



*The article is dedicated to development of technologies of receiving and investigation of the structure, characteristics of composite materials of the system Al-Si-TiAl-SiC. The investigations are carried out on alloy AK12.*

А. В. ПАНФИЛОВ, А. А. ПАНФИЛОВ, Владимирский государственный университет

УДК 662.611.25

## ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ЛИТЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Развитие современного машиностроения неотделимо от решения проблем, связанных с повышением надежности и долговечности машин. Уменьшение потерь на трение и изнашивание подвижных сочленений узлов и механизмов является актуальной задачей новых разработок и практической эксплуатации многочисленных видов техники. Поэтому разработке новых материалов для узлов трения и износостойких материалов уделяется серьезное внимание. Интерес к этим материалам обусловлен возрастанием расходов на ремонт машин и механизмов, который, как правило, начинается с замены подшипниковых узлов или восстановления других изношенных деталей.

В связи с этим важное значение приобретают работы по созданию принципиально новых антифрикционных материалов на основе гетерофазных систем, в том числе металлических композиционных материалов (КМ), в которых искусственно объединены высокопластичные металлические матрицы и тугоплавкие дискретные наполнители. Такое сочетание фаз позволяет ожидать значительного повышения несущей способности узлов трения и расширения температурного интервала их работы.

С учетом требований, предъявляемых к подшипниковым материалам, применение алюминиевых сплавов в качестве матриц антифрикционных КМ вполне оправдано, так как для них характерны не только высокие показатели теплопроводности, теплоемкости, теплостойкости, но и высокие технологические свойства, в том числе возможность широкого варьирования механических свойств и износостойкости за счет легирования и термообработки. Алюминиевые сплавы отличаются хорошими литейными свойствами, удовлетворительной обрабатываемостью резанием и, наконец, физико-химической совместимостью с дискретными наполнителями.

Введение в алюминиевые расплавы армирующих частиц микронных размеров с резко отлич-

ной от матрицы твердостью не только повышает износостойкость сплавов, но и вследствие возросшей гетерогенности может расширить область существования во фрикционном контакте так называемых «вторичных структур», обеспечивающих нормальное протекание процессов трения и износа в широком диапазоне параметров нагружения.

В настоящей работе приведены результаты исследований по получению композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АК12, армированного дисперсными частицами карбида кремния и армированного частицами карбида кремния и эндогенными частицами интерметаллидной фазы  $TiAl_3$ .

Наиболее распространенным методом получения КМ является способ механического замешивания дисперсных частиц или волокон в расплав благодаря своей простоте, экономичности и гибкости. При этом КМ в жидком состоянии представляет собой свободно текущую суспензию, что позволяет получать из него фасонные отливки по обычным литейным технологиям.

Практический опыт показывает, что одним из решающих условий получения качественных КМ с достаточно равномерным распределением армирующей фазы является интенсивность перемешивания металлического расплава. Установлено, что частота вращения расплава в тигле должна составлять  $4 - 8 \text{ с}^{-1}$  с обеспечением положительного градиента скорости от поверхности тигля к центру вращения. Это необходимо для формирования направленного поля центробежных сил, действующего на вводимые армирующие частицы. Центробежные силы перемещают более тяжелые частицы SiC к стенке тигля. Однако вблизи поверхности тигля из-за уменьшения частоты вращения (потери на трение) центробежные силы ослабевают и, следовательно, дисперсные частицы не выталкиваются на границу раздела расплав – тигель, а остаются в металле. Газовые включения под действием центробежных сил выталкиваются на свободную поверхность параболоида враще-

ния, при этом обеспечивается рафинирование расплава. Вращение расплава с частотой  $4 - 8 \text{ с}^{-1}$  обеспечивается вращением дискового импеллера с частотой  $20 - 40 \text{ с}^{-1}$ .

Дисперсные частицы SiC, движущиеся из дозирующего устройства в потоке несущего газа (аргон, азот) с расходом  $0,5 - 3,0 \text{ г/с}$ , направляются на поверхность вращающегося диска. При этом армирующий наполнитель при ударе порошковогазовой струи о поверхность импеллера диспергируется. За счет трения частицы SiC разгоняются, приобретают скорость  $0,5 - 3,0 \text{ м/с}$  и веерообразной струей врезаются во вращающийся металл вблизи поверхности соприкосновения вращающегося диска и металла, где наблюдается максимальная разность в скоростях их вращения.

По окончании введения армирующих частиц композиционный сплав перемешивали с относительной скоростью  $1 - 5 \text{ м/с}$  в течение  $60 - 120 \text{ с}$  для раздробления скоплений наполнителя, введенного в композит и его рафинирования от газовых включений.

Введение армирующих частиц в сплав АК12 осуществляли при перегреве матричного сплава на  $100 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$  выше температуры ликвидуса. Было установлено, что при перегреве расплава над линией ликвидуса менее  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  не обеспечивается равномерное распределение армирующих частиц по причине повышенной вязкости расплава, а перегрев выше  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к сильной окисляемости расплава, что отрицательно сказывается на свойствах композита. Как было установлено ранее, интенсивность перемешивания зависит также от конструктивных параметров перемешивающего агрегата. С целью обеспечения заданных режимов соотношение диаметра тигля и диаметра диска необходимо выдерживать в пределах  $(1,2 - 1,3):1$ .

Для получения комбинированных композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, армированных частицами карбида кремния и интерметаллидной фазой TiAl<sub>3</sub>, авторами разработана технология, при которой армирование матрицы происходит за счет ввода в расплав прессованных брикетов, состоящих из смеси дисперсных частиц карбида кремния и порошка титана, суть которой заключается в следующем. В рафинированный и нагретый до температуры  $780 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  алюминиевый расплав вводят подогретые до температуры  $150 - 170 \text{ }^\circ\text{C}$  прессованные брикеты. После ввода брикетов необходима выдержка расплава в течение  $25 - 30 \text{ мин}$  для прохождения реакции взаимодействия алюминиевой матрицы с порошком титана, результатом которой является образование интерметаллидной фазы TiAl<sub>3</sub>. В данной технологии порошок титана служит не только одним из упрочнителей, но и выполняет транспортировочную функцию при вводе частиц карбида кремния. Брикет, состоящий из порош-

ков титана и карбида кремния, имеют большую плотность по сравнению с расплавом алюминия ( $\rho_{\text{Ti}} = 4,5 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{SiC}} = 3,2 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{Al}} = 2,34 \text{ г/см}^3$ ), поэтому при вводе они сразу уходят под зеркало металла. Во время реакции алюминия и порошка титана образующиеся интерметаллиды вовлекаются в тепловое движение жидкости и конвективные потоки, вызванные выделением тепла в зоне реакции, тем самым вовлекая в этот процесс и частицы SiC. В результате интерметаллиды и частицы карбида кремния распределяются в объеме расплава. Следует отметить, что локальное повышение температуры расплава за счет прохождения экзотермической реакции интенсифицирует взаимодействие на границе керамическая частица – матричный расплав и тем самым является одним из определяющих факторов для успешного введения керамической фазы. Кроме того, этот метод приготовления композиционных материалов уменьшает повышенную окисляемость и газонасыщенность расплава, которые имеют место при механическом замешивании керамической армирующей фазы в жидкий металлический расплав.

Одно из важнейших технологических свойств литейных композиций – жидкотекучесть. Экспериментами установлено, что увеличение доли армирующих компонентов в композиции приводит к заметному уменьшению ее жидкотекучести. Следует отметить, что все кривые изменения жидкотекучести сходятся к  $\lambda=0$  в одной точке, соответствующей доли армирующих наполнителей  $15 \text{ мас. \%}$  независимо от температуры композиции. Исходя из этого, можно сделать вывод, что жидкотекучесть композиций определяется в первую очередь концентрацией армирующих компонентов, а во вторую – температурой.

Анализ полученных данных по жидкотекучести позволяет сделать вывод о том, что для КМ системы Al–Ti–SiC с содержанием армирующей фазы до  $10 \text{ мас. \%}$  применима обычная гравитационная заливка. При этом объемное содержание армирующей фазы не превышает  $17 \text{ об. \%}$  ( $14 \text{ об. \%} - \text{TiAl}_3$ ,  $3 \text{ об. \%} - \text{SiC}$ ) (рис. 1). Температура композиции при гравитационной заливке должна быть не менее  $760 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При содержании армирующей фазы более  $10 \text{ мас. \%}$  единственно приемлемыми способами следует считать методы литья с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизирующийся металл. Для КМ системы алюминиевый сплав – частицы карбида кремния гравитационная заливка применима при содержании армирующей фазы до  $20 \text{ об. \%}$ .

Помимо жидкотекучести, одним из основных свойств литейных сплавов является усадка. Установлено, что усадка ЛКМ уменьшается с увеличением доли армирующих компонентов в матричном сплаве. Это связано с тем, что с увеличением доли армирующих компонентов в композиции

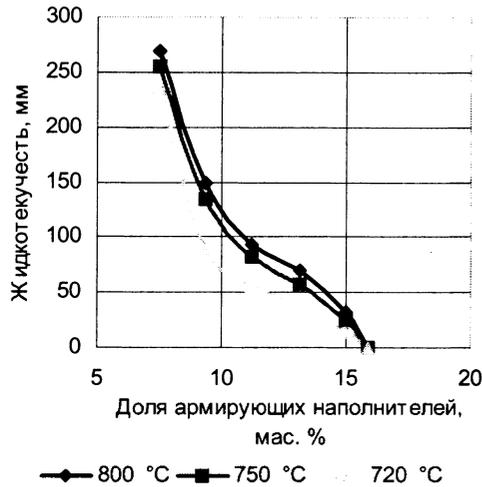


Рис. 1. Влияние доли армирующей фазы на жидкотекучесть композиции системы Al-Ti-SiC

уменьшается доля жидкой фазы, которая служит основной составляющей величины усадки. За счет равномерного распределения упрочнителей в матрице усадка в композиционных материалах сосредоточена по объему, поэтому концентрированных усадочных раковин в ЛКМ не образуется.

Проведенные исследования по изучению механических свойств КМ показали, что эти материалы обладают более высокой прочностью, твердостью по сравнению с матричным сплавом и могут работать при температурах до 200 °C без заметных потерь своих свойств (рис. 2, 3).

Исследования последних лет, проводимые ВлГУ совместно с ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, свидетельствуют о том, что алюмоматричные КМ, армированные частицами карбида кремния, зна-

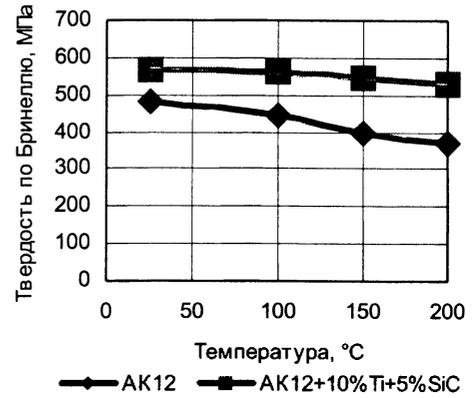


Рис. 2. Зависимость твердости от температуры испытаний

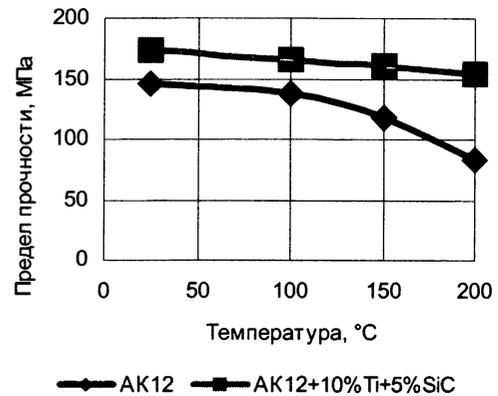


Рис. 3. Зависимость предела прочности от температуры

чительно превосходят традиционные антифрикционные материалы на основе медных сплавов по несущей способности и износостойкости.

Результаты трибологических испытаний бронзы и композиционных материалов на основе сплава АК12 приведены в таблице.

### Сравнительные характеристики бронзы и композиционных сплавов

Характеристика	Бронза БрО6Ц6С5	Композиционные сплавы		
		АК12 + 5% SiC <sub>28</sub> *	АК12 + 10% Ti + 5% SiC <sub>28</sub>	АК12 + 2,5% SiC <sub>3</sub> *
Удельное давление при стабильном режиме трения, МПа	7,0	64,0	60	120,0
Коэффициент трения при указанном давлении	0,038	< 0,01	0,01	< 0,01
Температура, развивающаяся в зоне трения, °C	110	< 55	80	< 70
Интенсивность изнашивания при давлении 7 МПа: материал колодки контртела	4,5·10 <sup>-10</sup> 1,8·10 <sup>-10</sup>	3,7·10 <sup>-12</sup> 1,3·10 <sup>-12</sup>	0,4·10 <sup>-12</sup> 0,6·10 <sup>-12</sup>	0,5·10 <sup>-12</sup> 0,7·10 <sup>-12</sup>
Интенсивность изнашивания при давлении 64 МПа: материал колодки контртела	- -	7,2·10 <sup>-10</sup> 3,1·10 <sup>-10</sup>	3,4·10 <sup>-12</sup> 2,8·10 <sup>-13</sup>	5,0·10 <sup>-11</sup> 5,0·10 <sup>-11</sup>

Примечание: \* SiC<sub>28</sub> означает, что КМ армирован частицами карбида кремния со средним диаметром 28 мкм; SiC<sub>3</sub> - соответственно частицами размером ≤ 3 мкм.

Следует отметить, что, кроме высоких триботехнических характеристик, алюмоматричные КМ, содержащие керамические частицы, обладают рядом других ценных свойств: высоким удельным модулем, теплостойкостью, теплопроводностью и демпфирующей способностью, меньшими, чем у матриц, коэффициентами линейного расширения, хорошо адаптируются к условиям серийного литейного производства, поддаются механической обработке и соединению сваркой плавлением, являются наиболее дешевыми среди КМ с металлическими матрицами.

В настоящее время разработка КМ с алюминиевыми матрицами для трибосопряжений не вышла еще из стадии накопления эмпирических данных. Отчасти это вызвано отсутствием достоверных моделей поведения в трибоконтакте не только КМ, но даже традиционных антифрикционных материалов. Однако промышленные испытания новых антифрикционных материалов в трибосопряжениях различных видов техники, а также расширение номенклатуры изделий из КМ для пар трения свидетельствуют об их высокой эксплуатационной надежности в сравнении с применяемыми бронзами (Бр.О5Ц5С5, Бр.О6Ц6С5, Бр.А9Ж3Л и др.).

В цехе наплавки вагонного депо станции Владимир Горьковской железной дороги антифрикционные КМ прошли промышленные испытания в течение 1999–2001 гг. и внедрены для изготовления втулок паразитных шестерен КПП расточных станков мод. 2А-614-1. На станках обрабатываются крупногабаритные детали (надressорные балки) после наплавки изношенных поверхностей. Эти поверхности имеют повышенную твердость, значительные отклонения по размерам. В результате этого все узлы станков работают в тяжелых условиях – неравномерная, ударная и интенсивная нагрузка. Узел трения паразитной шестерни работает в наиболее нагруженных условиях. Применяемые подшипники скольжения из Бр.А9Ж3Л и Бр.О5Ц5С5 катастрофически изнашиваются и разрушаются через 1–3 смены работы.

За период с 1999 г. по настоящее время состояние подшипников из антифрикционных КМ работоспособное и они продолжают эксплуатироваться. Применение КМ позволило при значительной экономии материала снизить себестоимость изготовления подшипников скольжения и затраты, связанные с ремонтом и простоем оборудования и обеспечить получение годового эко-

номического эффекта свыше 15 тыс. руб. на единицу оборудования.

Антифрикционные КМ успешно применяются в течение нескольких лет в ремонтно-механических цехах ОАО «Кварцевое стекло» (г. Гусь-Хрустальный), ОАО «Ремез» (г. Лакинск) вместо Бр.О6Ц6С5 в ножницах листовых мод. Н-477, на ФГУП ВПО «Точмаш» – в качестве подшипников скольжения токарных станков «Лорх», «В-56», в полировальных станках «Штейнелль», компрессорах, на ОАО «Завод им. В.А. Дегтярева» – для изготовления подшипников скольжения, используемых в узлах трения токарных станков мод. ИТ-42, 16К20-Ф3 и др.

На Заволжском моторном заводе проводили испытания КМ на головке цилиндров 514.1003007 дизеля ЗМЗ 514.10 с втулками клапанов из композиционного материала АЛ25 + 5–8 % SiC (28 мкм) в сравнении с базовыми латунными втулками клапанов из материала М94 (С 0/94) по ТУ 473-001-13092819-99.

Средняя величина увеличения зазора в парах трения втулка – клапан (между 100 и 200 ч испытаний) составила:

- для пар трения с втулками из материала М94 (С 0/94) – 7,031 мкм;
- для пар трения с алюминий-композитными втулками – 3,75 мкм;

Таким образом, увеличение среднего зазора (износа) в парах трения втулка – клапан с втулками из алюминий-композитного материала в сравнении с латунными меньше на 3,281 мкм, или на 47 %.

На ОАО ВТЗ (г. Владимир) были проведены стендовые испытания деталей втулок распределительного вала и вкладышей коренных и шатунных подшипников дизельного двигателя Д21А1, изготовленных из КМ АЛ25+2%SiC (3 мкм). Испытания показали, что применение КМ вместо бронзы Бр.О5Ц5С5 и вкладышей на основе сплава АОМ20-1 позволяет увеличить моторесурс двигателя в 1,5 раза.

На ОАО КЭЗ (г. Ковров) в течение двух лет проходят успешные полевые испытания антифрикционные КМ в катках экскаватора ЭО-4225А взамен бронзы Бр.А9Ж3Л.

Проведенные испытания свидетельствуют о перспективности и целесообразности использования новых антифрикционных композиционных материалов на алюминиевой основе вместо традиционных медных сплавов в трибосопряжениях автомобильной, дорожно-строительной техники, технологического оборудования и других отраслей машиностроения.