

УДК 669.018.95

В.М. Серпова¹, Д.В. Сидоров¹, А.Н. Няфкин¹, Е.И. Курбаткина¹

ГИБРИДНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-68-77

Представлен обзор научно-технической литературы в области гибридных металлических композиционных материалов (МКМ) на основе алюминиевых сплавов. Рассмотрены наиболее распространенные в настоящее время матричные алюминиевые сплавы и армирующие компоненты для изготовления гибридных МКМ. Показаны основные методы изготовления МКМ, а также влияние матричных алюминиевых сплавов и армирующих компонентов на механические, теплофизические и трибологические свойства гибридных МКМ. Приведено сравнение характеристик гибридных МКМ с матричными сплавами и МКМ схожих систем.

Ключевые слова: *металлический композиционный материал, гибридный композиционный материал, армирующий компонент, волокна, частицы, карбид кремния, оксид алюминия, графит.*

V.M. Serpova¹, D.V. Sidorov¹, A.N. Nyafkin¹, E.I. Kurbatkind¹

HYBRID METAL MATRIX COMPOSITES BASED ON ALUMINUM ALLOYS (review)

A review of scientific and technical literature in the field of hybrid metal composite materials (MMC) based on aluminum alloys is presented. The most widespread at present matrix aluminum alloys and reinforcing components for the manufacture of hybrid MMCs are considered. The main methods of manufacturing MMCs are shown, as well as the effect of matrix aluminum alloys and reinforcing components on the mechanical, thermophysical and tribological properties of hybrid MMCs. A comparison of the characteristics of hybrid MMCs with matrix alloys and MMCs of similar systems is given.

Keywords: *metal matrix composite, hybrid metal matrix composites reinforcing component, fibers, particles, silicon carbide, aluminum oxide, graphite.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Для разработки и производства перспективных изделий и техники различного назначения требуются новые материалы [1, 2].

В настоящее время отечественными и зарубежными материаловедческими предприятиями проводятся исследования в области создания и применения металлических композиционных материалов (МКМ), интерес к которым обусловлен их повышенными механическими характеристиками в сочетании с низкой плотностью, в отличие от характеристик исходных компонентов. Представителями данного класса материалов являются МКМ на основе алюминиевых сплавов [3–6].

Зарубежные научные организации ведут прикладные исследовательские работы по улучшению свойств данных МКМ. Одним из возможных путей решения поставленной задачи является использование нескольких видов армирующих компонентов, т. е.

создание гибридных МКМ на основе алюминиевых сплавов. Следует отметить, что научный интерес к созданию гибридных МКМ и изготовлению из них элементов конструкций вырос относительно недавно – в настоящее время ведутся только опытно-технологические работы по применению рассматриваемых материалов в изделиях [7, 8].

Цель данной статьи – обзор научно-технической литературы в области гибридных МКМ на основе алюминиевых матриц.

Гибридные металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов

По методам армирования МКМ разделяют на искусственные и естественные. В первом случае армирующие компоненты синтезируются в матрице путем химических реакций, происходящих в процессе изготовления. Во втором случае армирующие компоненты вводят в матрицу искусственно с применением различных технологий. В данной статье рассмотрены гибридные МКМ на основе алюминиевого сплава с искусственно введенным армирующим компонентом [7–9].

Распространенными методами изготовления гибридных МКМ на основе алюминиевого сплава являются: жидкофазные (пропитка под давлением, литье с перемешиванием) и твердофазные (порошковая металлургия). В научно-технической литературе приведены, в свою очередь, методы аддитивной технологии [7–9].

В таблице представлены наиболее распространенные матричные сплавы и армирующие компоненты для изготовления гибридных МКМ на основе алюминиевых сплавов, а также их механические свойства и метод изготовления.

Наиболее распространенные матричные алюминиевые сплавы и армирующие компоненты для изготовления гибридных металлических композиционных материалов

| Сплав | Армирующие компоненты | Предел прочности при растяжении, МПа | Метод изготовления |
|-------|--|--------------------------------------|---|
| 6061 | TiO ₂ +SiC | 260–280 | Литье с перемешиванием [10] |
| | SiC+B ₄ C | 179–197 | Литье с перемешиванием [11] |
| | Al ₂ O _{3w} +Al ₂ O _{3p} | 397–408 | Литье под давлением [12] |
| 1060 | NiTi _f +SiC _p | 211 | Литье под давлением [13] |
| 7075 | SiC _p +Cr _p | 549 | Литье под давлением [14] |
| | SiC+Ti | 527 | Литье под давлением [15, 16] |
| 359 | SiC+Si ₃ N ₄ | 420–453 | Литье с перемешиванием под давлением [17] |
| 2124 | SiC _w +SiC _p | 526–585 | Порошковая металлургия [18] |
| 2024 | SiC _p +Gr | – | Порошковая металлургия [19] |
| 6351 | Al ₂ O ₃ +C | – | Литье с перемешиванием [20] |

Для повышения механических характеристик МКМ на основе алюминиевого сплава марки 6061, армированного частицами карбида кремния (SiC), в работе [11] предложено использовать дополнительно второй армирующий компонент в виде частиц карбида бора (B₄C). Гибридный МКМ получен методом литья с перемешиванием, при котором частицы SiC и B₄C вводили в жидкий расплав. Для предотвращения агломерации суммарную массовую долю армирующих частиц ограничивали 6% (по массе). Исследование влияния соотношения массового содержания армирующих частиц на механические характеристики гибридного МКМ проводили на трех составах, в которых доля армирующих частиц следующая, % (по массе): 5 SiC и 1 B₄C, 4 SiC и 2 B₄C, 3 SiC и 3 B₄C. С увеличением содержания карбида бора с 1 до 3% (по массе) при одновременном уменьшении содержания карбида кремния с 3 до 1% (по массе) в МКМ, по сравнению с матричным алюминиевым сплавом, происходит повышение прочности при растяжении на ~30% и твердости по Бринеллю на ~(50–75)% при комнатной

температуре, при этом пластичность уменьшается на 46% [10]. Все испытания проводили на образцах без термической обработки. Изменение механических характеристик таких систем представлено на рис. 1.

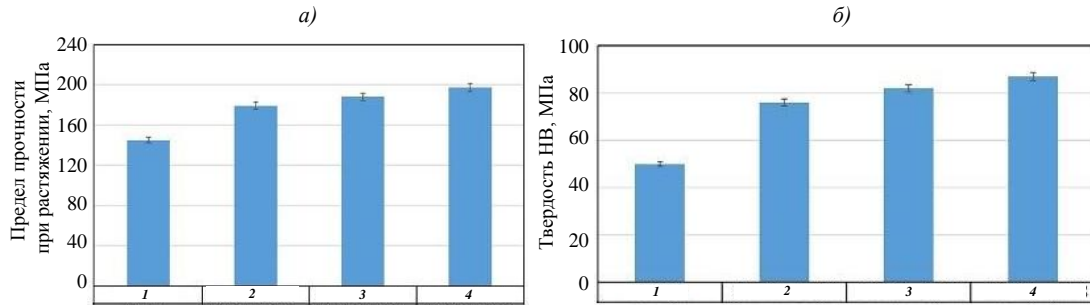


Рис. 1. Механические характеристики металлического композиционного материала системы Al–SiC–B₄C (предел прочности при растяжении при комнатной температуре (а) и твердость по Бринеллю (б)) в сравнении с матричным алюминиевым сплавом марки 6061 (1) и армированным частицами карбида бора и карбида кремния, % (по массе): 1 B₄C и 5 SiC (2); 2 B₄C и 4 SiC (3); 3 B₄C и 3 SiC (4) [11]

Влияние термической обработки, в частности температуры старения, на твердость рассматриваемого гибридного МКМ изучено в работе [21]. На рис. 2 представлены полученные результаты МКМ в сравнении с матричным алюминиевым сплавом.

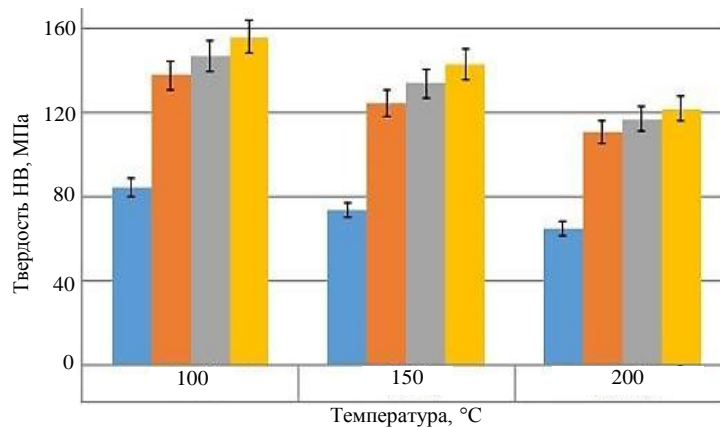


Рис. 2. Твердость по Бринеллю металлического композиционного материала системы Al–SiC–B₄C в сравнении с матричным алюминиевым сплавом марки 6061 (■) и армированного частицами карбида бора и карбида кремния, % (по массе): 1 B₄C и 5 SiC (■); 2 B₄C и 4 SiC (■); 3 B₄C и 3 SiC (■), в зависимости от температуры старения [21]

Максимальное значение твердости МКМ системы Al–SiC–B₄C достигается при температуре старения 100 °C. При температурах старения >100 °C независимо от соотношения армирующих частиц отмечается снижение твердости как гибридного МКМ, так и матричного алюминиевого сплава, на ~(10–20)%. Кроме того, независимо от температуры старения твердость МКМ больше на 60–90%, по сравнению с матричным алюминиевым сплавом [11, 21].

Типичная структура гибридного МКМ с равномерным распределением армирующих частиц (SiC и B₄C) и матричного сплава представлена на рис. 3.

Аналогичные выводы представлены в работе [10] по исследованию влияния массового содержания армирующих частиц оксида титана (Ti₂O₃) и карбида кремния в гибридном МКМ на основе алюминиевого сплава марки 6061: увеличение доли армирующих частиц приводит к увеличению твердости и прочности при растяжении МКМ на ~(25–30)%, по сравнению с матричным сплавом.

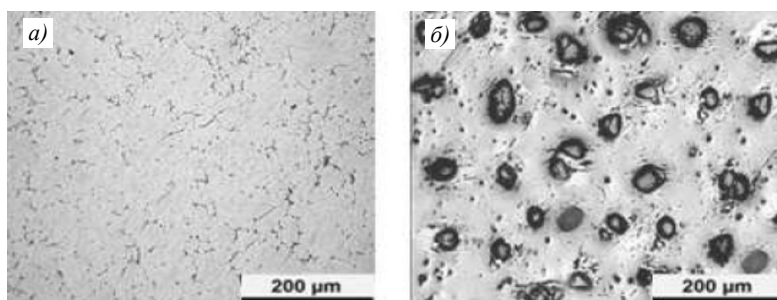


Рис. 3. Микроструктура матричного алюминиевого сплава марки 6061 (а) и металлического композиционного материала системы Al-SiC-B₄C с армирующими частицами карбида бора и карбида кремния, % (по массе): 1 B₄C и 5 SiC (б) [21]

В работе [13] представлены исследования демпфирующей способности и механических характеристик гибридного МКМ на основе алюминиевого сплава марки 1060, армированного волокнами никелида титана (TiNi) и частицами SiC. При этом содержание волокон TiNi было постоянным и составляло 20% (объемн.), а содержание частиц SiC варьировалось от 5 до 35% (объемн.). Металлический композиционный материал изготавливали методом пропитки под давлением: порошок алюминиевого сплава с размером частиц 5 мкм смешивали с частицами SiC, затем смесь порошков засыпали в форму с уложенными в ней волокнами TiNi и пропитывали под давлением алюминиевым сплавом. Микроструктура полученного МКМ представлена на рис. 4.

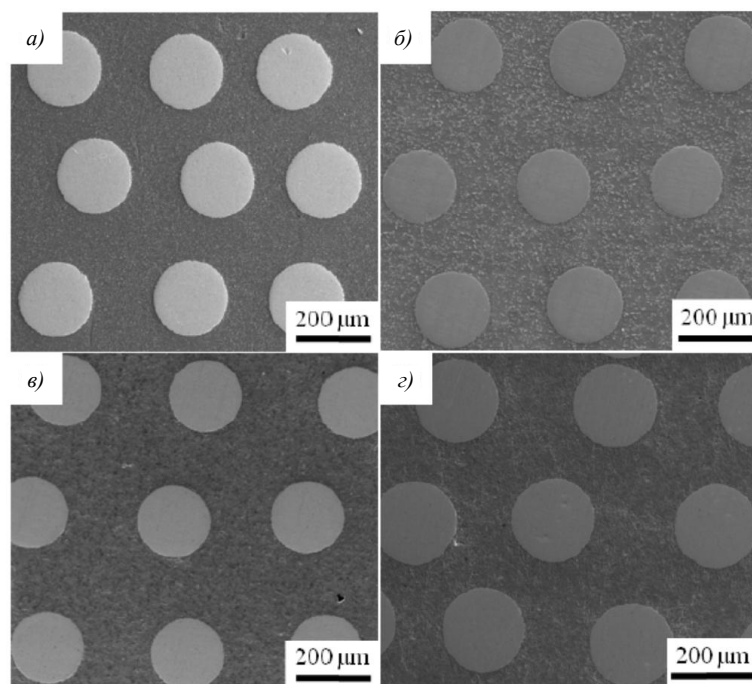


Рис. 4. Микроструктура металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава марки 1060 с армирующими частицами никелида титана и карбида кремния, % (объемн.): 20TiNi_f (а), 5SiC_p+20TiNi_f (б), 20SiC_p+20TiNi_f (в), 20SiC_p+35TiNi_f (г) [13]

При содержании частиц карбида кремния <5% (объемн.) на диаграмме деформирования наблюдается площадка текучести в диапазоне деформации от 1,5 до 6%, что нехарактерно для МКМ. Данное явление связывают с переориентацией мартенсита в волокнах TiNi. На рис. 5 приведена зависимость предела текучести при растяжении, модуля упругости и относительного удлинения гибридного МКМ от объемного содержания частиц SiC.

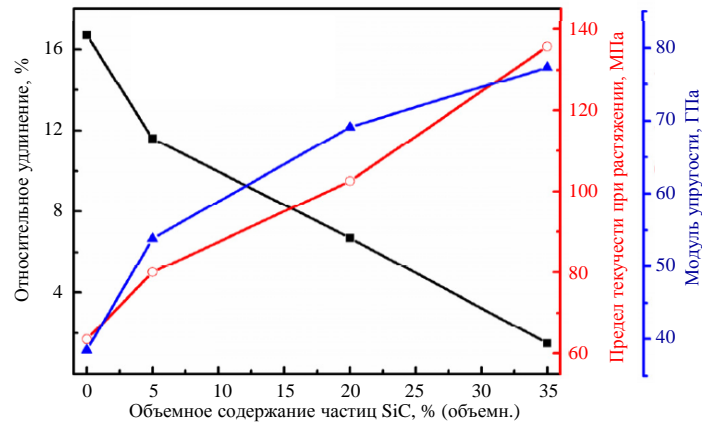


Рис. 5. Зависимость механических характеристик (предела текучести при растяжении (○), модуля упругости (▲) и относительного удлинения (■)) металлического композиционного материала системы Al–TiNi–SiC от объемного содержания частиц карбида кремния (SiC) [13]

Установлено, что с увеличением объемного содержания частиц SiC повышается предел текучести при растяжении и модуль упругости, а пластичность уменьшается. Следует отметить, что пластичность >6% сохраняется при содержании SiC <20% (объемн.). Это объясняется пластической деформацией мартенсита в волокнах TiNi. Отмечается, что когда доля частиц SiC составляет 35% (объемн.), разрушение матрицы начинается до переориентации мартенсита.

Исследование демпфирующей способности проводили при частотах 1, 10 и 20 Гц в диапазоне температур от 30 до 250 °С. Демпфирующая способность на исследуемых частотах практически одинаковая в диапазоне температур от 30 до 50 °С при всех вариациях армирования МКМ, за исключением МКМ, не содержащего частицы SiC. С повышением температуры демпфирующая способность увеличивается при частотах 10 и 20 Гц. В диапазонах температур от 50 до 110 и от 140 до 250 °С демпфирующая способность МКМ, содержащих 5 и 20% (объемн.) SiC соответственно, более высокая, чем у МКМ, которые не содержат частицы SiC или у которых их доля составляет 35% (объемн.). Максимум демпфирования наблюдается при температуре 135 °С. Данное явление связывают с обратным мартенситным превращением B19'→B2 в волокнах TiNi в процессе нагрева. С увеличением частоты максимум демпфирования уменьшается.

Отмечается, что на демпфирующую способность исследованного МКМ с различным армированием частиц SiC влияет не только демпфирующая способность волокон TiNi и алюминиевой матрицы, но и границы раздела между армирующими компонентами [13].

В работах [14, 22] изучали влияние частиц хрома (Cr) на характеристики гибридных МКМ на основе алюминиевых сплавов. Влияние частиц Cr на механические и теплофизические характеристики МКМ на основе алюминиевого сплава марки 7075, армированного частицами SiC, представлено в работе [14]. В этом исследовании гибридный МКМ системы Al–Cr–SiC изготавливали методом пропитки под давлением предварительно сформированной заготовкой из частиц SiC и Cr. При этом содержание частиц SiC варьировали от 50 до 55% (объемн.), а содержание частиц Cr оставалось постоянным и составляло 5% (объемн.).

На рис. 6 представлены микроструктура гибридного МКМ и зависимость предела прочности при растяжении и изгибе от объемного содержания частиц SiC и с частицами Cr.

Как видно из данных, представленных на рис. 6, пределы прочности при растяжении и изгибе гибридного МКМ системы Al–SiC–Cr на ~20 и ~5% соответственно больше, чем у МКМ системы Al–SiC при различном объемном содержании армированных частиц. При этом относительное удлинение больше на ~15% у гибридного МКМ

системы Al–SiC–Cr, по сравнению с МКМ системы Al–SiC. Гибридный МКМ обладает теплопроводностью 144 Вт/(м·К), что на ~10% больше, чем у МКМ с содержанием SiC 50% (объемн.). При этом значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в диапазоне температур от 30 до 100 °С отличается незначительно, а в диапазоне температур от 100 до 400 °С у гибридного МКМ уменьшается на ~7%.

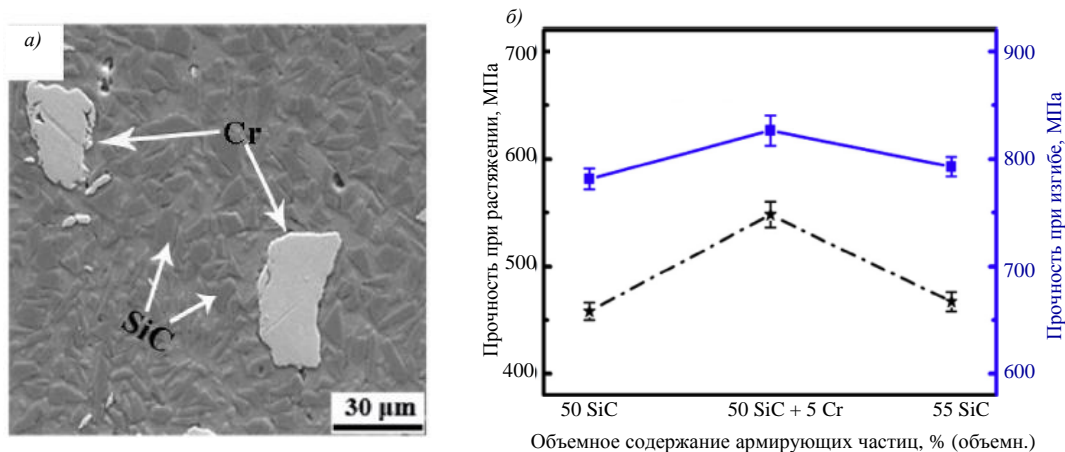


Рис. 6. Микроструктура гибридного металлического композиционного материала системы Al–SiC–Cr (а) и зависимость пределов прочности при растяжении (■) и изгибе (★) от объемного содержания частиц карбида кремния (SiC) и с частицами хрома (Cr) [14]

В работе [15] исследовано влияние частиц титана (Ti) на механические свойства МКМ на основе алюминиевого сплава марки 7075, армированного частицами SiC. Гибридный МКМ системы Al–Ti–SiC изготавливали рассматриваемым методом в работе [14]. Для сравнения механических характеристик изготовили МКМ системы Al–SiC и гибридный МКМ системы Al–Ti–SiC следующих составов:

- M-SiC/7075Al: алюминиевый сплав марки 7075, армированный частицами SiC с содержанием 45% (объемн.) и дисперсностью 7 мкм;
- D-SiC/7075Al: алюминиевый сплав марки 7075, армированный частицами SiC с содержанием 40 и 5% (объемн.), дисперсностью 7 и 35 мкм соответственно;
- L-SiC/7075Al: алюминиевый сплав марки 7075, армированный частицами SiC с содержанием 40% (объемн.) и дисперсностью 7 мкм, а также частицами Ti с содержанием 5% (объемн.) и дисперсностью 35 мкм.

Экспериментальные результаты показали, что гибридный МКМ состава L-SiC/7075Al обладает пределом прочности при растяжении 626 МПа и относительным удлинением 1,2%, что больше на ~15% и ~60% соответственно, чем у МКМ состава M-SiC/7075Al, а также больше на ~25% и ~65% соответственно, чем у МКМ состава D-SiC/7075Al. Кроме того, предел прочности МКМ состава L-SiC/7075Al больше на ~60%, по сравнению с алюминиевым матричным сплавом 7075 (все исследования проводили на образцах без термической обработки). При этом относительное удлинение гибридного МКМ системы Al–Ti–SiC меньше на ~30%, по сравнению с матричным сплавом, но больше на ~65%, чем у МКМ системы Al–SiC с разной дисперсностью армирующего компонента.

Отмечается, что в гибридном МКМ на границе раздела «матрица–армирующий компонент» плотность дислокаций меньше, по сравнению с МКМ, армированным частицами SiC. Этот факт способствует увеличению прочности и пластичности материала. Меньшую плотность дислокаций связывают с тем, что частицы титана и матричный алюминиевый сплав обладают близкими значениями ТКЛР, а также имеют более низкий модуль упругости, по сравнению с частицами SiC, что способствует уменьшению внутренних напряжений.

Обнаружено, что траектория трещин в гибридном МКМ зигзагообразная, по сравнению с МКМ, армированным частицами SiC. Разрушение МКМ, армированного частицами SiC с дисперсностью 35 мкм, происходит преимущественно с перерезанием частиц и приводит к уменьшению пластичности материала.

В работе [17] методом литья с перемешиванием получали МКМ на основе алюминиевого сплава марки 359, армированного частицами SiC и нитрида кремния (Si_3N_4) с содержанием 5, 10 и 15% (по массе) в соотношении 2:1 соответственно. Во время процесса кристаллизации прикладывали давление, что значительно снизило процент газовой пористости, присутствующей в расплаве во время литья с перемешиванием. Частицы Si_3N_4 добавляют для повышения механических свойств, а частицы SiC – для повышения износостойкости. Полученные гибридные композиты имеют более высокие значения пределов текучести при сжатии и прочности, чем у матричного сплава марки 359, но при этом имеют более низкую пластичность. Конечно-элементное моделирование показало, что концентрация деформаций вблизи крупных частиц SiC приводит к снижению пластичности МКМ.

Добавление частиц SiC и Si_3N_4 в матрицу при их содержании 10% (по массе) ускоряет кинетику старения, поскольку продолжительность старения уменьшается с 12 до 4 ч [15–17, 23].

Оценку влияния старения на микроструктуру и механические свойства МКМ на основе алюминиевого сплава марки 2124, армированных нитевидными кристаллами и частицами SiC, проводили в работе [18]. Установлено, что армирование нитевидными кристаллами и частицами SiC приводит к повышению механических характеристик по сравнению только с частицами SiC. Отмечается, что такое армирование является экономически нецелесообразным из-за высокой стоимости нитевидных кристаллов SiC.

В научно-технической литературе представлены исследования трибологических характеристик МКМ. Отмечается, что износостойкость таких материалов больше, чем неармированных сплавов. Это связано с наличием керамических наполнителей в виде частиц SiC, B_4C и TiC. С одной стороны, армирование керамическими частицами приводит к повышению твердости материала и защите поверхности матрицы при трении/скольжении, а с другой стороны, наличие этих частиц увеличивает коэффициент трения. Кроме того, они могут действовать как абразивные частицы и ускорять износ трущихся поверхностей. Для решения этой проблемы предложено использовать в качестве армирующих компонентов сочетание керамических частиц и частиц графита или силицида молибдена (MoSi_2) [19, 24–27].

Например, в работе [21] проводили сравнительные исследования трибологических свойств гибридного МКМ системы Al–SiC на основе алюминиевого сплава марки 2024, армированного частицами карбида кремния и графита. Содержание частиц SiC в материалах составляло 5% (по массе), а частиц графита в гибридном МКМ варьировалось от 5 до 10% (по массе).

На рис. 7 представлена зависимость влияния массового содержания частиц графита (Gr) гибридного МКМ на коэффициент трения и коэффициент износа в сравнении с МКМ системы Al–SiC.

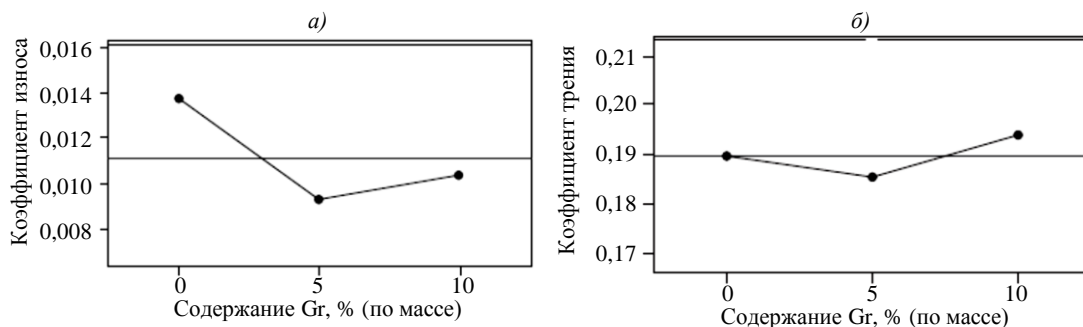


Рис. 7. Зависимость коэффициентов износа (а) и трения (б) гибридного металлического композиционного материала от массового содержания графита (Gr) [19]

Из данных, представленных на рис. 7, видно, что коэффициенты износа и трения гибридного МКМ меньше при содержании частиц графита 5% (по массе), по сравнению с МКМ системы Al–SiC. Этот эффект связывают с образованием триботехнического слоя из частиц графита, которые высвобождаются при трении. При армировании графитом >5% (по массе) коэффициенты износа и трения имеют тенденцию к увеличению. Предполагается, что эта тенденция обусловлена снижением вязкости разрушения материала [19, 26, 27].

Исследования скорости износа проводили в работе [20] на гибридном МКМ на основе алюминиевого сплава марки 6351, армированного частицами оксида алюминия (Al_2O_3) и углерода (C). Диапазон армирования варьировали от 2,5 до 10% (по массе) для каждого типа частиц. На рис. 8 представлена зависимость скорости износа МКМ от массового содержания армирующих частиц при различной нагрузке.

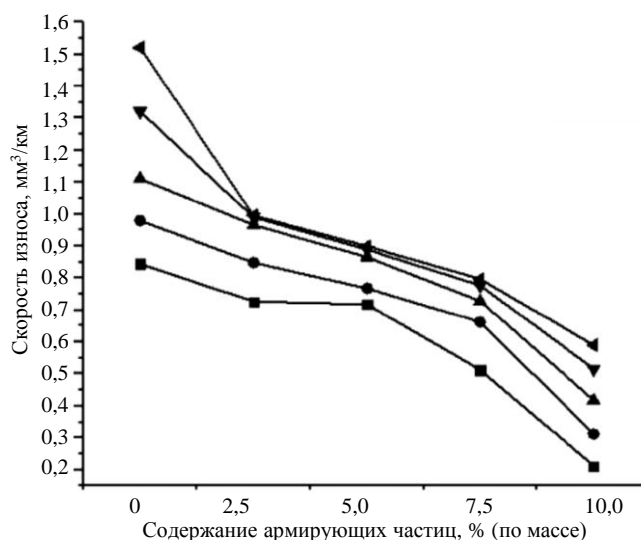


Рис. 8. Зависимость скорости износа металлического композиционного материала от массового содержания армирующих частиц оксида алюминия (Al_2O_3) и углерода (C) при нагрузке 5 (■), 10 (●), 15 (▲), 20 (▼) и 25 Н (◄) [20]

Из данных, представленных на рис. 9, видно, что скорость износа уменьшается с увеличением содержания армирующих частиц вне зависимости от приложенной нагрузки. Отмечается, что основными видами износа гибридного МКМ являются адгезионный и абразивный. При этом адгезионный износ наблюдается при минимальной приложенной нагрузке, а абразивный – при максимальной.

Заключения

В настоящее время в зарубежной научно-технической литературе представлены исследования в области изучения, разработок и создания гибридных МКМ на основе алюминиевых сплавов. Наиболее распространенными алюминиевыми сплавами, используемыми для изготовления гибридных МКМ, являются сплавы марок 359, 1060, 2024, 2124, 6061, 6351 и 7075. В качестве армирующих компонентов применяют сочетания порошков карбида кремния с керамическими (диоксид титана, карбид бора, нитрид кремния и оксид алюминия) и металлическими частицами (титан и хром). Отмечается также использование нитевидных кристаллов карбида кремния, коротких волокон оксида алюминия, волокон нитинола и частиц графита.

Основными методами изготовления гибридных МКМ на основе алюминиевого сплава являются жидкофазные (пропитка под давлением и литье с перемешиванием)

и твердофазные (порошковая металлургия). В научно-технической литературе также описаны методы аддитивной технологии.

Сочетание различных видов армирующих компонентов позволяет получить гибридные МКМ с повышенными механическими, теплофизическими и трибологическими характеристиками, а также улучшенными демпфирующими свойствами. Например, предел прочности при растяжении гибридного МКМ системы Al–SiC–Cr на ~20% больше, чем у МКМ системы Al–SiC, при сопоставлении объемного содержания частиц карбида кремния. Кроме того, относительное удлинение у гибридного МКМ системы Al–SiC–Cr больше на ~15%, по сравнению с МКМ системы Al–SiC. Коэффициенты износа и трения гибридного МКМ системы Al–SiC–C меньше при содержании частиц графита 5% (по массе), по сравнению с МКМ системы Al–SiC. Данный эффект связывают с образованием триботехнического слоя из частиц графита, которые высвобождаются при трении. Применение частиц титана в качестве армирующего компонента позволяет получить гибридный МКМ системы Al–Ti–SiC, который обладает повышенным пределом прочности (на ~15%), по сравнению с МКМ системы Al–SiC с сопоставимым объемным содержанием частиц карбида кремния. При этом относительное удлинение гибридного МКМ системы Al–Ti–SiC меньше на ~30%, по сравнению с матричным сплавом, но больше на ~65%, чем у МКМ системы Al–SiC. Сочетание волокон никелида титана и частиц карбида кремния в качестве армирующих компонентов позволяет получить материал с повышенными механическими и демпфирующими свойствами при сохранении удовлетворительной пластичности.

Таким образом, рассмотренные гибридные МКМ на основе алюминиевых сплавов представляют практический интерес и имеют потенциальные возможности для применения в различных областях науки и техники.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. №1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. Карашаев М.М., Базылева О.А., Шестаков А.В., Овсепян С.В. Технологические основы создания металлических композиционных материалов, армированных оксидными и интерметаллидными частицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №3 (60). С. 29–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-29-36.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
7. Chawla N., Chawla K.K. *Metal Matrix Composites*. New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2006. P. 351–379.
8. Almgour B. *Additive Manufacturing of Emerging Materials*. Springer, 2019. 355 p.
9. Debroy H.L., Wei J.S., Zuback T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224.

10. Venugopal S., Karikalan L. Microstructure and physical properties of hybrid metal matrix composites AA6061–TiO₂–SiC via stir casting techniques // *Materials Today: Proceedings*. 2020. P. 2–6. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.462.
11. Gowrishankar M.C., Hiremath P., Shettar M. et al. Experimental validity on the casting characteristics of stir cast aluminium composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 3340–3347. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.028.
12. Oh K.H., Han K.S. Short-fiber/particle hybrid reinforcement: effects on fracture toughness and fatigue crack growth of metal matrix composites // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. Iss. 7–8. P. 1719–1726. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.020.
13. Hu J., Wu G., Zhang Q., Gou H. Mechanical properties and damping capacity of SiC_p/TiNi_f/Al composite with different volume fraction of SiC particle // *Composites. Part B: Engineering*. 2014. Vol. 66. P. 400–406. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.013.
14. Lu T.W., Chen W.P., Wang P. et al. Enhanced mechanical properties and thermo-physical properties of 7075Al hybrid composites reinforced by the mixture of Cr particles and SiC_p // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 735. P. 1137–1144. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.227.
15. Liu Y.X., Yang C., Chen W.P. et al. Effects of particle size and properties on the microstructures, mechanical properties, and fracture mechanisms of 7075Al hybrid composites prepared by squeeze casting // *Journal of Materials Science*. 2014. Vol. 49. P. 7855–7863. DOI: 10.1007/s10853-014-8496-5.
16. Chen W., Liu Y., Yang C. et al. (SiC_p+Ti)/7075Al hybrid composites with high strength and large plasticity fabricated by squeeze casting // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 609. P. 250–254. DOI: 10.1016/j.msea.2014.05.008.
17. Shalaby E.A.M., Churyumov A.Y., Solonin A.N., Lotfy A. Preparation and characterization of hybrid A359/(SiC+Si₃N₄) composites synthesized by stir/squeeze casting techniques // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 674. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.058.
18. Ko B.C., Yoo Y.C. The effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of AA2124 hybrid composites reinforced with both SiC whiskers and SiC particles // *Composites Science and Technology*. 1999. Vol. 59. Iss. 5. P. 775–779. DOI: 10.1016/S0266-3538(98)00118-3.
19. Pandian V., Kannan S. Processing and preparation of aerospace-grade aluminium hybrid metal matrix composite in a modified stir casting furnace integrated with mechanical supersonic vibration squeeze infiltration method // *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101732.
20. Ahamad N., Mohammada A., Guptab P. Wear characteristics of Al matrix reinforced with Al₂O₃-carbon hybrid metal matrix composites // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. No. 1. P. 2–6. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.739.
21. Sharma S.S., Jagannath K., Prabhu P.R. et al. Metallography & Bulk Hardness of Artificially Aged Al6061–B₄C–SiC Stir Cast Hybrid Composites // *Materials Science Forum Submitted*. 2016. Vol. 880. P. 140–143. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.880.140.
22. Kumar J., Singh D., Kalsi N.S. et al. Comparative study on the mechanical, tribological, morphological and structural properties of vortex casting processed, Al–SiC–Cr hybrid metal matrix composites for high strength wear-resistant applications: Fabrication and characterizations // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Is. 6. P. 13607–13615. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.001.
23. Shabani M., Mazahery A. Prediction of wear properties in A356 matrix composite reinforced with B₄C particulates // *Synthetic Metals*. 2011. Vol. 161. P. 1226–1231. DOI: 10.1016/j.synthmet.2011.04.009.
24. Bayhan M., Önel K. Optimization of reinforcement content and sliding distance for AlSi₇Mg/SiC_p composites using response surface methodology // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31. Iss. 6. P. 3015–3022. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.049.
25. Liu Y.B., Lim S.C., Ray S., Rohatgi P.K. Friction and wear of aluminium-graphite composites: the smearing process of graphite during sliding // *Wear*. 1992. Vol. 159. Iss. 2. P. 201–205. DOI: 10.1016/0043-1648(92)90303-P.
26. Suresha S., Sridhara B.K. Wear characteristics of hybrid aluminium matrix composites reinforced with graphite and silicon carbide particulates // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. Iss. 11. P. 1652–1659. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.06.013.
27. Mahdavi S., Akhlaghi F. Effect of SiC content on the processing, compaction behavior, and properties of Al6061/SiC/Gr hybrid composites // *Journal of Materials Science*. 2011. Vol. 46. P. 1502–1511. DOI: 10.1007/s10853-010-4954-x.