотезы исследования. В настоящее время разработано и внедрено множество способов введения наноразмерных добавок в состав высоконаполненного полимерного материала. Наиболее часто применяемые способы введения наноразмерных добавок в ЭГКМ или его аналог предполагают:

последовательное введение компонентов твердой фазы в среду полимерного материала (Способ получения смесового твердого топлива с металлическим горючим : пат. РФ, № 2 474 567, МПК С 06 D 5/06, С 06 В 33/04, авторы – В. А. Архипов и др.);

предварительное перемешивание наноразмерных добавок с одним из компонентов ЭГКМ микрометрового размера (Способ получения смесового твердого топлива : пат. РФ № 2 429 282, МПК С 10 L 9/10, В 82 В 3/00, авторы – В. А. Архипов и др.);

механоактивация одного из компонентов твердой фазы микрометрового размера в присутствии наноразмерных добавок [7];

сокристаллизация наноразмерных добавок с одним из доминирующих компонентов твердой фазы ЭГКМ (Топливная композиция (варианты) : пат. РФ № 2 649 573, МПК С 10 L 9/10, В 82 В 3/00, авторы – В. А. Горбачев, Е. Ю. Убей-Волк, Н. В. Шевченко).

В целях выбора наиболее целесообразного способа проводилось экспериментальное сравнение результатов их реализации. Для проведения эксперимента изготавливался опытный образец ЭГКМ, состоящий из 20 мас.% полимерного связующего, 79,5 мас.% аммониевой соли хлорной кислоты (фракции 240–360 мкм) и 0,5 мас.% ультрадисперсной алмазосодержащей шихты, полученной способом детонационного синтеза.

Установлено, что введение наноразмерных добавок в среду высоконаполненного полимерного материала в силу его развитой удельной поверхности приводит к резкому увеличению вязкости полимерной среды, комкованию твердой фазы, что является причиной невозможности получения однородной массы даже в течение длительного перемешивания. Остающиеся после перемешивания агломераты вводимого наноразмерного компонента провоцируют неоднородность ЭГКМ и, как следствие, нестабильность эксплуатационных свойств данного материала. Дальнейшее перемешивание такой композиции возможно только после добавления растворителей, существенно снижающих вязкость перемешиваемого состава (достигалось введением в состав смешиваемой композиции растворителей на основе гликолей).

Практически аналогичная ситуация характерна для способа, предполагающего предварительное перемешивание наноразмерных добавок с одним из компонентов ЭГКМ микрометрового размера. В отличие от предыдущего способа в процессе проведения перемешивания часть агломератов из наноразмерной добавки разрушалась (около 25–30 %, определялась визуально на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira). Увеличение длительности процесса не давало положительного результата. Можно предположить, что механического воздействия в ходе твердофазного перемешивания недостаточно для получения однородного фракционного состава и разрушение присутствующих в добавке агломератов сопровождается образованием новых.

Предварительная механоактивация частиц одного из доминирующих компонентов микрометрового размера в присутствии наноразмерной добавки привела к росту дисперсности за счет дробления частиц этого компонента, увеличению удельной поверхности твердофазной составляющей, а также увеличению доли мелкой фракции частиц твердой фазы. Эти изменения явились причиной снижения плотности упаковки частиц твердой фазы ЭГКМ и, как в уже рассмотренных способах введения наноразмерных добавок в композиционный материал, негативно сказались на его вязкости при смешивании твердой и жидкой фаз.

Сокристаллизация ультрадисперсной алмазосодержащей шихты с аммониевой солью хлорной кислоты не проводилась, так как эта технологическая операция требует соответствующего лабораторного оборудования и является достаточно дорогостоящей. При этом не исключено, что частицы сокристаллизованных элементов могут иметь форму, существенно отличную от сферической, что может способствовать уменьшению плотности упаковки твердой фазы, а соответственно, и плотности изделия из ЭГКМ.

В ходе проведенного экспериментального сравнения способов введения наноразмерных добавок определено осаждение некоторого их количества на поверхность частиц твердой фазы микрометрового размера (аммониевой соли хлорной кислоты). Установлено, что снижение вязкости компонентов жидкой фазы ЭГКМ (например, при добавлении в полимерный материал растворителей) способствует разрушению агломератов наноразмерной добавки; а дополнительное введение мелющих тел при смешивании компонентов ЭГКМ обуславливает увеличение количества осажденных частиц наноразмерной добавки.

С учетом полученных результатов сформулирована *гипотеза исследования*, в основу которой положено предположение, что *решение задачи по модифицированию ЭГКМ наноразмерной добавкой возможно посредством ее равномерного осаждения на поверхность частиц одного из компонентов твердой фазы, количество которого является преобладающим в общем объеме*

композиционного материала. Это будет способствовать равномерному распределению такой добавки по всему объему ЭГКМ. Предполагается, что данным способом также можно уменьшить размер поверхности твердофазной составляющей, предназначенной для смачивания компонентом(ами) жидкой фазы, за счет исключения их примыкающих поверхностей.

Преобладающим элементом в составе твердой фазы ЭГКМ является аммониевая соль хлорной кислоты, которая для повышения плотности упаковки может быть представлена двух- и более фракционным составом [1]. Для двухфракционного состава (наиболее часто используемый подход при изготовлении ЭГКМ) характерно соотношение крупная/мелкая фракция – 70/30 мас.% [8]. При таком соотношении осаждение на поверхность частиц крупной фракции будет достаточным для равномерного распределения наноразмерной добавки по всему объему ЭГКМ.

Наличие жидкой фазы благоприятствует разрушению агломератов за счет создаваемых рабочим органом смесительного оборудования турбулентных потоков дисперсной среды, а также возрастанию числа контактных взаимодействий тел дисперсной системы, которые способствуют осаждению частиц наноразмерных добавок на поверхность аммониевой соли хлорной кислоты. Дальнейшее взаимодействие частиц наноразмерной добавки и аммониевой соли хлорной кислоты обеспечивается наличием адгезионных сил, возникающих на границе раздела контактирующих частиц.

Можно предположить, что введение в рабочий объем смесительного оборудования мелющих тел будет способствовать росту интенсивности контактных взаимодействий между частицами компонентов ЭГКМ, увеличению адгезионных сил, возникающих на границе раздела контактирующих частиц, а также улучшению морфологических характеристик частиц твердофазной составляющей.

Обсуждение результатов исследований. В ходе разработки режимов модифицирования решались задачи по определению:

- состава жидкой фазы, в среде которой возможно проведение осаждения;
- целесообразного количества компонентов с учетом рабочего объема смесителя;
- продолжительности модифицирования для наиболее полного осаждения наноразмерной добавки на поверхность частиц аммониевой соли хлорной кислоты;
- требуемой массы мелющих тел;
- режимов работы смесительного оборудования.

С учетом результатов исследований, проведенных в [9], в качестве жидкой фазы выбран этанол (СТБ 1334-2003).

Осаждение осуществлялось в гравитационном смесителе СМБ-4. Степень загрузки рабочего объема смесителя, режимы модифицирования и другие параметры определялись опытным путем при смешивании в выбранной среде 99,5 мас.% крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты (240–360 мкм) и 0,5 мас.% ультрадисперсной алмазосодержащей шихты. В ходе повторяющихся опытов с различными массой перемешиваемых компонентов, количеством и массой дополнительных мелющих тел, степенью загрузки рабочего объема смесителя, частотой вращения рабочего органа смесителя и продолжительностью модифицирования решалась задача выбора наиболее эффективного технологического режима.

Целесообразность технологических режимов оценивалась:

- по полноте и однородности осаждения наноразмерной добавки на поверхность частиц крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты;
- по величине изменения морфологических характеристик модифицируемых фракций аммониевой соли хлорной кислоты (улучшении фактора формы);
- по степени снижения удельной поверхности компонентов твердофазной составляющей ЭГКМ.

Для оценки приведенных характеристик проводили измерения рассматриваемых свойств до начала осаждения наноразмерной добавки на поверхность частиц аммониевой соли хлорной кислоты и после завершения процесса. Полноту и однородность осаждения оценивали на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения MIRA. Степень изменения фактора формы определяли на автоматическом анализаторе изображения Mini-Magiscan (производство Jouse Loebel, Великобритания) по программе Genias 26 (погрешность метода – 3–5 относительных процентов), а установление изменения значения удельной поверхности частиц твердофазной

составляющей проводили методом BET на анализаторе площади поверхности и размера пор SA 3100 фирмы BECKMAN COULTER (США).

По результатам проведенных экспериментов установлены наиболее целесообразные технологические режимы смешивания:

степень заполнения рабочего объема смесителя	40 %;
время перемешивания	4 ч;
масса дополнительных мелющих тел	0,017 $m_{\text{перемешив. шихты}}$;
частота вращения рабочего органа смесителя	60 мин ⁻¹ ;
соотношение массы этанола к массе перемешиваемого состава	0,6:1.

Данным технологическим режимам соответствовали значения степени изменения фактора формы, удельной поверхности и распределения наноразмерной добавки по поверхности частиц аммониевой соли хлорной кислоты. Изменения значения смачиваемой поверхности до и после осаждения приведены в таблице.

Изменения величины смачиваемой поверхности частиц твердой фазы до и после осаждения наноразмерной добавки

Variability of the wetted surface of the particles of the solid phase before and after deposition of nanoscale additives

Компонент ЭГКМ	Удельная поверхность, м ² /г	Масса вводимого вещества, кг	Площадь поверхности частиц компонента ЭГКМ, м ²
<i>До осаждения</i>			
Аммониевая соль хлорной кислоты	0,475	2,985	1417,9
Алмазосодержащая наноразмерная шихта	430	0,015	6450
<i>После осаждения</i>			
Твердая фаза ЭГКМ	1,956	3	5868

Результаты анализа морфологии поверхности в начале (5 мин после смешивания) и после проведения осаждения наноразмерной добавки на поверхность частиц аммониевой соли хлорной кислоты представлены на рис. 2.

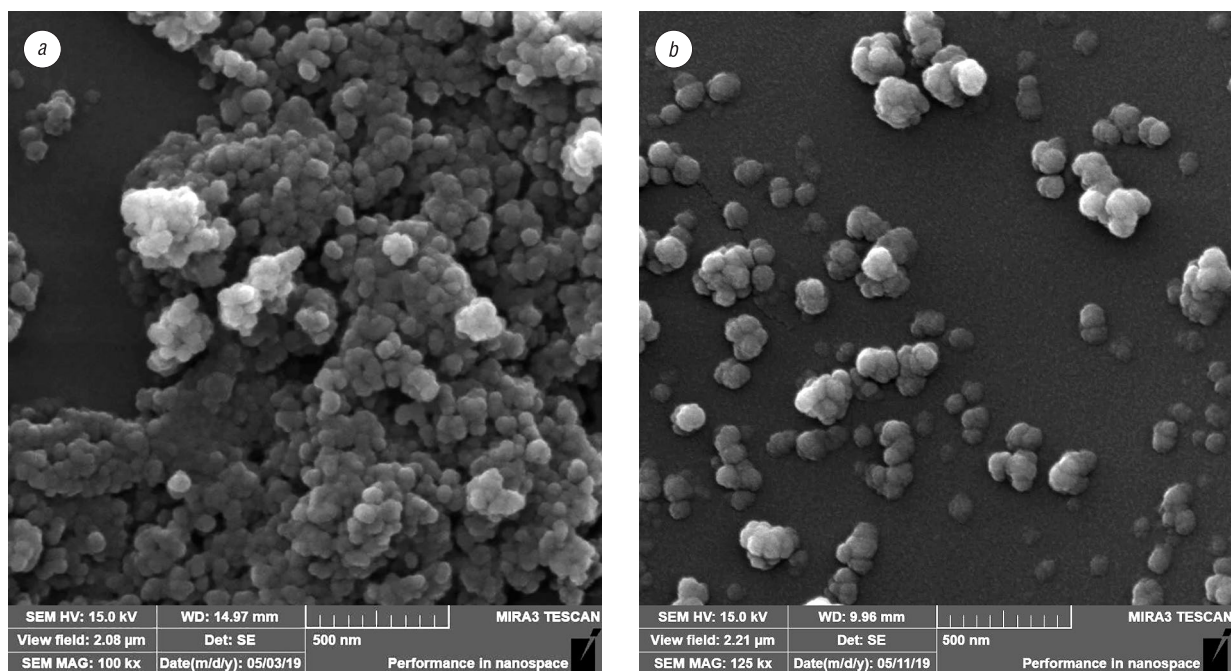


Рис. 2. Морфология поверхности твердофазной составляющей ЭКМ: *a* – после 5 мин смешивания, *b* – после завершения модифицирования

Fig. 2. The surface morphology of the solid-phase ECM component: *a* – after 5 minutes of mixing, *b* – after the completion of the modification

Таким образом, предложенный способ модифицирования ЭГКМ наноразмерными добавками позволил осуществить их осаждение на поверхность превалирующей по количеству дисперсной составляющей, обеспечив при этом:

уменьшение площади поверхности частиц твердой фазы ЭГКМ на 25 %;

улучшение значения фактора формы модифицированных частиц аммониевой соли хлорной кислоты (до модифицирования – 0,86, после – 0,91);

уменьшение числа и размеров агломератов наноразмерной добавки;

равномерное распределение наноразмерной добавки по всему объему ЭГКМ.

Заключение. В работе подтверждена гипотеза о возможности введения в состав ЭГКМ наноразмерной добавки посредством ее осаждения на поверхность частиц крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты. Определены режимы работы технологического оборудования, которые могут быть положены в основу промышленной технологии модифицирования ЭГКМ алмазосодержащей шихтой, полученной в ходе детонационного синтеза. Эти режимы могут быть применимы для других наноразмерных добавок, вводимых в ЭГКМ.

С учетом полученных результатов сформулированы научные задачи, заключающиеся в необходимости исследования:

взаимодействия между компонентами дисперсной фазы;

механизма смачиваемости поверхности частиц твердой фазы ЭГКМ;

степени изменения межмолекулярных сил на границе раздела фаз до и после осаждения алмазосодержащей шихты на поверхность частиц аммониевой соли хлорной кислоты;

порядка взаимодействия между дисперсной фазой и дисперсной средой.

Решение этих задач обеспечит формирование научно-технического задела для разработки и освоения в производстве промышленной технологии модифицирования ЭГКМ наноразмерными добавками.

Список использованных источников

1. Повышение плотности упаковки твердой фазы гетерогенного композиционного материала. Основные проблемы и пути их решения / А. Ф. Ильюшенко [и др.] // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – Вып. 40. – С. 42–47.
2. Модифицирование энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала циклическими нитраминами / А. Ф. Ильюшенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вест. Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 27–33. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-27-33>
3. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.
4. Кривонос, О. К. Моделирование процесса смешивания энергонасыщенного композиционного материала на основе генетического алгоритма / О. К. Кривонос // Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2017. – Вып. 33. – С. 90–97.
5. Андриевский, Р. А. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 192 с.
6. Бернер, М. К. Наночастицы энергетических материалов. Способы получения и свойства / М. К. Бернер, В. Е. Зарко, М. Б. Талавар // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 6. – С. 3–30.
7. Жорник, В. И. Антифрикционные композиционные материалы, модифицированные наноразмерными алмазно-графитовыми добавками: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / В. И. Жорник. – Минск, 2012. – 346 с.
8. Влияние гранулометрического состава частиц на плотность упаковки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sunspire.ru/articles/part14> – Дата доступа: 11.03.2019.
9. Кривонос, О. К. Технология модифицирования энергонасыщенного композиционного материала ультрадисперсными алмазами / О. К. Кривонос // Порошковая металлургия: Респ. межвед. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск: Нац. акад. наук Беларусі, 2018. – Вып. 41. – С. 194–199.

References

1. Ilyushchenko A. F., Krivonos O. K., Petyushik E. E., Smirnov V. G. Increasing the packing density of the solid phase of a heterogeneous composite material. The main problems and ways for their solutions. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskiy mezhvedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. Iss. 40, pp. 42–47 (in Russian).
2. Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Modification of energy-saturated heterogeneous composite material with cyclic nitramines. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 27–33 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-27-33>

3. Vityaz' P. A., Zhornik V. I., Il'yshchenko A. F., Senyt' V. T., Komarov A. I., Korzhenevskii A. P., Ivakhnik A. V. *Nanodiamonds of Detonation Synthesis: Production and Application*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 381 p. (in Russian).
4. Kryvanos A. K. Modeling the process of mixing energy-saturated composite material based on a genetic algorithm. *Sbornik nauchnykh statei Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Collection of Scientific Papers of the Military Academy of the Republic of Belarus]. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus, 2017. Iss. 33, pp. 90–97 (in Russian).
5. Andrievsky R. A., Ragulya A. V. *Nanostructured Materials*. Moscow, Academy Publ., 2005. 192 p. (in Russian).
6. Berner M. K., Zarko V. E., Talavar M. B. Nanoparticles of energy materials. Ways of production and properties. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 625–647. <https://doi.org/10.1134/s0010508213060014>
7. Zhornik V. I. *Antifriction Composite Materials Modified with Nanoscale Diamond-Graphite Additives*. Minsk, 2012. 346 p. (in Russian).
8. *The effect of article size distribution on the packing density*. Available at: <https://www.sunspire.ru/articles/part14> (accessed 11 March 2019) (in Russian).
9. Kryvanos A. K. Modification technology of energy-saturated composite material with ultra-dispersed diamonds. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2018. Iss. 41, pp. 194–199 (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии – директор Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Information about the authors

Aliaksandr Ph. Ilyushchanka – Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director General of the State Research and Production Powder Metallurgy Association – Director of the O.V. Roman Powder Metallurgy Institute, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Yauheni Ya. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of Director General for Research, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Deputy of Director General, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by