

# КОМПАНИЯ BERGQUIST: ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

Владимир КОСНЫРЕВ

Проблема обеспечения теплоотвода в электронных устройствах любого назначения всегда была актуальной. И несмотря на достижения электроники, важность этой проблемы не уменьшается, а скорее возрастает, поскольку она имеет прямое отношение к надежности, габаритам и другим эксплуатационным и экономическим характеристикам электронной аппаратуры. Вот почему вопросы разработки и поставки на рынок высококачественных материалов, позволяющих реализовывать необычные подходы к решению задачи отвода тепла электронных компонентов, привлекают к себе все большее внимание. Именно такие материалы и предлагает разработчикам и производителям электронной аппаратуры известная американская компания Bergquist.

Быстрое развитие электроники было бы невозможно без столь же быстрого развития промышленности специальных материалов. Как правило, цель их разработки и внедрения в производство электронных устройств – уменьшение габаритов и снижение энергопотребления. А это, в свою очередь, приводит к появлению новых потребительских свойств и даже принципиально новых технических направлений – достаточно вспомнить мобильную телефонию и развитие беспроводных телекоммуникаций. Поэтому специалист, занятый разработкой электронных устройств, всегда должен быть в курсе современных технических и технологических достижений в области производства материалов для электронной техники.

Известно, что одна из самых важных и сложных задач, возникающих при разработке электронной аппаратуры, – отвод выделяемого ею тепла. При современной устойчивой тенденции к уменьшению габаритов электронных устройств эта проблема не исчезает, а напротив, становится все более острой, и тем сильнее, чем выше мощность устройства и меньше его физический объем.

Американская компания Bergquist, один из лидеров среди производителей специальных материалов для электронной аппаратуры, уже более 30 лет выпускает различные теплопроводящие материалы, значительно улучшающие тепловые режимы работы электронных устройств и приборов. В перечень ее продукции входят несколько десятков наименований. Это не так давно разработанный, но уже довольно широко применяемый композит Thermal Clad\*, предназначенный, подобно фольгированным текстолитам типа FR4,

\* Полное зарегистрированное название материала Thermal Clad Insulated Metal Substrate – IMS®, или Thermal Clad на изолированной металлической подложке. Композит Thermal Clad, материал его диэлектрического слоя и технология их производства запатентованы в США и других странах.

для изготовления печатных плат (рис.1). В отличие от FR4, его структура, получаемая горячим прессованием, состоит из нескольких слоев (название Thermal Clad означает соединение двух и более материалов горячим прессованием). Такая структура, отличающаяся высокими прочностью и жесткостью, позволяет эффективно отводить тепло от всей площади печатной платы.

Первый слой материала Thermal Clad представляет собой медную фольгу толщиной от 35 до 350 мкм и служит для изготовления токоведущих дорожек печатной платы. Как и в случае применения обычных фольгированных текстолитов, рисунок печатной платы на слое Thermal Clad можно выполнять травлением или фрезерованием.

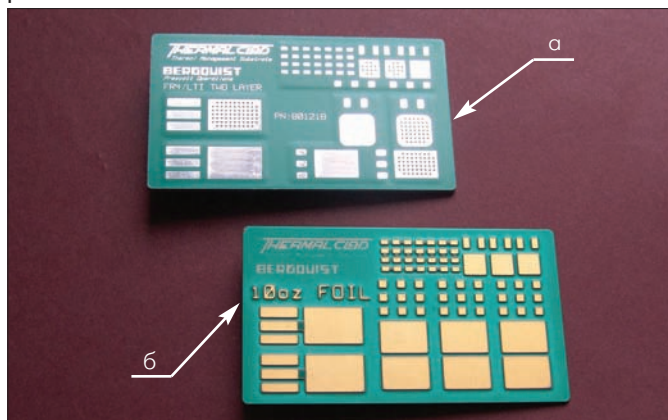


Рис. 1. Печатные платы, изготовленные из материала Thermal Clad:

а) алюминиевая основа толщиной 1 мм, двухслойный диэлектрик FR4/LTI, медная фольга толщиной 35 мкм с покрытием из олова;  
б) медная основа толщиной 2 мм, диэлектрик HT, медная фольга толщиной 356 мкм с покрытием никель-золото

Второй, или средний, слой с высокой теплопроводностью и толщиной 75–200 мкм изготовлен из особого диэлектрика – смеси полимера со специальной керамикой. Полимер выбирается исходя из его диэлектрических свойств, тогда как керамический наполнитель предназначен для улучшения теплопроводности материала, благодаря чему средний слой имеет и отличные диэлектрические свойства, и очень низкое тепловое сопротивление. Объемное удельное сопротивление материала этого слоя не менее  $10^{14}$  Ом·см. При толщине диэлектрика 75 мкм допустимое рабочее напряжение между первым и третьим слоями составляет 5,5 кВ переменного тока и более, что вполне достаточно для большинства приложений. В композите Thermal Clad средний слой – ключевой, поскольку соединяет первый слой с третьим, металлическим (алюминиевым или медным) базовым слоем (толщиной 1–3,5 мм), который служит радиатором для всей печатной платы и выполняет функцию проводника тепла к этому третьему слою или к подложке.

Компания Bergquist поставляет достаточно широкую номенклатуру композитов Thermal Clad с различными диэлектриками: HT/LTI (High Temperature/Low Thermal Impedance – высокотемпературный диэлектрик с низким полным тепловым сопротивлением); MP (Multi-Purpose – диэлектрик широкого применения); CML (Circuit Material Laminate – слоистый диэлектрический материал типа гетинакса) и другие. Тангенс угла диэлектрических потерь всех типов диэлектриков довольно низкий, что позволяет использовать Thermal Clad на частотах до 150 МГц.

Композиты Thermal Clad, помимо эффективного отвода тепла от печатной платы, позволяют решать и другие проблемы, возникающие при разработке и производстве электронных устройств. На печатной плате с теплоотводом, изготовленной из материала Thermal Clad, можно без специальной изоляции размещать активные элементы (мощные транзисторы и микросхемы) с различной полярностью на теплоотводящем выводе. Например, на одной плате можно поместить биполярные *pnp*-транзисторы с отрицательным напряжением на коллекторе и *pnp*-транзисторы с положительным напряжением на коллекторе. Это способствует увеличению плотности монтажа, упрощает сборку изделия, снижает стоимость производства при значительном повышении его надежности. Применение печатных плат на основе композита Thermal Clad позволяет также использовать для отвода тепла различные конструктивные элементы. При этом Thermal Clad может крепиться непосредственно на этих элементах, например на металлическую стенку корпуса электронного устройства, без каких-либо специальных изолирующих прокладок. Кроме того, благодаря прочности и жесткости композита печатные платы на его основе сами могут служить элементами конструкции электронного устройства.

Thermal Clad имеет еще одно важное достоинство. При нагреве печатных плат из фольгированных текстолитов происходит отслаивание токопроводящих дорожек, что часто приводит к их окислению и обрыву. Температура нагрева, при которой может произойти такое отслаивание, колеблется от 100 до 160°C, время нагрева – от нескольких минут до нескольких месяцев. При этом у печатных плат из фольгированных материалов, выполненных методом травления или фрезерования, дорожки отслаиваются, а у плат, выполненных аддитивным способом (осаждением), отслаиваются и осыпаются как дорожки, так и металлизация отверстий. У Thermal Clad этих недостатков нет, поскольку адгезия используемых в материале диэлектриков к медным и алюминиевым сплавам достаточно высокая. Более того, прочность соединения слоев в трехслойной композиции Thermal Clad со временем только возрастает.

В некоторых случаях при высоких температурах в печатных платах на основе Thermal Clad из-за различных температурных коэффициентов расширения материалов, составляющих композит, могут возникать механические напряжения. Для высокотемпературных приложений, где подобные нежелательные явления наиболее вероятны, компания Bergquist выпускает материалы с подложкой, изготовленной из низкоуглеродистой стали толщиной 1–2 мм.

К семейству композитов Thermal Clad относится и выпускаемый компанией материал Thermal Clad Bond Ply, предназначенный для применения со стандартными печатными платами, изготовленными из стеклотекстолита. Thermal Clad Bond Ply представляет собой двухслойный композит, в котором отсутствует слой фольги, а в качестве диэлектрика используется эластичный материал Bond Ply, обладающий высокими теплопроводностью и адгезией к обычным текстолитам, например к FR4. Теплоотводящие подложки из композита Thermal Clad Bond Ply можно соединять с многослойными пе-

чатными платами и с помощью обычных промышленных ламинаторов. Необходимое условие при применении этого материала – обеспечение его хорошего теплового контакта с печатной платой.

Для электронных устройств, работающих в неблагоприятных условиях при высокой температуре и при больших значениях тока и напряжения, например для промышленных осветительных систем, мощных источников питания и т.п., выпускаются специальные композиты Thermal Clad HTV. По своей структуре они аналогичны другим материалам Thermal Clad, но имеют более высокие технические характеристики: теплопроводность до 2,2 Вт/м·К и напряжение пробоя не ниже 9 кВ переменного тока при толщине диэлектрического слоя 150 мкм. Толщина медной фольги в материалах Thermal Clad этой группы несколько больше – 140–350 мкм, что не только снижает сопротивление токоведущих дорожек (при заданной их ширине), но и увеличивает теплоотдачу от нагреваемых элементов.

Композит Thermal Clad может также успешно заменять композиции из хрупких керамических материалов, используемых в толстопленочных технологиях.

Необходимо добавить, что по желанию заказчика материалы Thermal Clad могут поставляться с покрытием медной фольги оловом, никелем или золотом. Возможно и комбинированное покрытие никель-золото. Свойства материалов семейства Thermal Clad делают их все более популярными у разработчиков и производителей электронных систем.

Увеличение степени интеграции микросхем, мощности выходных каскадов усилителей и переключающих приборов при одновременном уменьшении их габаритов приводят к росту числа источников тепла внутри корпусов современных электронных устройств. Это снижает эффективность работы теплоотводящих элементов и заставляет искать новые технологические подходы к проблеме отвода тепла.

От конструкций теплоотводящих элементов зависит не только эффективность отвода тепла, но также габариты и, конечно, надежность электронных устройств. Современные теплоотводы представляют собой сложные конструкции, состоящие из радиаторов, воздухопроводов, вентиляторов и различных прокладок из специальных материалов, улучшающих теплоотдачу. В большинстве современных электронных систем в основном используется воздушное охлаждение, но в последнее время все чаще можно встретить жидкостное охлаждение, а также модули Пельтье. В любом случае, независимо от способа охлаждения, для отвода тепла от электронного компонента необходим радиатор, имеющий непосредственный тепловой контакт с охлаждаемым электронным компонентом или контакт через прокладки из специальных материалов.

Поскольку площадь поверхности радиатора во много раз больше, чем у охлаждаемого компонента, теплообмен с окружающей средой усиливается. Главное при использовании радиаторов, как уже упоминалось, – обеспечить хороший тепловой контакт с охлаждаемыми поверхностями. В противном случае тепловое сопротивление охлаждающей системы резко увеличивается и эффективность теплоотвода падает.

Поверхности охлаждаемых электронных компонентов (микросхем, транзисторов, тиристоров, диодов и др.), как правило, не очень ровные и не гладкие. Поэтому между ними и радиаторами для получения надежного теплового контакта располагаются специальные материалы, заполняющие неровности и обеспечивающие хороший тепловой контакт и максимальную теплопроводность системы. В качестве таких материалов наибольшее распространение получили специальные пластичные смеси – теплопроводные пасты

или, как их еще называют, термопасты. Изготавливаются они на жидкой силиконовой основе с наполнителем из теплопроводного материала – оксида металла (цинка), металлической пудры и т.п. Их главные достоинства – простота использования и низкая стоимость, а основной недостаток – старение, высыхание и ухудшение теплового контакта. Вдобавок термопасты не обеспечивают электрической изоляции между охлаждаемым компонентом и радиатором, что часто бывает необходимо, например при установке нескольких мощных разнополярных транзисторов на один, а не на несколько радиаторов.

Кроме термопаст для улучшения теплового контакта применяют твердые материалы, такие как слюда, графит, керамика, фторопласт и др. Слюда обладает хорошими электроизолирующими свойствами, но хрупка и очень нетехнологична. Из-за высокой вероятности возникновения паразитных емкостей между корпусом компонента и радиатором при использовании слюды, характеризуемой высокой диэлектрической проницаемостью, ее применение на высоких частотах ограничено. Вдобавок, работа со слюдой требует специальных защитных средств для персонала.

Графит используется в виде тонких пластин. Графитовые прокладки выпускаются в различных конфигурациях, они часто поставляются вместе с радиаторами для процессоров, используемых в микрокомпьютерах. Такие радиаторы, как правило, поставляются в комплекте со специальным вентилятором – кулером. Теплопроводность графита высокая, и он обеспечивает достаточно хороший тепловой контакт радиатора и компонента. Но этот материал очень хрупок и не обладает электроизоляционными свойствами.

Керамические прокладки также имеют высокую теплопроводность и, кроме того, отличные электроизоляционные свойства, но они хрупки и очень дороги. Кроме того, производятся они в основном только для конкретных компонентов, их нельзя вырезать под нестандартные размеры.

Электроизоляционные свойства фторопластовых пленок отличные. Они гибкие и легко режутся. Однако из-за высокой твердости эти пленки не обеспечивают хорошего теплового контакта, особенно если одна или обе поверхности охлаждаемого компонента не ровные, имеют шероховатости и микродефекты. Фторопласт плохо клеится, и к тому же его пленки довольно дороги.

С учетом приведенного краткого перечня достоинств и недостатков применяемых сегодня теплопроводных материалов можно определить основные предъявляемые к ним требования. Так, современные материалы, предназначенные для отвода тепла электронных компонентов, должны:

- иметь хорошую теплопроводность;
- иметь высокое пробивное напряжение;
- быть эластичными;
- легко обрабатываться и резаться;
- иметь клеевой слой с одной или двух сторон по желанию заказчика;
- быть экологически чистыми и не выделять вредные вещества при нагреве;
- иметь доступную цену.

Иными словами, необходимо, чтобы современные материалы вмещали в себе лучшие свойства нескольких совершенно разных композитов и к тому же были недорогими и безопасными.

Специалисты компании Bergquist отлично справились с задачей получения таких материалов, начав их выпуск около 25 лет назад. Сегодня теплопроводные материалы компании отличаются не только высоким качеством, но и позволяют конструкторам на должном техническом уровне и принципиально по-новому решать проблему

отвода тепла электронных устройств. Первым в ряду таких материалов стоит семейство Sil-Pad, композиты которого используются в основном в качестве теплопроводящих и электроизолирующих прокладок между радиатором и охлаждаемым компонентом, то есть там, где обычно применялись термопасты и керамические прокладки (рис.2). Sil-Pad представляет собой стекловолоконную основу, заполненную силиконовой резиной (Sil – материал на основе кремнийорганического соединения, Pad – прокладка). Стекловолоконная основа придает материалу прочность, одновременно повышая его теплопроводность, а силиконовая резина заполняет неровности микрорельефа поверхностей компонентов, улучшая при этом теплообмен. Материал не токсичен, не растворяется в спирте и ацетоне, устойчив к воздействию других растворителей. Наиболее широко материалы Sil-Pad применяются для обеспечения отвода тепла от нескольких силовых разнополярных приборов (например, биполярных *pnp*- и *pnp*-транзисторов), размещенных на одном радиаторе.

В семейство Sil-Pad входят два десятка пленочных материалов различных наименований толщиной 0,13–0,38 мм с пробивным напряжением 1,7–6,0 кВ и теплопроводностью 0,9–3,0 Вт/м·К. В их числе такие специальные материалы, как Sil-Pad 1750 и Sil-Pad 1950, предназначенные для работы в условиях повышенной влажности; Sil-Pad 800-S и Sil-Pad 900-S, обеспечивающие низкое



**Рис.2.** Эластичные материалы компании Bergquist. Слева направо: Hi-Flow-225U, Sil-Pad K-4, Sil-Pad A2000, Poly-Pad K-10, Sil-Pad 900S, Gap Pad 2500-S20 (защитная пленка

темповое сопротивление (0,1 и 0,2°C·дюйм<sup>2</sup>/Вт, соответственно) даже при слабом прижиге корпуса прибора к радиатору, например с помощью пружинной клипсы. Для приложений, требующих повышенной прочности материала на разрыв, Bergquist выпускает Sil-Pad K-4, Sil-Pad K-6 и Sil-Pad K-10. В них используется пленка из полиэтилентерефталата (полиэстера), резко увеличивающая прочность материала на разрыв. Материал Sil-Pad K-10 специально разрабатывался в качестве заменителя керамических изоляторов. При толщине 0,15 мм значение его пробивного напряжения составляет 6 кВ, а тепловое сопротивление 0,2°C·дюйм<sup>2</sup>/Вт. Но, в отличие от хрупких керамических аналогов, он очень пластичен и значительно дешевле! Наибольшую известность и популярность в нашей стране получил Sil-Pad 400, теплопроводность которого при толщине 0,007" (0,18 мм) составляет 0,9 Вт/м·К, пробивное напряжение – 3,5 кВ, диапазон рабочих температур – - 60–180°C.

Для приложений, не допускающих применения кремнийорганических соединений типа Sil-Pad (некоторые телекоммуникационные устройства, авиационно-космическое оборудование), Bergquist выпускает группу материалов Poly-Pad, в которых, как и в Sil-Pad, в качестве основы используется стекловолокно или диэлектрическая пленка, но силиконовая резина заменена полистиролом.

Для приложений, не требующих электрической изоляции между охлаждаемым компонентом и радиатором, компания Bergquist разработала материалы Q-Pad II и Q-Pad III, пригодные для замены теплопроводной пасты. Первый представляет собой алюминиевую фольгу толщиной 38 мкм с нанесенным на обе ее стороны теплопроводным слоем силиконовой резины. Второй – полимер с графитовым наполнителем на стекловолоконной основе.

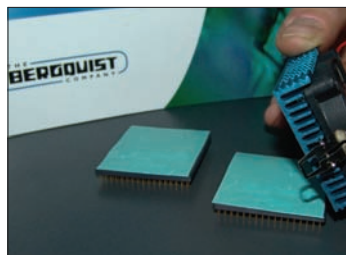
Все рассмотренные материалы поставляются в различных видах: в рулонах, в листах, в виде вырубленных форм, соответствующих термоконтактным поверхностям более ста самых распространенных корпусов полупроводниковых приборов (DO-4, DO-5, TO-5, TO-18, TO-66, TO-126, TO-220, TO-247 и т.п.). На них для упрощения монтажа прибора, по желанию заказчика, с одной или с двух сторон может быть нанесен клеевой слой. Кроме того, материалы Sil-Pad выпускаются и в виде коротких трубок SPT 400 и SPT 1000, предназначенных для охлаждения мощных приборов в пластмассовых корпусах, прижимаемых к радиатору пружинной клипсой.

Для СВЧ-приложений компания Bergquist предлагает специальные Sil-Pad пластины, так называемые Sil-Pad Shield. Они изготавливаются из меди, ламинируются с двух сторон Sil-Pad 400 или Sil-Pad 1000 и имеют вывод для заземления. Sil-Pad Shield незаменимы, когда необходимо снизить помехи, вносимые мощными СВЧ-элементами. Если в этом случае использовать традиционные изоляторы, например слюду, то между прибором и радиатором возникает паразитная емкость, достигающая 100 пФ. Применение же Sil-Pad Shield позволяет резко снизить уровень паразитного излучения.

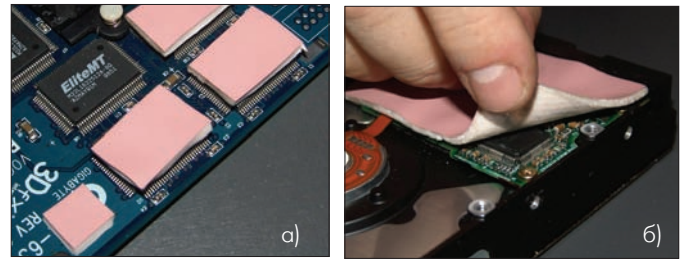
Нельзя не отметить продукцию компании Bergquist нового поколения – материалы группы Hi-Flow (рис.3). Их основа – алюминиевая фольга. Кроме того, в состав этих материалов входит полимер, сохраняющий твердое состояние вплоть до температуры 65°C. При более высокой температуре полимер размягчается и растекается по всей контактной поверхности, заполняя при этом все ее неровности. В результате тепловое сопротивление сильно уменьшается. Так, термосопротивление Hi-Flow 105 равно 0,32°C·см<sup>2</sup>/Вт. Этот материал предназначен для приложений, не требующих электрической изоляции. Если же изоляция необходима, компания Bergquist предлагает материалы Hi-Flow 625 и Hi-Flow 115-AC с пленочной и стекловолоконной изолирующими основами, соответственно.

Особый интерес для разработчиков электронной аппаратуры представляют материалы группы Gap Pad. Благодаря специальному теплопроводному изолирующему полимеру они чрезвычайно легко деформируются, плотно прилегают ко всем компонентам на печатной плате (рис.4). Материалы Gap Pad можно использовать для отвода тепла от печатной платы целиком, при этом функцию радиатора может выполнять металлический корпус устройства. Материалы этой группы различаются значениями теплопроводности, толщиной, необходимым усилием прижима к поверхности платы. Так, Gap Pad HC 1100 с гелеподобной поверхностью требует совсем небольшой силы прижима. Некоторые из материалов Gap Pad содержат усиливающий стекловолоконный слой. Очевидно, с увеличением толщины тепловое сопротивление этих материалов несколько возрастает, однако чем больше толщина, тем лучше они заполняют пустоты неровной поверхности. Напряжение пробоя материалов Gap Pad составляет 3–10 кВ, диапазон рабочих температур – от -60 до 200°C.

Если пластичность материала Gap Pad не достаточно высока для требуемого применения, можно использовать композиты группы Gap Filler. Это жидкие материалы, состоящие из двух компонентов, которые при смешивании полимеризуются, образуя монолитное покрытие с высокой теплопроводностью. В этом случае формируется своеобразный полимерный "радиатор", покрывающий все компо-



**Рис.3.** Материал Hi-Flow 625, разработанный для тепловых интерфейсов, требующих электрической изоляции охлаждаемого прибора от кулера



**Рис.4.** Применение материала Gap Pad VO (а) и Gap Pad VO Soft (б)

ненты на плате. Полимеризация в зависимости от типа материала происходит в течение нескольких часов при комнатной температуре либо в течение 5 мин при 100°C. Таким образом, без силового воздействия на элементы печатной платы, на ее поверхность наносится теплопроводное и одновременно электроизолирующее покрытие, толщина которого может быть сколь угодно мала. Материалы Gap Filler выпускаются как на основе кремнийсодержащих компонентов, так и без них. У них отличные теплопроводные и электроизолирующие характеристики, высокая механическая и химическая устойчивость как при высоких (до 200°C), так и при низких (-60°C) температурах. Важно также отметить, что при необходимости поверхность печатной платы легко очищается от этих материалов.

Следует упомянуть еще два продукта компании Bergquist. Это самоклеящийся материал Bond Ply и термопрокладки Softface. Материал Bond Ply 100 представляет собой стекловолоконную основу с нанесенными с обеих сторон акриловыми клеевыми слоями. Значения его термосопротивления и пробивного напряжения те же, что и у материалов типа Sil-Pad. Вместе с тем, продукты Bond Ply обладают высокой адгезией, их особенно удобно применять для крепления радиатора к процессору компьютера или к печатной плате силового модуля.

Термопрокладки Softface на полистироловой основе предназначены для монтажа на поверхность радиаторов или иных устройств методом горячей штамповки, что весьма удобно при серийном производстве. Охлаждаемый прибор можно непосредственно крепить к радиатору с нанесенным слоем Softface, не пользуясь теплопроводными пастами или изоляционными материалами. Термопрокладки Softface выпускаются в двух модификациях – с электроизоляционными свойствами (на напряжение пробоя 2,5 и 4,0 кВ) и электропроводящие.

Все материалы компании Bergquist отвечают требованиям коммерческих и военных стандартов США и могут применяться в любых системах – от бытовых до оборудования военного назначения.

Компания Bergquist принимает участие в таких международных экологических программах по снижению содержания вредных веществ в выпускаемой продукции, как RoHS (Restriction of Hazardous Substances – ограничение содержания веществ, опасных для здоровья). В полном соответствии с положениями этой международной программы Bergquist выпускает продукцию, не содержащую экологически вредных веществ – свинца, ртути, шестивалентного хрома, полибромид-дифенильных эфиров, кадмия и других.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо заметить, что продукция компании Bergquist доступна на российском рынке с 1993 года, во многом благодаря усилиям ее российского дистрибьютора – компании "Золотой Шар ЭК", широкая сеть представительств которой обеспечивает поставки продукции Bergquist во все регионы России и ближнего зарубежья.

**СТ**

Фотографии для статьи предоставлены И.Косныревым