

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-24-27

О.И. Гришина¹, А.А. Шавнев¹, В.М. Серпова¹**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ КАРБИДА КРЕМНИЯ (обзор)**

Представлен обзор особенностей упрочнения металлических композиционных материалов (МКМ) на алюминиевой матрице тугоплавкими частицами карбида кремния. Показано влияние разницы в коэффициентах термического расширения (КТР) матрицы и армирующего компонента, а также остаточных тепловых напряжений, возникающих в МКМ в процессе формирования, на механические характеристики материала. Рассмотрен механизм зарождения и роста трещины в процессе усталостного разрушения, наблюдающийся либо по границе раздела «матрица–упрочняющий компонент», либо в самих упрочняющих частицах. Также рассмотрено влияние межфазного взаимодействия на механизм усталостного разрушения. Показано влияние состояния поверхности раздела «матрица–упрочняющий компонент» на механические характеристики композиционного материала.

Ключевые слова: металлический композиционный материал, частицы карбида кремния, алюминиевый сплав.

This article provides an over view of hardening features of aluminum metal matrix composite reinforced with heat-resistant silicon carbide particles. We described the influence on mechanical properties of the difference in thermal expansion coefficient of matrix and reinforcing component and availability of residual thermal stress that arise in composite during producing. Was considered the mechanism of crack formation and growth during fatigue fracture, wich is observed at the interface, on within the reinforcing particles. Also examined the effect of interfacial interaction on the mechanism of fatigue failure and the influence of the interface condition on mechanical properties of the composite material.

Keywords: a metal composite material, silicon carbide particles, aluminum alloy.

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

После того как в современной физике металлов было дано подробное разъяснение причин пластичности металлов, их прочности и ее увеличения, начались интенсивные разработки новых материалов. Одними из таких материалов являются дисперсноармированные металлические композиционные материалы (МКМ) [1–4]. В таких материалах твердые частицы тугоплавких соединений чаще всего увеличивают прочность и твердость, а пластичная металлическая матрица придает материалу вязкость и пластичность [5].

К преимуществам дисперсноармированных МКМ перед остальными материалами могут быть отнесены высокие уровни прочности и сопротивления ползучести в широком интервале температур. Важным преимуществом перед волокнистыми МКМ также является изотропность дисперсноупрочненных МКМ – с повышением температуры снижение механических свойств дисперсноармированных композиционных материалов выражено значительно слабее, чем в традиционных материалах, например упрочняемых старением [6–10].

Особенности упрочнения металлических композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, упрочненных частицами карбида кремния

Поскольку в МКМ, армированных частицами, матрица несет основную нагрузку, то при деформации МКМ из-за наличия в пластичной матрице твердых частиц возможно образование пор – либо вследствие разрушения частиц, либо вследствие разрывов по поверхностям раздела между частицами и матрицей. В процессе деформации наблюдаются следующие характерные особенности растрескивания частиц:

- прогрессивное растрескивание частиц при пластической деформации;
- трещины в частицах, стремящиеся расположиться перпендикулярно направлению максимальной деформации растяжения;
- направление разрушения зависит от размера и формы частиц.

Частицы армирующего компонента, находящиеся в области вершины трещины, изменяют геометрическую форму ее фронта, снижая кон-

центрацию напряжения в матрице и, как следствие, препятствуя распространению трещины.

Одной из проблем, оказывающих влияние на механические свойства МКМ, является разница в коэффициентах термического расширения (КТР) матрицы и армирующих частиц [11]. В работе [12] показано, что при охлаждении до комнатной температуры после изготовления или термической обработки (отжига) в МКМ системы Al/SiC возникают остаточные напряжения из-за несоответствия КТР между матрицей и армирующими частицами, за счет чего в МКМ возникают внутренние напряжения, приводящие к образованию пор и микротрещин.

В работе [13] проведены исследования величины остаточных тепловых напряжений путем определения изменения предела текучести при циклическом нагружении (растяжении и сжатии). На основании метода Эшелби [14] построена теоретическая модель для прогнозирования величины остаточных тепловых напряжений и изменения предела текучести, которая подтвердилась при экспериментальных исследованиях. Отмечено, что по границе раздела «матрица–упрочняющий компонент» наблюдается множественное скопление дислокаций. Также при деформации благодаря дислокациям сдвиг атомов в соседнее положение происходит не одновременно по всей поверхности скольжения, а скачками во времени. Такое постепенное скольжение из-за небольших смещений атомов в области дислокаций не требует значительных напряжений, что и проявляется при испытаниях пластичных материалов. В МКМ, армированных частицами, заданные прочность и надежность достигаются путем формирования определенного структурного состояния, при котором эффективное торможение дислокаций сочетается с их равномерным распределением в объеме материала либо (что особенно благоприятно) с определенной подвижностью скапливающихся у барьеров дислокаций для предотвращения хрупкого разрушения [15].

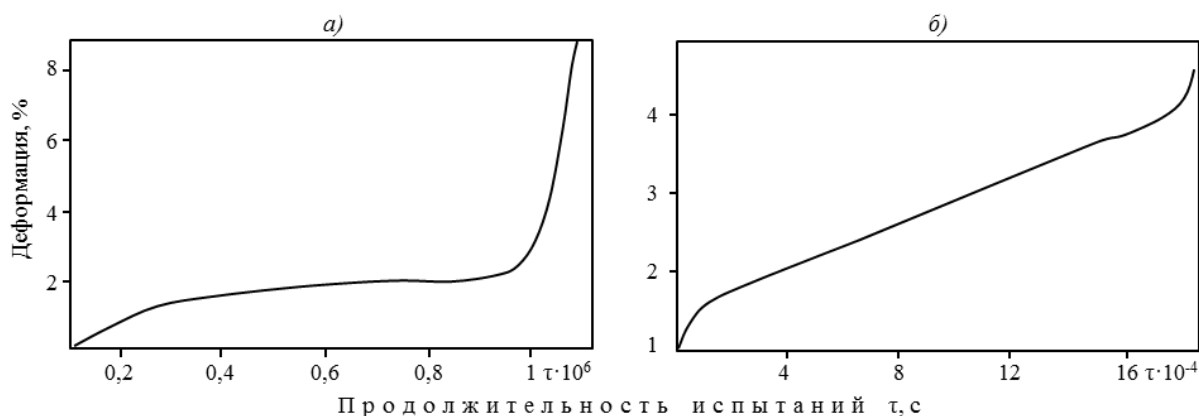
В работе [16] проводились аналогичные исследования для определения относительной плотности дислокаций, возникающих вследствие термического сжатия. Установлено, что при охлаждении МКМ с температуры отжига до комнатной температуры наличие частиц SiC в алюминиевой матрице приводит к возникновению дислокаций по границе раздела «матрица–упрочняющий компонент». Интенсивность возникновения дислокаций по границе раздела связана с размером и формой частиц карбида кремния.

Влияние межфазного взаимодействия на механизм усталостного разрушения

Решение проблемы повышения конструкционной прочности не только в повышении прочностных свойств, но и в том, как при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, т. е. повысить надежность материала [17].

Процесс усталостного разрушения МКМ с концентраторами напряжений включает две стадии – образование и рост трещины. Переход от стадии образования к стадии роста трещины определяется начальным размером макротрещины [18]. В МКМ системы Al/SiC рост усталостной трещины наблюдается либо по границе раздела «матрица–упрочняющий компонент», либо в самих частицах SiC, возникающих в процессе механического легирования. Размер трещины обуславливается размером и формой частиц [19].

Рост усталостных трещин также возможен вследствие слабого межфазного взаимодействия. Скорость роста усталостной трещины (СРТУ) в зависимости от ее длины, а также коэффициент интенсивности напряжений у трещины в МКМ находятся в достаточно узком диапазоне значений вследствие низкой вязкости разрушения и низкого поля напряжения у трещины [20]. По причине слабого межфазного взаимодействия на границе раздела в МКМ системы Al/SiC наблюдается ранняя стадия ускоренного (нестабильного) роста усталостной трещины (см. рисунок, а).



Кривые ползучести металлических композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы: а – сплав 2014, армированный частицами SiC (13% объемн.) [19]; б – сплав 6061, армированный нитевидными кристаллами SiC (20% объемн.) [21]

В отличие от МКМ, армированных частицами, в МКМ, армированных нитевидными кристаллами («кусами»), наличие слабого межфазного взаимодействия на границе раздела снижает темпы роста трещин (см. рисунок, б) [21].

В работе [22] проведены исследования накопления повреждений при испытании на усталость МКМ на основе алюминиевого сплава 6061-T6, армированного частицами SiC (15% объемн.), с помощью метода акустической эмиссии (АЭ). С точки зрения механики усталостного роста трещины можно выделить следующие механизмы, ответственные за возникновение АЭ:

- процесс пластического течения на фронте трещины;
- микроразрушение в области интенсивной пластической деформации в вершине трещины;
- «отдирирование» частично схватывающихся поверхностей трещины при циклическом нагружении [23].

Установлено, что при интенсивном циклическом нагружении в МКМ активно возникают и достаточно быстро распространяются упругие колебания (акустические волны) вследствие слабого межфазного взаимодействия между матрицей и армирующим компонентом, а также из-за наличия пустот по границе раздела.

Изменение с течением времени деформации МКМ системы Al(2124)/SiC под воздействием постоянной нагрузки изучалось в работе [24]. Установлено, что частицы SiC непосредственно не влияют на ползучесть МКМ при деформации.

Прочностные свойства МКМ зависят также от состояния поверхности раздела между матрицей и упрочняющим элементом. Упрочнение МКМ, армированных частицами, заключается в создании в них структуры, затрудняющей движение дислокаций. Наиболее сильное торможение передвижению дислокаций создают дискретные ча-

стицы вторичной фазы – например, химические соединения типа карбидов, нитридов, боридов, оксидов – характеризующиеся высокой прочностью и температурой плавления. Например, в работе [25] предложен нетрадиционный подход к упрочнению МКМ частицами вторичной фазы Al_4C_3 , образующимися на границе раздела «матрица–упрочняющий компонент». Благодаря образованию карбида алюминия наблюдается увеличение пределов текучести и прочности при растяжении, а также трещиностойкости. Разрушение такого МКМ происходит преимущественно по границе раздела за счет сильного межфазного взаимодействия между матрицей и частицами SiC.

На прочностные характеристики МКМ большое влияние оказывают механические воздействия, в результате которых в материале возникают дислокации. В работе [26] рассматривалось влияние экструзии на процесс образования дислокаций и их влияние на структуру МКМ системы Al–Cu/SiC. Установлено, что в процессе экструзии механические свойства композиционного материала значительно увеличиваются за счет значительного уменьшения количества пор в материале.

Заключение

Проведенные до настоящего времени исследования в области развития дисперсноармированных МКМ показывают, что наиболее перспективными являются МКМ на основе алюминиевых сплавов, армированных частицами SiC. Большое влияние на механические свойства и целостность композиционного материала оказывают не только частицы, препятствующие движению дислокаций в матрице, но и межфазное взаимодействие матрицы с армирующими частицами. Граница раздела «матрица–армирующий компонент» играет важнейшую роль в передаче нагрузки от матрицы к армирующим частицам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алюминиевые сплавы /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди; Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 143–156.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
5. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
7. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.

9. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al-SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 373–380.
10. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al-SiC в силовой электронике и преобразовательной технике //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 20–22.
11. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
12. Zhang F., Sun P., Li X., Zhang G. A comparative study on microplastic deformation behavior in a SiC_p/2024Al composite and its unreinforced matrix alloy //J. Mater. Lett. 2001. V. 49. №2. P. 69–74.
13. Arsenault R.J., Taya M. Thermal residual stress in metal matrix composite //Acta Metall. 1987. V. 35. №3. P. 651–659.
14. Лурье С.А., Соляев Ю.О. Модифицированный метод Эшелби в задаче определения эффективных свойств со сферическими микро- и нановключениями //Вестник ПГТУ. Механика. 2010. №1. С. 80–90.
15. Беляев М.С., Кошкин С.Б., Горбовец М.А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 27–30.
16. Arsenault R.J., Shi N. Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion //Mater. Sci. and Eng. 1986. V. 81. P. 175–187.
17. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
18. Волков В.М., Миронов А.А. Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений //Проблемы прочности и пластичности. 2005. Вып. 67. С. 20–25.
19. Kumai S., King J.E., Knott J.F. Fatigue in SiC-particulate-reinforced aluminum alloy composites //Mater. Sci. and Eng. A. 1991. V. 146. P. 317–326.
20. Тренингов И.А., Алексеев А.А., Зайцев Д.В., Филонова Е.В. Исследования фазовых и структурных изменений, а также остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в сплаве ВЖМ4 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 11–19.
21. King J.E., Bhattacharjee D. Interfacial effects on fatigue and fracture in discontinuously reinforced metal matrix composites //Materials Science Forum. 1995. V. 189–190. P. 43–56.
22. Shan D., Nayeb-Hashemi H. Fatigue-life prediction of SiC particulate reinforced aluminum alloy 6061 matrix composite using AE stress delay concept //J. Mater. Sci. 1999. V. 34. №13. P. 3263–3270.
23. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 64–69.
24. Li Y., Mohamed F.A. An investigation of creep behavior in an SiC-2124 Al composite //Acta Mater. 1998. V. 45. №11. P. 4775–4785.
25. Tham L.M., Gupta M., Cheng L. Effect of limited matrix-reinforcement interfacial reactions on enhancing the mechanical properties of aluminum-silicon carbide composites //Acta Mater. 2001. V. 49. №16. P. 3243–3253.
26. Sun C., Shen R., Song M. Effects of sintering and extrusion on the microstructures and mechanical properties of a SiC/Al-Cu composite //Journal of Materials Engineering and Performance. 2011. V. 12. №2. P. 37–38.