

УДК 669.018.95

Е.А. Стоякина¹, Е.И. Курбаткина¹, В.Н. Симонов²,
Д.В. Косолапов¹, А.В. Гололобов¹

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ
ЧАСТИЦАМИ SiC, В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ МАТРИЧНОГО СПЛАВА (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-8-8

Проведен обзор механических свойств существующих низконаполненных алюмоматричных композиционных материалов с матрицами из алюминиевых сплавов серий 6XXX (6061, 6063, 6092), 2XXX (2024, 2009), 7XXX (7075, 7050) и разным процентным содержанием упрочняющих частиц карбида кремния. Показана зависимость изменения свойств при изменении процентного содержания упрочняющих частиц у алюмоматричных композиционных материалов с разными матричными сплавами. Показано, что максимальными механическими характеристиками обладают алюмоматричные композиционные материалы с матричными алюминиевыми сплавами серии 7XXX. Рассмотрены химические и фазовые составы матричных сплавов. Приведены детали и конструкции, которые изготавливают из алюмоматричных композиционных материалов.

Ключевые слова: алюмоматричный композиционный материал, алюминиевые сплавы, матричный сплав, механические свойства, карбид кремния, упрочняющие частицы.

Е.А. Stoyakina¹, Е.И. Kurbatkina¹, V.N. Simonov²,
D.V. Kosolapov¹, A.V. Gololobov¹

**MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM-MATRIX
COMPOSITE MATERIALS REINFORCED
WITH SiC PARTICLES, DEPENDING
ON THE MATRIX ALLOY (review)**

The paper reviews the mechanical properties of existing low-filled alumo-matrix composite materials with matrices of aluminum alloys 6XXX (6061, 6063, 6092), 2XXX (2024, 2009), 7XXX (7075, 7050) series and different percentages of silicon carbide hardening particles. The dependence of the change in properties is shown with a change in the percentage content of hardening particles in aluminum-matrix composite materials with different matrix alloys. It is shown that aluminum composites with matrix aluminum alloys 7XXX series have maximal mechanical characteristics. The chemical and phase compositions of matrix alloys are considered. Also, details and constructions, which are made of alumo-matrix composite materials, are considered.

Keywords: alumo-matrix composite material, aluminum alloy, matrix alloy, mechanical properties, silicon carbide, hardening particles.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Прогресс науки и техники во многом зависит от успехов в области создания новых материалов. Композиционные материалы (КМ) по праву считаются материалами будущего, так как в большинстве случаев только они могут удовлетворять требованиям при создании новой техники, для которой актуальным вопросом является уменьшение массы изделия, а также характерно ужесточение условий эксплуатации: повышение эксплуатационных нагрузок, скоростей, температур, агрессивности сред и т. д. [1–4].

По типу матричного материала композиты делятся на полимерные (ПКМ), металлические (МКМ) и керамические (ККМ), а по геометрической форме армирующего элемента – на дисперсноармированные, волокнистые и слоистые. Металлические КМ имеют ряд важных преимуществ: высокие жесткость, прочность, трещиностойкость, износостойкость, широкий температурный интервал работы. Дисперсноармированные КМ выгодно отличаются от волокнистых и слоистых изотропией своих свойств, универсальностью и сравнительной простотой технологии изготовления, в связи с чем дисперсноармированные МКМ нашли широкое применение в авиационно-космической отрасли, а среди них на первом месте по объему применения находятся алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ), которые используются в качестве конструктивных материалов [5, 6].

Алюмоматричные композиционные материалы с упрочняющими частицами SiC благодаря своим свойствам нашли широкое применение в авиационной промышленности. Из них изготавливают элементы обшивки самолета, лопатки ГТД, поршни, тормозные диски и т. д. [7–9].

В настоящее время существует множество исследований механических свойств низконаполненных АМКМ с определенными матричными сплавами и различным содержанием упрочняющих частиц карбида кремния. Механические свойства во многом зависят от матричного сплава и от процентного содержания упрочняющих частиц [10–12]. Целью данной статьи является обзор существующих АМКМ и описание механических характеристик АМКМ с разными матричными сплавами, в частности сплавами серий 6XXX, 2XXX, 7XXX.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)» [13].

Алюмоматричные композиционные материалы, армированные частицами SiC, на основе сплавов серии 6XXX

Сплавы серии 6XXX широко применяются в настоящее время. Интерес к ним обусловлен комплексом таких свойств, как хорошая коррозионная стойкость, технологичность и высокая пластичность. Данные сплавы относятся к сплавам системы Al–Mg–Si, которые имеют высокую пластичность в отожженном, свежезакаленном и естественно состаренном состоянии, что позволяет подвергать их вытяжке, штамповке и другим операциям со значительными степенями деформации [6, 10]. Сплавы серии 6XXX являются низколегированными, по сравнению со сплавами серий 2XXX и 7XXX. Фазовый состав данных сплавов представлен α -фазой и основной упрочняющей фазой Mg_2Si . Помимо фазы Mg_2Si , в сплавах могут присутствовать интерметаллидные соединения типа $AlSiFe$, $AlCrFeSi$, $AlFeMnSi$ и др. Основными легирующими элементами являются Si и Mg. При содержании магния $>0,8\%$ (по массе) повышение концентрации кремния приводит к снижению временного сопротивления разрушению, поэтому кремний добавляют в небольшом количестве. Коррозионная стойкость сплавов системы

Al–Mg–Si резко снижается при увеличении содержания фазы Mg₂Si и кремния. Поэтому при выборе матричных сплавов для АМКМ, к которым предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости, сплавы с избытком магния следует предпочесть сплавам с повышенным содержанием кремния.

Алюминиевый деформируемый сплав марки 6061 наиболее часто используется для упрочнения частицами SiC благодаря высокой технологичности. Сплав 6061 имеет следующие механические свойства: предел прочности 215 МПа, предел текучести 150 МПа, удлинение 13%. Данный сплав используется для изготовления деталей средней прочности с высокой коррозионной стойкостью, работающих во влажной атмосфере и морской воде [6]. Сплав 6061 имеет следующий химический состав, % (по массе):

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn
0,4–0,8	0,8–1,2	0,7	0,15	0,15–0,4	0,15	0,0,4–0,35	0,25

Введение частиц карбида кремния позволяет повысить механические свойства сплава. Частицы карбида кремния обладают следующими преимуществами – имеют высокие прочность, модуль упругости, сопротивление термическому удару, а также образуют прочную связь с алюминием [12]. В работе [14] изучались механические свойства КМ с матричным сплавом 6061 и упрочнением SiC с разным процентным содержанием. Механические свойства КМ приведены в табл. 1. Измерения проводили на образцах, изготовленных методом порошковой металлургии с последующей экструзией и термической обработкой – закалкой с последующим старением. С увеличением процентного содержания карбида кремния возрастают пределы текучести и прочности, а также модуль упругости. Увеличение значений модуля упругости свидетельствует о том, что в процессе нагружения осуществляется эффективный перенос нагрузки на границе «матрица–частица» благодаря хорошей адгезии между частицами SiC и сплавом 6061.

Таблица 1

Механические свойства образцов из композиционного материала 6061–SiC с различным содержанием частиц SiC после экструзии или термической обработки

Материал	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Al 6061 (экструзия)	68,5	131	205
Al 6061 (закалка+старение)	69,5	226	342
Al 6061+10% SiC (экструзия)	87	192	287
Al 6061+10% SiC (закалка+старение)	90	281	424
Al 6061+15% SiC (экструзия)	103	229	329
Al 6061+15% SiC (закалка+старение)	99	307	449

Не менее широко используется и изучается КМ с включениями карбида кремния и матрицей из алюминиевого сплава марки 6063, который имеет следующий химический состав, % (по массе):

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn
0,2–0,6	0,45–0,9	0,35	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Данный сплав, как и сплав 6061, относится к системе Al–Mg–Si [10]. По сравнению со сплавом 6061, сплав 6063 содержит меньшее количество легирующих элементов и примесей, что объясняет его более высокую пластичность. Фазовый состав сплава представлен α -фазой, упрочняющей фазой Mg_2Si и Si.

Алюминиевый сплав 6063 используется для изготовления деталей невысокой прочности. Механические характеристики сплава 6063 следующие: предел прочности 240 МПа, предел текучести 220 МПа, удлинение 12%. В работе [15] изучаются механические свойства при растяжении АМКМ состава: сплав 6063–5% SiC. Смесь из 5% частиц карбида кремния и гранул алюминиевого сплава 6063 после механического легирования, в процессе которого использовали стальные шары, формовали с помощью горячего прессования. После механического легирования размер полученных частиц (рис. 1) составлял от 1 до 350 мкм. Основной размер фракции композиционных гранул составляет 45 мкм.

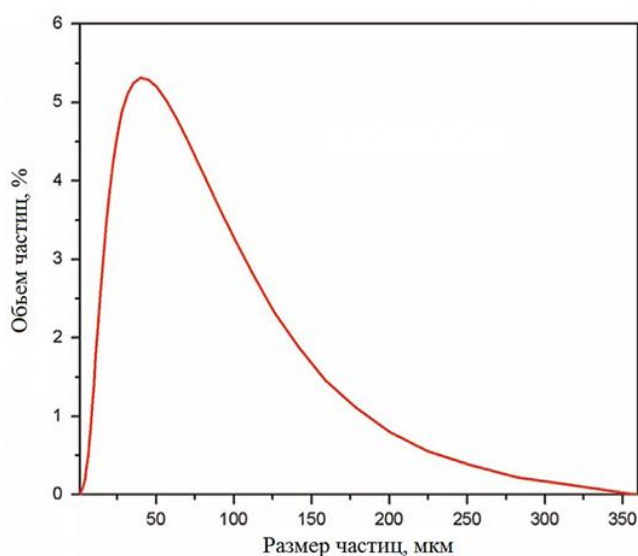


Рис 1. Распределение размеров частиц порошка сплава 6063–5% SiC

После получения порошка изготовили три образца различными способами. Первый образец шифра 6SE500 изготавливали методом искрового плазменного спекания в среде аргона, затем проводили экструзию при температуре 500°C. Второй (6PE500) и третий (6PE550) образцы изготовлены методом штамповки с последующей экструзией при 500 и 550°C соответственно. Индукционный нагрев и экструзия проведены в среде аргона. Способы и режимы изготовления образцов при компактировании приведены в табл. 2.

Таблица 2

Процессы и режимы изготовления образцов из порошка состава Al 6063–5% SiC

Шифр образца	Вид компактирования	Параметры режима изготовления образцов		
		температура компактирования, °C	давление компактирования, МПа	температура экструзии, °C
6SE500	Искровое плазменное спекание	500	50	500
6PE500	Штамповка	20	600	500
6PE550	Штамповка	20	600	550

На рис. 2 представлены кривые растяжения трех образцов, а в табл. 3 механические свойства, полученные в результате испытаний на растяжение.

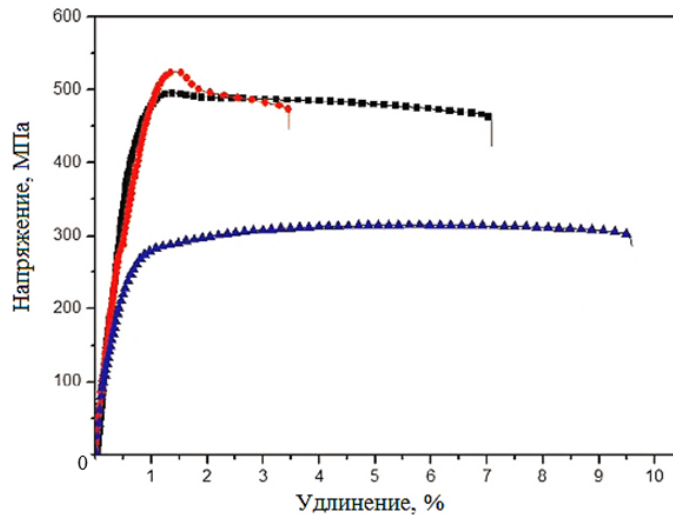


Рис. 2. Кривые растяжения образцов из композиционного материала 6063–5% SiC шифров 6SE500 (■), 6PE500 (♦) и 6PE550 (▲)

Таблица 3

Механические свойства образцов из композиционного материала 6063–5% SiC

Шифр образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение, %
6SE500	392	496	7,1
6PE500	449	526	3,5
6PE550	233	314	9,6

Из результатов видно, что образец шифра 6PE500 имеет максимальные пределы прочности (526 МПа) и текучести (449 МПа), но при этом достаточно хрупкий и разрушается при удлинении 3,5%. Средним уровнем механических характеристик обладает образец, полученный искровым плазменным спеканием (шифр 6SE500).

Исследование свойств образцов шифров 6SE500 и 6PE500 показало, что последний обладает более высокой пластичностью, чем первый. Наиболее вероятная причина такого поведения в том, что процесс окисления в образце, изготовленном методом искрового плазменного спекания, менее активный, чем в образце, полученном штамповкой и экструзией при температуре 500°C.

Образец шифра 6PE550 имеет более высокую пластичность, чем образец шифра 6PE500. Это может быть объяснено тем, что наиболее прочный материал имеет склонность к образованию дефектов, которые способствуют разрушению образца при его незначительном удлинении.

В качестве матрицы также активно используется сплав марки 6092 [10], который имеет следующий химический состав, % (по массе):

Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Ti	O
0,4–0,8	0,8–1,2	0,7–1,0	0,3	0,25	0,15	0,05–0,5

Сплав имеет высокое содержание основных легирующих элементов, также как и сплав 6061, поэтому механические свойства этих сплавов похожи.

Алюмоматричный композиционный материал с матричным сплавом 6092 и частицами карбида кремния изготавливается методом механического легирования с последующей экструзией. Механические свойства АМКМ зависят от содержания частиц упрочняющей фазы (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства образцов из композиционного материала 6092–SiC

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %
6092+25% SiC	520	410	6
6092+17,5% SiC	490	405	7

Из данных табл. 4 видно, что наибольшей прочностью обладает АМКМ с 25% карбида кремния, изменение пластичности по сравнению с содержанием карбида кремния 17,5% – незначительно.

Благодаря своим свойствам АМКМ на основе алюминиевых сплавов серии 6XXX нашли применение при изготовлении опорных стоек антенн самолетов и полых статорных лопаток ГТД [16].

Алюмоматричные композиционные материалы на основе сплавов серии 2XXX с добавлением частиц SiC

Сплавы серии 2XXX относятся к сплавам системы Al–Cu–Mg. Сплавы применяются в основном в естественностаренном состоянии и уступают по прочности высокопрочным сплавам системы Al–Zn–Mg–Cu, однако имеют преимущество перед сплавами типа B95 по выносливости и сопротивлению росту усталостной трещины. Поэтому сплавы системы Al–Cu–Mg применяются для деталей, от которых требуется повышенная выносливость в условиях растягивающих напряжений. Фазовый состав сплавов представлен α (Fe, Si)-фазой, фазами CuAl_2 и CuMgAl_2 . Основным легирующим элементом в этих сплавах является медь, она обеспечивает сплавам высокую прочность, но, к сожалению, приводит к понижению коррозионной стойкости.

Одним из сплавов серии 2XXX, используемым в качестве матрицы в АМКМ, является сплав марки 2009 [15], который имеет следующий химический состав, % (по массе):

Cu	Mg	Si	Fe	O	Zn
3,2–4,4	1,0–1,6	0,25	0,2	0,6	0,1

Данный сплав обладает следующими механическими свойствами: предел прочности 360 МПа, предел текучести 255 МПа, удлинение 10%.

Алюмоматричный композиционный материал с матричным сплавом 2009 и частицами карбида кремния изготавливается методом механического легирования с последующей экструзией. Механические свойства образцов с матричным сплавом 2009 и различным содержанием частиц карбида кремния представлены в табл. 5.

Таблица 5

Механические свойства образцов из композиционного материала с матричным сплавом 2009 и различным содержанием частиц SiC

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %
2009+5% SiC	531	400	10
2009+15% SiC	564	415	7
2009+20% SiC	608	424	5
2009+25% SiC	662	448	3

Как видно из данных табл. 5, наивысшими свойствами обладает АМКМ с 25% карбида кремния. При увеличении процентного содержания карбида кремния с 5 до 25% прочность возрастает на 131 МПа, при этом пластичность уменьшается с 10 до 3%.

Наиболее распространенным сплавом для матрицы композиционного материала является сплав марки 2024. По сравнению со сплавом 2009, сплав 2024 легирован большим количеством элементов, поэтому его прочностные характеристики выше. Предел прочности сплава 2024 составляет 440 МПа, предел текучести 350 МПа, удлинение 17%. Для увеличения прочностных свойств в сплав стали вводить частицы карбида кремния. Сплав 2024 имеет следующий химический состав, % (по массе):

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Cr	Zn
3,8–4,9	1,2–1,8	0,3–0,9	0,5	0,5	0,15	0,1	0,25

Испытания на растяжения АМКМ с матрицей из сплава 2024 и содержанием частиц карбида кремния 10% приведены в работе [17]. Образцы получали методом порошковой металлургии с последующим холодным прессованием. После холодного прессования проводили нагрев до 625°C, затем горячее прессование при различных температурах пресс-формы – от 200 до 400°C. Исследовали влияние температуры пресс-формы при горячем прессовании на прочностные характеристики АМКМ – результаты исследований приведены на рис. 3.

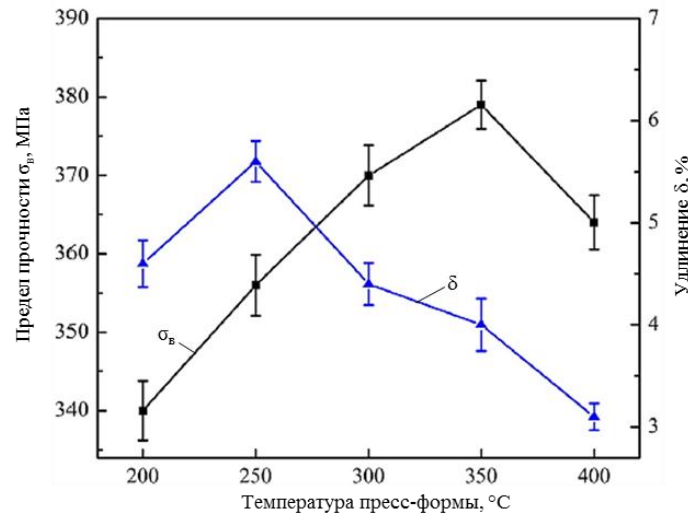


Рис. 3. Влияние температуры пресс-формы на прочностные характеристики композиционного материала 2024–10% SiC

Видно, что температура пресс-формы в процессе горячего прессования значительно влияет на прочностные показатели. Максимальная прочность 380 МПа наблюдается при температуре пресс-формы 350°C. При повышении температуры с 200 до 350°C предел прочности увеличивается на 40 МПа. При увеличении температуры до 400°C предел прочности снижается до 375 МПа. Пластичность возрастает на 1% при повышении температуры пресс-формы с 200 до 250°C, затем при увеличении температуры до 400°C пластичность уменьшается на 2,5%. Повышение прочности при увеличении температуры пресс-формы связано с тем, что при малых температурах пресс-формы в материале присутствует большое количество пор, которые являются концентраторами напряжений, и при растяжении материала поры превращаются в микротрещины, соответственно при повышении температуры количество пор уменьшается.

Известны работы, посвященные исследованию свойств слоистых композиций на основе сплавов серии 2XXX, состоящих из слоев АМКМ с различным содержанием карбида кремния. Данные композиции имеют высокую прочность при изгибе. Механические свойства (табл. 6) спеченного композиционного материала с матрицей из сплава

марки 2024 и различным содержанием карбида кремния изучали в работе [18]. Образцы были приготовлены порошковым методом. Затем путем прессования изготавливали композиции из нескольких слоев.

Таблица 6

Механические свойства образцов* из композиционного материала с матрицей из сплава 2024 с различным содержанием частиц SiC

Условный номер образца	Соотношение металл/керамика	Микротвердость HV	Пористость, %	Прочность при изгибе, МПа
A3	70:30	170	0,5674	845
A4	60:40	225	0,5978	1052
A5	50:50	205	1,3811	940
A6	40:60	180	2,0272	914
AS3	100/(70:30)	90–174	0,061	860
AS4	100/(60:40)	96–230	0,1925	1400
AS5	100/(50:50)	100–210	0,2445	1342
AS6	100/(40:60)	105–185	0,2015	1169
AS34	100/(70:30)/(60:40)	108–180–238	0,5907	800

* Образцы: A3–A6 – однослойные, AS3–AS6 – двухслойные, AS34 – трехслойный.

При увеличении процентного содержания карбида кремния с 30 до 40% существенно увеличивается микротвердость. Влияние процентного содержания карбида кремния на прочность при изгибе неоднозначно. Прослеживается следующая зависимость – меньшая пористость соответствует большей прочности при изгибе. Наибольшей прочностью при изгибе обладает образец с 40% карбида кремния (A4).

При исследовании двухслойного образца AS3 обнаруживается повышение твердости слоя 70:30, по сравнению с однослойным образцом A3, так как пористость снижается. Следует отметить, что у образцов, состоящих из двух или трех слоев пористость меньше, а следовательно, твердость выше, чем у аналогичных однослойных образцов.

Степень связи между матрицей и частицами исследовали при трехточечных тестах при изгибе. Наибольшей прочностью при изгибе среди однослойных образцов обладает образец A4. Одной из главных причин снижения прочности является разрыв на границе «матрица–частица» [19]. При повышении процентного содержания частиц карбида кремния прочность при изгибе уменьшается – это объясняется тем, что метод порошковой металлургии не обеспечивает прочного соединения армирующих частиц с матрицей. Как видно из данных табл. 6, прочность при изгибе у слоистых образцов выше, чем у однослойных композитов. Увеличение прочности с 1052 до 1400 МПа у образцов A4 и AS4 обуславливается снижением пористости с 0,5978 до 0,1925%. Такая зависимость прослеживается и на других образцах.

Композиционные материалы с алюминиевыми матричными сплавами серии 2XXX и армирующими частицами карбида кремния применяются для изготовления опорных стоек лопастей вертолетов и крышек сальников трубопроводов [16].

Алюмоматричные композиционные материалы на основе сплавов серии 7XXX с добавлением частиц SiC

Алюминиевые сплавы серии 7XXX являются сплавами системы Al–Zn–Mg–Cu и широко используются в аэрокосмической промышленности. Данные сплавы являются высокопрочными, но не теплопрочными.

Свойства сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu зависят от дисперсности и равномерности распределения частиц упрочняющих фаз. Цинк, магний и медь образуют с алюминием и между собой соединения $MgZn_2$, $S(Al_2CuMg)$, $T(Mg_4Zn_3Al_3)$, играющие

большую роль при упрочнении сплава в процессе термической обработки. В сплавах данного типа особенно важной является фаза Т. Марганец и хром усиливают эффект старения и повышают коррозионную стойкость сплавов. Легирование сплава переходными металлами (Mn, Cr, Ti) также позволяет дополнительно повысить уровень прочности. Марганец способствует повышению эффекта закалки, так как ускоряет распад пересыщенных твердых растворов. Титан уменьшает вероятность появления крупнозернистой структуры, оказывает положительное влияние на технологические и механические свойства. Следует отметить, что чем более дисперсна структура, тем выше прочностные характеристики [10–12].

Рассмотрим сплав марки 7075. Как уже было отмечено, сплавы серии 7XXX обладают повышенной прочностью. Так, сплав 7075 имеет предел прочности 520 МПа, предел текучести ~400 МПа, но пластичность небольшая – удлинение составляет 7%. Внедрение в этот сплав частиц карбида кремния значительно повышает механические свойства. Сплав 7075 имеет следующий химический состав, % (по массе):

Zn	Mg	Cu	Mn	C	Ti	Fe	Si
5,1–5,7	2,1–2,9	1,2–2,0	0,3	0,18–0,28	0,2	0,5	0,4

В работе [20] изучались механические свойства композиционного материала на основе сплава 7075 с содержанием SiC: 5 и 10%, полученного по технологии порошковой металлургии. В результате испытаний установлено, что плотность снижается при увеличении процентного содержания карбида кремния (рис. 4). Такое поведение может быть вызвано прежде всего пористостью, наличием твердых и недеформируемых частиц в пластичной матрице, которые снижают прессуемость.

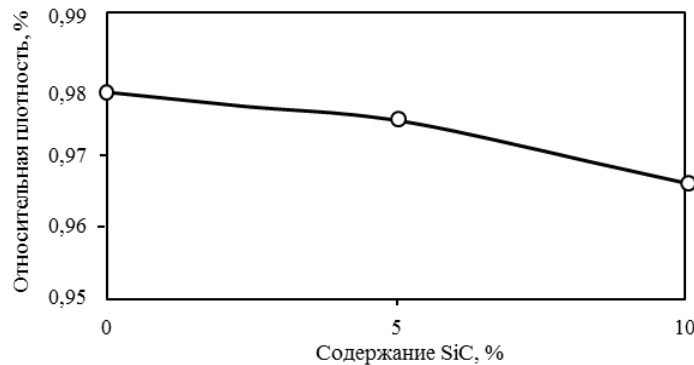


Рис. 4. Относительная плотность композиционного материала на основе сплава 7075–SiC в зависимости от содержания карбида кремния

Проведены также испытания на растяжение со скоростью деформации 10^{-2} с^{-1} (рис. 5, а) и с использованием раскола Гопкинсона (два стальных стержня, между которыми устанавливают образец, – один стержень в качестве индикатора, а второй – создает давление) при скорости деформации 10^3 с^{-1} (рис. 5, б).

Из кривых растяжения видно, что внедрение частиц карбида кремния повышает предел прочности, но при этом снижается пластичность, что свидетельствует о повышении хрупкости. Следует отметить, что при квазистатичном тесте на растяжение предел прочности для всех трех составов образцов ниже, чем при тесте с использованием раскола Гопкинсона, а удлинение в первом случае больше, чем во втором. Такое поведение объясняется тем, что при высоких испытательных нагрузках (при высоких скоростях испытания) материалы склонны к хрупкости.

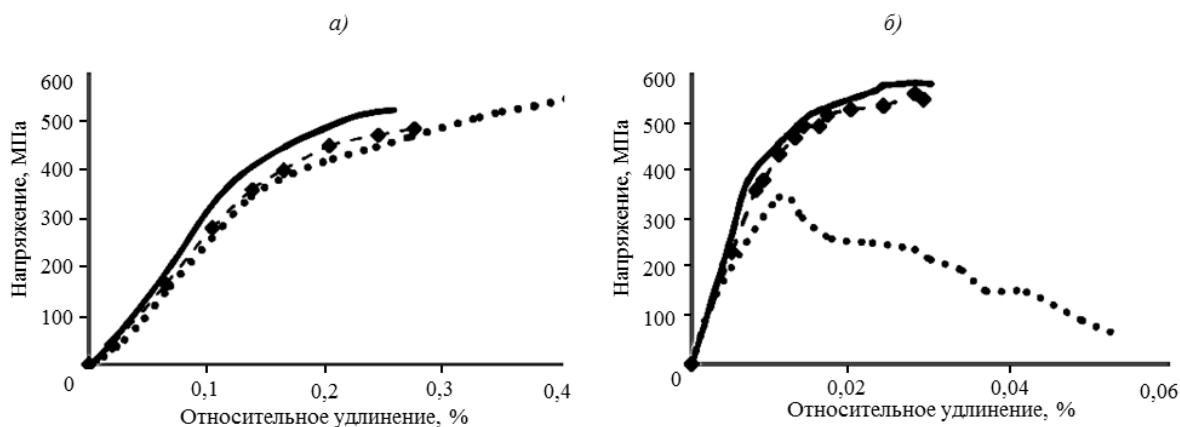


Рис. 5. Кривые растяжения при скорости деформации 10^{-2} (а) и 10^3 с $^{-1}$ (б – с использованием раскола Гопкинсона) образцов с содержанием SiC: 0 (·····), 5 (◆) и 10% (—)

Измерение микротвердости (рис. 6) показало, что с повышением содержания частиц карбида кремния, твердость увеличивается. Как видно, микротвердость увеличилась на 10%.

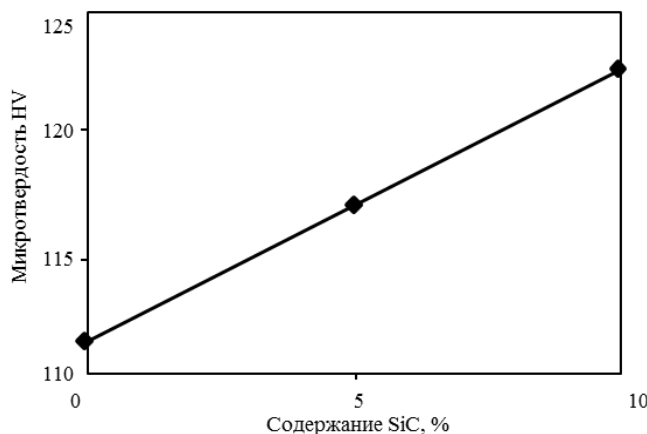


Рис. 6. Результаты измерения микротвердости по Виккерсу

Еще одним распространенным матричным сплавом для АМКМ серии 7XXX является сплав марки 7050 со следующим химическим составом, % (по массе):

Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Cr	Ti	Fe	Si
5,7–6,7	1,9–2,6	2,0–2,6	0,1	0,08–0,15	0,04	0,06	0,15	0,12

Данный сплав обладает высокой прочностью 490 МПа, пределом текучести 420 МПа, но невысокой пластичностью – удлинение ~9%.

Рассмотрим АМКМ с матричным сплавом 7050 и 15% карбида кремния [10]. Добавление частиц карбида кремния повышает механические характеристики (табл. 7), но при этом происходит снижение пластичности – с 9 до 4%.

Таблица 7

Механические свойства образцов из композиционного материала с матрицей из сплава 7050 с содержанием 15% SiC

Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %
660	606	4,4

Благодаря высоким механическим характеристикам данные АМКМ используются для производства силовых наборов летательных аппаратов, лопастей вертолетов и рам каркасов самолетов [16].

Заключение

Алюмоматричные композиционные материалы, армированные частицами карбида кремния, являются перспективными материалами для авиационной отрасли, об этом свидетельствует множество разработок, проведенных в данной области. Механические характеристики АМКМ с упрочняющими частицами карбида кремния во многом зависят от матричного сплава и от процентного содержания упрочняющих частиц.

Добавление частиц карбида кремния в алюминиевые матричные сплавы серий 6XXX, 2XXX и 7XXX позволяет значительно повысить пределы прочности и текучести, модуль упругости, но приводит к снижению пластичности. Как было отмечено ранее, прочность получаемого АМКМ во многом зависит от выбора матричного сплава. Так, наибольшей прочностью обладают сплавы с матрицей из алюминиевых сплавов серии 7XXX, средние прочностные характеристики – у АМКМ с матричными алюминиевыми сплавами серии 2XXX и наименьшие показатели прочности – у АМКМ с матричными сплавами серии 6XXX.

При добавлении в сплав марки 6061 10% частиц карбида кремния прочность повышается на 70 МПа (до 287 МПа) по сравнению с матричным сплавом, а при добавлении 15% частиц карбида кремния прочность составляет 330 МПа. Помимо возрастания предела прочности, происходит и увеличение модуля упругости. При использовании в качестве матрицы сплава марки 6063 с добавлением 5% карбида кремния предел прочности повышается значительно – до 526 МПа. Схожий со сплавом 6061 сплав марки 6092 имеет следующие механические характеристики: при добавлении 17,5% карбида кремния прочность составляет 490 МПа, а при 25% наполнителя прочность увеличивается до 520 МПа.

Добавление в алюминиевый сплав марки 2009 20% карбида кремния позволяет повысить прочность практически в 2 раза – до 608 МПа. Существуют также исследования слоистых композиций, состоящих из АМКМ на основе сплава марки 2024, с различным содержанием керамических частиц. Данные композиции имеют высокую прочность при изгибе, которая может достигать 1400 МПа.

Такой высокопрочный сплав, как сплав марки 7075, при упрочнении частицами карбида кремния в количестве 10% приобретает прочность ~600 МПа, а сплав марки 7050 с 15% упрочняющих частиц имеет предел прочности 660 МПа.

Таким образом, благодаря своим свойствам, АМКМ с различным содержанием упрочняющих частиц карбида кремния нашли применение при изготовлении полых статорных лопаток ГТД, опорных стоек лопастей самолетов и антенн, рам фюзеляжа и лопастей вертолетов.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (Проект №А-73-10328).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.

3. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
5. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
6. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Перспективы применения алюмоматричных композиционных сплавов в машиностроении // Литейщик России. 2012. №9. С. 16–19.
7. Березовский В.В., Шавнев А.А., Ломов С.Б., Курганова Ю.А. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al–SiC с различным содержанием армирующей фазы // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S6. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-17-23.
8. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
9. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков 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. Polmear I.J. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. John Wiley & Sons, Australia, 1995. 235 p.
11. Cottu J.-P., Couderc J.-J., Viguier B., Bernard L. Influence of SiC reinforcement on precipitation and hardening of a metal matrix composite // Journal of Materials Science. 1992. Vol. 27. No. 11. P. 3068–3074.
12. Сидоров Д.В., Щербакова Г.И. Высокотехнологичные компоненты композиционных материалов и специальные волокна для широкого спектра применения // Химическая технология. 2016. Т. 17. №4. С. 183–192.
13. 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.
14. Knowles A.J., Jiang X., Galano M., Audebert F. Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 615. P. S401–S405.
15. Yao X., Zheng Y.F., Liang J.M. Microstructures and tensile mechanical properties of an ultrafine grained AA6063–5vol% SiC metal matrix nanocomposite synthesized by powder metallurgy // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 648. P. 225–234.
16. Алюминиевые композиционные материалы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dwa-usa.com>. (дата обращения: 18.01.2018).
17. Li P.B., Chen T.J., Qin H. Effects of mold temperature on the microstructure and tensile properties of SiC p/2024 Al-based composites fabricated via powder thixoforming // Materials & Design. 2016. Vol. 112. P. 34–45.
18. Erdemir F., Canakci A., Varol T. Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al2024/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015. Vol. 25. P. 3569–3577.
19. Liu P., Wang A., Xie J., Hao S. Characterization and evaluation of interface in SiCp/2024 Al composite // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015. Vol. 25. P. 1410–1418.
20. Majzoobi G.H., Atrian A., Bakhtiari H. Evaluation of mechanical properties of Al7075/SiC Nanocomposite Fabricated by Hot Uniaxial Pressing // Proceeding of the 5th International Conference on Nanostructures (ICNS₅). March 2014. URL: http://www.academia.edu/27325070/Evaluation_of_Mechanical_Properties_of_Al7075_SiC_Nanocomposite_Fabricated_by_Hot_Uniaxial_Pressing (дата обращения: 23.01.2018).