

# КОМПОЗИТНЫЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

С.Потапов company@metalcomposit.ru

Повышение плотности мощности современных высокопроизводительных микросхем, силовых и СВЧ-устройств требует поиска новых эффективных способов отвода избыточного тепла. Один из путей решения проблемы – применение материалов со сверхвысокой теплопроводностью. За последние годы многие компании добились успехов в получении углеродосодержащих материалов с повышенными теплопроводными свойствами. Уникальные особенности углерода дают возможность создавать на его основе композитные структуры, существенно повышающие эффективность отвода тепла в полупроводниковых приборах и электронных модулях. Рассмотрим основные свойства композитных теплопроводящих материалов, а также перспективы их применения в изделиях электроники гибридных структур, содержащих высокотеплопроводящие формы углерода.

**А**нализ механизмов возникновения отказов в электронных приборах из-за влияния факторов окружающей среды показал, что основными их причинами являются повышенная температура и вибрация (рис.1). Например, по данным Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA), 90% отказов оборудования в ходе выполнения космического задания происходит по причине разрыва контактов из-за механических напряжений, вызываемых высокой температурой\*. Более половины (55%) отказов военной электроники в ВВС США обусловлено термическими эффектами.

\* Developments and trends in thermal management technologies – a mission to the USA. Report of a DTI Global Watch Mission, December 2006.

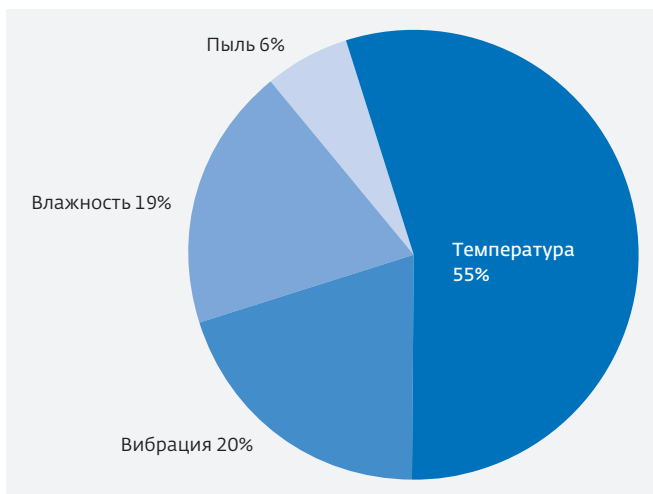


Рис.1. Основные факторы отказов электронной аппаратуры (по данным ВВС США)

Проблемы снижения надежности электронных систем, возникающие вследствие повышенных температур, доказывают, что задача отвода тепла из ряда критически важных. Для ее решения используют как активные, так и пассивные методы. Активные системы, в которых для охлаждения применяют газ или жидкость, содержат множество элементов: двигателей, клапанов, систем трубопроводов, теплообменников, — что не только усложняет эти системы, но и снижает их надежность, ограничивает возможности уменьшения габаритов. Кроме того, к факторам риска отказов для активных систем относятся вибрации и удары.

Пассивные методы, в которых отвод тепла осуществляется только благодаря применению материалов с высокой теплопроводностью, обладают большей надежностью. Более того, в изделиях микроэлектроники высокотеплопроводные материалы зачастую являются единственным приемлемым способом отвода тепла. Однако даже минимальные зазоры и неоднородности на границах раздела теплопроводящих материалов приводят к возникновению значительных тепловых сопротивлений и резкому снижению эффективности отвода тепла. Кроме того, из-за различия коэффициентов теплового расширения разных материалов высока вероятность отказов. Например, если коэффициенты

теплового расширения полупроводникового кристалла, серебряного припоя и теплопроводного основания значительно различаются, то при нагревании или охлаждении на границе раздела этих материалов неизбежно возникновение высоких механических напряжений, которые в результате воздействия некоторого количества таких термоциклов приведут к отслаиванию. Создаваемые зазоры способны в несколько раз снизить эффективность отвода тепла. Поэтому в качестве теплоотводящих подложек в полупроводниковых приборах выбирают материалы, обладающие высокой теплопроводностью, коэффициентом термического расширения, близким к полупроводникам, и достаточной механической прочностью.

Во многих странах проводятся исследования и разрабатываются новые материалы для отвода тепла в электронных приборах. Каковы основные тенденции в области создания теплопроводящих материалов?

В качестве теплоотводящих подложек для полупроводниковых приборов уже не одно десятилетие применяются композитные материалы. Одними из первых стали использовать псевдосплавы WCu и MoCu, получаемые в результате пропитки пористого каркаса из порошка вольфрама или молибдена медным сплавом. На основе этой технологии были созданы

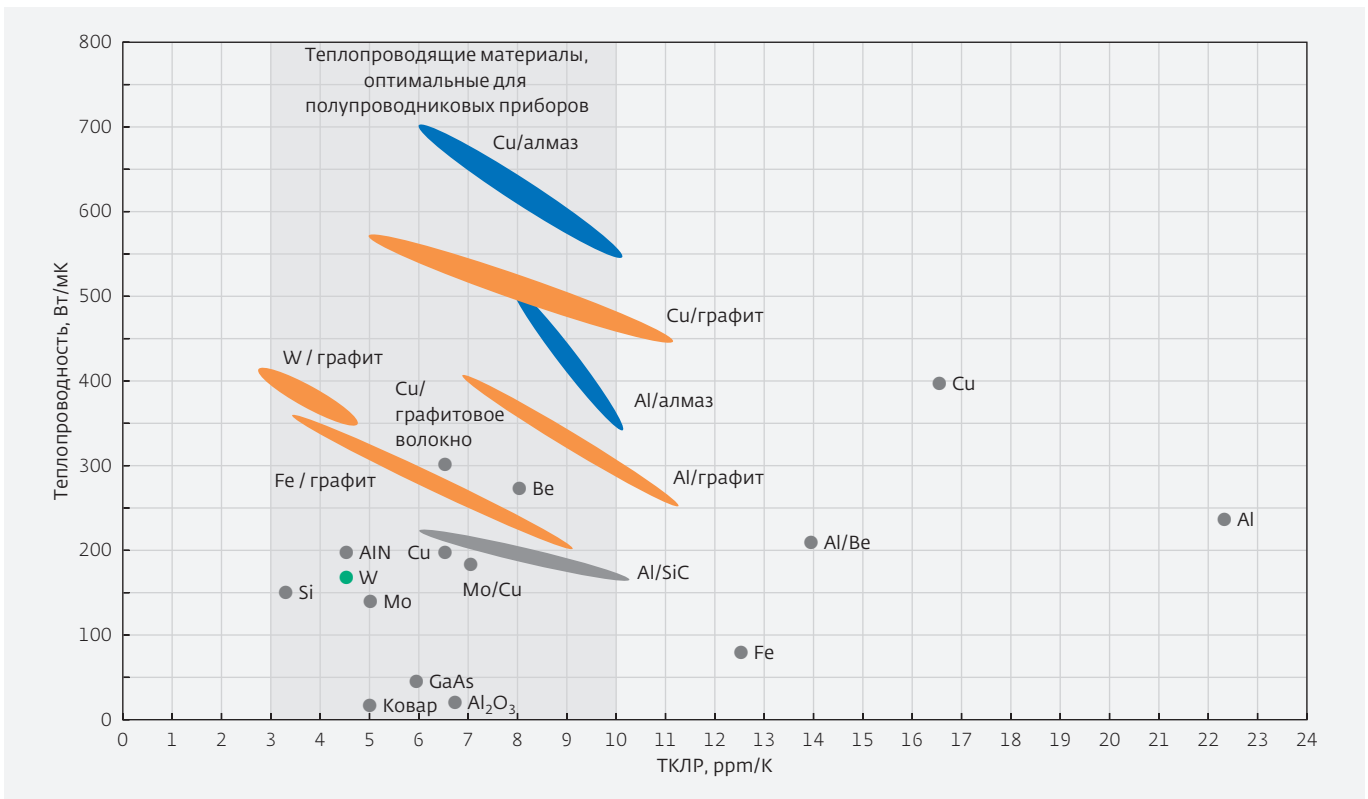


Рис.2. Теплопроводность и ТКЛР материалов для изделий электроники

композиаты AlSiC, AlSi, AlAlN и др. Для создания этих материалов применяют общий подход: изготавливается пористая порошковая преформа\*, которая пропитывается жидким сплавом высокотеплопроводного металла. Вектор развития композитных материалов – использование все более теплопроводных наполнителей.

В последнее время разработчики проявляют большой интерес к композитным теплопроводящим материалам на основе углерода. Углеродные материалы в форме графитов или синтетических алмазов комбинируются с металлами, что позволяет снизить их плотность по сравнению с медью и алюминием и повысить теплопроводность. Однако на пути внедрения этих материалов остается ряд организационных и технических барьеров.

Распространение композитных материалов сдерживается отсутствием соответствующих стандартов и методик их применения и контроля. Кроме того, до недавнего времени технология производства этих материалов не отвечала требованиям эффективности и рентабельности. Однако развитие технологических методов обработки позволило добиться определенных успехов. Сейчас на рынке несколько крупных

и небольших компаний используют оригинальные методы производства композитных материалов.

В качестве примера решения проблемы внедрения новых технологий можно привести композиты

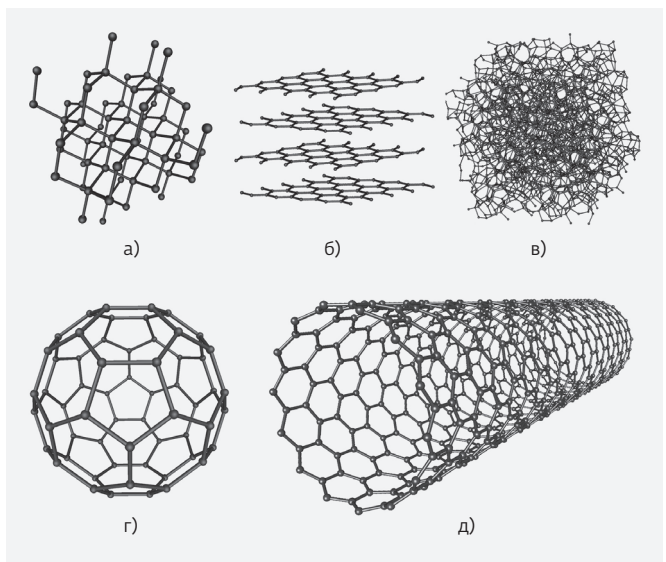


Рис.3. Аллотропные формы углерода: а) алмаз, б) графит, в) аморфный углерод, г) фуллерен, д) углеродная нанотрубка

\* Преформа – пористый порошок, частицы которого связаны клеем.

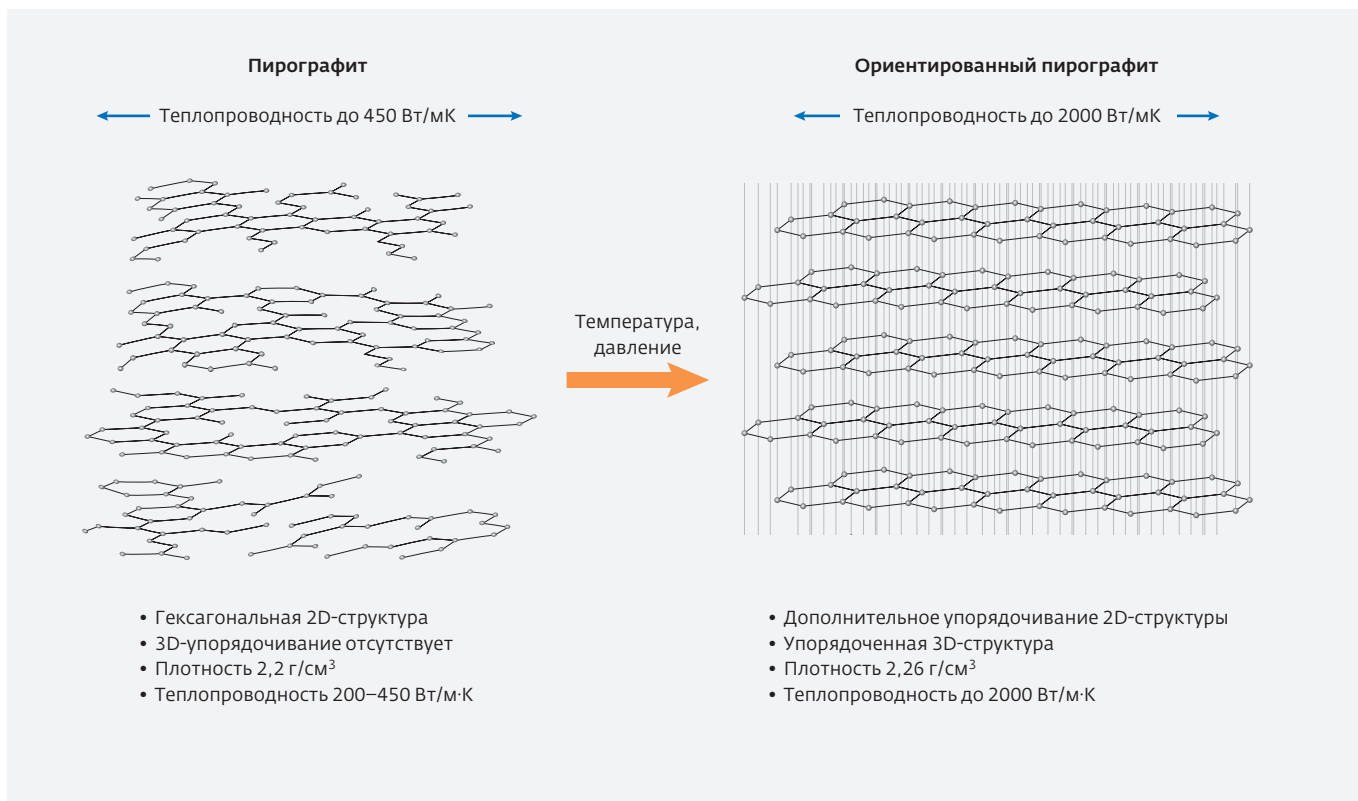


Рис.4. Процесс получения супертеплопроводного графита

на основе AlSiC, стоимость механической обработки которых многократно превышает стоимость обработки традиционных материалов. Разработаны методики выпуска изделий на основе AlSiC с очень высокими размерными допусками, требующие лишь небольшой финальной обработки. Это позволило композитам на основе AlSiC выйти на первое место по применению в системах силовой электроники, СВЧ-модулях и в системах мощного светодиодного освещения.

Не менее важная проблема отвода тепла – заполнение зазоров, которые образуются в результате наличия технологических допусков при сборке, а также разности коэффициентов расширения кристаллов, плат, оснований и корпусов приборов. Для заполнения щелей и зазоров необходимы пластичные и в то же время высокотеплопроводные материалы, чтобы обеспечить низкое сопротивление тепловому потоку. За последнее время был разработан ряд пластичных полимерных материалов с высокодисперсными наполнителями на основе высокотеплопроводных графитов, а также сферезированных частиц нитридов бора и алюминия, отвечающих этим требованиям.

Сегодня в электронной промышленности применяется широкий спектр материалов для отвода тепла. Тем не менее, как показывает сравнение композитов на основе различных аллотропных форм углерода

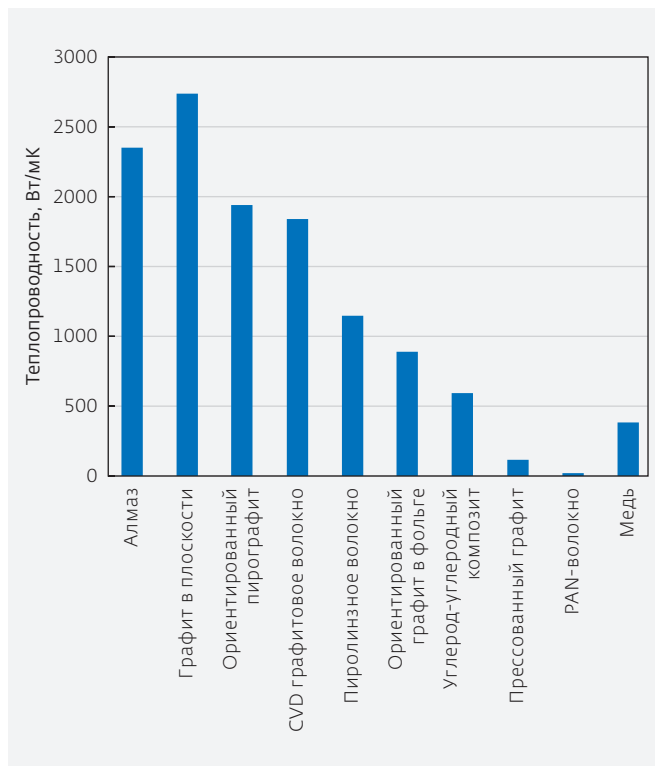
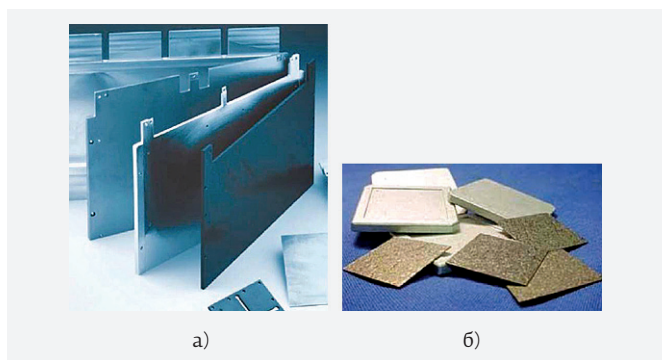


Рис.5. Теплопроводность графитированных (sp<sup>2</sup>) и алмазоподобных (sp<sup>3</sup>) форм углерода



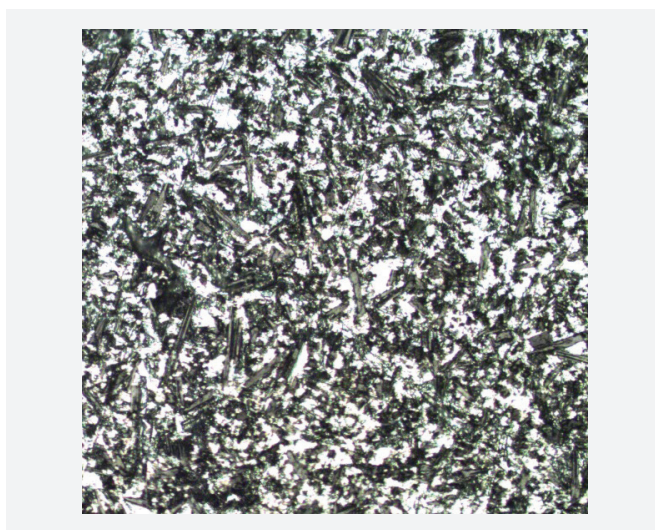
**Рис.6.** Композиты TC1050 (а) и слои пирографита, инкапсулированные во flip-chip-крышки для процессоров (б) производства компании Momentive Performance Materials

с другими материалами для монтажа активных элементов и корпусирования по таким показателям, как теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), их преимущества очевидны (рис.2). Наиболее популярными матричными материалами для композитов являются сплавы на основе меди, алюминия, вольфрама и молибдена.

Высокие параметры таких композитных материалов объясняются особенностями структуры и физическими характеристикам различных форм углерода (рис.3). Уникальность углерода состоит в том, что в зависимости от структуры, координационного числа и длины связей его механические и теплофизические характеристики могут меняться на несколько порядков. Если, например, теплопроводность синтезированного пирографита в направлении слоистости достигает 300–450 Вт/м·К, то после дополнительной высокотемпературной обработки его теплопроводность в направлении слоистости возрастает в 4–5 раз (рис.4) за счет упорядочения структуры материала.



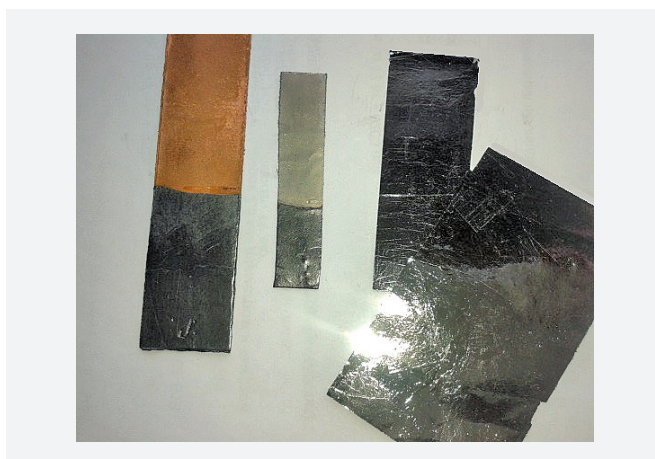
**Рис.7.** Экспериментальные образцы композитных пластин со вставками из пирографита



**Рис.8.** Структура экспериментального образца композитного материала: алюминиевый сплав – молотое высоко модульное углеродное волокно

На основе графита получают ряд материалов, обладающих уникальными свойствами. Разнообразие физико-технических характеристик таких материалов определяется технологией их получения, используемой компанией-производителем (рис.5).

Например, компания Momentive Performance Materials производит материал на основе графита Graphmet 350. При его изготовлении пористые графитовые преформы пропитываются алюминием под давлением. Основные параметры Graphmet 350: теплопроводность 220–360 Вт/м·К, ТКЛР 6,0–8,5 ppm/К, плотность 2,1 г/см<sup>3</sup>. Композит TC1050 производства той же компании имеет следующую структуру: сердцевина



**Рис.9.** Экспериментальные образцы ламинированных металлической фольгой слоев термического пирографита

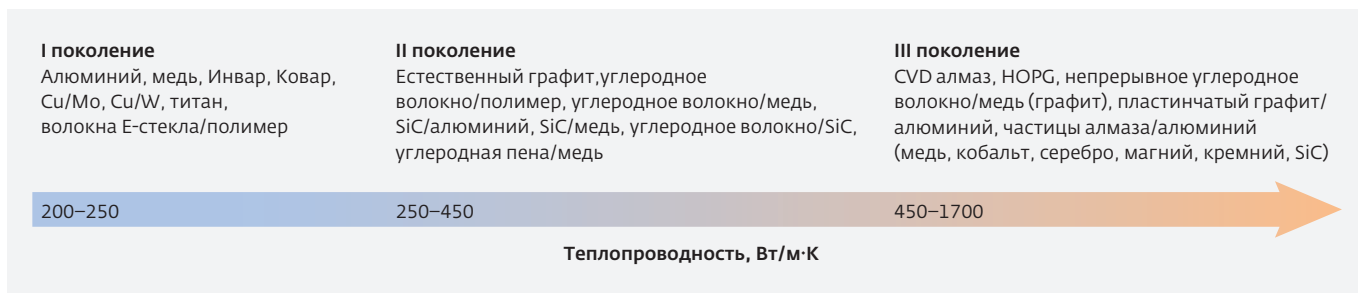


Рис.10. Поколения материалов для отвода тепла

представляет собой слой ориентированного пирографита, обкладки изготовлены из алюминиевого или медного сплава (рис.6). Теплопроводность композита TC1050 в плоскости или поперек подложки в зависимости от ориентации пирографита превышает 1000 Вт/м·К. Компания Metal Matrix Cast Composites выпускает графитовое волокно, пропитанное под давлением сплавами меди и алюминия.

Компания JW Composites предлагает графитовое волокно, покрытое адгезионным слоем молибдена и пропитанное сплавами меди, со следующими характеристиками: ТКЛР 2–10 ppm/K, теплопроводность в плоскости подложки 400 Вт/м·К, поперек подложки – 200 Вт/м·К. Графитовая пена, пропитанная сплавами меди, от JW Composites имеет ТКЛР в диапазоне от 5,7 до 7,4 ppm/K, ее теплопроводность (изотропная) составляет 342 Вт/м·К. Синтетический алмаз с добавлением медного или серебряного матричного сплава этой же компании имеет теплопроводность 600–800 Вт/м·К и ТКЛР 5–8 ppm/K.

Алюминий-графитовые композиты производства Hiffmann Elektrocontrole имеют ТКЛР на уровне 8–12 ppm/K, их теплопроводность составляет 180–220 Вт/м·К, а плотность – 2,2–2,3 г/см<sup>3</sup>.

Успехи, достигнутые зарубежными компаниями в области создания материалов на основе высокотеплопроводных форм графита, повлекли за собой серьезные изменения в подходах, используемых при проектировании систем отвода тепла электронных модулей.

В России в сфере разработки и производства композитных материалов наметилось отставание. Несмотря на то, что освоено производство композитов WCu и MoCu, выпуск таких материалов, как AlSi, Al-синтетический алмаз, Al/Cu-пирографит и ориентированный пирографит, не налажен. Высококачественные порошки SiC, используемые для создания AlSiC-композитов с теплопроводностью выше 200 Вт/м·К, также не производятся.

Научно-производственное предприятие "Металл-Композит" поставило перед собой задачу создания

опытно-промышленного производства высококачественных композитных материалов. Компания в инициативном порядке выполняет опытные работы по получению металломатричных композитных материалов с высокотеплопроводными формами графита; получены первые успешные результаты. Например, изготовлены образцы композитного материала в форме пластин, представляющего собой композит AlSiC со вставкой из пирографита (рис.7). Его теплопроводность в направлении поперек пластины (при ориентации пирографита слоями поперек пластины) может достигать 350 Вт/м·К.

Кроме того, в НПП "Металл-Композит" получены образцы композита "алюминий – высокомодульное углеродное волокно" (рис.8). Теплопроводность такого композита достигает 200–250 Вт/м·К, а ТКЛР – в пределах 7–8 ppm/K в диапазоне температур от 20 до 150°C. Разрабатываются пассивные теплопроводники, представляющие собой ламинированные металлической фольгой слои термического или ориентированного пирографита (рис.9). Теплопроводность таких структур превышает 1100 Вт/м·К.

\*\*\*

Проблема отвода избыточного тепла – одна из ключевых при обеспечении высокого уровня надежности электроники. Для ее решения требуются новые высокотеплопроводные гибридные и композиционные материалы для корпусов, подложек и оснований. В настоящее время стремительно развивается новое поколение материалов на основе углерода и его высокотеплопроводных форм – алмаза, пирографита, термического пирографита (рис.10). Результаты, полученные НПП "Металл-Композит" в процессе создания композитных материалов на основе высокотеплопроводных форм углерода, подтвердили перспективность этого направления и открыли возможность разработки эффективных теплопроводящих гибридных структур для широкого спектра применений в изделиях электроники. ●