

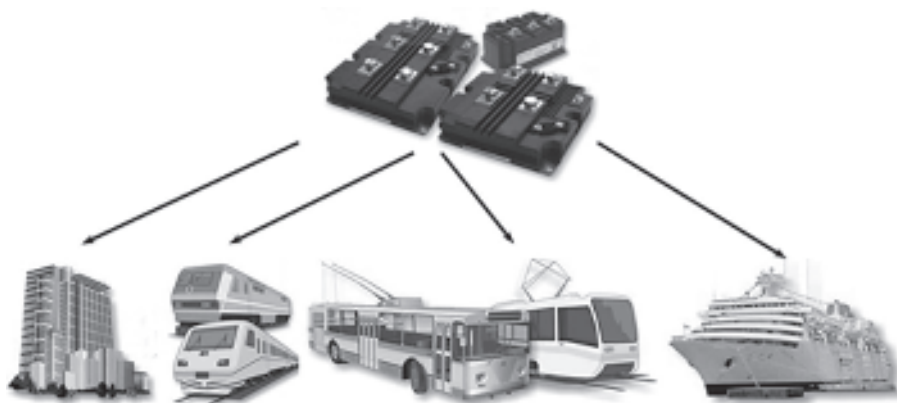
*Е.Н. КАБЛОВ, Б.В. ЩЕТАНОВ, Д.В. ГРАЩЕНКОВ,  
А.А. ШАВНЕВ, А.Н. НЯФКИН*

### **МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ Al–SiC**

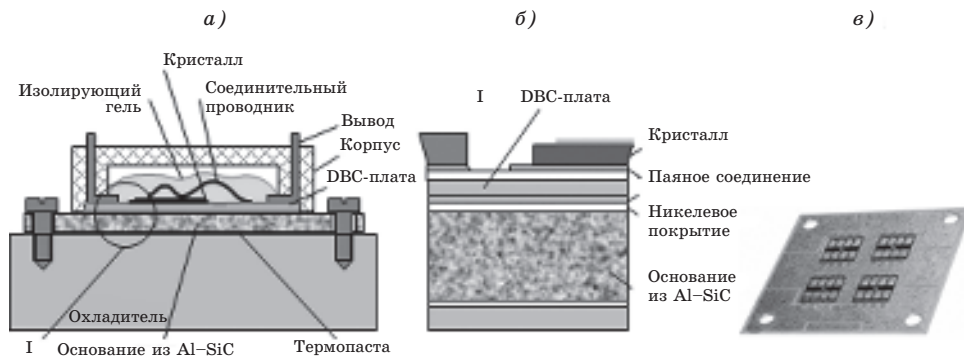
Одним из важнейших условий развития мировой экономики, в том числе экономики России, является повышение эффективности использования электроэнергии. Применение современных энергосберегающих технологий позволяет экономить до 30–40% электроэнергии. Многократное снижение энергоемкости валового внутреннего продукта возможно путем использования современной высокопроизводительной техники и технологии, в создании которой широко применяются передовые системы силовой электроники.

Использование высокочастотного преобразования в энергетических и технологических установках дает экономии дефицитной электротехнической меди – в десятки раз. Материалоемкость, габарит и масса изделий уменьшаются в разы одновременно с увеличением КПД. Расширяются пределы устойчивой эксплуатации, гибкость и управляемость сложных систем, повышаются их надежность и безопасность.

Энергосберегающая силовая электроника в России востребована уже сегодня. Это доказывает, например, резкий рост применения систем регулируемого электропривода в коммунальном хозяйстве (тепло- и водоснабжение), а также в нефтегазоперекачивающей отрасли в течение последних 5–7 лет. Другим весомым критерием является программа Федеральной сетевой компании (ФСК) по созданию гибких линий электропередач, включающая создание и применение статических компенсаторов на суммарную установочную мощность 40 000–80 000 Мвар в 2005–2015 гг. Значительную потребность в новой преобразовательной технике выявляют также программы технического перевооружения тяговых подстанций и электроприводов подвижного состава железных дорог. В настоящее время твердотельная силовая электроника широко используется в регулируемом технологическом и тяговом электроприводе, вторичных источниках питания, в металлургии, химии, машиностроении, связи и энергетике (рис. 1) [1].



**Рис. 1.** Применение приборов силовой электроники



**Рис. 2.** Схематичное изображение IGBT-модуля (а), DBC-плата с питаемыми полупроводниковыми кристаллами (в) и схема ее соединения с теплоотводящим основанием (б)

Практически все типы оборудования средней мощности (от десятков киловатт до единиц мегаватт) разрабатываются с использованием силовых модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). В настоящее время силовые IGBT-модули выпускаются на ток 100–2400 А и коммутируемое напряжение – до 3,3 кВ (рис. 2, а, б).

Силовые модули, с точки зрения тепловых процессов, могут функционировать при условии, что имеется эффективный отвод тепла, осуществляемый через многослойную структуру к наружной поверхности корпуса. В связи с постоянно растущей концентрацией энергии в электронных схемах, высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения (КТР) теплоотводящих оснований – становятся решающим критерием для проектирования высокомоощных модулей. Основным фактором, обеспечивающим максимальную производительность полупроводниковых приборов, является эффективность передачи тепла от кристалла к теплоносителю, характеризуемая тепловым сопротивлением, – чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не является равномерным. Если источником тепла является кристалл, то передача тепла от него осуществляется по конусообразному каналу (ко-

нической тепловой трубе) – аналогично тому, как распространяются звуковые волны или свет.

Передача тепла из одного места (кристалл) в другое (теплоноситель, окружающая среда) определяется толщиной слоев и тепловым сопротивлением материалов, а также площадью их соединения (чем больше площадь, тем большее количество тепла в единицу времени может быть передано). Часто недостаточное внимание уделяется тому, что неблагоприятный эффект от воздействия высокого теплового сопротивления увеличивается по мере приближения к источнику тепла, т.е. чем дальше от источника тепла находится слой материала, тем шире в этом месте конус тепловой трубы, а следовательно, снижается влияние теплового сопротивления этого материала. Это означает, что даже самый хороший теплоотвод с вентиляцией не обеспечит охлаждения кристалла, если переходы кристалл–корпус и корпус–теплоотвод имеют неоправданно высокие значения теплового сопротивления. Предельные характеристики (ток, напряжение, мощность) ограничиваются максимальной температурой кристалла, которая не должна быть превышена ни при каких режимах работы полупроводникового прибора.

Для изолирования кристалла IGBT (см. рис. 2, в) от охладителя, он размещается на изолирующей пластине – DBC-плате (технология Direct Bonded Copper – прямое нанесение меди) из специальной керамики (на основе  $Al_2O_3$  или AlN) с низким коэффициентом термического расширения (КТР), высокими теплопроводностью и электрической прочностью. В конструкции с DBC-керамикой тепло, выделяемое силовыми полупроводниковыми приборами (кристаллами), распределяется первоначально в верхнем слое металлизированной керамики, затем равномерно – по всей толщине изолирующей теплопроводящей подложки, проходит через нижний слой металлизации и передается основанию прибора, а затем и охладителю. Таким образом, конус тепловой трубы становится шире, и, следовательно, снижается тепловое сопротивление.

Полупроводники – кристаллические материалы с чрезвычайно низким коэффициентом теплового расширения. В элементах конструкции, в которую должны быть собраны электронные модули, должен учитываться тот факт, что многократное циклическое расширение и сжатие приводит к разрушению кристаллов в результате тепловых напряжений.

Исходя из вышесказанного совершенно очевидным становится то, что используемые в настоящее время теплоотводящие основания на основе меди и ее сплавов не могут уже более соответствовать постоянно возрастающим требованиям к новым приборам силовой электроники по причине их высоких КТР, плотности и стоимости. Как показывает практика, при пайке металлокерамики на медное основание ухудшается качество поверхности медного основания, появляются местные напряжения и изгибы.

После определенного числа термоциклов, из-за постепенного разрушения припоя, ухудшается тепловой контакт между металлокерамической платой и медным основанием, что влечет за собой повышение градиента температуры, а также перегрев и тепловое разрушение полупроводникового элемента.

Проблема устраняется использованием конструкции модуля с применением металлического композиционного материала (МКМ) на основе алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния (система Al–SiC), – в качестве теплоотводящего основания [3]. Данный материал об-

ладает уникальными свойствами: высокими теплопроводностью и механической прочностью, низкими КТР и плотностью. В отличие от традиционных материалов, изменяя величины в соотношении Al (матрица)–SiC (наполнитель), можно точно задать теплофизические свойства нового материала в соответствии с техническими требованиями – для применения во многих ответственных областях. Совокупность этих свойств позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции силовых модулей, достичь высочайших надежности и ресурса при циклических нагрузках (не менее 100 тыс. циклов) силовых IGBT-модулей с применением МКМ.

Уже в настоящее время в силовой электронике МКМ системы Al–SiC используются в мощных полупроводниковых IGBT-модулях, работающих в жестких условиях эксплуатации во всех климатических зонах. Такие модули производят американские фирмы «Ceramics Process Systems» (CPS) и «Thermal Transfer Composites» (TTC) [3–5]. В настоящее время фирмой CPS, в зависимости от выполняемых задач, выпускается ряд теплоотводящих изделий из Al–SiC нескольких марок с различными КТР (рис. 3).

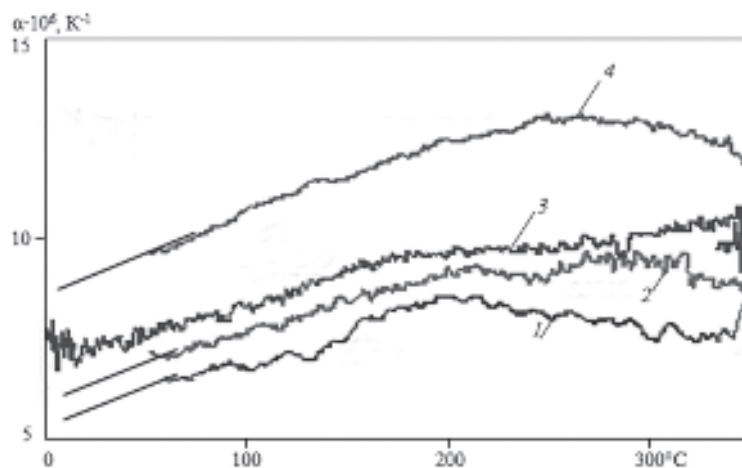


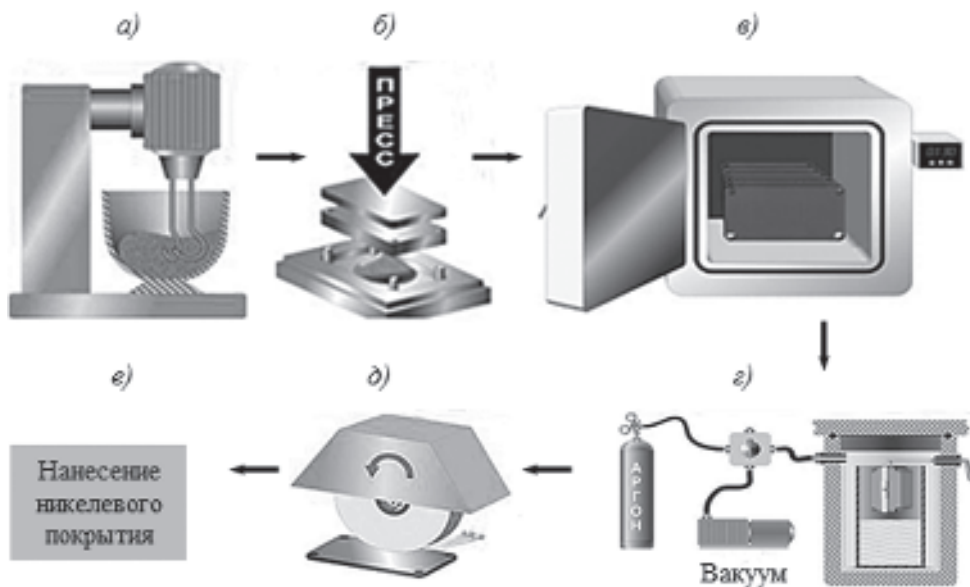
Рис. 3. Температурная зависимость [5] коэффициента термического расширения ( $\alpha$ ) от объемного содержания наполнителя SiC в материале системы Al–SiC: 70 (1), 67 (2), 63 (3) и 55% объемн. (4)

Решением проблемы создания и применения в изделиях силовой электроники отечественных теплоотводящих оснований из МКМ системы Al–SiC занимаются в ВИАМ совместно с ОАО «Электровыпрямитель» и МГУ им. Н.П. Огарева.

В ВИАМ и ОАО «Электровыпрямитель» в течение 2009–2010 гг. выполнен цикл научно-исследовательских работ по созданию МКМ системы Al–SiC и изделий из него (теплоотводящих оснований) с высоким (до 70% объемн.) содержанием SiC для полупроводниковых изделий силовой электроники. При этом необходимо было решить ряд задач, например: обеспечить высокое содержание армирующей фазы в матри-

це, получить изделия с отверстиями, в том числе резьбовыми, с минимальной последующей механической обработкой, так как материалы подобного класса практически не поддаются стандартной обработке. Кроме того, изделия должны отвечать жестким требованиям по геометрическим размерам. В результате проведенных работ была разработана технология изготовления теплоотводящих оснований из МКМ системы Al-SiC, обладающих высокой теплопроводностью, достигающей 180 Вт/(м·К), низким КТР:  $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Плотность материала составляет 3 г/см<sup>3</sup>, удельная теплоемкость (при 20°C): 0,75 кДж/(кг·К), модуль упругости 280 ГПа, прочность при растяжении 160 МПа и изгибе 370 МПа [6].

Схема технологического процесса изготовления МКМ представлена на рис. 4. Перед проведением пропитки алюминиевым расплавом, исходные порошки SiC перемешивали до получения гомогенной смеси, добавляли связующее и проводили процесс холодного компактирования до получения пористой заготовки с содержанием пор 30% (объемн.). После чего полученные пористые заготовки пропитывали расплавом алюминиевого сплава под давлением инертного газа. Для достижения заданных геометрических размеров проводили механическую обработку пропитанных изделий. Структура МКМ системы Al-SiC представлена на рис. 5. Видно, что матричный металл полностью заполнил поры исходной заготовки. Порошки SiC расположены равномерно в матрице, конгломерата не обнаружено.



**Рис. 4.** Схема технологического процесса изготовления МКМ системы Al-SiC: *а* – подготовка смеси порошков; *б* – формирование пористой заготовки; *в* – сушка и обжиг пористой заготовки; *г* – вакуумно-компрессионная пропитка; *д* – механическая обработка; *ж* – электрохимическое никелирование

Главное внимание при изготовлении изделий обращено на технические характеристики, такие как объемное содержание наполнителя, значения КТР, удельной теплоемкости, теплопроводности, модуля упругости, прочности при изгибе и растяжении.

В процессе проведения исследований опробованы различные технологические приемы. В результате за основу была принята технология, представляющая собой пропитку пористой заготовки из порошков SiC алюминиевым сплавом, которая позволяет изготавливать изделия из системы Al-SiC.

На первом этапе был выбран фракционный состав порошка, режимы формирования пористой заготовки. Разработанная технология получения пористой заготовки позволяет контролировать объемное содержание наполнителя и геометрические размеры будущего изделия.

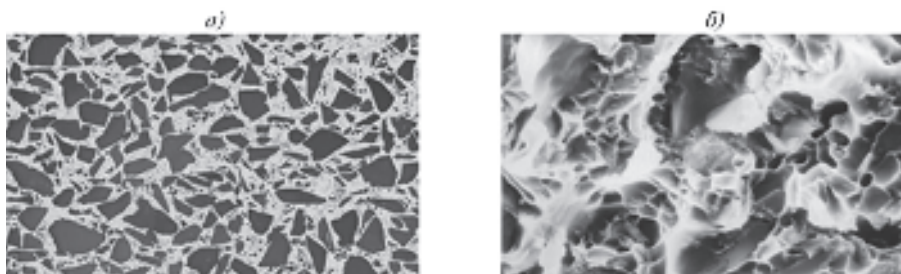


Рис. 5. Микроструктуры (*a* –  $\times 100$ ; *b* –  $\times 2200$ , СЭМ) МКМ системы Al-SiC: *a* – шлиф; *b* – излом

На втором этапе (пропитка пористой заготовки расплавом матричного сплава) проведены исследования технологических режимов пропитки.

Результаты проведенных испытаний по основным теплофизическим и механическим свойствам МКМ системы Al-SiC представлены в табл. 1 и 2 в сравнении с техническими требованиями, предъявляемыми ОАО «Электровыпрямитель» к теплоотводящим основаниям из данного материала.

Таблица 1

Теплофизические свойства МКМ системы Al-SiC в сравнении с техническими требованиями

Материал	Объемное содержание SiC, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	КТР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	Удельная теплоемкость (при 20°C), кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
МКМ системы Al-SiC	70	3	5,8	0,75	180
Технические требования	70	3	5—7	0,75	180—200

Таблица 2

**Механические свойства МКМ системы Al—SiC  
в сравнении с техническими требованиями**

Свойства	$\sigma_B$	$\sigma_{B.изг}$	$E$
	МПа		
МКМ системы Al—SiC	160	340	245
Технические требования	125—235	300—370	220—230

Из представленных данных видно (см. табл. 1), что по всем показателям полученный материал соответствует требованиям ОАО «Электровыпрямитель».

Из представленных данных видно (см. табл. 2), что свойства МКМ системы Al—SiC полностью соответствуют требованиям к материалу.

Для проведения комплекса испытаний теплоотводящих оснований в составе изделия М2ТКИ-300-17КТ были изготовлены опытные экземпляры модулей на основе теплоотводящих оснований из МКМ системы Al—SiC. Для сравнения также были проведены испытания теплоотводящих оснований, изготовленных фирмой «Ceramic Process Systems» (США).

В табл. 3 представлены результаты проведенных измерений теплового сопротивления.

Таблица 3

**Сравнение тепловых сопротивлений\* модулей М2ТКИ-300-17КТ  
с различными основаниями из Al—SiC [1, 6]**

Модуль	Условный номер	$R_T$	$R_D$	Максимально допустимое значение	
				$R_T$	$R_D$
Отечественный образец	1	0,060	0,098	$\leq 0,075$	$\leq 0,11$
	2	0,051	0,0882		
Зарубежный аналог	3	0,0625	0,088	$\leq 0,075$	$\leq 0,11$
	4	0,069	0,086		

\*  $R_T$ ,  $R_D$  — сопротивление транзисторного и диодного ключа.

Проведенными испытаниями установлено (см. табл. 3), что среднее значение теплового сопротивления транзисторного ключа модуля с основанием из МКМ на основе отечественного образца – на 18% ниже, чем у аналога, среднее значение теплового сопротивления диодного ключа – на 7% выше.

Также в настоящее время испытаниями на термоциклирование установлено, что после 10000 циклов на образцах не произошло отслоения металлокерамических плат (AlN с чипами) от основания. Проведены натурные климатические испытания силовых полупроводниковых приборов на полигоне ГЦКИ ВИАМ (г. Геленджик).

На сегодняшний день отработана базовая технология изготовления нового материала системы Al-SiC и ведутся работы по освоению серийного производства с объемом выпуска – до 10000 изделий в год с последующим увеличением. Планируются поставки изделий системы Al-SiC как внутри страны, так и на экспорт в страны Европы, Азии и Америки (до 50%).

В настоящее время ведется исследование по разработке технологии изготовления из данного материала широкой номенклатуры теплопроводящих изделий для силовой электроники и преобразовательной техники и внедрению ее на ОАО «Электровыпрямитель».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А. и др. Повышение надежности силовых IGBT-модулей с помощью высоконаполненного МКМ системы Al-SiC // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 4. С. 3–6.
2. Singh S., Tech Junior B., Ryssel H. Lifetime of power modules: 7 Indo-German winter academy. 2008.
3. Gilleo K., Ph. D. MEMS/MOEMS Packaging Concepts, Designs, Materials and Processes – McGraw-Hill // Nanoscience and Technology Series. 2005. 239 p.
4. Occhionero M.A., Adams R.W., Saums D. AlSiC for Optoelectronic // Thermal Management and Packaging Designs. 2001. 5 p.
5. Occhionero M.A., Fennessy K.P., Adams R.W., Sundberg G.J. AlSiC Baseplates for Power IGBT Modules: Design, Performance and Reliability // Ceramics Process Systems. 2003. 6 p.
6. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Мартыненко В.А., Мускатиньев В.Г., Эмих Л.А., Вдовин С.М., Ниццев К.Н. Свойства и применение высоконаполненного металлического композиционного материала Al-SiC // Технология машиностроения. 2011. № 3 (105). С. 5–7.

Ю.А. ИВАХНЕНКО, В.Г. БАБАШОВ,  
А.М. ЗИМИЧЕВ, Е.В. ТИНЯКОВА

#### **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Восстановление промышленности и оборонно-промышленного комплекса, ликвидация отставания в этой области и выход на современный уровень развития требуют разработки широкого ассортимента высокотемпературных материалов и технологий их получения для многих отраслей промышленности, и в первую очередь – для ракетно-космической техники.

Одной из главных задач в разработке перспективных изделий ракетной техники является обеспечение ее высокотемпературной теплозащитой – волокнистыми теплозащитными и уплотнительными материалами с высокими теплофизическими характеристиками и низкой плотностью.

Основным компонентом таких материалов являются высокотемпературные дискретные и непрерывные волокна на основе тугоплавких окси-