

УДК: 669.719:546.56:546.621

**А. С. Затуловский, В. А. Лакеев, А. В. Косинская,  
В. А. Щерецкий**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ЛИТЫЕ КОМПОЗИТЫ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Показана возможность рециклинга отходов литейного производства для получения функциональных композиционных материалов триботехнического назначения на основе литейных алюминиевых сплавов. Изучены влияние размера и количества упрочняющих частиц вторичного наполнителя на триботехнические свойства и структура материала после трения на глубину до 250 мкм от поверхности трения.*

**Ключевые слова:** рециклинг, композиты, алюминиевые сплавы, триботехника, вторичные материалы.

*Показано можливість рециклінгу відходів ливарного виробництва для отримання функціональних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі ливарних алюмінієвих сплавів. Вивчено вплив розміру і кількості зміцнюючих частинок вторинного наповнювача на триботехнічні властивості та структура матеріалу після тертя на глибину до 250 мкм від поверхні тертя.*

**Ключові слова:** рециклинг, композиты, алюмінієві сплави, триботехніка, вторинні матеріали.

*The paper are shows the opportunity to produce functional composite tribological materials based on cast aluminum alloys with recycled foundry waste materials. The effect of size and amount of reinforcing particles of secondary filler on the tribological properties and structure change after friction tests to a depth up to 250 microns from the surface were studied.*

**Keywords:** recycling, composites, aluminum alloys, composites, scrap materials

**А**люминий и алюминиевые сплавы являются одними из основных матричных составляющих при создании конструкционных композитов, отличающихся повышенными эксплуатационными характеристиками. В то же время, научно-технический прогресс сопровождается ростом потребления природных ресурсов и одновременным увеличением производственных и бытовых отходов. За последние 20 лет количество отходов в промышленно развитых странах возросло в 2-3 раза. В мире ежегодно образуется около 50 млрд. т отходов. Основными поставщиками отходов являются горнодобывающая, химическая, металлургическая, топливно-

энергетическая отрасли [1]. Поиск компонентов, позволяющих снизить стоимость алюминиевых композиционных материалов (КМ) за счет применения неметаллических материалов и отходов различных промышленных предприятий, является актуальной задачей.

Уменьшение количества промышленных отходов возможно путем переработки и рециклинга вторичных материалов для производства гетерогенных материалов, таких как композиты. Металломатричные композиты с повышенными функциональными характеристиками, такие как износостойкость, жаропрочность, демпфирующая способность, все шире применяются в производстве бытовой и промышленной техники, инструментов и приборостроении. Уникальные свойства композита достигаются сочетанием пластичной металлической матрицы и дискретных армирующих частиц, волокон или пластин, которые можно получать в результате переработки вторичного сырья, отходов производства. В качестве армирующей фазы могут быть использованы шлаки, золы, отходы огнеупорного и камнелитного производства, которые возможно рассматривать как смесь оксидов различных металлов. Известно, что оксиды обладают высокой тугоплавкостью, твердостью, химической стабильностью в широком диапазоне температур и поэтому являются весьма перспективными в качестве упрочняющие фазы металлической матрицы при создании КМ [2]. Указанные выше материалы, как правило, наследуют перечисленные качества оксидов и характеризуются высокой жаростойкостью, твердостью и фазовой стабильностью.

В работе для получения образцов композиционных материалов использовали механический метод замешивания на экспериментальной установке. Сплав в тигле помещали в печь и нагревали со скоростью 3-4 градуса в минуту до 800 °С, выдерживая его при этой температуре в течении 30 мин. Затем вводили дискретный наполнитель и перемешивали 15 или 30 мин. После чего поднимали температуру печи опять до 800 °С и производили разливку сплава в графитовую форму, оставив остывать на воздухе. Замешивание частиц осуществляли с помощью электрической мешалки с лопастями. Выбранный в качестве наполнителя камнелитой материал подвергали помолу и рассеву. При экспериментах варьировали: фракционный состав наполнителя одного состава, используя крупные частицы от 100 мкм до 3 мм, и мелькие – 20-50мкм, изменяли параметры получения композита.

Для повышения смачивания поверхности частиц металлом использовали флюсы, которыми обрабатывали частицы неметаллических материалов. Для этой цели использовали HCl и смесь NaCl, NaF, HCl, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>. С этой же целью частицы подвергли дезинтеграционному дроблению в стержневой дробилке при скорости вращения роторов 9000 об/мин и времени обработки в течение 1-2 мин. После однократной обработки частицы имели размер от 5-10 мкм до 300-500 мкм.

Исследования прочностных характеристик композита при действии изгибающих нагрузок показали, что влияние оказывает как состав матричного сплава (AK5M2), так и присутствие частиц неметаллического наполнителя. Структура полученного композита приведена на рис. 1. Установлено, что деформация и прочность, которые определяются статическим модулем упругости, пределом прочности при изгибе, зависят от величины поверхности контакта неметаллических армирующих частиц с матрицей. При идентичном количественном содержании частиц и их равномерном распределении в объеме матрицы образцов КМ (1 об.% наполнителя) с размером частиц 2-3 мкм образует большую поверхность контакта с матрицей, чем, например частицами размером 20-30 мкм. При увеличении размера частиц, при одинаковом их количественном содержании по массе, уменьшается величина общей поверхности контакта, что вызывает снижение значений модуля упругости. При этом прочность КМ возрастает (рис. 2), в наибольшей степени это проявляется при замешивании мелких частиц размером до 15 мкм.

Триботехнические испытания проводили на образцах сплава AK5M2 без добавок и с добавками частиц камнелитного материала. Испытания проводили на установке МТ-68 в паре со стальным контртелом (HRC 46-48) без подачи смазки в зону контакта.

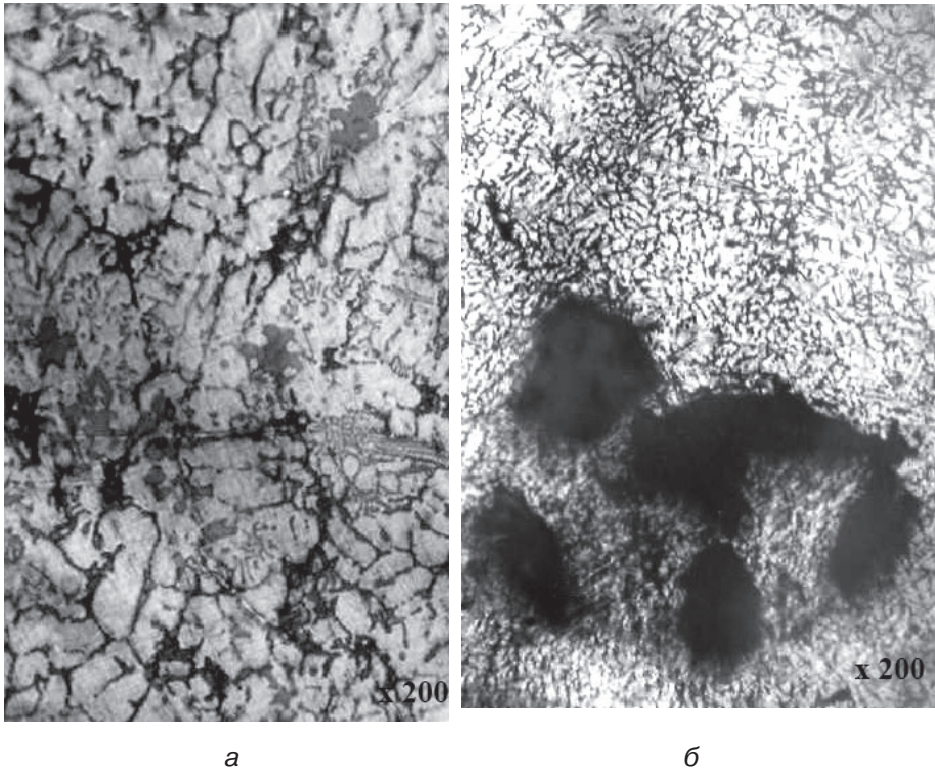


Рис. 1. Структура сплава АК5М2 (а) и композита (б), армированного частицами каменного литья

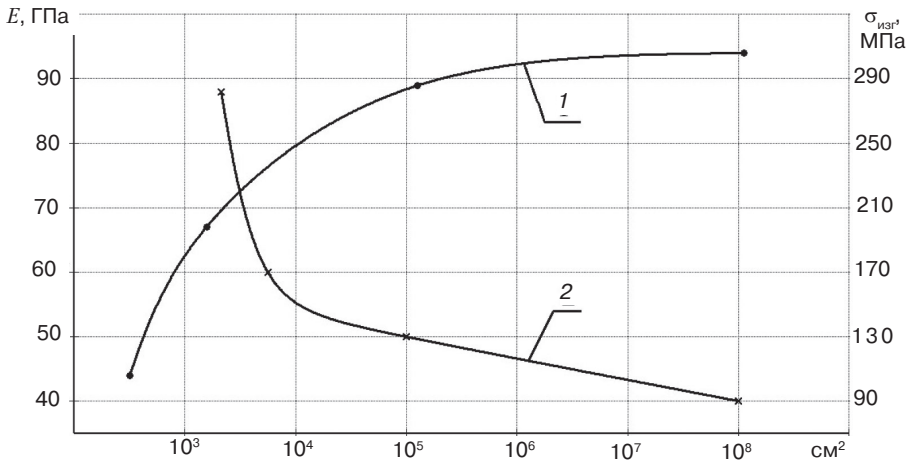


Рис. 2. Зависимость прочностных характеристик образцов от площади поверхности контакта частиц камнелитого материала со сплавом матрицы АК5М2: 1 – модуль упругости; 2 – прочность при изгибе,  $\sigma_{изг}$

В процессе эксперимента при различных скоростях скольжения и нагрузках фиксировали основные трибопоказатели пары трения: силу и износ. По полученным показателям рассчитывали коэффициент трения  $f$  и интенсивность изнашивания  $J$ , мкм/км. Полученные результаты представлены в таблице.

Как следует из приведенных в таблице данных, композиционные образцы по износостойкости превышают матричный сплав на 17-34 % в режимах трения при нагрузках от 625 до 1250 КПа и скоростях трения от 2 до 5 м/с.

Триботехнические свойства испытанных материалов

Нагрузка $P$ , кПа	Образец	$V = 2$ м/с		$V = 3$ м/с		$V = 4$ м/с		$V = 5$ м/с	
		$f$	$J$ , мкм/км	$f$	$J$ , мкм/км	$f$	$J$ , мкм/км	$f$	$J$ , мкм/км
625	AK5M2	0,8	24	0,68	52	0,6	98	0,58	172
	AK5M2+ частицы каменного литья	0,8	19	0,68	43	0,6	78	0,58	144
1250	AK5M2	0,9	31	0,8	71	0,68	128	0,6	315
	AK5M2+ частицы каменного литья	0,9	21	0,8	45	0,68	88	0,6	221

Изучение макро- и микроструктуры шлифов испытанных образцов позволило выявить различия, имеющиеся в их структуре после воздействия истирающих нагрузок. Поверхность после истирания образца из сплава АК5М2 имеет зубчатые края и сетку бороздок (рис. 3). Поверхность истирания на глубину до 200-250 мкм имеет измененную микроструктуру. Наблюдается измельчение дендритов  $\alpha$ -твердого раствора, границы кристаллитов сложно идентифицируемы. Эвтектика  $\alpha + \text{CuAl}_2$  присутствует в виде мелких хаотично расположенных включений. На указанной глубине происходит деформация и «сминание» микроструктуры матрицы. Остальные участки микроструктуры сохраняют морфологию и фазовый состав исходного образца.

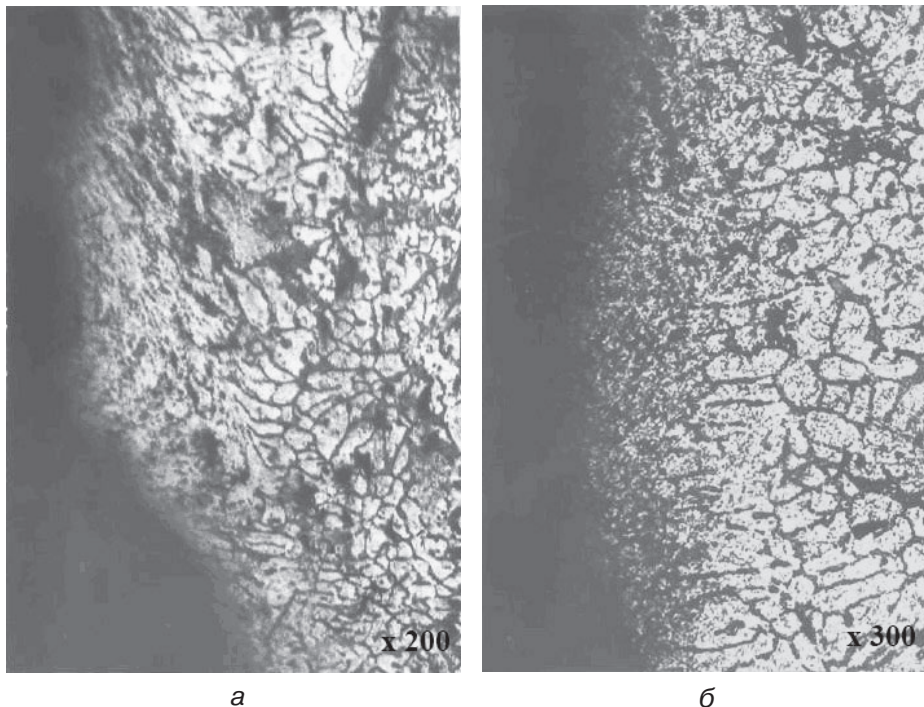


Рис. 3. Структура поверхности истирания образца из сплава АК5М2; а – сплав АК5М2, б – композит



## Новые литые материалы

В композите с камнелитым наполнителем в алюминиевой матрице поверхность истирания также имеет разрушения в виде борозд, но глубина их значительно меньше, без выраженных зазубрин, задиров в рабочей зоне. Изменение структуры композита происходит также на глубину 200-250 мкм, но лишь в местах матричного сплава. Измельчение и деформация формы дендритов  $\alpha$ -твердого раствора наблюдается только в тех местах, где отсутствуют включения армирующей фазы. Частицы камнелитого материала ограничивают глубину изменения структуры (рис. 4, а). Они не позволяют происходить деформации сплава матрицы под воздействием истирающих нагрузок. Кроме того, на поверхности трения образуется плотная разделительная пленка толщиной до 50 мкм («третье тело»), (рис. 4, б), препятствующая, также как и частицы, интенсивному изнашиванию поверхности трения. В результате образцы композиционного материала изнашиваются с меньшей интенсивностью, чем чистые алюминиевые сплавы без наполнителя, износ имеет равномерный характер, отсутствует схватывание и задиры образцов.

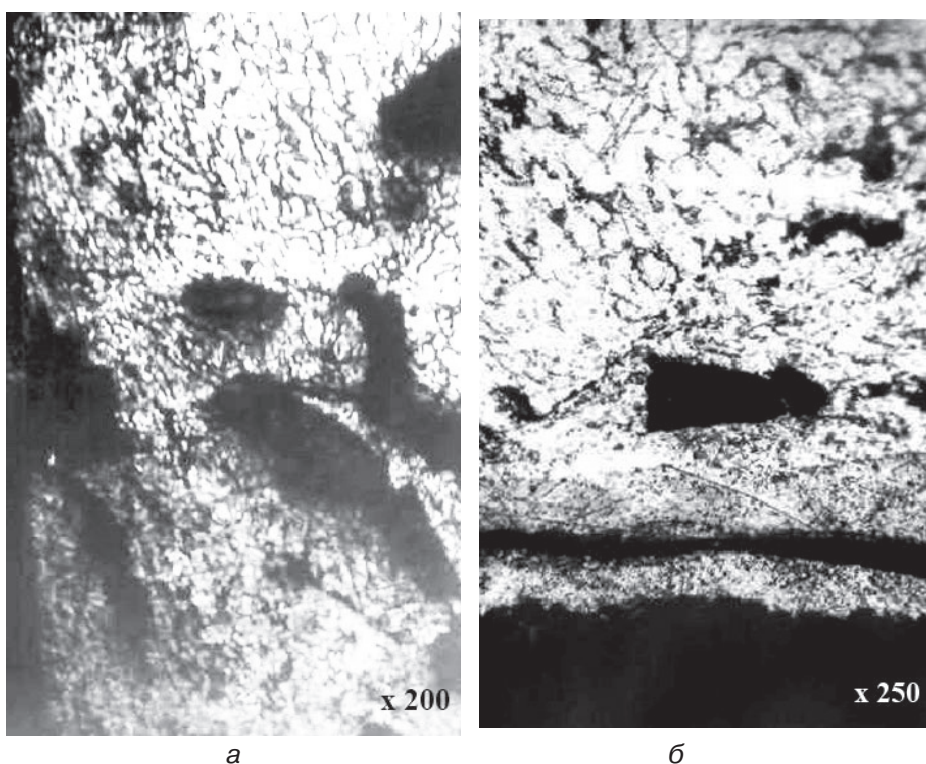


Рис. 4. Структура поверхности истирания композита на матрице сплава АК5М2, армированной камнелитыми частицами: а – вид поверхности истирания; б – пленка на поверхности истирания

Таким образом, в данной работе показана возможность использования вторичных материалов из отходов литейного производства для получения армирующей составляющей алюмоматричных композитов триботехнического назначения. Использование отходов каменного литья для производства композитов с одной стороны позволяет снизить себестоимость функционального композиционного материала, а с другой – решает вопрос утилизации отходов литейных производств.



### Список литературы

1. Paul Knox, John A Agnew, Linda Mccarthy. The Geography of the World Economy // Routledge. – 2014, ISBN 1444184717. – 496 p.
2. Затуловский С. С. Концепция развития литых композиционных материалов // Процессы литья. – 1997. – № 4. – С. 9-10.



### References

1. Paul Knox, John A Agnew, Linda Mccarthy. (2014). The Geography of the World Economy. Routledge, ISBN 1444184717. 496 p.
2. Zatulovkiy S. S. (1997). Kontseptsiiia razvitiia litykh kompozitsionnykh materialov. [Development conception of cast composite materials]. Protsessy litia, № 4, pp. 9-10. [in Russian].

Поступила 25.07.2016

### **Вниманию авторов!**

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объём статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть чёрно-белыми, чёткими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.