

# Поведение керамических DBC-субстратов при повреждении:

## иллюстрация дефектов, характеристики и факторы влияния

**Субстраты DBC (direct bonded copper) используются в качестве подложек в производстве силовой электроники. За счет образования эвтектики между медью и оксидом алюминия создается сплошное соединение обоих материалов. Вследствие различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) возможно разрушение субстрата в виде «раскола ракушки» при циклической температурной нагрузке. Образование трещин и причины их возникновения были детально исследованы. Это позволило прийти к выводу, что место возникновения трещины может быть изменено с помощью модификации топологии и состояния субстрата после старения.**

**Михаэль Гюнтер**  
(Michael Günther)

Michael.Guenther3@de.bosch.com

**Мартин Риттнер**  
(Martin Rittner),  
к. т. н.

**Вольфганг Нюхтер**  
(Wolfgang Nüchter),  
к. т. н.

**Клаус-Юрген Вольтер**  
(Klaus-Jürgen Wolter),  
профессор, д. т. н.

**Перевод: Андрей Новиков**

andrej.novikov@uni-rostock.de

### Введение

При разработке модулей силовой электроники с высокой температурной нагрузкой и большими мощностями потерь увеличивается значение возможности отвода тепла. В типичных модулях используются керамические подложки. Так как данные материалы имеют ограниченные возможности теплоотвода, целесообразно уменьшение их толщины. Однако тем самым увеличивается вероятность нарушений их структуры (отказов). В данной статье показано, как могут происходить нарушения в DBC-субстратах вследствие циклической температурной нагрузки.

При изготовлении DBC-субстратов используется свойство образования эвтектики между медью/смесью оксидов меди и оксида алюминия. При установлении определенной атмосферы в печи с температурным интервалом от 1065 до 1073 °С и образовании шпинеля из меди и алюминия может быть создано сплошное соединение между керамической подложкой и медной пластиной [1, 2]. При охлаждении происходит деформация субстрата за счет различных ТКЛР обоих материалов.

В связи с этим обратная сторона субстрата также соединяется с медной пластиной. Тем самым создается сэндвич из материалов медь – оксид алюминия – медь. Структуры проводников могут быть изготовлены с помощью маскирования и травления. В результате создается структурированная подложка, в которой керамический субстрат служит изолятором и обеспечивает механическую прочность.

### Механизмы отказов

Изначальное напряженное состояние и изменение нагрузки по напряжению во время термоциклирования ведут к докритическому росту трещин в керамике. Увеличивается размер пор и дефектов в областях, подверженных нагрузке вблизи поверхности.

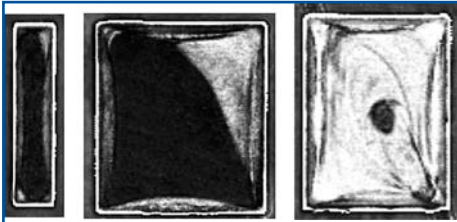
Дальнейшая нагрузка от термоциклирования ведет к росту микроскопических трещин. Трещины начинают распространяться в керамике под определенным углом. При этом изменяется форма трещин от состояния II (срез) до состояния I (натяжение), и как следствие изменяется направление роста трещин.

Этот механизм получил название «раскол ракушки», он представлен на рис. 1. Следствие раскола — отрыв проводников и части керамики, что ведет к прерыванию термического контакта компонентов с теплоотводом. Еще одно следствие — изгиб субстрата, так как нарушается равновесие сил между верхней и нижней сторонами.

После разрушения большей части площади соединения рост трещины замедляется. Как правило, небольшая площадь контакта, которая, однако, может быть разрушена при небольшой механической нагрузке (например, при вибрации). Это общая картина данного механизма отказа. При детальном рассмотрении этот механизм выглядит сложнее, как это представлено на рис. 2. На этом рисунке показаны снимки частично разрушенных субстратов, сделанные с помощью УЗ-микроскопа. Разрушение в керамике представлено белым или светлым цветом, а остаточная площадь контакта — черным. Края присоединенного слоя меди выделены в этих снимках белым цветом, и хорошо видно,

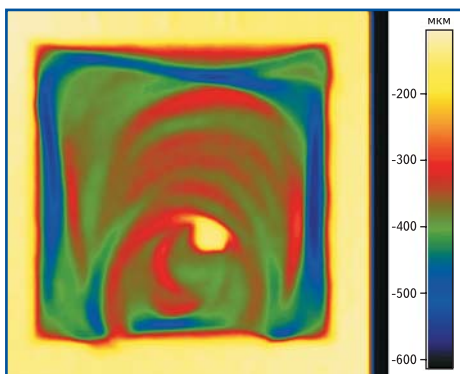


**Рис. 1.** Поперечный срез подложки медь – керамика – медь [1]: начало трещины вблизи поверхности керамики после нескольких термоциклов (слева), распространение трещины после продолжительного термоциклирования (справа)



**Рис. 2.** Снимки УЗ-микроскопом роста трещин в субстратах DBС с различной топологией и различными состояниями повреждения. Разрушение представлено светлым цветом, а остаточная площадь контакта — темным

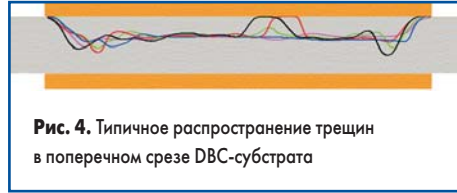
что повреждения расположены исключительно под медными контактными площадками. При детальном рассмотрении рост трещин может быть описан следующим образом. Сначала происходит докритический рост трещин в керамике. Они принимают микроскопический размер под краями медного слоя. Это первые трещины, которые заметны в микрошлифе. Трещины растут под медными структурами, так как изменяется их форма от состояния II до состояния I. К этому моменту остаточная площадь контакта имеет сходство с «подушкой». Все образцы, которые были повреждены вследствие термомеханических испытаний с большой нагрузкой, ведут себя подобным образом. Причиной может являться то, что на углах медной контактной площадки имеются три свободные поверхности, а на краях площадки — только две. Поэтому медный слой над углами может иначе реагировать на вызванную повышением температуры деформацию, чем медный слой на краях. Далее начинается рост трещин под углами медных площадок. В связи со статическим поведением керамического материала рост трещин на этом этапе не всегда происходит симметрично (рис. 3).



**Рис. 3.** Глубина разрушения в полностью разрушенном DBС-субстрате

После того как разрушена большая часть поверхности контакта (что может быть обозначено как катастрофический дефект), уменьшается скорость роста трещин и сохраняется небольшая остаточная площадь контакта. При небольшой механической нагрузке образец может быть разрушен на две части.

На рис. 4 показаны типичные направления роста трещин. Под правым и левым краями медного слоя трещина может расти до 2/3 толщины керамического субстрата. За ней следуют трещина глубиной около 1/3 толщины субстрата. Как уже было описано, в середине субстрата может находиться область, в которой нет трещин.



**Рис. 4.** Типичное распространение трещин в поперечном срезе DBС-субстрата

ет трещина глубиной около 1/3 толщины субстрата. Как уже было описано, в середине субстрата может находиться область, в которой нет трещин.

### Причины отказов

Все субстраты ведут себя одинаково при получении повреждения. В образцах с двусторонним симметричным расположением медных структур повреждение после термошока в воздушной атмосфере (–40...150 °С, 30'/30') происходит всегда с одной стороны. Это сторона, которая в процессе изготовления DBС-субстрата была последней соединена с медным слоем.

Такое поведение может иметь три различные причины:

- прочность керамики может быть различной на поверхности, подвергающейся разрушению;
- связующие слои меди и керамики могут различаться, например из-за дефектов соединения (рис. 5);
- из-за наличия двух слоев меди керамический материал может испытывать различную нагрузку.

Сравнительная оценка этих факторов влияния более подробно описана ниже.



**Рис. 5.** Поперечный срез соединения медь – керамика с дефектом соединения

### Прочность керамики

Прочностные характеристики керамических материалов обычно определяются с помощью испытания на изгиб с четырьмя пунктами опоры. Примечательно, что это испытание отображает уровень нагрузки в критической области детали, поверхности или области, близкой к поверхности. Трещина начинается за счет нагрузки на срез в состоянии II. В первой части немецкой промышленной нормы DIN EN 843 [3] предлагается полировать все поверхности образца, чтобы избежать влияния дефектов поверхности. Но поверхность — это место, особенно подверженное возникновению трещин. Поэтому образцы для испытания на изгиб были подготовлены таким образом, чтобы изменения на поверхности, возникающие в ходе процесса соединения, сохранялись. В процессе изготовления керамика целиком покрывается медным слоем, после чего медь полностью стравливается, чтобы получить исходное состояние керамики. И вот тут могут возникать трещины. Образ-

цы были отполированы с двух из четырех боковых сторон для уменьшения влияния поверхностных дефектов на этих сторонах. Затем края были зафиксированы со стороны нагрузки на растяжение для избежания превышения нагрузки [4].

Так как применялась керамика из оксида алюминия с толщиной 630 мкм, то зависимость изгиба образцов от напряжения нелинейная. В связи с этим напряжение разрушения для каждого образца было рассчитано с помощью метода конечных элементов.

Для описания прочности керамики может быть использовано распределение Вейбулла с двумя параметрами. С помощью метода Maximum Likelihood [5] были определены примерные значения прочности при изгибе  $\sigma_0$  и наклона Вейбулла  $m_{corr}$ .

Прочность образцов, разрушенных со стороны, которая была соединена с медным слоем первой, составляет  $\sigma_0 = 427$  МПа. Между образцами, выбранными параллельно (А) и перпендикулярно (Б) к направлению изготовления керамики, практически нет различий.

При разрушении образцов в другом направлении может наблюдаться и другое поведение. Образцы, выбранные по направлению А, имеют характеристики, похожие на характеристики испытанных ранее образцов. Образцы, выбранные по направлению Б, имеют повышенное значение прочности при испытании на изгиб, как это видно по таблице 1.

На этой стороне поверхности керамики был найден марганец. Он мог попасть на нее, например, при перемещении образца в процессе температурной обработки или при изготовлении исходного материала.

Для исключения поверхностного эффекта, вызванного наличием марганца и зависимостью от направления, были изготовлены и испытаны образцы из другой серии. Таким образом, возможно сравнить модифицированную (прошедшую процесс соединения и травления) и необработанную керамику. В таблице 2 представлены результаты испытаний. В данном испытании в образцах в направлении Б также была зафиксирована более высокая прочность. Следовательно, такое поведение не зависит от процесса соединения. Данное свойство материала может быть обусловлено, например, процессом изготовления керамики. Однако этот эффект выражен недостаточно явно, так как доверительные интервалы пересекаются. В связи с использованием различных серий образ-

**Таблица 1.** Скорректированные значения прочности на разрушение  $\sigma_0$  [МПа].

Сравнение обеих сторон керамического субстрата

	Направление А	Направление Б
Сторона, присоединенная первой (после соединения и травления)	423	429
Сторона, присоединенная второй (после соединения и травления)	421	477

**Примечание.** Образцы для испытания на изгиб были изготовлены из материала в направлении А и Б. Образцы испытывались на изгиб до разрушения в направлении первой и последней сторон, соединенных с медным слоем.

**Таблица 2.** Скорректированные значения прочности на разрушение  $\sigma_0$  [МПа]. Влияние процесса изготовления

	Направление А	Направление Б
Сторона, присоединенная последней (после соединения и травления)	445	466
Сторона, присоединенная последней (только керамика)	449	460

*Примечание.* Образцы для испытания на изгиб были изготовлены из материала в направлении А и Б. Образцы испытывались на изгиб до разрушения в направлении последней стороны, соединенной с медным слоем.

цов перекрестное сравнение таблиц 1 и 2 нецелесообразно.

Оценка фактора интенсивности распространения трещины  $K_{Ic}$  была проведена на некоторых образцах с помощью испытания на твердость по Виккерсу [6]. Модуль упругости определялся с помощью ультразвука.

В данном случае также не была установлена зависимость от направления до и после процесса соединения при большом разбросе измеренных значений. Обобщая, можно констатировать, что значение прочности керамики с обеих сторон субстрата при испытании на изгиб примерно одинаково. С одной стороны наблюдается незначительное повышение прочности. Процесс изготовления DBC-субстратов не оказывает влияния на такое поведение. На обоих уровнях соединения подложки детектировались дефекты соединения. Меньше дефектов соединения зафиксировано на стороне, которая была соединена первой. Однако это зависит скорее от серии образцов, чем от стороны субстрата. Идентификация данных дефектов может быть проведена с помощью метода ультразвуковой микроскопии. Однако результаты перекрываются маленькими порами и частицами (например, оксидом меди). Дефекты соединения величиной в несколько миллиметров могут быть детектированы как с помощью ультразвуковой, так и оптической микроскопии.

Данные субстраты непригодны для желаемого применения. Следовательно, важны только маленькие дефекты соединения. Разрушение в симметрично структурированных образцах происходит со стороны, которая была соединена последней. С этой стороны также чаще расположены дефекты соединения. Несмотря на это, было установлено, что данные дефекты соединения не сильно влияют на напряженное состояние, особенно при учете механических свойств меди и размера этих дефектов.

#### Нагрузка, обусловленная слоем меди

Известно, что форма медных структур после травления и соотношение толщины меди и керамики оказывают влияние на срок службы деталей. Эти аспекты не описываются в данной статье.

Слои меди последовательно наносятся на обе стороны керамики. Это означает, что слой меди, нанесенный первым, два раза подвергается температурной нагрузке от 1065 до 1073 °С

в процессе изготовления, что ведет к росту более крупных зерен меди и к различию свойств меди на обеих сторонах. Так как во всех образцах рост трещин был обнаружен на стороне, присоединенной второй, различная нагрузка, связанная с медным слоем, представляет собой наиболее вероятную причину подобного поведения при разрушении. В ходе измерения деформации субстратов с одним слоем меди с однократной температурной нагрузкой были установлены более высокие значения изгиба. Из этого следует логичное заключение, что все образцы с симметричной топологией показывают асимметричное поведение при разрушении, так как нагрузка на обеих сторонах различна.

#### Влияние топологии

Очевидно, что большие медные контактные площадки увеличивают абсолютное значение разницы ТКЛР обоих материалов. Чем больше медная площадка, тем меньше количество термоциклов до разрушения подложки. Этот эффект представлен на рис. 6. На данном рисунке показаны контактные площадки с различными размерами, поврежденные при испытании термошоком. Все прямоугольные площадки имеют небольшие повреждения в области углов и краев. Самая большая площадка была дополнительно удлинена на 3,5%, и этого оказалось достаточно для полного разрушения.

Интересен тот факт, что место возникновения трещины может быть изменено при изменении топологии медных структур. При уменьшении размера контактной площадки на стороне субстрата, к которой медный слой был присоединен вначале (например, на стороне, которая не разрушается первой), дефект все равно может возникнуть прежде на этой стороне. Данный эффект может наблюдаться уже при смещении обеих площадей на 300 мкм.

Влияние подобного смещения было протестировано термоциклированием субстратов с квадратными контактными площадками. Результаты испытаний представлены на рис. 7 и 8. В образцах, показанных на рис. 7, смещение краев площадок составляет 300 мкм и повреждение было зафиксировано через 250 тер-



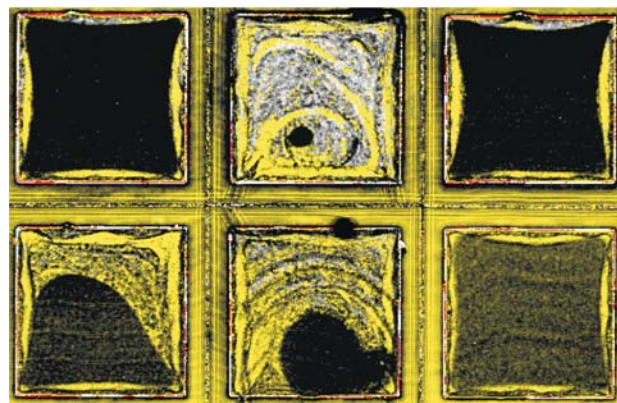
**Рис. 6.** УЗ-снимки образцов с различной геометрией после 200 термоциклов

моциклов. В половине тестовых структур зафиксирован полный отказ. В образцах, показанных на рис. 8, смещение краев площадок составляет 600 мкм. После 250 термоциклов не было зафиксировано полных отказов, в связи с чем дополнительно проводились 50 циклов. В результате после образования дефекта в форме «подушки» происходило дальнейшее разрушение.

Обобщая, можно установить, что правильный выбор смещения топологии верхней и нижней сторон может повысить стойкость при испытании термоциклированием.

#### Прочие факторы влияния

Как было сказано ранее, асимметрия деталей, связанная с процессом изготовления, имеет значение для определения области возникновения первых дефектов. Изменение напряженного состояния медного слоя также может оказывать влияние на повреждения. Если напряжение в медном слое уменьшить за счет продолжительных термоциклов с небольшой амплитудой, в керамике могут возникнуть разрушения с обеих сторон субстрата. Для получения различных напряженных состояний медного слоя некоторые образцы хранились 9 месяцев при комнатной температуре и в дальнейшем подвергались разрушающему испытанию с температурной амплитудой до 160 К. Другие образцы подвергались разрушающему испытанию



**Рис. 7.** УЗ-снимки образцов со смещением верхней и нижней сторон на 300 мкм после 250 термоциклов



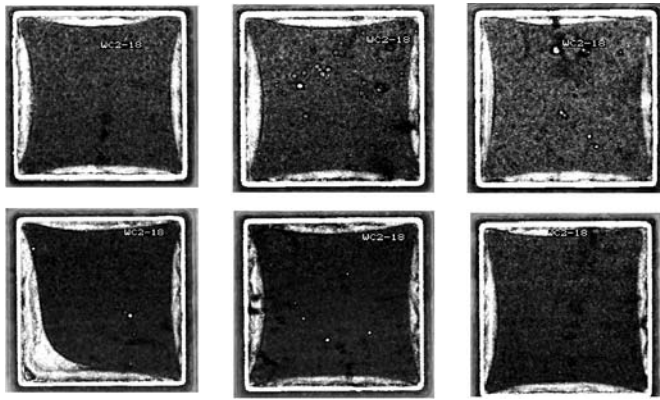


Рис. 8. УЗ-снимки образцов со смещением верхней и нижней сторон на 600 мкм после 300 термоциклов

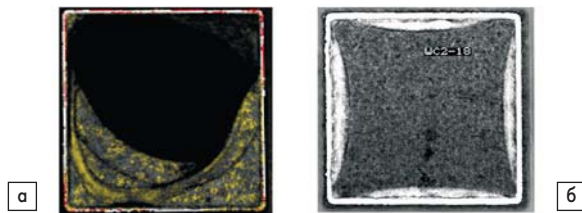


Рис. 9. УЗ-снимки образцов после процесса старения с различным ростом трещин

с температурной амплитудой до 190 К сразу после изготовления. Различное поведение при разрушении показано на рис. 9. В состаренных образцах в комбинации с меньшей температурной амплитудой трещины начинают расти под углами медного слоя (рис. 9а), в то время как в более свежих образцах в комбинации с большей температурной амплитудой — в середине краев медного слоя (рис. 9б).

Было установлено, что наряду с зависимым от температуры изменением напряженного состояния также существует эффект, зависящий от времени. Поэтому были проведены измерения деформации субстратов с медным слоем с одной стороны. Было установлено, что при комнатной температуре происходит существенная релаксация меди.

Для исследования поведения меди при релаксации провели дополнительный эксперимент. Испытанию термоциклированием были подвергнуты несколько образцов после хранения — при комнатной температуре и для сравнения несколько образцов сразу после изготовления. К удивлению, первыми отказали субстраты, изготовленные ранее и прошедшие предварительное старение, что ведет к предположению о том, что во время старения изменяется не только медный слой субстрата.

#### Механизмы повреждения

Наблюдались два механизма. Керамический материал находится после изготовления в напряженном состоянии, которое ведет к докритическому росту трещин, особенно под углами и краями медного слоя. Одновременно начинается релаксация меди, что, в свою очередь, ослабляет причину роста трещин. Прочность керамики в отдельных нагруженных областях уменьшается в зависимости от процесса ре-

лаксации меди. Следовательно, нельзя исходить из измеренной до этого прочности керамики на разрушение при изгибе без учета процесса обработки материала (температура, время хранения).

#### Заключение

При изготовлении DBC-субстратов с симметричной топологией на обеих сторонах повреждение при испытании термошоком происходит преимущественно на одной стороне. Причина — различная нагрузка, вызванная слоями меди. Данное поведение обусловлено процессом изготовления. Различные значения прочности керамики вблизи модифицированных в процессе изготовления поверхностей были исключены после испытаний на разрушение при изгибе.

На стойкость к термоциклированию может оказывать влияние как размер контактных площадок, так и смещение топологии верхней и нижней сторон субстрата относительно друг друга. Поведение при разрушении более сложное, чем это описано в литературе. Термоциклированием с большой температурной амплитудой были вызваны глубокие трещины, которые возникают в других точках субстрата, нежели при термоциклировании с меньшей температурной амплитудой и другим напряженным состоянием меди.

Испытание DBC-субстратов обычно проводится с помощью термоциклирования с большой амплитудой для сокращения времени тестирования. Это может изменить место возникновения возможного повреждения. Не исключено, что это также усиливает асимметрию, вызванную процессом изготовления. Возможное решение — проводить испытания субстратов с меньшей температурной амплитудой.

*Примечание.* Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen, 2006, № 11, Германия).

#### Литература

1. Schulz-Harder J. Keramische Substratmaterialien für Leistungsmodule // SMT/ES&S/Hybrid 97, Surface Mount Technology, Electronic Syst. & Solutions Technol., Circuits & Tools, Hybrid & Adv. Packaging Technol., 1997.
2. Schulz-Harder J. Zuverlässigkeit und Integration von Leistungsmodulen für die Weitverkehrstechnik. Teilprojekt "Weiterentwicklung und Prozessoptimierung der Aluminiumnitridsubstrattechnologie für Leistungsmodule", Verbundprojekt "HighModule" (Förderprogramm Mikrosystemtechnik), Berichtszeitraum 1998–2001, Eschenbach, 2002.
3. Deutsches Institut für Normierung e. V. Hochleistungskeramik — monolithische Keramik — mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur. Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit. DIN EN 843-1, 1995.
4. Günther M., Wolter K.-J. Material characterization of substrates for power modules // 29th International Spring Seminar on Electronics Technology, St. Marienthal, Germany (10–14 May 2006).
5. Deutsches Institut für Normierung e. V. Hochleistungskeramik — monolithische Keramik — mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur. Teil 5: Statistische Auswertung. DIN EN 843-5, 1997.
6. Ray K. K., Dutta K. A. Comparative study on indentation fracture toughness evaluations of soda-lime-silica glass // British Ceramic Transactions 98(4), 1999.