

Теплопроводные материалы компании Bergquist

Задача отвода тепла в электронных устройствах различного назначения была всегда актуальна. Несмотря на последние достижения электроники, связанные главным образом с уменьшением габаритов электронных компонентов, значение этой задачи не уменьшается, а скорее растет. Проблема теплоотвода имеет прямое отношение к надежности, габаритам и другим эксплуатационным и экономическим характеристикам электронных устройств. Известный производитель специальных теплопроводных материалов — американская компания Bergquist — предлагает разработчикам и производителям электронной аппаратуры ряд высококачественных материалов, позволяющих на современном техническом и технологическом уровне реализовать необычные решения проблемы отвода тепла от электронных компонентов.

Владимир Коснырев

vladimirk@zolshar.ru

Быстрое развитие электроники было бы совершенно невозможно без такого же быстрого развития промышленности специальных материалов. Разработка и внедрение новых материалов и технологий в электронике почти всегда направлены на уменьшение габаритов и снижение энергопотребления, что, в свою очередь, приводит к появлению новых потребительских свойств и даже принципиально новых технических направлений в электронике — достаточно вспомнить мобильную телефонию и развитие беспроводных телекоммуникаций, электроприводы с фазоимпульсным управлением и развитие автоматизации и т. п. Поэтому специалисты — разработчики новых электронных устройств — стараются быть всегда в курсе современных технических и технологических достижений в отраслях, связанных с производством материалов для электроники.

Одна из самых важных и сложных задач, решаемых при разработке электронной аппаратуры, — отвод тепла, рассеиваемого электронным устройством. При современной устойчивой тенденции к уменьшению габаритов электронных устройств острота этой проблемы не снижается, а постоянно возрастает тем сильнее, чем больше мощность устройства и чем меньше его физический объем.

Американская компания Bergquist более 30 лет назад начала выпуск нескольких типов теплопроводящих материалов на основе силиконовых полимеров, позволяющих значительно улучшить тепловые режимы электронных устройств и приборов. Сегодня в номенклатуре компании более сотни специальных полимерных и композитных материалов, в производстве которых используются самые современные технологии. Одним из таких материалов является относительно недавно разработанный компанией, но уже довольно широко применяемый материал Thermal Clad.

Этот материал, подобно фольгированным стеклотекстолитам типа FR4, предназначен для изготовле-

ния печатных плат. Однако, в отличие от FR4, Thermal Clad имеет структуру, состоящую не из двух, а из трех слоев. Эта структура получается в технологическом процессе горячего прессования (английский термин Clad означает соединение двух и более материалов горячим прессованием; аналогично: clad metal — биметалл). Полное зарегистрированное название материала: Thermal Clad Insulated Metal Substrate (IMS®) — «Термал Клад на изолированной металлической подложке». Композит Thermal Clad, материал его диэлектрического слоя и технология их производства запатентованы в США и других странах.

Композитный материал Thermal Clad представляет собой трехслойную структуру следующего состава:

- первый, верхний слой — токопроводящий — медная фольга, служащая для вытравливания (или фрезерования) токопроводящих дорожек печатной платы;
- второй, средний слой — диэлектрик; изолирующий токопроводящие дорожки от третьего, нижнего слоя;
- третий, нижний слой — теплоотводящий — металлическая пластина для отвода тепла от токоведущих дорожек и компонентов, размещенных на поверхности печатной платы. Такая структура позволяет эффективно отводить тепло от всей площади печатной платы и компонентов на ней. Толщина токопроводящей медной фольги варьируется по желанию заказчика от 35 до 356 мкм, то есть может достигать 0,356 мм, что особенно важно для компактных устройств с большими плотностями тока в токоведущих дорожках.

Второй или средний слой изготовлен из особого диэлектрика с высокой теплопроводностью толщиной от 75 до 150 микрон. В материале Thermal Clad этот слой является ключевым, так как он соединяет первый слой с третьим, базовым слоем. Типы диэлектрика также варьируются по желанию заказчика.

Теплоотводящий, или базовый слой в материале Thermal Clad представляет собой алюминиевую или

медную пластину толщиной от 0,5 до 3,2 мм. Компания предлагает на выбор несколько марок алюминия и меди, из которых изготавливается теплоотводящий слой (пластина). Кроме этого, для приложений, требующих повышенной жесткости печатных плат, выпускается Thermal Clad со стальной базовой теплоотводящей пластиной.

Все материалы Thermal Clad могут поставляться со специальными покрытиями поверхностей. Например, токопроводящий слой (фольга) может иметь никелевое, оловянное или золотое покрытие по выбору или не иметь никакого покрытия. Базовый слой также может иметь различные покрытия, например, защитные — для защиты поверхности теплоотвода от повреждения в агрессивной среде в процессе травления или комбинированные: защитное поверх никелевого покрытия и т. п.

Материал Thermal Clad выпускается с различными типами диэлектрика, например, с такими как HT/LTI (High Temperature/Low Thermal Impedance — высокотемпературный / с низким полным тепловым сопротивлением); MP (Multi-Purpose — широкого применения); CML (Circuit Material Laminate — слоистый материал типа гетинакса) и др. Все типы диэлектрика обладают довольно низким тангенсом угла диэлектрических потерь, что позволяет использовать Thermal Clad на частотах до 150 МГц.

Диэлектрический слой с диэлектриком типа HT материала Thermal Clad состоит из смеси полимера со специальной керамикой, что обеспечивает ему отличные диэлектрические свойства и очень низкое тепловое сопротивление. Полимер выбирается исходя из его диэлектрических свойств, а керамический наполнитель улучшает теплопроводность материала. Кроме того, эта смесь имеет отличные адгезивные свойства и коэффициент температурного расширения, приблизительно такой, как у токопроводящего слоя и базового слоя. Удельное объемное сопротивление материала не менее 10^{14} Ом·см. При толщине диэлектрика 75 мкм допустимое рабочее напряжение между первым и третьим слоями составляет не менее 5,5 кВ, что вполне достаточно для большинства приложений.

Диэлектрики типа MP представляют собой полимерную пленку, обладающую приблизительно теми же свойствами, что и диэлектрик HT, но имеющую несколько меньшую рабочую температуру. Если у диэлектрика HT рабочая температура достигает 145 °С, то у диэлектриков MP эта температура не более 135 °С.

Материалы Thermal Clad с диэлектриком CML имеют рабочую температуру до 130 °С. Этот диэлектрик представляет собой стеклотекстолит, изготовленный по особой технологии, которая позволяет обеспечить его надежное сцепление с металлической подложкой (базового слоя) с одной стороны и токопроводящей медной фольгой — с другой.

Все материалы группы Thermal Clad могут выдерживаться в конвекционной печи до 6 минут при температуре до 263 °С, что позволяет использовать их в технологических процессах автоматической сборки печатных плат.

Материалы Thermal Clad, помимо эффективного отвода тепла от печатной платы, позволяют решить и другие проблемы в разработке и производстве электронных устройств. На печатной плате с теплоотводом, изготовленной из материала Thermal Clad, можно размещать без специальной изоляции активные элементы (мощные транзисторы и микросхемы) с различной полярностью на теплоотводящем выводе. Например, на одной плате можно поместить биполярные транзисторы структуры *p-n-p*, имеющие на коллекторе отрицательное напряжение питания, и *n-p-n* с положительным напряжением питания коллектора. Это способствует увеличению плотности монтажа при значительном повышении надежности электронных устройств, упрощает сборку изделия, снижает стоимость производства. Применение материала Thermal Clad позволяет также использовать различные конструктивные элементы для отвода тепла. Для этого печатная плата на основе Thermal Clad может крепиться прямо на них без применения каких-либо специальных изолирующих прокладок, например, на металлическую стенку корпуса электронного устройства, автомобиля или летательного аппарата. Кроме того, такие печатные платы сами могут служить элементами конструкции электронного устройства, учитывая их прочность и жесткость.

Thermal Clad имеет еще одно важное положительное качество, о котором также необходимо рассказать. Печатные платы, изготовленные по обычным технологиям из фольгированных текстолитов или аддитивным методом (осаждением), обладают неприятным свойством: при нагревании у них происходит отслаивание токопроводящих дорожек, которое часто приводит к их окислению и обрыву. Температура нагрева, при которой может произойти отслаивание, колеблется от 100 до 160 °С, время нагрева может быть от нескольких минут до нескольких сотен часов. При этом у печатных плат, выполненных методом травления или фрезерования из фольгированных материалов, отслаиваются дорожки, а у печатных плат, выполненных аддитивным способом, могут отслаиваться и осыпаться дорожки, и металлизация отверстий. Thermal Clad совершенно свободен от этих недостатков, так как диэлектрики, используемые в материале Thermal Clad, обладают высокой степенью адгезии к медным и алюминиевым сплавам. Более того, прочность соединения слоев в трехслойной композиции Thermal Clad при правильной эксплуатации со временем только возрастает.

В отличие от вышеописанного трехслойного композита Thermal Clad, материал Thermal Clad Bond Ply представляет собой двухслойный композит, в котором отсутствует слой фольги, а в качестве диэлектрика применяется эластичный диэлектрик Bond Ply («Бонд Плай»), обладающий высокой теплопроводностью и адгезией к обычным текстолитам, например, к стеклотекстолиту FR4 и композитам на основе эпоксидных смол. Thermal Clad Bond Ply предназначен для использования совместно с обычными печатными платами, в том числе многослойными, изготовленными из стеклотекстолита, с которыми

пластина материала Thermal Clad Bond Ply может быть легко смонтирована. Теплоотводящие подложки из материала Thermal Clad Bond Ply можно также соединять с многослойными печатными платами с помощью обычных промышленных ламинаторов. Необходимое условие при применении материала Thermal Clad Bond Ply — это обеспечение хорошего теплового контакта материала и печатной платы.

Thermal Clad также может успешно заменять композиции из хрупких керамических материалов в толсто пленочных технологиях.

Для электронных устройств, работающих в неблагоприятных условиях при высокой температуре с большими токами и напряжениями, например, промышленного освещения, мощных источников питания и т. п., выпускаются специальные материалы Thermal Clad HTV. По своей структуре они аналогичны другим материалам Thermal Clad, но имеют улучшенные технические характеристики: теплопроводность диэлектрика до 2,2 Вт/м·К и напряжение пробоя не ниже 6 кВ при толщине диэлектрического слоя 150 мкм. Толщина медной фольги в материалах Thermal Clad данной серии — от 140 до 356 мкм. Более толстая фольга позволяет не только снизить сопротивление токоведущих дорожек (при заданной ширине дорожки), но и несколько увеличивает теплоотдачу.

Как и описанные выше материалы, Thermal Clad HTV по желанию заказчика также могут поставляться с металлизированным покрытием медной фольги оловом, никелем или золотом или комбинированным покрытием никель-золото.

Замечательные свойства материалов Thermal Clad делают их все более популярными у разработчиков и производителей.

Повышение степени интеграции микросхем, увеличение мощности выходных каскадов усилителей и переключающих приборов с одновременным уменьшением их габаритов приводят к увеличению количества источников тепла внутри корпусов современных электронных устройств. Чем больше горячих компонентов находится внутри корпуса, тем сильнее нагревается находящийся в нем воздух. Это снижает эффективность работы теплоотводящих элементов и заставляет искать новые технологические подходы к проблеме отвода тепла в электронике.

От конструкций теплоотводящих элементов зависят эффективность отвода тепла, габариты и, конечно, надежность электронных устройств. Современные теплоотводы могут представлять собой сложные конструкции, составленные из радиаторов, воздуховодов, вентиляторов и разного рода прокладок из специальных материалов, улучшающих теплоотдачу. В большинстве современных электронных устройств в основном применяется воздушное охлаждение, но в последнее время все чаще можно встретить конструкции с жидкостным охлаждением, а также с модулями Пельтье.

В любом случае, независимо от способа охлаждения, для отвода тепла от электронного компонента необходимо использование радиатора, имеющего непосредственный тепловой контакт с охлаждаемым электронным

компонентом или контактирующего с ним через прокладки из специальных материалов. Обладая площадью поверхности во много раз большей, чем у охлаждаемого компонента, радиатор усиливает теплообмен с окружающей средой. Главное при использовании радиаторов, как уже говорилось, — это обеспечить хороший тепловой контакт с охлаждаемыми поверхностями, в противном случае тепловое сопротивление охлаждающей системы резко увеличивается и эффективность теплоотвода падает.

Охлаждаемые электронные компоненты (например, микросхемы, транзисторы, тиристоры, диоды и др.), как правило, имеют не очень ровные и гладкие поверхности. Для обеспечения надежного теплового контакта с такими поверхностями между ними и радиаторами применяются специальные материалы, которые заполняют неровности на поверхностях и обеспечивают хороший тепловой контакт и максимальную теплопроводность системы. В качестве таких материалов к настоящему времени наибольшее распространение получили специальные пластичные смеси — теплопроводящие пасты, или, как их еще называют, термопасты. Они изготавливаются на жидкой силиконовой основе с наполнителем из теплопроводящего материала, например, окисла металла (цинка), металлической пудры и т. п. Их главные преимущества — в простоте использования и низкой стоимости, а основной недостаток в том, что пасты со временем теряют свои свойства, высыхают, и тепловой контакт ухудшается. Лишенные таким образом необходимого теплоотвода электронные компоненты выходят из строя. Вдобавок, термопасты не обеспечивают электрической изоляции между охлаждаемым компонентом и радиатором, что часто бывает необходимо, когда несколько мощных разнополярных приборов (например, транзисторов) необходимо установить на один, а не несколько радиаторов.

Кроме термопаст для улучшения теплового контакта применяются твердые материалы, такие как слюда, графит, керамика, фторопласт и другие.

Слюда обладает хорошими электроизолирующими свойствами, но хрупка и очень нетехнологична. Диэлектрическая проницаемость слюды ограничивает ее применение на высоких частотах из-за возможности возникновения паразитных емкостей между корпусом компонента и радиатором. Вдобавок, работа со слюдой требует применения специальных защитных средств.

Графит используется в виде тонких пластин. Графитовые прокладки выпускаются в различных конфигурациях, они часто поставляются вместе с радиаторами для процессоров в микрокомпьютерах. Такие радиаторы, как правило, поставляются в комплекте с кулером — специальным вентилятором. Графит обладает высокой теплопроводностью, обеспечивает достаточно хороший тепловой контакт, но очень хрупок и не обладает электроизоляционными свойствами.

Керамические прокладки имеют высокую теплопроводность и отличные электроизоля-

ционные свойства, но они хрупки и очень дороги. Кроме того, их особенность в том, что они производятся только для конкретных компонентов, их нельзя вырезать под нестандартные размеры.

Фторопластовые пленки имеют отличные электроизоляционные свойства, они гибкие, легко режутся. Однако их твердость не позволяет создать хороший тепловой контакт, особенно если одна или обе поверхности неровные, имеют шероховатости и микродефекты. Фторопласт плохо клеится, и к тому же пленки из фторопласта довольно дороги.

Принимая во внимание приведенный краткий перечень достоинств и недостатков теплопроводных материалов, в той или иной степени еще применяемых сегодня, можно составить список основных требований, которым должны отвечать современные материалы, предназначенные для отвода тепла от электронных компонентов.

Эти материалы должны:

- иметь хорошую теплопроводность;
- иметь высокую электропрочность;
- быть эластичными;
- легко обрабатываться, разрезаться;
- выпускаться с клеевым слоем с одной или двух сторон по желанию заказчика;
- быть экологически чистыми, не выделять вредные вещества при нагреве;
- иметь доступную цену.

Иными словами, современные материалы должны совмещать в себе лучшие свойства нескольких совершенно разных материалов, к тому же быть недорогими и безопасными.

Специалисты компании Bergquist отлично справились с этой задачей, начав выпуск таких материалов около 25 лет назад. Сегодня компания Bergquist выпускает теплопроводные материалы не просто высокого качества, а такие, которые позволяют конструкторам принципиально иначе и на более высоком техническом уровне решать проблему отвода тепла в электронике.

Первым в этом ряду стоят материалы семейства Sil-Pad, основное назначение которых — использование в качестве теплопроводящих и электроизолирующих прокладок между радиатором и охлаждаемым компонентом, то есть в тех местах, где обычно применялись термопасты и керамические прокладки. Sil-Pad представляет собой стекловолоконную основу, заполненную силиконовой резиной; Sil — сокращение от слова Silicone («силиконовый»), то есть изготовленный на основе кремнийорганического соединения; Pad — «прокладка».

Стекловолоконная основа придает прочность материалу, одновременно увеличивая его теплопроводность, а силиконовая резина заполняет неровности микрорельефа поверхностей, увеличивая при этом теплообмен. Материал не токсичен, не растворяется в спирте и ацетоне, устойчив к воздействию других растворителей. Одно из обычных применений материалов Sil-Pad — использование его для размещения нескольких силовых разнополярных приборов (например, биполярных транзисторов с *p-n-p* и *n-p-n* структурами) на одном теплоотводящем элементе (радиаторе).

Ряд материалов Sil-Pad состоит из двух десятков наименований. Наибольшую известность и популярность в нашей стране получил Sil-Pad 400, имеющий отличные характеристики: при толщине 0,007 дюйма (0,18 мм), теплопроводность 1,0 Вт/м·К, электропрочность 3,5 кВ, диапазон рабочих температур от -60 до +180 °С.

Материалы Sil-Pad выпускаются толщиной от 0,13 до 0,38 мм, имеют электропрочность от 1,7 до 6,0 кВ и теплопроводность от 0,9 до 3,0 Вт/м·К.

Компания Bergquist выпускает специальные материалы Sil-Pad для различных приложений, например, Sil-Pad 1750 и Sil-Pad 1950 предназначены для работы в условиях повышенной влажности, а Sil-Pad 800-S и Sil-Pad 900-S обеспечивают низкое тепловое сопротивление (соответственно 0,1 и 0,2 °С·дюйм²/Вт) даже при слабом прижиге корпуса прибора к радиатору, например, с помощью пружинной клипсы. Для приложений, где требуется повышенная прочность материала, Bergquist выпускает материалы Sil-Pad K-4, Sil-Pad K-6 и Sil-Pad K-10. В отличие от материалов Sil-Pad на основе стекловолокна, 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 °С·дюйм²/Вт. Но, в отличие от хрупких керамических аналогов, он очень пластичен и значительно дешевле!

Для приложений, где нельзя применить кремнийорганические соединения типа Sil-Pad, например, в условиях повышенного радиационного или радиочастотного излучения, Bergquist выпускает группу материалов Poly-Pad. В этих материалах, как и в материалах Sil-Pad, в качестве основы использовано стекловолокно или диэлектрическая пленка, но силиконовая резина заменена полистиролом. Для приложений, не требующих электрической изоляции охлаждаемого компонента от радиатора, компания Bergquist разработала материалы Q-Pad II и Q-Pad 3. Эти материалы применяются там, где применяли теплопроводную пасту. Первый представляет собой алюминиевую фольгу толщиной 38 мкм, покрытую с двух сторон теплопроводным слоем силиконовой резины, второй — полимер с графитовым наполнителем на стекловолоконной основе.

Все вышеописанные материалы поставляются в различных видах: в рулонах, в листах, в виде вырубленных форм, соответствующих термоконтактным поверхностям более ста наиболее распространенных корпусов полупроводниковых приборов, например, DO-4, DO-5, TO-5, TO-18, TO-66, TO-126, TO-220, TO-247 и т. п. На них по желанию заказчика с одной или с двух сторон может быть нанесен клеевой слой, упрощающий монтаж прибора.

Для СВЧ-приложений компания Bergquist предлагает специальные Sil-Pad пластины, называемые Sil-Pad Shield. Это медные пластины, ламинированные с двух сторон материа-

лом Sil-Pad 400 или Sil-Pad 1000. Медная пластина имеет вывод для заземления. Sil-Pad Shield незаменимы, когда необходимо снизить помехи от мощных СВЧ-элементов. Если в этом случае использовать традиционные изоляторы, например слюду, то между прибором и радиатором образуется паразитная электрическая емкость до 100 пФ. Применение Sil-Pad Shield позволяет в этом случае резко снизить уровень паразитного излучения.

Материалы группы Hi-Flow — это материалы нового поколения продуктов компании Bergquist. В их состав включен полимер, остающийся в твердом состоянии до температуры 65 °С. При температуре выше 65 °С полимер размягчается и растекается по контактной поверхности, заполняя при этом все ее неровности. В результате тепловое сопротивление сильно уменьшается. Так, Hi-Flow 105 имеет термосопротивление 0,32 °С·см²/Вт. Основой этого материала служит алюминиевая фольга. Он предназначен для приложений, не требующих электрической изоляции. Если же изоляция необходима, то 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 особому теплопроводящему изолирующему полимеру, материал чрезвычайно легко деформируется, плотно прилегая ко всем компонентам на печатной плате. Материалы Gap Pad можно использовать для отвода тепла от печатной платы целиком. Эти материалы позволяют использовать в качестве теплорассеивающего элемента (радиатора) металлический корпус устройства. Материалы данной группы различаются теплопроводностью, толщиной, необходимым усилием прижима к поверхности платы. Для конструкторской оценки необходимого усилия прижима для каждого материала этой группы указывается величина модуля Юнга. Некоторые из материалов Gap Pad включают в себя усиливающий стекловолоконный слой. Очевидно, что с увеличением толщины тепловое сопротивление этих материалов несколько возрастает, однако тем лучше они заполняют пустоты неровной поверхности. Напряжение пробоя материалов Gap Pad составляет от 3 до 10 кВ, диапазон рабочих температур — от -60 до +200 °С.

В случаях, когда пластичности материалов Gap Pad оказывается недостаточно, можно использовать материалы группы Gap Filler. Это жидкие материалы, состоящие из двух компонентов, которые при смешивании полимеризуются, образуя монолитное покрытие с высокой теплопроводностью. В этом случае образуется своеобразный полимерный «радиатор», покрывающий все компоненты на плате. Полимеризация происходит в течение нескольких часов при комнатной температуре, либо в течение десяти-пятнадцати минут при 100 °С в зависимости от модификации материала. Таким образом, не оказывая силового воздействия на элементы печатной платы, можно покрыть ее поверхность теплопроводным и одновременно электроизолирующим

материалом, при этом толщина покрытия может быть сколь угодно мала. Материалы Gap Filler выпускаются как на силиконовой основе, так и без кремнийсодержащих компонентов. У них отличные теплопроводные и электроизолирующие характеристики, высокая механическая и химическая устойчивость как при высоких (до 200 °С), так и при низких (-60 °С) температурах. Важно отметить, что при необходимости поверхность печатной платы легко очищается от нанесенного материала Gap Filler.

Необходимо упомянуть еще один продукт компании Bergquist. Это самоклеящиеся материалы серии Bond Ply. Материал Bond Ply 105 представляет собой стекловолоконную основу с нанесенными с обеих сторон акриловыми клеевыми слоями. При термосопротивлении и пробивном напряжении, как и у материалов типа Sil-Pad, продукты Bond Ply обладают высокой адгезией и удобны при

креплении радиатора к процессору компьютера или к печатной плате силового модуля.

Все материалы, выпускаемые компанией Bergquist, отвечают требованиям коммерческих и военных стандартов США и могут применяться в любой области — от бытовых устройств до военной техники. Материалы компании Bergquist способны удовлетворить самые высокие требования разработчиков и технологов радиоэлектронной аппаратуры. Подтверждением этому служат рекомендации мировых лидеров в производстве электроники, таких, например, как AMD, Intel, IR и других. Российские поставщики OEM-компонентов для сборки компьютеров уже хорошо знают марку Bergquist.

Компания Bergquist принимает участие в международных экологических программах по снижению содержания вредных веществ в выпускаемой продукции, таких, например, как RoHS

(Restriction of Hazardous Substances — ограничение содержания веществ, опасных для здоровья). В полном соответствии с положениями этой международной программы компания Bergquist выпускает продукцию, не содержащую таких экологически вредных веществ, как свинец, ртуть, шестивалентный хром, полибромид-дифенильные эфиры, кадмий и др.

Литература

1. Thermally Conductive Interface Materials for Cooling Electronic Assemblies. Sil-Pad Selection Guide. The Bergquist Company, 2007.
2. Мэтьюс Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004.
3. Композиционные материалы / Под. ред. Л. Браутманна. Т. 1–8. М.: Мир, 1978.
4. www.bergquist.com