

# Функциональные металлические композиционные материалы и технологии в машиностроении

Ю.А. Абузин, к.т.н., доцент кафедры «Металловедение цветных металлов» НИТУ «МИСиС»

**В** настоящее время металлические функциональные материалы практически подошли к пределу возможного применения в современных технических системах в связи со значительно возросшими требованиями к комплексу эксплуатационных характеристик. Их специальные свойства могут оставаться на уровне, соответствующем требованиям, но комплекс сопутствующих механических и физико-химических характеристик не обеспечивает требуемой работоспособности. Антифрикционные материалы не выдерживают нагрузки на смятие, противорадиационные – не обеспечивают весовой эффективности, теплопроводные – не обладают требуемым ТКЛР или износостойкостью, размеростабильные – недостаточно теплопроводны, и т.д.

Эффективным путём изменения комплекса свойств этого класса материалов является их армирование соответствующим компонентом, не снижающим функциональные характеристики и существенно повышающим комплекс сопутствующих свойств, то есть создание функциональных металлических композиционных материалов (МКМ).

Функциональные МКМ отличаются важной особенностью, присущей всем композитам, – их свойства можно изменять в широких пределах в зависимости от доли армирования. Таким образом, возможно конструирование материала, максимально соответствующего условиям эксплуатации с уникальными функциональными возможностями. В качестве примеров можно привести ряд материалов, или уже прочно занявших свою потребительскую нишу, или находящихся в процессе разработки:

- МКМ на основе алюминиевых сплавов или свинца, армированные бором (карбидом бора) – для защиты от нейтронного излучения;
- высоконаполненные карбидом кремния (с содержанием армирующих частиц 60-70% по объёму) алюминиевые композиты – для получения высокой теплопроводности при низком ТКЛР;
- дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе меди для электрических контактов с повышенной эрозионной и коррозионной стойкостью;
- антифрикционные композиционные материалы на основе меди, алюминия или свинца, армированные микронными частицами квазикристалла системы Al-Cu-Fe;
- композиты системы алюминий – рубленое углеродное волокно, полученные особым способом, – для

использования в качестве специальных датчиков или образцов-свидетелей, способных накапливать информацию о внешнем воздействии на изделие, конструкцию или техническое средство и т.д.

Армирование алюминия частицами бора (карбида бора) приводит к усилению защитных свойств композита и к появлению у него возможности использования в качестве конструкционного материала, непосредственно интегрированного в конструкцию. В результате возникает композиционный материал конструкционно-функционального назначения. Из этого материала возможно изготавливать защитные контейнеры для перевозки радиоактивных материалов с высокой весовой эффективностью. Подобный материал уже сейчас широко применяют за рубежом в различных вариациях для изготовления спецконтейнеров и элементов защиты транспортных средств, работающих с расщепляющимися материалами [1, 2]. Фирма Talon Composites, LLC рекламирует материал для защиты от нейтронного излучения Talbor®, представляющий собой МКМ на алюминиевой матрице (сплавы 6XXX, 7XXX, 2XXX, 11XX и 5XXX серии), армированной карбидом бора (объёмная доля от 1 до 40%).

Кроме алюминия, хорошие перспективы и у армированного борсодержащими частицами свинца. Первые эксперименты показали, что этот материал после армирования приобретает механическую прочность, повышенный модуль упругости, механическую и деформационную обрабатываемость на стандартном оборудовании на уровне, близком к обычным материалам. При этом поглощающие свойства композита могут даже превышать аналогичные характеристики свинца. В областях применения, не требующих высокой весовой эффективности, этот материал может стать незаменимым элементом конструкции, принимающим на себя часть эксплуатационных нагрузок.

Наполнение алюминиевой матрицы частицами карбида кремния с содержанием 60-70% по объёму, позволяет достичь в композите высокой теплопроводности при низком ТКЛР, обеспечивая эффективное применение в качестве теплоотводящих элементов конструкции силовой электроники. Материалы этого класса уже давно используют в качестве теплоотводящих подложек для приборов силовой электроники на западе такие фирмы, как MC-21, Inc., АМТЕК, CPS [2, - 4]. Производство таких материалов освоено и в Китае. Характерные свойства высоконаполненных материалов системы Al-SiC произ-

Таблица. Характерные свойства высоконаполненных МКМ системы Al-SiC

		AlSiC-7	AlSiC-8	AlSiC-10
SiC (%)		70	63	55
AlSiMg (%)		30	37	45
Коэффициент теплового расширения (ppm/°C):	30-100° C	7.00±0.25	8.00±0.25	9.80±0.25
	30-150° C	7.25±0.25	8.30±0.25	10.20±0.25
	30-200° C	7.48±0.25	8.60±0.25	10.50±0.25
Теплопроводность (Вт/м·К, 25° C)		≥180	≥180	≥180
Удельная теплоемкость (Дж/г·К, 20° C)		0.743±0.05	0.752±0.05	0.768±0.05
Плотность (г/см <sup>3</sup> )		3.02±0.01	3.00±0.01	2.96±0.01
Прочность на изгиб (МПа)		430±20	480±20	470±20
Модуль Юнга (ГПа)		200±10	190±10	180±10
Удельное сопротивление (МОм·см)		20±1	20±1	20±1
Воздухонепроницаемость (Бар·см <sup>3</sup> /с, He)		-10 <sup>-9</sup>	-10 <sup>-9</sup>	-10 <sup>-9</sup>

водства компании Miqam Microelectronics Materials Co., Ltd (Китай) представлены в *таблице* [5].

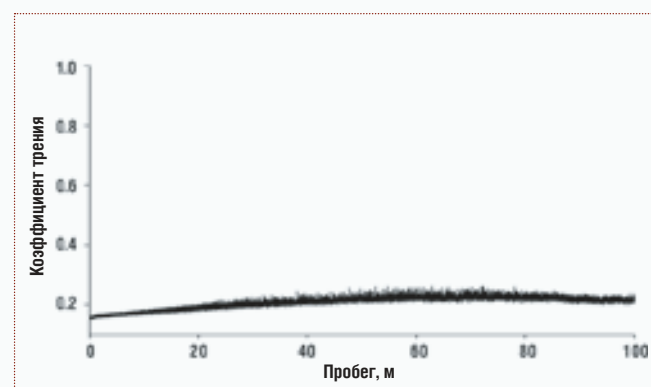
Работа по освоению промышленного производства высоконаполненных МКМ ведётся в настоящее время и в России (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск, ОАО «СЛК», г. Ульяновск).

Одно из важнейших назначений дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе меди – электрические контакты. Разрывные контакты предназначены для размыкания и замыкания электрических цепей реле, регуляторов напряжения, пускателей, контакторов и других аппаратов. Особенность их работы заключается в том, что в моменты размыкания и замыкания между ними возникают электродуговые разряды, являющиеся причиной двух основных видов разрушения: химического – коррозионного, связанного с окислением и другими реакциями при высоких температурах, и физического – эрозийного, связанного с такими физическими явлениями на поверхности контактов, как плавление, испарение, распыление медной матрицы. Часто разрывные контакты могут привариваться друг к другу в случае больших импульсов тока. Армирование медной матрицы частицами карбида кремния или хрома позволяет при незначительном падении электропроводности достичь существенного повышения уровня эрозийных и коррозионных свойств, повысить работоспособность контактов и их ресурс. Функциональный МКМ CuCr50 (50% вес. меди + 50% вес. хрома) прошел успешное испытание в условиях Московской железной дороги и внедрен в качестве элемента дугогасительных контактов быстродействующих автоматических переключателей типа ВАБ-28 [6, 7].

Значительный прогресс современного материаловедения привел к созданию новых материалов, объединение которых с хорошо известными металлами и сплавами позволяет дополнительно усилить специальные возможности функциональных МКМ.

Разработка квазикристаллических материалов, обладающих твёрдостью на уровне корунда и низким коэффициентом трения, открывает широкие возможности армирования классических антифрикционных материалов на основе свинца, алюминия и меди с до-

стижением повышенных и антифрикционных и механических свойств в обеспечение возросших требований по контактному давлению, скоростям и ресурсу современных механизмов [8]. Измерения коэффициента трения композиционного материала на основе меди, армированной микронными частицами квазикристалла системы Al-Cu-Fe, позволило получить достаточно низкое и очень стабильное значение коэффициента трения [9]. Данные по коэффициенту трения представлены на *рисунке*.



Кривая зависимости коэффициента трения МКМ системы Cu – квазикристалл Al-Cu-Fe

Армирование квазикристаллами свинца и алюминия приводит к усилению антифрикционных свойств композиционного материала и повышению уровня его технологических и механических характеристик. Такие материалы могут стать серьёзной основой для создания новых эффективных пар трения для криогенных температур, а также для работы в тяжело нагруженных подшипниках скольжения автомобильной промышленности, транспорта и энергетики.

Важную роль при разработке и производстве специальных композитов играет прогресс в развитии технологий металлургии, порошковой металлургии, химии и смежных отраслей промышленности. Функциональные МКМ получают по различным технологиям, включающим жидкофазные технологии замешивания в расплав, принудительную и реакционную пропитку, твердофазные технологии механического легирования

и горячего прессования, специальные технологии послойного напыления, электротермического взрыва, реакционного спекания и т.д. При этом возможно изготовление деталей и элементов конструкции непосредственно из МКМ, формирование слоёв МКМ на стандартных материалах, или формирование сложных пространственных образований узкоспециализированного назначения.

При необходимости, функциональные МКМ можно нанести на требующие соответствующего покрытия поверхности деталей и элементов конструкций с использованием как известных так и разработанных недавно методов напыления. Например, при необходимости минимального разогрева подложки и напыляемого материала, хорошо зарекомендовал себя метод холодного газодинамического напыления, применимый к большинству порошковых композиционных систем.

В отдельных случаях функциональные МКМ могут быть доставлены к «месту службы» специальными методами, например, в виде ультрадисперсных порошков через масляную систему механизма к областям непосредственного контакта трущихся деталей.

Функциональные композиционные материалы являются в своём большинстве новыми материалами для современной промышленности, что приводит к возникновению новых областей их использования. Например, особая область применения функциональных МКМ – в качестве специальных датчиков или образцов-свидетелей, способных накапливать информацию о внешнем воздействии на изделие, конструкцию или техническое средство. Специально изготовленный МКМ системы алюминий-углерод имеет резко выраженную зависимость ряда свойств от общего уровня термовременного воздействия и, находясь в качестве образцов-свидетеля, может в любое время через определение уровня этих свойств характеризовать степень накопленного объектом термо-временного воздействия [10].

Современные технологии позволяют создать широкий спектр функциональных композиционных материалов с повышенной работоспособностью для использования в деталях и элементах конструкций высоконагруженных технических систем, обеспечивая недостижимые ранее эксплуатационные характеристики в комплексе с повышением ресурсных экономических и экологических показателей функционирования новой техники.

Однако, в настоящее время в России практически отсутствует промышленное производство металлических композиционных материалов в целом, и функциональных МКМ, в частности. Парадокс заключается в достаточно глубокой проработке проблем материаловедения, технологии производства, возможностей переработки этого класса материалов с одной стороны, и практически полном отсутствии интереса со стороны промышленности, с другой. Возникший на более ранних стадиях исследования стереотип о высокой стоимости и сложности технологии МКМ, несомненно, имеет основания и в экономической, и в технологической сфере рассмотрения, но в современных условиях многое изменилось, и

то, что ранее казалось элитарным и несбыточным, становится эффективным и обыденным. Весь опыт развитых стран показывает наличие существенного по объёмам и финансам рынка металлических композиционных материалов. Отечественной промышленности не обойти этот сегмент рынка высоких технологий, и тот, кто первый рискнёт его осваивать, в результате окажется в существенном выигрыше на десятилетия вперёд.

В настоящее время вопросы создания производства композитов из области теоретических рассуждений начинают переходить в область практических действий. Появились российские компании, проявляющие реальный интерес к освоению производства ряда композитов на металлической матрице, появились государственные программы софинансирования подобного процесса, намечается общий поворот к экономике с высоким уровнем добавочной стоимости. На этом фоне функциональные МКМ имеют ярко выраженное преимущество, связанное с относительно низкими объёмами производства потребного продукта, невысокими объёмами финансирования процессов освоения производства и высокой рентабельностью этого производства при наличии платежеспособного спроса на отечественном рынке наукоёмкой продукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robin A. Carden Use of Talbor<sup>®</sup>, a Metal Matrix composite, as a Neutron Shielding Material, Document: TC-021005-C, Talon Composites, LLC.25677 Paseo de la Paz San Juan Capistrano, CA 92675 [www.taloncomposites.com](http://www.taloncomposites.com).
2. MC-21, Inc. 5100 Convair Drive Carson City, NV 89706 [www.mc21inc.com](http://www.mc21inc.com).
3. AMETEK Specialty Metal Products 21 Toelles Road, Wallingford, CT 06492 USA [www.ametekmetals.com](http://www.ametekmetals.com).
4. Occhionero M.A., Fennessy K.P., Adams R.W., G.J. Sundberg AlSiC Baseplates for Power IGBT Modules: Design, Performance and Reliability Ceramics Process Systems Chartley, MA 02712-0338 [www.cps technologies.net/pdf/cps\\_igbt\\_2001.pdf](http://www.cps technologies.net/pdf/cps_igbt_2001.pdf).
5. Xian Miqam Microelectronic Materials Co., Ltd. 303#, Chuangtuo Building, 5th Gaoxin Rd., Xian City, P. R. China Website: [www.al-sic.com](http://www.al-sic.com).
6. Аксенов А.А., Гершман И.С., Кудашов Д.В., Портной В.К. Способ изготовления КМ на основе меди и КМ, изготовленный этим способом. Патент РФ №2202642 от 26.09.01. МКП: С22С1/05; В22F9/04.
7. Aksenov A.A., Kudashov D.V., Prosviryakov A.S., Gershman I.S., Solonin A.N. The Study of the Structure and Properties of ODS Materials Based on the Cu-SiC System and Obtained by Mechanical Alloying. European Congress on Advanced Materials and Processes «Materials Week 2002» 30 Sept – 2 Oct. 2002, Munich, Germany.
8. Абузин Ю.А., Юдин А.С. Использование особенностей квазикристаллов при создании материалов для космоса, авиации, моторостроения и других отраслей народного хозяйства. Сборник докладов первого всероссийского совещания по квазикристаллам, апрель 2003, с. 82-87.
9. Шайтура Д.С., Теплов А.А., Чикина Е.А., Клевачев А.М., Ефимочкин И.Ю., Федотов С.В., Петржиж М.И., Левашов Е.А., Абузин Ю.А. Композиты, армированные квазикристаллическими частицами Al-Si-Fe, с медной матрицей и их трибологические свойства // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010, № 11, с. 1-5.
10. Абузин Ю.А. Неравновесные структуры в металлических композиционных материалах // Металлургия машиностроения, 2009, № 6. С. 32-35.