

УДК 66.011
ББК Л1.7

Игорь Евгеньевич Калашников

доктор технических наук,
Институт металлургии и материаловедения
им. А. А. Байкова Российской академии наук
(Москва, Россия), e-mail: kalash2605@mail.ru

Владимир Викторович Ковалевский

доктор геолого-минералогических наук,
Институт геологии Карельского научного центра
Российской академии наук (Петрозаводск, Россия), e-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

Татьяна Александровна Чернышова

доктор технических наук, профессор,
Институт металлургии и материаловедения
им. А. А. Байкова Российской академии наук
(Москва, Россия), e-mail: chern@imet.ac.ru

Людмила Константиновна Болотова

научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения
им. А. А. Байкова Российской академии наук
(Москва, Россия), e-mail: l.bolotova@mail.ru

Композиционные материалы, упрочнённые модифицированными шунгитовыми породами и керамическими микрочастицами¹

Проведены исследования по выбору и совершенствованию технологии модифицирования и введения перспективных наполнителей для жидкофазного совмещения компонентов композиционных материалов (КМ). Представлены результаты исследований получения КМ функционального назначения на основе разработанной технологии армирования алюмоматричных КМ наномодифицированными шунгитовыми породами и керамическими микрочастицами. Методами рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, комбинированного рассеяния наноструктурированной шунгитовой породы оценено влияние модифицированных шунгитов на структуру и эксплуатационные характеристики КМ, выполняющих роль опор в процессах трения. Установлено, что при жидкофазном совмещении компонентов комплексное использование дискретных керамических частиц карбида кремния и углерода в виде частиц графита, нанотрубок или фуллеренов, полученных при модифицирующей обработке шунгитовых пород, позволило в 2–4 раза увеличить износостойкость и на 30–40 % снизить коэффициенты трения разработанных КМ для применения их в трибоузлах различных технических приложений.

Ключевые слова: композиционные материалы, алюминиевые сплавы, шунгитовые породы, модифицирование, износостойкость, коэффициент трения.

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №11-08-00258-а и НШ-854.2012.3).

Igor Evgen'evich Kalashnikov

Doctor of Engineering Science,
Baykov Institute of Metallurgy and Material Science,
Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia), e-mail: kalash2605@mail.ru

Vladimir Viktorovich Kovalevskiy

Doctor of Geology and Mineralogy,
Institute of Geology, Karelian Scientific Center,
Russian Academy of Sciences
(Petrozavodsk, Russia), e-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

Tatyana Aleksandrovna Chernyshova

Doctor of Engineering Science, Professor,
Baykov Institute of Metallurgy and Material Science,
Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia), e-mail: chern@imet.ac.ru

Lyudmila Konstantinovna Bolotova

Research Assistant,
Baykov Institute of Metallurgy and Material Science,
Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia), e-mail: l.bolotova@mal.ru

Composite Materials Reinforced with Modified Shungite Rocks and Ceramic Microparticles

The research on the selection and improvement of technology of modification and introduction of advanced fillers for a liquid phase of combining the components of composite materials (CM) was conducted. The paper presents the results of investigations of obtaining functional purpose CM on the basis of the developed technology of reinforcement of aluminomatrix CM by nanomodified shungite rock and ceramic particles. By methods of x-ray phase analysis, scanning electron microscopy, combined scattering of shungite rock nanostructure, the effect of modified shungites on the structure and operational characteristics of the CM performing the role of pillars in the processes of friction was estimated. The study has found that in the liquid-phase combination of components, integrated use of discrete ceramic particles of silicon carbide and carbon in the form of graphite particles, carbon nanotubes or fullerenes obtained by the modifying processing of shungite rocks results in 2–4 times wear resistance increase and 30–40 % reduction of friction coefficients in the developed composite materials, for their further use in various technical tribology applications.

Keywords: composite materials, aluminium alloys, shungite rock, modification, wear resistance, coefficient of friction.

Введение. В настоящее время успехи синтеза и дальнейшего практического применения дисперсно наполненных металломатричных композиционных материалов (КМ) в значительной степени определяются достижениями материаловедов в области создания и разработки новых перспективных упрочняющих наполнителей и модификаторов структуры [1; 4]. Введение в металломатричные КМ углерода, в том числе и в виде частиц графита, нанотрубок или фуллеренов [6; 7], оказывает влияние на структуру и функциональные свойства материалов (возрастает износостойкость, повышаются антифрикционные свойства КМ). Однако обычные методы для производства значительных объёмов углеродных нанотрубок требуют энергоёмких процессов и экстремальных условий синтеза, что затрудняет их внедрение в промышленных масштабах. Кроме того, в полной мере не изучены вопросы, касающиеся их потенциальной токсичности для людей и окружающей среды.

Таким образом, чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами нанотрубчатых материалов, исследователи стремятся найти равнозначную замену синтезированным углеродным нанотрубкам. Одним из естественных материалов, содержащим нанотрубки, состоящие из гидроалюмосиликатов, является имоголит (*imogolite*). Этот гидроалюмосиликат – материал с общей формулой

$[Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O]$ был найден в продуктах выветривания почвы, образовавшейся из вулканического пепла, в южной части острова Кюсю, Япония. Имголит, обладая уникальными физико-химическими свойствами, как ожидается, имеет потенциал применения в нанотехнологиях при производстве катализаторов, мембран и адсорбентов [8]. Другим, природным материалом, являющимся доступным сырьём для получения наноразмерных модифицирующих добавок при синтезе алюмоматричных КМ, является шунгит (Карелия, Россия) [3].

Перспективы использования наноструктурированных шунгитовых пород в промышленных наукоёмких технологиях определяются возможностью получения относительно дешёвых продуктов в достаточных промышленных объёмах; следовательно, необходимо снижать многофакторность задачи за счёт использования более совершенных методов модифицирования исходного сырья и его очистки. На сегодняшний момент в реализации этой задачи существует серьёзная проблема, обусловленная неоднородностью вещественно-структурных характеристик исходного природного сырья даже в пределах одного месторождения. Это наблюдалось в исследованиях при использовании породы, добываемой ООО НПК «Карбон-шунгит» различных месторождений [2].

Поскольку наноструктурирование обусловлено и сопровождается образованием новых компонент – нановолокнистых карбидов кремния, наноразмерных полых углеродных частиц и волокон (гиперфуллереновых структур), а также наночастиц карбидов металлов, инкапсулированных в углеродные оболочки, проведено дальнейшее исследование модифицированной шунгитовой породы, содержащей микро- и наноразмерные частицы.

Методы исследования модифицированной шунгитовой породы. Для исследования модифицированной шунгитовой породы использовались рентгенофазовый анализ – РФА (*ARL X'TRA* с *CCD* детектором), сканирующая электронная микроскопия – СЭМ (*VEGA 11 LSH, TESCAN* с энергодисперсионным анализатором *INCA Energy, OXFORD Instruments*), просвечивающая электронная микроскопия с микродифракцией – ПЭМ (*ЭМ-125*), и комбинационное рассеяние – КР (*Nicolet Almega XR, Ar 532 nm laser*).

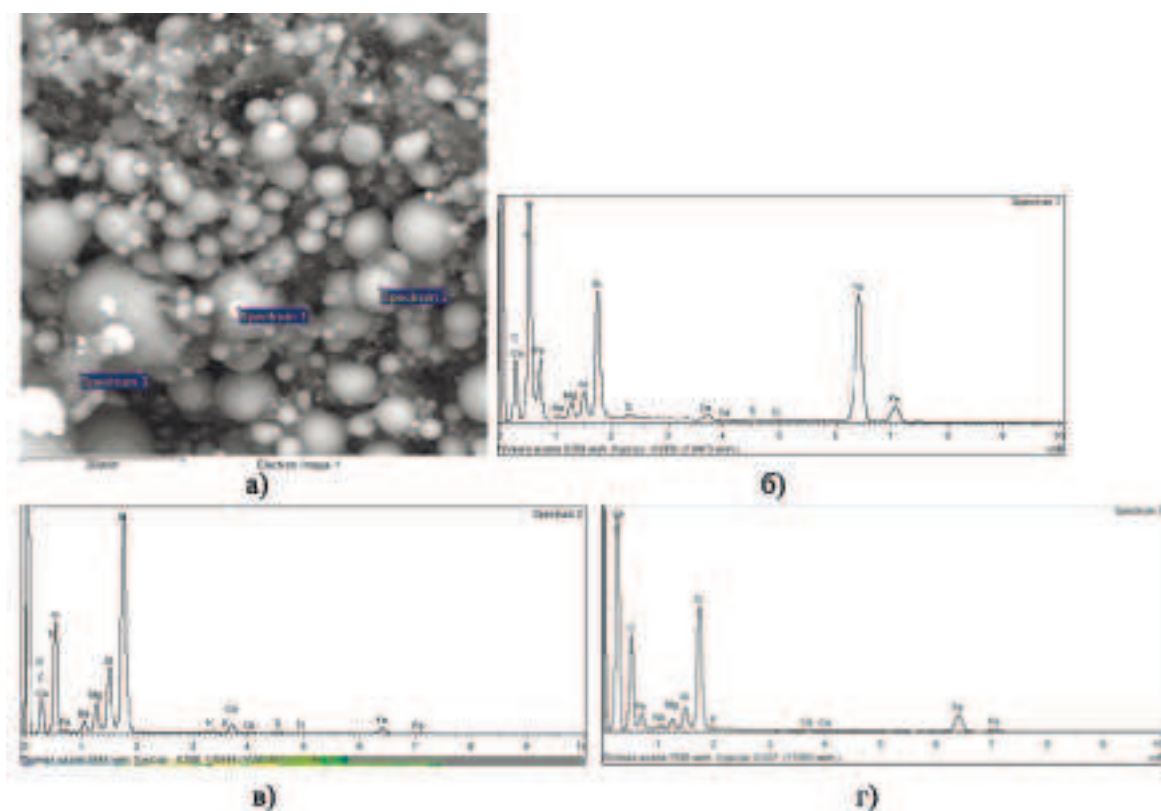


Рис. 1. Сканирующее электронномикроскопическое изображение во вторичных электронах модифицированной шунгитовой породы, типичные спектры, полученные с различных компонент образца и соответствующие им элементные составы

Номер спектра	Химический элемент											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
1	28,7	34,8	0,40	0,98	1,32	6,14	-	0,16	-	0,37	0,20	26,95
2	31,2	39,2	1,46	2,53	5,06	16,72	-	-	0,25	1,01	0,36	2,16
3	61,8	27,4	0,30	0,46	0,95	5,06	0,07	-	-	0,16	-	3,85

Модифицированная шунгитовая порода по снимкам растровой электронной микроскопии характеризуется визуально наличием нескольких компонент. В качестве первой компоненты можно выделить более светлые по контрасту области с более высокой отражающей и рассеивающей способностью электронов и имеющие более высокую средневзвешенную атомную плотность. По результатам энергодисперсионного анализа эти области содержат повышенную концентрацию железа (рис. 1а, 1б). Второй компонентой модифицированной шунгитовой породы являются сферы размерами от 50 нм до 10 мкм, состоящие из стекла сложной структурно-элементной композиции, которая близка по составу к слюдам, присутствовавшим в исходной шунгитовой породе (рис. 1а, 1в). К третьей компоненте можно отнести бесформенные образования по границам сфер с повышенным содержанием углерода (рис. 1а, 1г).

При использовании просвечивающей электронной микроскопии при больших увеличениях выявляются прозрачные сферические частицы с однородным контрастом размерами менее 100 нм. Микродифракционные картины от этих частиц не содержат кристаллических максимумов, что свидетельствует об их аморфном (стеклообразном) состоянии. Также эти стеклянные наносферы наблюдаются в совокупности с фуллероидным углеродом – полыми углеродными сферическими частицами, содержащими в ряде случаев металлы – чёрные, непрозрачные частицы в углеродной массе. Модифицированная шунгитовая порода, используемая в качестве наполнителя и модификатора алюмоматричных композиционных материалов, представляет собой сложную углерод-минеральную композицию. Для оценки содержания гиперфуллереновых структур и волокнистых карбидов кремния в модифицированной породе использовалась дериватография и рентгенофазовый анализ. Содержание углерода определялось с помощью дериватографии по термогравиметрическим кривым окисления углерода (рис. 2) и составило 35,6 вес. % от массы взятого образца.

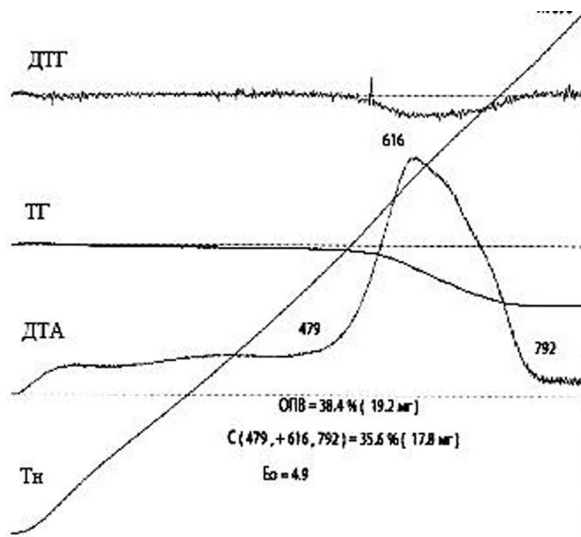


Рис. 2. Дериватограмма модифицированной шунгитовой породы

На рис. 2: Тн – изменение температуры; ДТА – разница температуры между эталонным и опытным (с образцом) тиглями (от 479 до 792 °С наблюдается окисление углерода с повышением температуры опытного тигля); ТГ – термогравиметрическая кривая – абсолютное изменение веса опытного тигля; ДТГ – дифференциальная термогравиметрическая кривая (относительное изменение веса между опытным и эталонным тиглями при конкретной температуре).

Для определения фазового состава модифицированной шунгитовой породы использовался рентгенофазовый анализ – РФА (ARL X'TRA с CCD детектором). На рис. 3 хорошо различим

углерод – относительно широкий пик в районе 26° ; карбид кремния – основной пик $\sim 36^\circ$; силициды железа $\sim 45^\circ$; а также кварц, кристобалит и др. Расчёт содержания аморфной составляющей и корректировка содержания кристаллических фаз производились по методике, предлагаемой с программным обеспечением *Siroquant* на дифрактометре *ARL X'TRA*. В образец, содержащий аморфную фазу, добавлялся эталон – оксид цинка (ZnO) в количестве 10 % от веса образца. Полученная смесь тщательно перемешивалась и снималась в стандартном режиме на дифрактометре. Взятое количество эталона являлось репером, по которому рассчитывалось процентное содержание всех фаз (табл. 1).

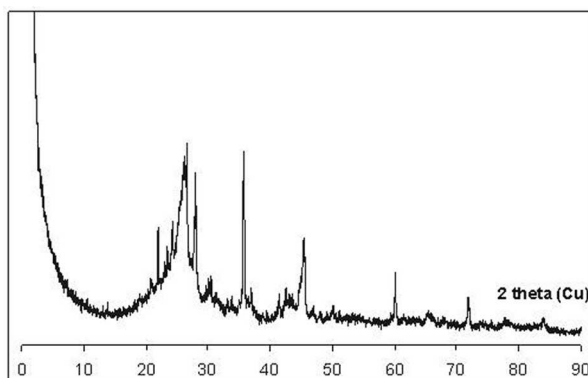


Рис. 3. Рентгенодифракционный спектр модифицированной шунгитовой породы

Таблица 1

Фазовый состав модифицированной шунгитовой породы

Фаза	Процентное содержание
Некристаллический C*	36
Кварц	3,5
Кристобалит	2
Карбид кремния (SiC)	29
Силицид железа (Fe_3Si)	23,5
Пироксен **	6

* Углерод определён по данным дериватографии

** В качестве модельной фазы задавался (Mg-Fe-Ca) пироксен, как наиболее близкий по положению и интенсивности дифракционных максимумов.

Спектры комбинационного рассеяния шунгитовых пород снимались на спектрометре *Nicolet Almega XR* с использованием Ar лазера с длиной волны 532 нм. Получены полные спектры комбинационного рассеяния углерода в модифицированной шунгитовой породе и, для сравнения, углерода той же породы в исходном состоянии. На кривых хорошо выделяются спектры двух порядков: первого – в области $900\text{--}2000\text{ см}^{-1}$, и второго – $2300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$. С помощью прилагаемого программного обеспечения OMNIC 8.2.403 от *Thermo Fisher Scientific Inc.* проведён анализ спектра углерода первого порядка для исходной и модифицированной шунгитовой породы. Спектры первого порядка углерода в исходном состоянии содержат 5 пиков (табл. 2). Согласно литературным данным, первый и третий пики отмечаются только в слабо упорядоченных материалах и могут быть связаны с наличием разупорядоченных областей, имеющих только ближний порядок с изменяющейся координацией атомов углерода от sp^2 гибридизации (графитоподобной) до sp^3 (алмазоподобной). Вторым (D-линия, „Disorder“) и пятый пики характерны для некристаллических углеродов и связаны с наличием краевых и внутрислоевых дефектов графеновых слоёв. Четвертый пик (G-линия, „Graphite“) определяется внутрислоевыми продольными движениями связанных пар sp^2 углеродных атомов. При этом из отношения максимальных ($I_{\text{пик}}$) или интегральных ($I_{\text{интерг}}$) интенсивностей G и D пиков (табл. 3) можно оценить размеры упорядоченных областей в плоскости графеновых слоёв по формуле: $L_a \sim 4.4\text{ нм} \times I(G)/I(D)$.

Данные по комбинационному рассеянию подтверждают результаты электронномикроскопических исследований, в частности, полученные ранее размеры упорядоченных областей в плоскости графенового слоя для углерода исходной шунгитовой породы (табл. 2). Углеродная компонента модифицированной породы фактически не содержит аморфного углерода (1 и 3 пики отсутствуют), при этом размеры упорядоченных областей увеличиваются до 20 нм, что согласуется с образованием полых углеродных структур размерами порядка 100 нм.

Таблица 2

Параметры комбинационного спектра углерода первого порядка для исходной и модифицированной шунгитовой породы

Шунгитовая порода	Параметры пиков	Пики комбинационного рассеяния					La (нм)
		1	2 (D)	3	4 (G)	5	
Исходная	Положение, см ⁻¹	1203	1342	1497	1579	1608	3,1
	Высота ($I_{\text{пик}}$)	4,6	114,9	3,6	80,4	28	
	Полуширина	197	60	72	43	28	
	Площадь ($I_{\text{интерг}}$)	1417	10784	408	5418	1250	
Модифицированная	Положение, см ⁻¹	1192	1346	1469	1577	1618	20,5
	Высота ($I_{\text{пик}}$)	0,02	33,3	0	154,8	6,9	
	Полуширина	198	39,9	46,2	27,7	11,3	
	Площадь ($I_{\text{интерг}}$)	5,7	2081	0	6477	123	

* Размеры упорядоченных областей в плоскости графенового слоя вычислены по отношению пиковых интенсивностей.

Таким образом, проведённые исследования свидетельствуют о чрезвычайно сложном составе и строении исходных и модифицированных шунгитовых пород не только как наполнителей и модификаторов в целом, но также и отдельных их составляющих. Требуются дальнейшие уточнения результатов по рентгеновскому фазовому анализу, поскольку на данный момент не учтены некристаллические составляющие помимо углерода (в районе 30 и 36 град. размытые максимумы, а также ряд мелких неидентифицированных кристаллических пиков).

Также требуют уточнения результаты по сферическим частицам. С одной стороны, сферические наночастицы представлены некристаллическим веществом – стеклом (по данным электронной микродифракции, не дают кристаллических рефлексов), а макрочастицы не просвечиваются электронным пучком – и с них невозможно получить никакой информации. С другой стороны, XRD спектры содержат максимумы кристаллической фазы (которая условно интерпретирована как пироксен и имеет близкий по микроанализу элементный состав). Возможно, сферические макрочастицы имеют сложное строение – аморфную оболочку (быстрое охлаждение на воздухе) и закристаллизованную центральную часть (более медленное охлаждение, способствующее кристаллизации). В отличие от них наноразмерные частицы могут охладиться быстро и полностью имеют стеклообразное состояние.

Изготовление и исследование полиармированных КМ. Исследовано применение природных шунгитов в наноструктурированном состоянии для изготовления полиармированных КМ. В качестве исходной использовалась порода, добываемая ООО НПК «Карбон-шунгит» (ТУ 88-003-90).

Исследовали влияние добавок модифицированной шунгитовой породы (МШП) и дискретного керамического наполнителя SiC на состав, структуру и триботехнические свойства алюмоматричных дисперсно упрочнённых КМ. Для изготовления полиармированных КМ предложен способ введения МШП в алюминиевые расплавы методом механического замешивания с использованием носителей – металлических порошков Al, Ti, Ni. Схема способа закрепления различных наноразмерных объектов на порошке носителе (в данном случае порошок Ti) показана на рис. 4. Здесь же показаны данные МРСА металлических порошков при использовании их в качестве носителей для введения в расплавы наномодифицированной шунгитовой породы. Наличие углерода и кремния (основных составляющих шунгитовых пород) указывает на возможность внедрять и закреплять модифицированную шунгитовую породу в объёме металлического порошка для дальнейшего введения в алюминиевые расплавы методом механического замешивания.

Для уменьшения доли матрицы в поверхности трения и улучшения износостойкости изготовлены полиармированные КМ с наполнителями в виде дискретных частиц SiC (40 мкм) в количестве 5 масс. %, исходной или модифицированной шунгитовой породы (2 масс. %). В качестве матриц



Рис. 4. Схема способа закрепления наноразмерных объектов на различных порошках носителях для последующего введения в расплав и данные МРСА после механического легирования в планетарной шаровой мельнице

№	Носитель	C	Si	Ti	Ni	Al
1	Ti+МШП	10,49	2,08	87,43	-	
2	Al+(Ti+МШП)	8,14	1,30	67,74	-	22,82
3	Ni+МШП	17,79	3,31	-	78,90	-
4	Al+(Ni+МШП)	9,43	2,63	-	68,14	19,80

использовали алюминий А99 и сплав АК12М2МгН. В табл. 3 представлены составы образцов и дана оценка процесса введения шунгитовых наполнителей.

Таблица 3

Составы исследуемых образцов и оценка введения шунгитовых пород в расплавы

№ обр	Матрица		Вариант обработки	Наполнители		Оценка введения
	A99	AK12M2MgH		SiC, масс.%	Шунгит, масс.%	
1	+					
2	+			5		+
3	+		МШП	5	2, МШП	+
4		+				
5		+	МШП	5	2, МШП	+
6	+		Исх. ШП		2, Исх. ШП	-
7		+	Исх. ШП		2, Исх. ШП	-

* Исходная и модифицированная шунгитовая порода введена в расплав на порошке носителе Al

Образцы из матричного сплава и КМ испытывали в условиях сухого трения скольжения на установках *CETR UMT Multi – Specimen Test System* и МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004) по схеме осевого нагружения: втулка (контртело) из стали 45 (HRC>45) против шайбы (КМ) с коэффициентом перекрытия 1. Определяли интенсивность изнашивания и коэффициенты трения изготовленных образцов КМ, матричных сплавов и контртела согласно [5]. Осевую нагрузку изменяли в пределах 18–60 Н (от 0,2 до 0,7 МПа); скорость вращения втулки и длительность испытаний при каждой нагрузке составляли 540 об/мин (0,37 м/с) и 10 мин соответственно. Испытания проведены на воздухе при температуре 20 ± 1 °С и влажности 60 ± 4 %. Момент трения фиксировали с помощью датчика, соответствующего данной схеме нагружения.

Из полученных данных следует (рис. 5), что армирование алюминия дискретными частицами SiC увеличивает его диапазон трибонагружения до 60 Н (образец №2), а дополнительное введение в структуру 2 масс. Процент модифицированной шунгитовой породы (образец № 3) позволяет в исследованном диапазоне трибонагружения уменьшить интенсивность изнашивания на 30–40 % и практически исключить износ контртела. Ещё более значимые результаты достигнуты при полиармировании промышленного алюминиевого сплава АК12М2МгН. Так, интенсивность изнашивания полиармированного КМ (образец № 5) во всем диапазоне нагрузок уменьшена в 4 раза по сравнению

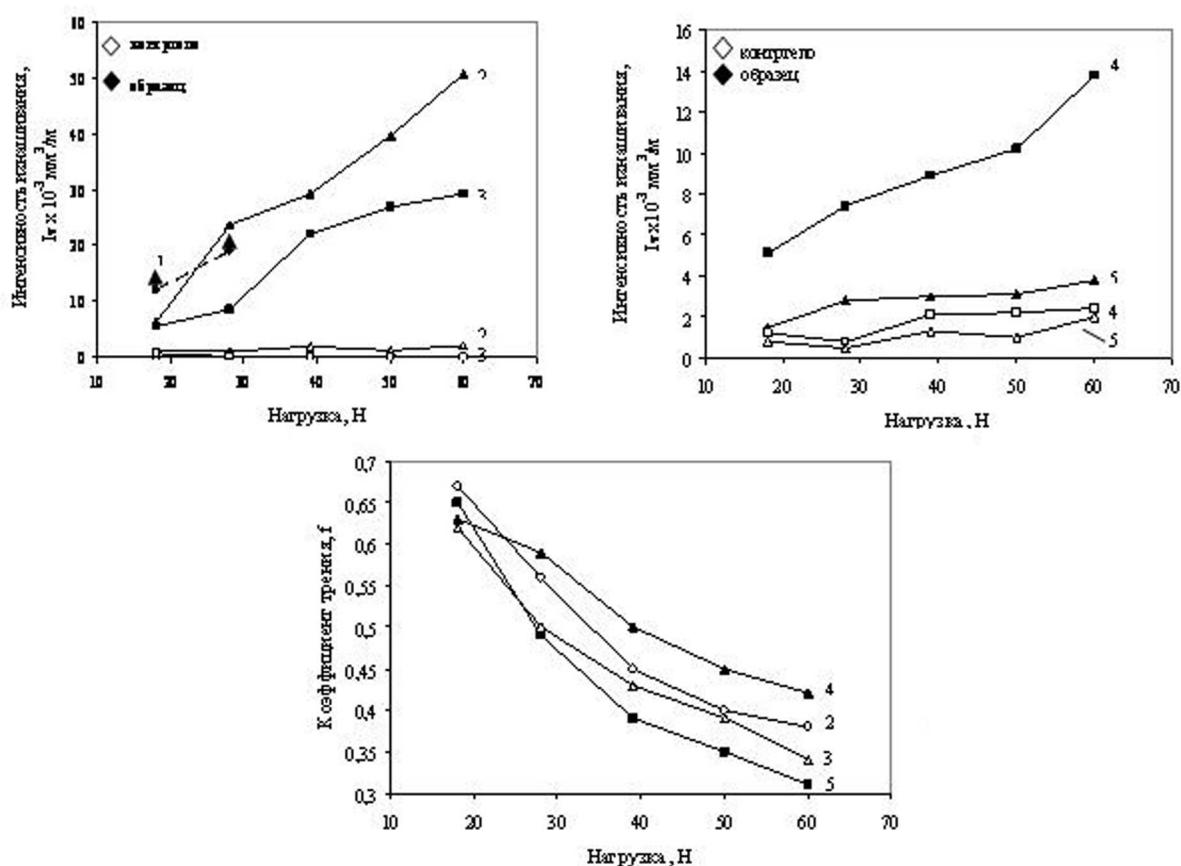


Рис. 5. Интенсивность изнашивания (а, б) и коэффициенты трения (в) в зависимости от нагрузки. Состав образцов: 1 – А99, 2 – А99 + 5 масс. % SiC; 3 – А99 + 5 масс. % SiC + 2 масс. % МШП; 4 – АК12М2МгН; 5 – АК12М2МгН + 5 масс. % SiC + 2 масс. % МШП. Стрелкой показан интервал нагрузок, при которых образец из сплава А99 характеризовался нестабильными моментами трения вследствие задира

с матричным сплавом, в 8 раз по сравнению с КМ на основе сплава А99, армированного 5 масс. % SiC и 2 масс. % модифицированной шунгитовой породы.

Износ контртела при испытаниях полиармированного сплава АК12М2МгН в среднем был в 1,5 раза ниже, чем при испытании матричного сплава, и характеризовался стабильными значениями во всем интервале трибонагружения. Защитное воздействие твердых керамических частиц SiC микронных размеров и шунгитовых наполнителей объясняется уменьшением доли матричной фазы на поверхности трения, что препятствует износу КМ. Кроме того, шунгитовые наполнители, выполняя роль сухой смазки, уменьшают коэффициенты трения, что особенно заметно при возрастании нагрузки.

Следует отметить, что представленные данные получены на образцах синтезированных КМ, полученных при отборе проб малого объема композиционного расплава непосредственно сразу после перемешивания. После кристаллизации расплава образцы подвергались отбраковке по критериям наличия армирующих компонентов, пористости и усадочных раковин (визуальный и оптический контроль). Данные значения интенсивности изнашивания и коэффициентов трения служат ориентиром перспективности КМ данного класса, к которым необходимо стремиться без отбраковки несовершенных образцов при осуществлении технологического процесса, который должен осуществляться в производственных условиях, т. е. при переливе всего объема композиционного расплава в изложницу для получения отливки-полуфабриката или изделия для последующей механической обработки.

Заключение. Таким образом, при жидкофазном совмещении компонентов комплексное использование дискретных керамических частиц карбида кремния и углерода в виде частиц графита,

нанотрубок или фуллеренов, полученных при модифицирующей обработке шунгитовых пород, позволяет значительно увеличить износостойкость и снизить коэффициенты трения разрабатываемых КМ для применения их в трибоузлах различных технических приложений. Однако требуется дальнейшее совершенствование метода модифицирующей обработки исходной шунгитовой породы и технологии получения объёмных КМ. Обеспечение равномерной дисперсии МШП и наполнителей микронного размера остаётся главной задачей при получении разрабатываемых КМ.

Авторы благодарят ООО «Шунгитон» за предоставление наноструктурированной шунгитовой породы.

Список литературы

1. Калашников И. Е. Исследование структуры и свойств алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными частицами // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 8. С. 27–36.
2. Калашников И. Е. Композиционные материалы с наполнителями из шунгитовых пород / И. Е. Калашников, В. В. Ковалевский, Т. А. Чернышова, Л. К. Болотова // Металлы. 2010. №6. С. 85–95.
3. Зырянов В. В., Ковалевский В. В., Петров С. А., Матвиенко А. А. Наноразмерные материалы из шунгитовых пород // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 11. С. 1234–1242.
4. Трегубова И. В., Алымов М. И., Анкудинов А. Б., Зеленский В. А., Тихомиров С. А. О закономерностях и условиях синтеза металлических нанопорошков. Цветные металлы. 2011. № 5. С. 47–52.
5. Чичинадзе А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браkn [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 469 с.
6. Bakshi S. R. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review / S. R. Bakshi, D. Lahiri, A. Agarwal // International Materials Reviews. 2010. Vol. 55. № 1. P. 41–64.
7. Esawi A. M. K. The influence of carbon nanotube (CNT) morphology and diameter on the processing and properties of CNT-reinforced aluminium composites / A. M. K. Esawi, K. Morsi, A. Sayed, M. Taher, S. Lanka // Composites: Part A. Vol. 42. 2011. P. 234–243.
8. Yah W. O., Yamamoto K., Jiravanichanun N., Otsuka H., Takahara A. Imogolite: Multifaceted Green Materials // Materials. 2010. №3. P. 1709–1745.

References

1. Kalashnikov I. Ye. Issledovaniye struktury i svoystv alyumomatrichnykh kompozitsionnykh materialov, modifitsirovannykh nanorazmernymi chastitsami // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii. 2011. № 8. S. 27–36.
2. Kalashnikov I. E. Kompozitsionnye materialy s napolnitelyami iz shungitovykh porod / I. Ye. Kalashnikov, V. V. Kovalevsky, T. A. Chernyshova, L.K. Bolotova // Metally. 2010. №6. S. 85–95.
3. Zyryanov V. V., Kovalevsky V. V., Petrov S. A., Matviyenko A. A. Nanorazmernye materialy iz shungitovykh porod // Neorganicheskiye materialy. 2012. T. 48, № 11, S. 1234–1242.
4. Tregubova I. V., Alymov M. I., Ankudinov A. B., Zelensky V. A., Tikhomirov S. A. O zakonornostyakh i usloviyakh sinteza metallicheskih nanoporoshkov. Tsvetnye metally. 2011. № 5. S. 47–52.
5. Chichinadze A. V. Treniye, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / A. V. Chichinadze, E. M. Berliner, E. D. Brakn [i dr.]. M.: Mashinostroyeniye, 2003. 469 s.

6. Bakshi, S. R. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites — a review / S. R. Bakshi, D. Lahiri, A. Agarwal // International Materials Reviews. 2010. Vol. 55. № 1. P. 41–64.
7. Esawi A. M. K. The influence of carbon nanotube (CNT) morphology and diameter on the processing and properties of CNT-reinforced aluminium composites / A. M. K. Esawi, K. Morsi , A. Sayed , M. Taher , S. Lanka // Composites: Part A. Vol. 42. 2011. P. 234–243.
8. Yah W. O., Yamamoto K., Jiravanichanun N., Otsuka H., Takahara A. Imogolite: Multifaceted Green Materials // Materials. 2010. №3. P. 1709–1745.

Статья поступила в редакцию 25.04.2013