

УДК 669.018.9

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩЕЙ ФАЗЫ НА ТВРЕДОСТЬ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Юлия Александровна Лопатина

*Студентка 4 курса*

*кафедра «Материаловедение»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Курганова Юлия Анатольевна,*

*доктор наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение»*

Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Каждый из составляющих имеет свое конкретное назначение применительно к рассматриваемому готовому изделию. Совместная работа разнородных компонентов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих. Такие сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые один в другом компоненты, разделённые ярко выраженной границей, называются *композиционными материалами*.

Во всех композиционных материалах четко различают два основных функциональных компонента. Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему, является *матрицей*; компонент прерывный, разделенный в объеме композиции, считается усиливающим или армирующим и называется *наполнителем*. Матричными материалами могут быть металлы и их сплавы, органические и неорганические полимеры, керамика и другие вещества. Усиливающими или армирующими компонентами чаще всего являются тонкодисперсные порошкообразные частицы или волокнистые материалы различной природы. За счет выбора армирующих элементов, их размеров, формы, ориентации в пространстве, варьирования их объемной доли в матричном материале, а также прочности связи по границе «матрица-наполнитель», свойства композиционных материалов можно регулировать в значительных пределах. Одно из важнейших достоинств композиционных материалов – это возможность изготовления из них элементов изделий с заранее заданными свойствами, наиболее отвечающими условиям работы деталей и конструкций.

Сочетание металлической матрицы и различных наполнителей, обладающих специальными свойствами, открывает широкие возможности для создания новых уникальных материалов для различных отраслей техники. В настоящее время производство изделий из металломатричных композиционных материалов находится на уровне самокупаемости и развернуто в таких странах, как США, Великобритания, Канада, Германия, Франция, Япония, Китай и др. Основными преимуществами композиционных материалов на металлической основе по сравнению с другими основами являются высокие значения механических характеристик, зависящих от свойств матрицы (предела прочности и модуля упругости в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон), высокая пластичность, вязкость разрушения, сохранение прочностных характеристик до высоких температур, высокая

тепло- и электропроводность, высокая технологичность (деформируемость, обрабатываемость).

Наиболее перспективными материалами для матриц металлических композиционных материалов являются металлы, обладающие небольшой плотностью – алюминий, магний, титан – и сплавы на их основе. Особенно выгодно среди них отличается алюминий, обладающий высокой коррозионной стойкостью и являющийся высокотехнологичным конструкционным материалом. Хорошие литейные свойства, возможность обработки давлением, механообработки, сварки и доступность обеспечивают широкое применение алюминия и сплавов на его основе в качестве матрицы композиционных материалов. В качестве наполнителей могут выступать оксиды, карбиды (обычно карбид кремния SiC), нитрид кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), стеклянные или углеродные нити, волокна бора (бороволокна), стальная или вольфрамовая проволока.

При совмещении матрицы и наполнителя на границе их раздела наблюдаются различные химические и физические явления, в результате которых между компонентами композиции образуется устойчивая связь. Контактное взаимодействие фаз содержит ключ к пониманию природы новых свойств, которыми обладают композиты, и их целенаправленному регулированию. От прочности связи компонентов композиционного материала существенно зависят такие характеристики, как модуль упругости, сдвиговая прочность, вязкость разрушения, термостойкость и другие. Для обеспечения работоспособности материала, в том числе эффективной передачи механической нагрузки, граница раздела наполнитель-матрица должна иметь определенные свойства. Адгезионная связь по границе раздела не должна разрушаться под действием термических и усадочных напряжений, т. е. матрица должна быть совместима с упрочняющими элементами. С другой стороны, взаимодействие по границе раздела не должно приводить к деградации компонентов в результате химических реакций или чрезмерно интенсивных диффузионных процессов.

Сочетание в одном материале веществ, существенно различающихся по химическому составу, строению и физическим свойствам, делает весьма сложной задачу достижения термодинамической совместимости компонентов при температурах получения и эксплуатации композиционного материала. Наиболее известным, дешевым и технологичным в плане обеспечения термодинамической и химической совместимости компонентов для алюминиевых матриц является карбид кремния (SiC). Важными достоинствами такого материала являются его низкая плотность и высокие удельные характеристики. При создании композиционного материала на основе алюминия, дисперсно-упрочненного изометрическими частицами карбида кремния, сохраняются все достоинства алюминиевых сплавов (низкая плотность, высокая технологичность и т.д.) и повышаются прочностные характеристики за счет затруднения скольжения дислокаций. При этом из-за незначительной разности в плотности материалов вес практически не изменяется ( $\rho_{Al}=2,7 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{SiC}=3,21 \text{ г/см}^3$ ).

Мировые тенденции производства и применения металломатричных композиционных материалов свидетельствуют о явной потребности производства такого рода материалов и изделий из них (рис. 1). В настоящее время применение дискретно-армированных МКМ увеличилось примерно на 70% по сравнению с 2004 г., при этом основной сектор промышленности занимает наземный транспорт и электронная техника, затем авиационно-космическая, машиностроительная и другие виды промышленности. Применение металломатричных композиционных материалов на алюминиевой основе, армированных частицами карбида кремния, позволяет уменьшить массу деталей и элементов конструкций на 15-50 %, в 1,5-2 раза повысить их жесткость и усталостные характеристики по сравнению с прототипными

металлическими материалами (например, титановыми и алюминиевыми сплавами), обеспечивая при этом повышение эффективности и конструкционной надежности.

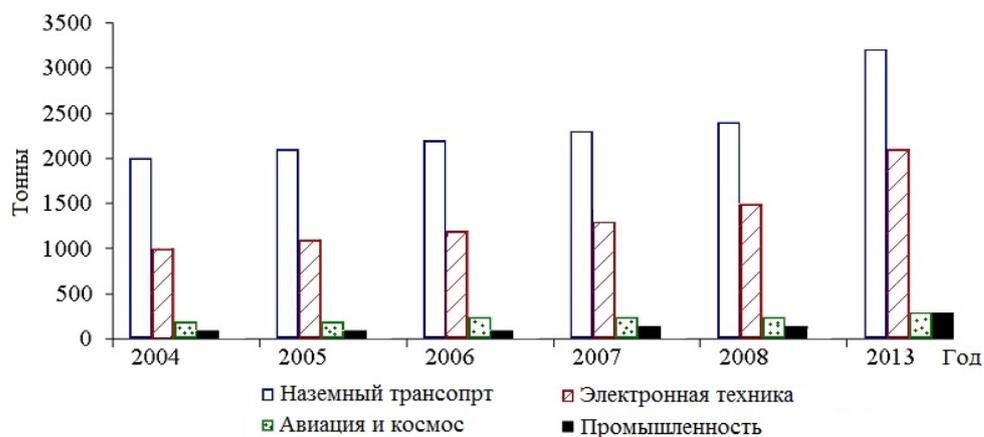


Рис. 1. Диаграмма применения дискретно-армированных МКМ на основе алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности с 2004 по 2013 гг

Высокие характеристики МКМ на основе алюминия, дисперсно-армированного частицами SiC, позволяют изготовить из этого материала такие ответственные детали, как, например, муфты лопасти вентилятора, которые держат роторную лопатку на несущем вертолета. Этот компонент требует огромной усталостной долговечности, превосходного сопротивления фреттинг-усталости и хорошей ударной вязкости. Муфты лопастей относятся к классу жизненно важных вращающихся деталей, так как разрушение компонента приводит к полной потере аппарата и его обитателей. Работа и долговечность вертолета сильно зависит от вращающейся массы, и принципиальным моментом при рассмотрении МКМ Al-SiC для данного применения стало уменьшение вращающейся массы и высокой стоимости, связанной с титановым сплавом Ti-6-4, который был заменен на МКМ.

Этот пример и анализ мирового опыта применения КМ рассматриваемой системы и ряд явно выраженных преимуществ по сравнению с традиционно используемыми конструкционными материалами требует аккумулирования и систематизации накопленных знаний для успешного внедрения металломатричных композиционных материалов на отечественный рынок современных конструкционных материалов и, в частности, МКМ на алюминиевой основе, дисперсно-упрочненных карбидом кремния.

Выбор технологического метода получения МКМ определяется в основном следующими факторами: видом исходных материалов, возможностью введения упрочнителя в матрицу без повреждения, создания прочной связи на границе раздела, максимальной реализации в материале свойств компонентов, получения необходимого распределения наполнителя в матрице, совмещения процессов получения композиционного материала и изготовления из него детали, а также экономичностью процесса. Существенную роль при выборе метода часто играет также наличие того или иного вида оборудования. Вес способы производства металлокомпозитов можно объединить в несколько групп: твердофазное и жидкофазное формование, осаждение из газовой фазы, формование методом in-situ.

Для наполнения алюминиевых сплавов дисперсными частицами карбида кремния среди твердофазных методов совмещения наиболее привлекательными согласно основным факторам выбора являются методы порошковой металлургии. Образцы были изготовлены по технологии, разработанной ФГУП «ВИАМ» и заключающейся в предварительном перемешивании порошков алюминиевого сплава и дисперсных

частиц карбида кремния до получения гомогенной смеси, механическом легировании (с целью обеспечения стабильного равномерного распределения частиц армирующей фазы в матрице), последующим компактированием и экструзии. Схема процесса представлена на рис. 2.

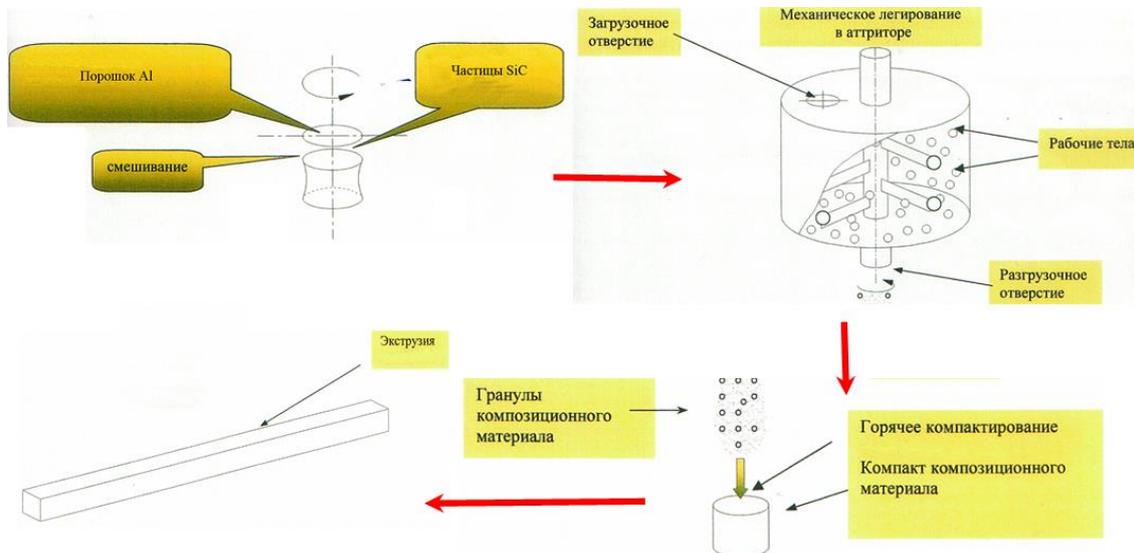


Рис. 2. Метод изготовления МКМ Al-SiC, разработанный в ФГУП «ВИАМ»

С помощью данной технологии во многих случаях при различных сочетаниях матрицы и наполнителя удастся создать прочную связь между компонентами. Температура и давление в каждом конкретном случае подбирают отдельно, технология ориентируется на отдельные типы изделий. К недостаткам следует отнести: неконтролируемое качество связи, наличие пористости, дорогое оборудование и необходимость изготовления приспособлений для обработки порошков.

Среди жидкофазных процессов для получения образцов был выбран способ механического замешивания наполнителя в матричные расплавы (рис. 3). Данный способ является наиболее технологичным и дешевым, качество получаемых при этом композиционных материалов зависит от смачивающей способности матричного расплава, условий замешивания и последующей обработки.

Основными преимуществами жидкофазных методов перед твердофазными являются возможность получения изделий сложной формы, высокая производительность процесса, возможность автоматизации технологических процессов и реализация непрерывных производственных процессов. Недостатками жидкофазных методов являются более высокие температуры процесса, отрицательные последствия межфазных взаимодействий в композиционных материалах, ограниченность круга компонентов в связи с требованием обеспечения смачивания и большой разницы в температурах плавления.

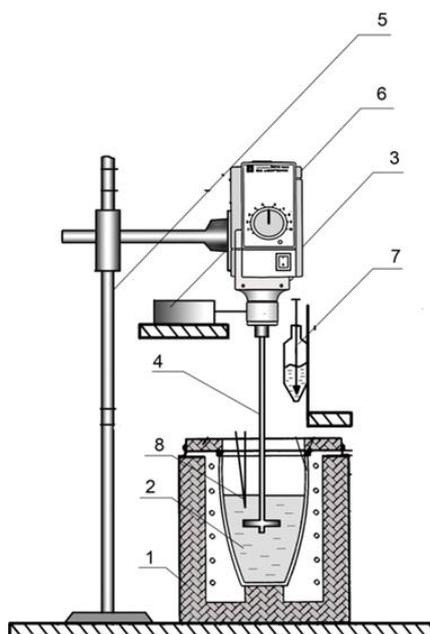


Рис. 3. Оборудование, используемое для изготовления МКМ Al-SiC литейным способом:

- 1 – печь сопротивления;
- 2 – тигель с расплавом;
- 3 – электронная верхнеприводная мешалка RW 16;
- 4 – лопастной замешиватель (импеллер);
- 5 – держатель;
- 6 – тахометр;
- 7 – вибропитатель

Твердость – способность материала оказывать сопротивление контактной деформации или хрупкому разрушению при внедрении индентора в его поверхность – является важной механической характеристикой и служит наиболее наглядным показателем проявления упрочнения, а в случае с дисперсно-упрочненными материалами косвенно характеризует равномерность распределения армирующего компонента в матрице, а, следовательно, равномерность распределения свойств. Очевидно, что задача определения твердости металломатричных композиционных материалов обладает большим практическим значением.

Замеры твердости на образцах проводились по методам Бринелля и Роквелла по шкале HRB. Данные методы дают более надежные результаты по сравнению с другими методами при оценке твердости композиционного материала, поскольку при проведении измерений воздействию индентора подвергается большой объем материала. При испытании на твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) в поверхность материала вдавливается твердосплавный шарик под действием некоторой нагрузки и после ее снятия измеряется диаметр отпечатка. Твердость по Бринеллю HB подсчитывается как отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка. В данной работе твердость по методу Бринелля измерялась на твердомере Wilson 930N с нагрузкой 62,5 кгс шариком диаметром 2,5 мм. Для уменьшения погрешности измерений выполнялось 5 замеров на каждом образце с последующим нахождением среднего значения.

При испытании на твердость по методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) по шкале HRB в поверхность материала вдавливаются стальной шарик диаметром 1,588 мм. Вначале под действием предварительной нагрузки индентор вдавливается на некоторую малую глубину, затем прикладывается основная нагрузка и индентор вдавливается на

большую глубину. После этого основную нагрузку снимают. Под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не возвращается в прежнее положение. Разность этих глубин вдавливания и соответствует значению твердости. За единицу твердости принимают разность глубин вдавливания 0,002 мм. Преимущество метода Роквелла по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что пропадает необходимость оптического измерения геометрических параметров отпечатка и связанная с этим ошибка. В данной работе твердость по методу Роквелла измерялась на твердомере Emco-test type N3A001 стальным шариком диаметром 1,588 мм при нагрузке 100 кг. Для уменьшения погрешности измерений выполнялось 5 замеров на каждом образце с последующим нахождением среднего значения.

Для оценки влияния армирующей фазы на твердость алюмоматричных композиционных материалов был выбран ряд образцов на основе различных сплавов алюминия с различным содержанием карбида кремния и полученных по разным технологиям совмещения. Химический состав матриц исследуемых композиционных материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав матриц исследуемых сплавов

	Маркировка сплава	Si, %	Cu, %	Mg, %	Mn, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Zn, %	Др., %	Al	ГОСТ
Чистый Al	A98	0,006	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,006	0,003	Ga 0,003	99,98	11069-2001
Деформированные	D16	0,50	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,15	0,1	0,5	0,25	-	ост.	4784-97
	AMg1	0,3	0,2	0,5-1,1	0,2	-	0,1	0,7	0,25	-	ост.	4784-97
Литейные сплавы	AK12 (Al2)	10-13	0,6	0,1	0,5	0,1	-	-	0,3	Zr 0,1	ост.	1583-93
	AK12M2MgH (Al25)	11-13	1,5-3,0	0,8-1,3	0,3-0,6	0,05-0,20	0,2	0,7	0,5	Ni 0,8-1,3	ост.	1583-93

Значения твердости композитов на основе *чистого алюминия* были взяты из работ [7] и [8]. В работе [7] образцы были получены твердофазным методом горячего прессования порошка технически чистого алюминия размером 25 и 180 мкм и карбида кремния размером 10 мкм; в работе [8] образцы были получены жидкофазным методом механического замешивания частиц карбида кремния в расплав алюминия. Твердость в обоих случаях измерялась по методу Бринелля. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Твердость (НВ) образцов на основе алюминия с различным содержанием SiC по данным работ [7] и [8].

Способ получения		Содержание SiC в образце, %						
		0	5	10	15	20	25	30
Твердофазное формование [7]	Al 180 мкм	37	57	76	-	81	-	-
	Al 25 мкм	35	46	49	-	66	-	-
Жидкофазное формование [8]		28,5	40,2	41,1	43,7	44,4	45,5	41,9

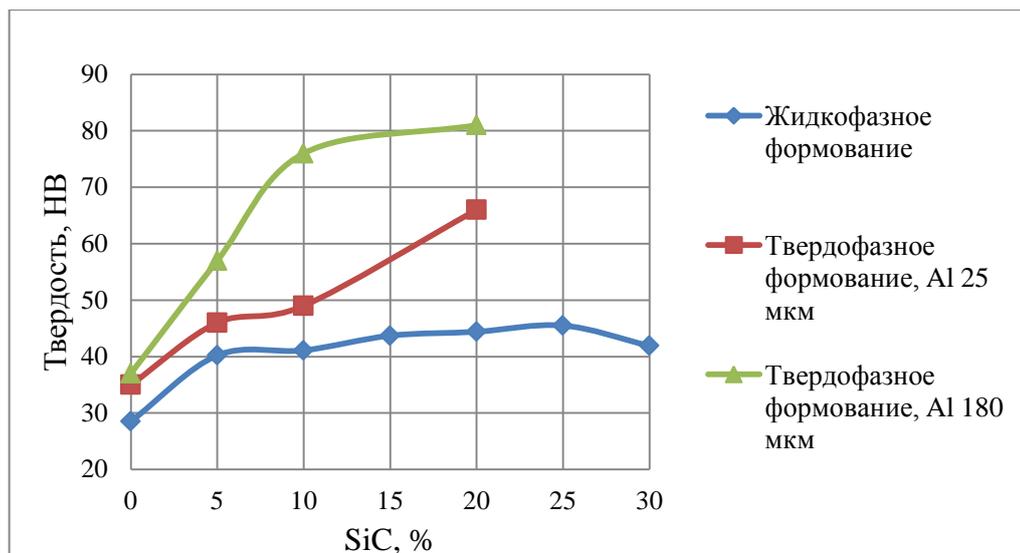


Рис.4. Зависимость твердости образцов на основе алюминия от способа получения и содержания SiC

Твердость композитов на основе *деформируемых сплавов* была изучена на примере сплавов Д16 и АМг1. Результаты измерений твердости методом Роквелла композитов на основе сплава Д16, полученных жидкофазным способом механического замешивания, представлены в табл. 3 и на рис. 5. Твердость образцов на основе Д16, полученных твердофазным методом прессования порошков, заимствована из работы [9].

Таблица 3. Твердость (HRB) образцов на основе сплава Д16 с различным содержанием SiC по результатам опытных данных и работы [10]

Способ получения	Содержание SiC, %						
	0	2,5	5	15	20	30	40
Жидкофазный	26	32,5	37	42	-	-	-
Твердофазный [10]	105	-	-	-	166	251	270

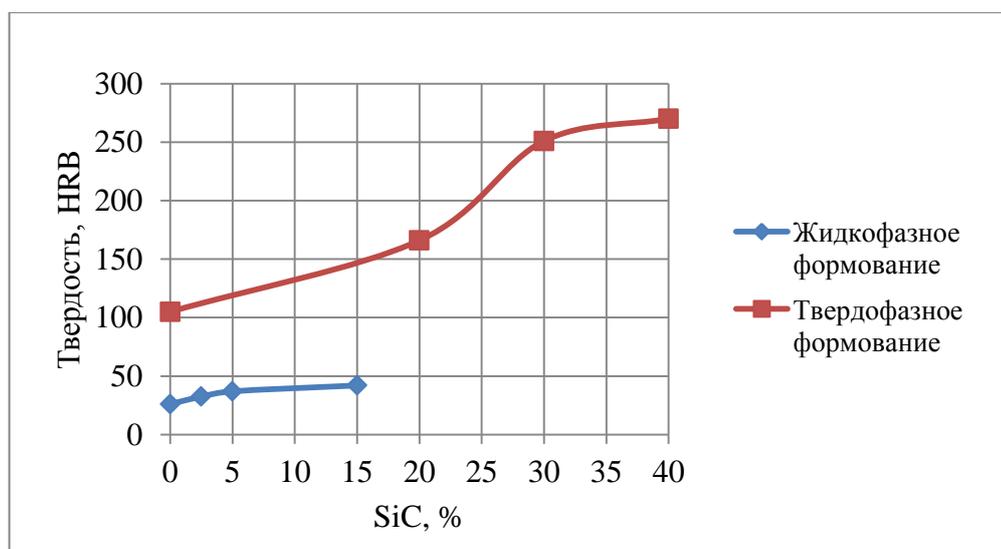


Рис. 5. Зависимость твердости образцов на основе сплава Д16 от способа получения и содержания SiC

По данным работы [10] было проанализировано значение микротвердости для композитов на основе сплава АМг1, полученных жидкофазным способом механического замешивания (табл. 4). Измерения микротвердости позволяют получить количественные данные об изменении свойств матрицы при армировании и сделать заключения о технологическом процессе и поведении материала в условиях эксплуатации.

Таблица 4. Микротвердость образцов на основе сплава АМг1, полученных жидкофазным способом, по данным работы [10]

Содержание SiC, %	2,5	5
Разброс значений микротвердости, кг/мм <sup>2</sup>	64 – 119	96,5 – 119
Среднее значение, кг/мм <sup>2</sup>	90	99

Рассматриваемые образцы на основе *литейных сплавов* были получены жидкофазным методом механического замешивания. Значения твердости по Роквеллу композитов на основе сплава АК12 с различным содержанием SiC были взяты из работы [10] и представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Табл. 5. Твердость образцов (HRB) на основе сплава АК12, полученных жидкофазным способом, по результатам опытных данных и работы [10].

Содержание SiC, %	0	2,5	5	15
Значение твердости, HRB	26	32,5	37	42

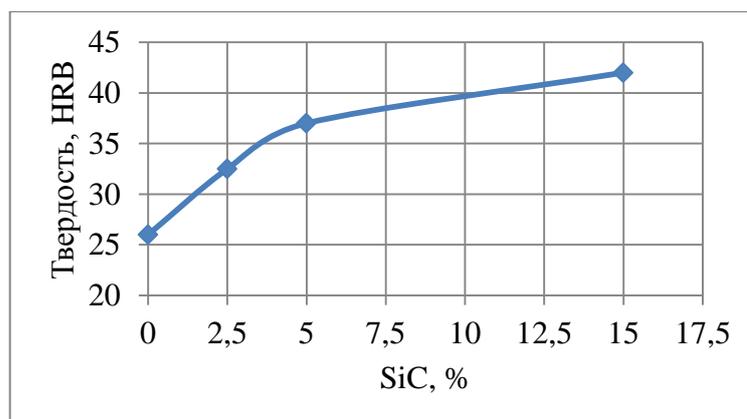


Рис. 6. Зависимость твердости образцов, полученных жидкофазным формованием на основе сплава АК12, от содержания SiC

Результаты измерения твердости образцов с различным содержанием частиц карбида кремния на основе сплава АК12М2МгН, полученных жидкофазным способом механического замешивания, представлены в табл. 6 и на рис. 7.

Таблица 6. Твердость образцов (HRB) с различным содержанием SiC на основе сплава АК12М2МгН, полученных жидкофазным способом.

Содержание SiC, %	0	3	5,6	10
Значение твердости, HRB	64,7	79,8	85,2	93,2

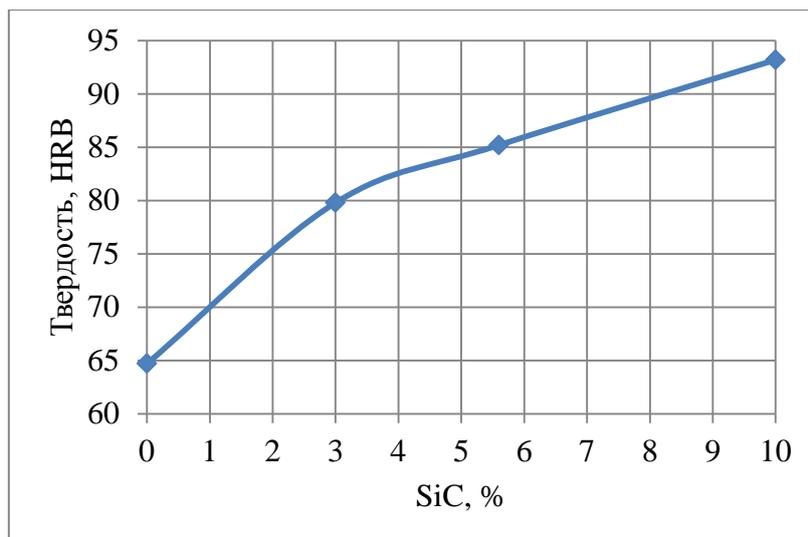


Рис. 7. Зависимость твердости образцов, полученных жидкофазным формованием на основе сплава АК12М2МгН, от содержания SiC

На рис. 8 представлена гистограмма распределения твердости образцов с различными матрицами и содержанием 5% SiC, полученных жидкофазным способом механического замешивания.

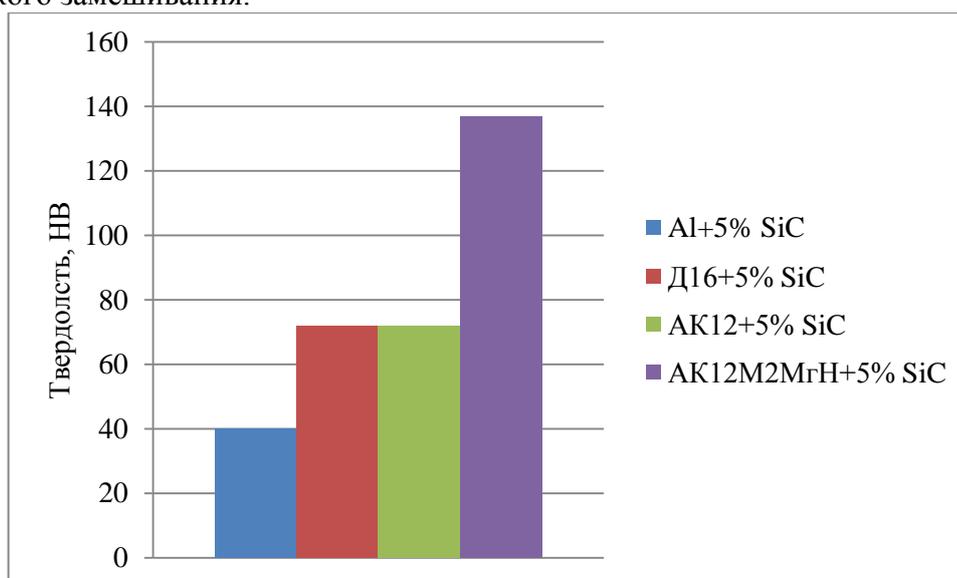


Рис. 8. Распределение твердости (HV) образцов на основе различных матриц с содержанием SiC 5%, полученных жидкофазным способом

Анализ результатов для всех матриц демонстрирует увеличение твердости композитов с увеличением количества армирующей фазы при любом способе получения. При одинаковом способе получения образцов и одинаковом количестве армирующей фазы, но при разных материалах матрицы, наблюдаются различные значения твердости, что позволяет сделать вывод о росте твердости композита с ростом твердости матрицы. Значения твердости образцов, полученных твердофазным формованием, превосходят значения твердости образцов такого же состава, но полученных жидкофазным методом. При жидкофазном формовании заметное упрочнение наблюдается уже при малых значениях содержания упрочняющей фазы (3-10 %). При содержании наполнителя свыше 15 % дальнейший прирост твердости уже не столь значителен. При твердофазном формовании увеличение твердости композитов

с высоким содержанием наполнителя (20, 30, 40 %) по сравнению с твердостью матрицы, напротив, очень значительно. Учитывая сложность твердофазной технологии, целесообразным является производство композитов с содержанием наполнителя ниже 15% жидкофазным методом, высоконаполненных композитов – твердофазным методом.

## Литература

1. Композиционные материалы: Справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.; Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 е.: ил.
2. Вотников А.М. Технология композиционных материалов: Учеб. пособие. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1998. 138 с.
3. Курганова, Ю. А. Разработка и применение дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов / Ю. А. Курганова, Т. А. Чернышова. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 223 с.
4. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки.
5. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.
6. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.
7. C. Hakan Gür, Middle East Tech. Univ., Metallurgical and Materials Eng. Dept., Ankara-Turkey. Ultrasonic investigation of SiC-particle reinforced aluminium matrix composites.
8. Manoj Singla, D. Deepak Dwivedi, Lakhvir Singh, Vikas Chawla. Department of Mechanical Engineering, R.I.E.I.T., Railmajra, Distt. Nawanshahr, India. Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite.
9. Ю.А. Курганова, В.В. Березовский, Г.П. Фетисов, А.А. Шавнев. Анализ перспективности использования дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов системы Al-SiC в изделиях авиационного назначения.
10. Чернышова Т. А. Литые дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение / Т. А. Чернышова, Ю. А. Курганова, Л. И. Кобелева, Л. К. Болотова. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 295 с.
11. Матюнин В.М. Механико-технологические испытания и свойства конструкционных материалов: учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 140 с.