



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 67.02

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.032



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

Евгений Валерьевич Ермолаев<sup>1</sup>, Илья Александрович Жуков<sup>2</sup>,  
Дмитрий Александрович Ткачев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия

<sup>2,3</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup> genek2011@inbox.ru

<sup>2</sup> gofra930@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0173-4308>

<sup>3</sup> d.tkachev11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1969-2927>

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс образования микротрещин металлокерамических плат в зоне локализации межслойных переходов, сформированных на основе вольфрамовых двухфракционных металлизационных паст со средним размером частиц 0,9 и 2,0 мкм, обеспечивающих электрическую связь между коммутационными слоями корпусов микросхем. Проведено исследование влияния «форм-фактора» межслойных переходов, их структуры и плотности размещения на процесс трещинообразования металлокерамических плат. Выявлен размерный эффект прямопропорциональной зависимости температурной усадки межслойных переходов от диаметра и плотности их размещения на плате, оказывающий значимое влияние на трещинообразование плат в зоне межслойных переходов. Установлено, что дисперсность порошкового наполнителя пасты, предназначенной для формирования межслойных переходов, оказывает значимое влияние на степень согласованности температурных усадок керамики и межслойного перехода, а значит и на величину напряжений на границе рассматриваемой системы элементов, которые способствуют образованию микротрещин. Выявлено, что тороидальная форма межслойного перехода, характеризующаяся наличием цилиндрической полости, которая, в свою очередь, является инициатором тангенциальных напряжений в объеме перехода, приводит к образованию микротрещин. При этом сплошные межслойные переходы имеют повышенную устойчивость к температурным воздействиям, но не исключают возможность образования микротрещин на границе «керамика–межслойный переход». Рассмотрены условия образования межслойных переходов тороидальной формы диаметром от 0,1 до 0,5 мм. Установлено доминирующее влияние вязкости металлизационных вольфрамовых паст в диапазоне от 1000 до 70000 Пуаз на возможность образования цилиндрической полости в объеме межслойного перехода. Предложены практические методы предотвращения их появления. Приведена оценка тангенциальных напряжений в объеме межслойных переходов тороидальной формы. Доказано, что образование внутренней полости в центре межслойного перехода при его формировании приводит к уменьшению температурной усадки на 4 % относительно значений температурной усадки сплошного межслойного перехода. Сравнительный анализ температурных усадок проводился для металлокерамических плат, содержащих в своем объеме межслойные переходы от 0,3 до 0,5 мм.

**Ключевые слова:** металлокерамическая плата, металлокерамический корпус, керамика, структура, прочность, корпус микросхемы, межслойный переход, трещина, структурные напряжения, температурная усадка.

**Благодарности:** автор выражает признательность коллегам за помощь в проведении теоретических исследований, постановке необходимых экспериментальных работ, а также за интерпретацию и совместный анализ полученных результатов.

**Для цитирования:** Ермолаев Е. В., Жуков И. А., Ткачев Д. А. Исследование влияния фактора формы межслойных переходов на процесс трещинообразования металлокерамических плат и корпусов микросхем // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 245–257. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/PACQMI>.

Original article

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE FACTOR OF INTERLAYER TRANSITIONS ON THE PROCESS OF CRACKING OF METAL-CERAMIC BOARDS AND CHIP HOUSINGS

Evgeny V. Ermolaev<sup>1</sup>, Iliya A. Zhukov<sup>2</sup>, Dmitriy A. Tkachev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

<sup>2,3</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>1</sup> genek2011@inbox.ru

<sup>2</sup> gofra930@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0173-4308>

<sup>3</sup> d.tkachev11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1969-2927>

**Abstract.** The article considers the process of formation of cracks in ceramic-metal boards in the zone of localization of interlayer vias formed on the basis of tungsten two-fraction metallization pastes with an average particle size of 0.9 and 2.0  $\mu\text{m}$ , which provide electrical connection between the switching layers of microcircuit packages. A study was made of the influence of the "form factor" of interlayer vias, their structure and placement density on the process of cracking of ceramic-metal boards. The size effect of the direct proportional dependence of the temperature shrinkage of interlayer vias on the diameter and density of their placement on the board is revealed, which has a significant effect on the cracking of boards in the zone of interlayer vias. It has been established that the fineness of the powder filler of the paste intended for the formation of interlayer vias has a significant effect on the degree of consistency between the temperature shrinkage of ceramics and the interlayer via, and hence on the magnitude of stresses at the boundary of the system of elements under consideration, which contribute to the formation of microcracks. It was revealed that the toroidal shape of the interlayer via, characterized by the presence of a cylindrical cavity, which in turn is the initiator of tangential stresses in the volume of the transition, leads to the formation of microcracks. At the same time, continuous interlayer vias have an increased resistance to temperature effects, but do not exclude the possibility of microcracks formation at the "ceramics - interlayer via" boundary. The conditions for the formation of interlayer vias of a toroidal shape with a diameter of 0.1 to 0.5 mm are considered. The dominating effect of the viscosity of metallizing tungsten pastes in the range from 1000 to 70000 Poise on the possibility of the formation of a cylindrical cavity in the volume of the interlayer via has been established. Practical methods for preventing their occurrence are proposed. An estimate of tangential stresses in the volume of toroidal interlayer transitions is given. It has been proven that the formation of an internal cavity in the center of the interlayer via, during its formation, leads to a decrease in temperature shrinkage by 4% relative to the values of thermal shrinkage of a continuous interlayer via. Comparative analysis of temperature shrinkage was carried out for cermet boards containing interlayer vias from 0.3 to 0.5 mm in their volume.

**Keywords:** ceramic-metal board, metal-ceramic package, ceramics, structure, strength, microcircuit of package, interlayer transition, crack, structural stresses, temperature shrinkage.

**Acknowledgements:** the author expresses his gratitude to his colleagues for their help in carrying out theoretical studies, organizing the necessary experimental work, also for interpreting and jointly analyzing the results obtained.

**For citation:** Ermolaev, E.V., Zhukov, I.A. & Tkachev, D.A. (2024). Investigation of the influence of the shape factor of interlayer transitions on the process of cracking of metal-ceramic boards and chip housings. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 245-257. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/PACQMI>.

### ВВЕДЕНИЕ

Основная проблема конструкторско-технологической реализации металлокерамических корпусов микросхем с высокой плотностью металлизационных (W, Mo) межслойных переходов состоит в том, что переход как неоднородность в составе керамической платы ведет к появлению внутренних напряжений, превышающих предел прочности керамического материала [1], что в конечном итоге приводит к об-

разованию микротрещин в объеме керамики, которые наглядно представлены на рисунке 1.

Согласно статистических данных японских исследователей и их соавторов [2–7], трещины в объеме корпуса микросхемы иницируются в основном на границе раздела «межслойный переход–керамика». Авторы работ поясняют, что образование трещин в области межслойных переходов вызвано разницей коэффициентов теплового расши-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

рения межслойного перехода и керамической подложки во время эксплуатации самой микросхемы. В связи с этим межслойный переход, сформированный на основе тугоплавких металлических порошков, не дает свободно усаживаться керамическому материалу, в результате чего развиваются структурные напряжения в корпусе микросхемы, которые способствуют образованию трещин на границе системы «межслойный переход–керамическая подложка».

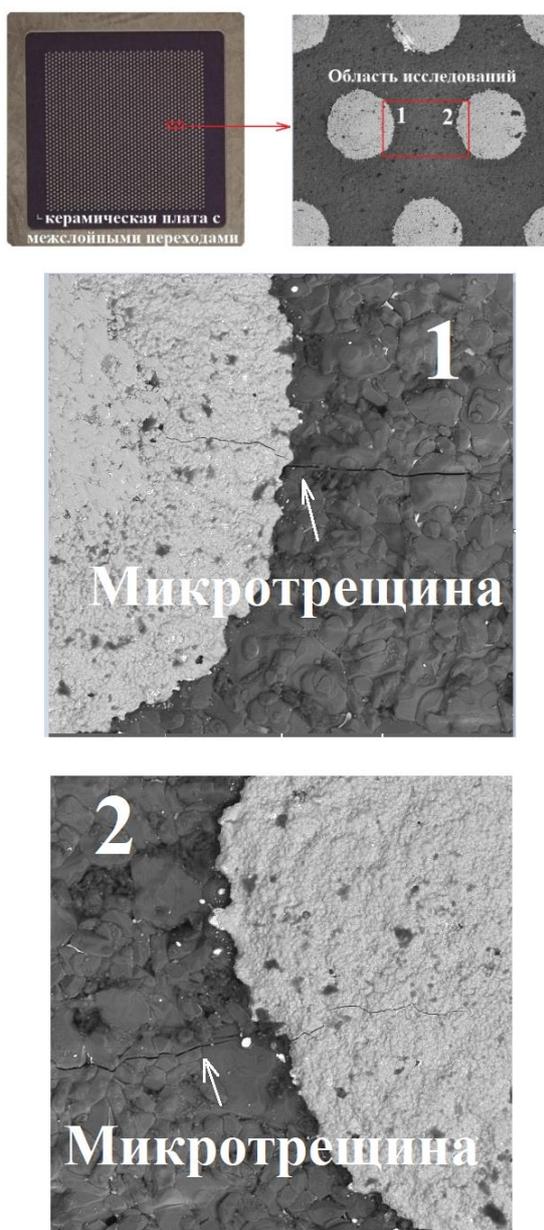


Рисунок 1 – Образование микротрещин керамики в зоне межслойного перехода, сформированного на основе вольфрамовой пасты

Figure 1 – Formation of ceramic microcracks in the zone of interlayer transition formed on the basis of tungsten paste

При этом необходимо отметить, что в последнее десятилетие в микроэлектронной промышленности разработано только несколько основных решений, касающихся диагностики структурных напряжений. Сведения о структурных напряжениях в поверхностных пленках и параллельных слоях многослойной керамики могут быть получены путем измерения сопротивления исследуемой конструкции на изгиб или методом рентгеновской дифракции [2–4]. Данные методы позволяют измерять такие величины, как предел упругости и величину внутреннего напряжения. Основываясь на полученных данных, методом конечных элементов разработано множество моделей для расчета полей напряженности в подобных конструкциях. Однако, как отмечают сами авторы работ [2–4], пока не ясно, как величины исследуемых напряжений могут быть использованы для коррекции условий производства и предотвращения отказов корпусов микросхем в области межслойных переходов.

Помимо этого, принимая во внимание сложную структуру изделий из многофазной керамики и неравную вероятность зарождения рассматриваемых дефектов в объеме каждого из отдельных структурных элементов, а также предел прочности кристаллов, входящих в состав керамики, трещиностойкость керамики в области межслойных переходов будет зависеть не только от согласованности температурных усадок рассматриваемой системы материалов, как утверждают авторы работ [2–7], а также от характера их спекания. Рассматриваемая система «керамика–межслойный переход», находящаяся в адгезионном контакте друг с другом, при спекании образует сеть сообщающихся капилляров, отличающихся по своим размерным характеристикам. Таким образом, из рассмотренных в работах [8–10] теории миграции стекла в металлизационный слой следует, что дефект «растрескивание керамики» может начаться с разрушения межслойного перехода, т.к. трещина зарождается с разрушения стекловидной фазы, которой может быть пропитан межслойный переход в процессе спекания металлокерамической платы. С другой стороны, как указывают авторы работ [8, 11–12], в процессе спекания увеличивается средний размер частиц вольфрама, в результате чего металлизация сильно уплотняется и выжимает из себя стекло на поверхность раздела металл–керамика. Исходя из установленного факта, можно предположить, что между керамикой и межслойным переходом в процессе их совместной термической обработки образуется тонкое кольцо сегрегированного стекла, которое может стать центром зарожде-

ния трещин при появлении структурных напряжений на границе раздела металл–стекло–керамика. Это дает основание полагать, что моделирование процессов развития трещин, приведенных в работах [2–7, 13–15], не отражает всей сущности данного явления, протекающего в реальности. Разработанные модели и приведенные расчеты в рассмотренных работах в основном направлены на изучение траектории роста трещин, а также расчета величины напряжений, возникающих в области межслойных переходов.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что на данный момент по-прежнему остаются неизвестными механизмы зарождения трещин в зоне межслойных переходов в условиях достижимых возможностей современной технологии существования и принципиальных особенностей массового производства. Получение и обработка информации об исследуемом явлении сопряжены со значительными трудностями из-за активации факторов нестабильности микроструктуры керамического материала, окружающего межслойные переходы, а также геометрическими особенностями самих межслойных переходов и сложной природой капиллярных явлений, протекающих (во время спекания) при взаимодействии жидкой составляющей керамической массы (стеклофазы) со стенками сообщающихся пор-каналов контактной межслоевой металлизации.

В данной работе мы ограничились рассмотрением лишь некоторых факторов. Исходя из этого, основной целью работы являлось проведение исследования влияния фактора формы, плотности размещения и структуры межслойных переходов на возможность образования трещин металлокерамических плат и корпусов микросхем в зоне их локализации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование вариаций формы межслойных переходов в условиях массового производства корпусов микросхем.

2. Исследование влияния фактора формы межслойных переходов на процесс температурной усадки системы материалов «межслойный переход–керамика».

3. Исследование влияния структуры межслойных переходов на процесс температурной усадки системы материалов «межслойный переход–керамика».

4. Исследование влияния фактора плотности размещения межслойных переходов в объеме металлокерамической платы на процесс температурной усадки системы материалов «межслойный переход–керамика».

5. Моделирование процессов усадки системы материалов «керамика–межслойный переход» в условиях изменения формы и структуры межслойных переходов.

6. Оценка структурных напряжений керамического материала плат и корпусов микросхем в зоне локализации межслойных переходов.

## МЕТОДЫ

В работе для оценки влияния фактора формы, структуры межслойных переходов, а также плотности их размещения в объеме платы на процесс согласованности температурных усадок системы материалов «керамика–межслойный переход», изготовлено 300 модельных образцов разных вариантов, представляющих собой многослойные металлокерамические платы на основе высокоглиноземистой керамики (содержание  $Al_2O_3$  – 91 %, 9 % стеклообразующие добавки на основе  $SiO_2$ ) с большим количеством коммутирующих межслойных переходов из вольфрамовой металлизации, с диаметрами  $D$  от 0,1 до 0,5 мм и расстояниями между переходными отверстиями от 1 до 3 мм.

Модельные образцы изготовлены особым методом с применением ряда технологических приемов, используемых в массовом производстве металлокерамических корпусов для интегральных микросхем. Для этого разработаны и изготовлены оригинальные варианты технологических оснасток для изготовления модельных образцов. В частности, разработаны и изготовлены оригинальные конструктивные варианты металлических трафаретов для процесса забивки переходных отверстий вольфрамовой пастой.

В качестве трафарета использована стальная рамка с наклеенной лентой из бериллиевой бронзы. Трафарет сформирован непосредственно на самой бериллиевой ленте методом фотолитографии с использованием позитивного фоторезиста. Для получения скрытого изображения защитного рисунка заготовка прошла этап двустороннего экспонирования через совмещенные пленочные фотошаблоны и последующую операцию проявления в водном растворе. Для дальнейшей стабилизации и структурирования пленки фоторезиста заготовка прошла этап температурной обработки.

Кроме трафаретов изготовлена оригинальная оснастка для формования в пластифицированной керамической ленте отверстий малого диаметра для межслойных переходов. Отработана технология заполнения таких отверстий вольфрамовой пастой.

Изготовлена металлизационная паста для

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

заполнения отверстий малого и большого диаметров отверстий. В качестве основы для металлизационных паст использован вольфрамовый порошок двух фракций (мелкая фракция 0,9 мкм; крупная фракция 2,0 мкм), предварительно диспергированный и перемешанный со связующим веществом на основе полимеров, которое способствует крепкому сцеплению отдельных частиц вольфрама между собой. В качестве связки использован раствор связующего компонента (этилцеллюлоза) в спирте класса терпенов. Метод изготовления металлизационной пасты включал несколько стадий. Начальная стадия – измельчение агломератов вольфрамовых порошков на более мелкие частицы для получения удельной поверхности пасты 1700 см<sup>2</sup>/г, а также смешение мелкой и крупной фракций порошкообразного материала для получения более плотной упаковки частиц. Диспергация вольфрамовых порошков проведена в фарфоровых барабанах на валковых мельницах методом мокрого помола с использованием высокоглиноземистых мелющих тел и последующим смешением со связующим веществом. Завершающим шагом служило испарение ацетона и дегазация пасты с целью удаления воздуха из внутренних слоев пасты и стабилизации ее реологических свойств.

Изготовление металлизационной пасты проведено в универсальном смесителе, позволяющем объединять операцию смешения, испарения (если требуется) и дегазацию.

Оценку среднего размера частиц смеси порошков в составе металлизационных паст проводили на приборе для определения удельной поверхности, среднего размера частиц и газопроницаемости дисперсных материалов ПСХ-12 (Россия).

Для изготовления модельных образцов применялась пластифицированная керамическая пленка толщиной 0,6 мм. Метод изготовления пленки включал первоначальное изготовление литьевой керамической массы в шаровых мельницах барабанного типа с последующим формированием керамической пленки методом валкового покрытия на движущуюся транспортер-подложку. Предложенный метод изготовления модельных образцов, в целом, был связан со значительной трудоемкостью работ.

Для проведения исследований разработана методика изготовления макетов коммутационных плат с оригинальной схемой размещения межслойных переходов на ее поверхности. Схема предполагала матричное размещение межслойных переходов, где в «строке» матрицы диаметр переходов и расстояние между ними оставались постоянными. В «столбце» матрицы, как и в «строке»,

диаметры межслойных переходов и расстояние между ними также оставались постоянными. На отдельной матрице было расположено 10×10 межслойных переходов. В матрицах варьировались либо диаметр межслойных переходов, либо расстояние между переходами. В общей сложности изготовлено 15 типов матриц с комбинациями 5 вариантов диаметра межслойных переходов и трех вариантов расстояний между межслойными переходами. Каждый из типов изготовлен в количестве 20 штук, с целью адекватной статистической оценки результатов измерений. Общее количество изготовленных таким образом плат составило 300 штук.

Наибольшую сложность при изготовлении матриц представило изготовление микроотверстий межслойных переходов с диаметрами от 0,1 до 0,2 мм. Трудоемкость изготовления системы переходов с такими диаметрами, по сравнению с трудоемкостью изготовления переходов с диаметрами от 0,3 до 0,5 мм, увеличилась в три раза. Еще большую трудность представляла операция металлизации переходов таких малых размеров пастой на основе вольфрамового порошка. Проблемы при заполнении переходных отверстий обусловлены необходимостью подбора вязкости паст, обеспечивающей, с одной стороны, равномерное заполнение межслойного перехода, с другой – равномерное распределение частиц вольфрама внутри перехода. Контроль качества заполнения межслойных переходов вольфрамовой пастой в зависимости от их диаметров обеспечен проведением петрографических методов, а также методов оптической микроскопии. Анализ вольфрамовой металлизации проводился на продольном срезе межслойного перехода спеченных тестовых образцов. Для изготовления тестовых образцов, предназначенных для оценки качества внутренних структур переходов, использованы матрицы на основе межслойных переходов разных диаметров.

Для изготовления шлифов использованы плоскошлифовальный станок ПДС-1 (Россия) и алмазные пасты с диаметрами частиц от 0,1 до 10 мкм. Длительность процесса шлифования одного образца составила 48 часов. Всего шлифов изготовлено 10 штук. Анализ шлифов проведен на оптическом микроскопе МБС-10 (Россия) и Nikon Optiphot-100 (Япония), в лаборатории базовой кафедры конструирования и производства керамических изделий микроэлектроники Марийского государственного университета.

Результаты петрографического анализа качества металлизации поперечных сечений межслойных переходов использованы для оптимизации процесса заполнения межслойных

переходов металлизационной пастой путем варьирования и подбора их реологических параметров.

Для определения влияния дисперсности вольфрамовых порошков на степень согласованности температурных усадок межслойного перехода и окружающей его керамики использовался следующий метод. Металлизационная паста с содержанием порошка наносилась в виде тонкой пленки (20–30 мкм) на сырую керамическую подложку методом трафаретной печати. Затем на твердосплавных штампах формировались металлизационные диски диаметром 3 см в количестве 50 штук на каждый тип пасты. Вырубленные диски проходили высокотемпературную обработку в печи спекания при одинаковых условиях. Значения степени согласованности температурных усадок рассматриваемых материалов снимались по характеру деформации металлизационного диска. Если диск деформировался в сторону металлизационного слоя, т.е. керамика оказывалась на выпуклой стороне диска, то температурная усадка обозначалась со знаком «–», а если диск деформировался в сторону керамики, т.е. с выпуклой стороны диска оказывалась металлизация, то температурная усадка обозначалась со знаком «+». Прогиб металлизированного диска в ту или иную сторону означает, что система элементов «металлизация–керамика» не согласована по температурной усадке. Следовательно, чем меньше величина деформации металлизированного керамического диска, тем больше степень согласованности температурных усадок металлизационного слоя и керамической подложки.

Для исследования формы и микроструктуры межслойных переходов промышленных образцов использовали метод электронной микроскопии с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 (TESCAN, Чехия, Брно). Для измерения диаметров межслойных переходов до и после высокотемпературной обработки плат использовали оптический компаратор Nikon Profile Projector 6C-2 (Япония).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе изготовленных модельных образцов металлокерамических плат исследована динамика изменения коэффициента усадки межслойных переходов после высокотемпературной обработки в зависимости от их диаметра, плотности размещения на поверхности платы, а также их положения относительно точки матрицы, выбранной в качестве начала координат (левый нижний угол матрицы).

В результате проведенных исследований обнаружен размерный эффект прямо-пропорциональной зависимости усадки межслой-

ных переходов от плотности их размещения на плате. Средние значения диаметров  $D$  и  $D_1$  межслойных переходов до и после спекания соответственно в зависимости от расстояния между переходами  $l$  (плотности их размещения на плате) представлены в таблице 1. Среднеквадратичное отклонение однотипного массива данных не превышало 5 %.

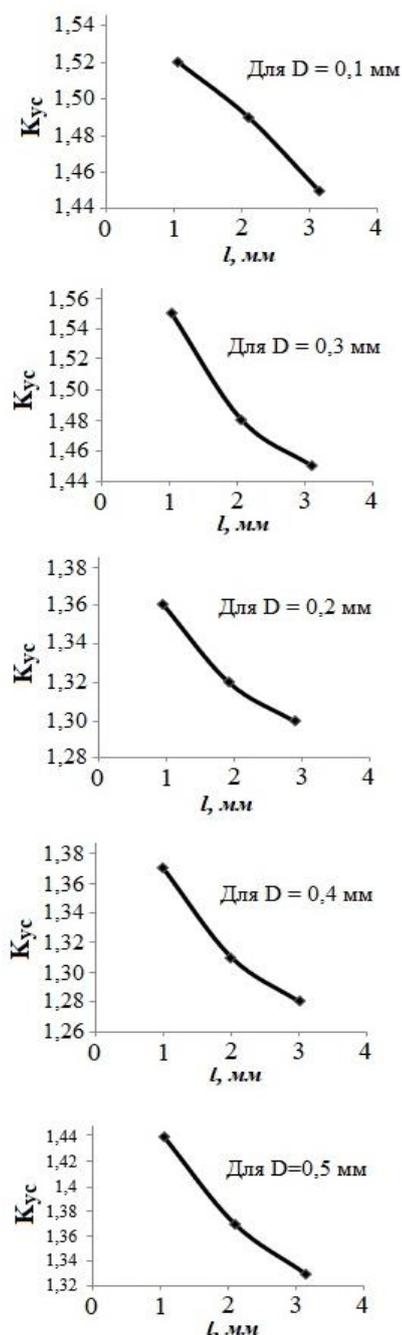


Рисунок 2 – Графики зависимостей коэффициентов усадок межслойных переходов диаметром от 0,1 до 0,5 мм от плотности их расположения на платах

Figure 2 – Graphs of the dependence of shrinkage coefficients of interlayer junctions with a diameter from 0.1 to 0.5 mm on the density of their position on the boards

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

Таблица 1 – Результаты измерений диаметра межслойных переходов до и после спекания

Table 1 – Measurement results of the diameter of interlayer junctions before and after sintering

$D, \text{мм}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	До спекания
$l, \text{мм}$						
1	0,066	0,147	0,193	0,292	0,348	После спекания
2	0,067	0,151	0,203	0,306	0,365	После спекания
3	0,069	0,154	0,207	0,313	0,376	После спекания

Рассчитаны коэффициенты усадок межслойных переходов после спекания по формуле  $K_{yc} = \frac{D}{D_1}$ , где  $D$  и  $D_1$  – диаметры меж-

слойного перехода до и после температурной обработки платы. Изменения коэффициентов усадок в зависимости от плотности расположения межслойных переходов на карте показаны на рисунке 2.

Из представленных графиков следует, что при всех диаметрах межслойных переходов наблюдается уменьшение коэффициентов усадок с уменьшением плотности размещения межслойных переходов на поверхности плат. Обнаруженный размерный эффект может быть объяснен недостаточным количеством стеклофазы, мигрирующей при спекании платы в межслойные переходы из окружающих областей керамики, для полного заполнения капилляров металлизации. Количество стеклофазы лимитируется ограниченным объемом керамики между несколькими близко расположенными межслойными переходами и уменьшается при увеличении плотности расположения переходов на плате. При малой степени пропитки металлизации стеклофазой интенсифицируется твердофазное спекание частиц вольфрама, что приводит к увеличению усадки переходов.

В ходе проведения дальнейших работ установлено, что у межслойных переходов, расположенных в «строках» и «столбцах» по периметру матрицы, наблюдается меньшая температурная усадка, в отличие от больших усадок межслойных переходов во внутренних областях матрицы.

Это хорошо согласуется с предложенным выше механизмом проявления размерного эффекта и обосновывает адекватность гипотезы. В силу того, что переходы большого диаметра имеют большой объем вольфрамовой металлизации и требуют большего количества стеклофазы из окружающей керамики для полного заполнения своих капилляров, стеклофазы для них не будет хватать даже при больших объемах керамики между несколькими меж-

слойными переходами, т.е. при меньших плотностях их расположения. Поэтому переходы диаметром от 0,3 до 0,5 мм с этой точки зрения представляли наибольший интерес.

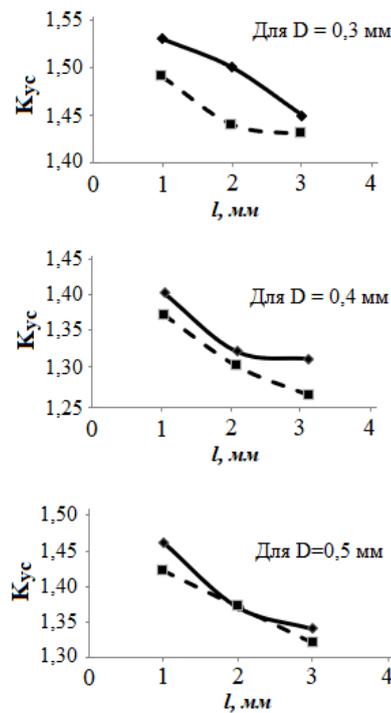


Рисунок 3 – Графики зависимостей коэффициентов усадок межслойных переходов от плотности их расположения для различных областей матрицы: сплошная линия – размещение во внутренних областях матрицы; пунктирная линия – размещение по периметру матрицы

Figure 3 – Graphs of the dependence of the shrinkage coefficients of interlayer transitions on the density of their location for different areas of the matrix: solid line - placement in the inner regions of the matrix; dotted line - placement along the perimeter of the matrix

Для определения влияния дисперсности вольфрамовых порошков на степень согласованности коэффициентов усадок системы «керамика–межслойный переход» проведены следующие исследования. В качестве интегрального параметра, связанного с дисперсностью порошков, измерялся средний размер частиц вольфрамовых порошков, который принимал значение для порошка «А» = 0,9 мкм, для порошка «В» = 1,6 мкм, для порошка «С» = 2 мкм. Порошок фракции «В» получен смешением порошков фракции «А» и фракции «С». Для проведения испытаний были изготовлены керамические диски диаметром 3 см, покрытые металлизационными пастами с разной дисперсностью вольфрамовых порошков. Согласованность определяли по деформации металлизационного диска, представленного на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схематическое изображение процесса деформации металлизированного диска после высокотемпературной обработки

Figure 4 – Is a schematic representation of the deformation process of a metallized disk after high-temperature treatment

Согласно проведенным испытаниям, наилучший результат в плане согласованности температурных усадок рассматриваемой системы материалов «керамика–межслойный переход» обеспечила металлизационная паста на основе вольфрамового порошка со средним размером частиц 1,6 мкм (фракция «В»), как представлено на рисунке 5.

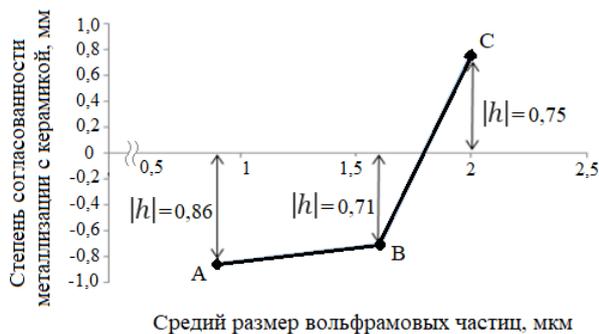


Рисунок 5 – Зависимость степени согласованности коэффициента усадки металлизационной пасты и керамики от дисперсности вольфрамовых порошков

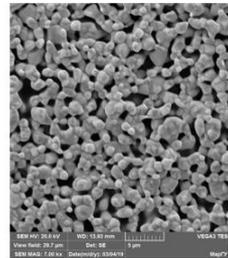
Figure 5 – Dependence of the degree of consistency of the shrinkage coefficient of metallization paste and ceramics on the dispersion of tungsten powders

Изображения микроструктуры поверхности металлизации керамических дисков представлены на рисунке 6.

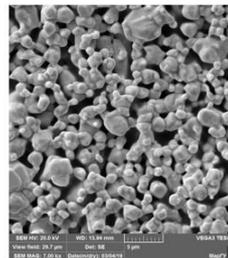
Такое поведение кривой, представленное на рисунке 5, объясняется наиболее плотной упаковкой металлизационных частиц. Смешение крупной и мелкой фракции, которая позволяет достичь лучшей пропитки металлизационного слоя стеклофазой керамики под действием капиллярного давления, в свою очередь, обеспечивает наилучшую согласованность коэффициентов усадки керамики и межслойного перехода на этапе температурной обработки.

В качестве доказательства этой рабочей гипотезы частицы вольфрамового порошка представлены в форме шара и смоделированы три ситуации распределения частиц с

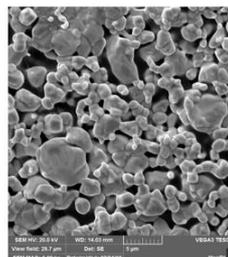
проведением расчетов. В соответствии с рис. 7 смоделирована ситуация для частиц размером 0,9 мкм (фракция «А») и 2 мкм (фракция «С»).



Порошок А  
( $d_p = 0,9$  мкм)



Порошок В  
( $d_p = 1,6$  мкм)



Порошок С  
( $d_p = 2,0$  мкм)

Рисунок 6 – Изображения микроструктуры металлизационных покрытий на основе порошков фракций «А», «В» и «С»

Figure 6 – Images of the microstructure of metallization coatings based on powders of fractions "A", "B" and "C"

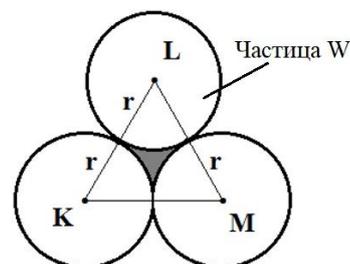


Рисунок 7 – Фрагмент упаковки вольфрамовых частиц фракции А и фракции С в металлизационном слое

Figure 7 – Fragment of packing of tungsten particles of fraction A and fraction C in the metallization layer

При самой плотной упаковке частиц площадь свободного пространства  $S$ , которая фактически представляет собой площадь поперечного сечения капилляров в металлизационном слое, из геометрических соображений определена следующим выражением:

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

$$S = S_1 - S_2 \approx r^2(1,73 - 1,57) \approx 0,16r^2, (1)$$

где  $S_1$  – площадь треугольника KLM,  $S_2$  – площадь трех частей окружностей, образованных сторонами треугольника,  $r$  – радиус частицы вольфрамового порошка.

Исходя из расчета, при самой плотной упаковке вольфрамовых частиц фракции «А» площадь поперечного сечения капилляра в металлизационном слое составляет  $S_A \approx 0,14$  мкм<sup>2</sup>, а для фракции С площадь поперечного сечения капилляров –  $S_C \approx 0,64$  мкм<sup>2</sup>.

Смоделирована ситуация при смешении фракции «А» и фракции «С» (фракция «В») и проведен сравнительный анализ площади поперечного сечения капилляров металлизационного слоя  $S_B$  с предыдущими результатами.

В металлизационном слое керамики, состоящем из мелкой и крупной фракции, возможно внедрение частицы мелкой фракции между 3-мя и 4-мя частицами крупной фракции (рис. 8).

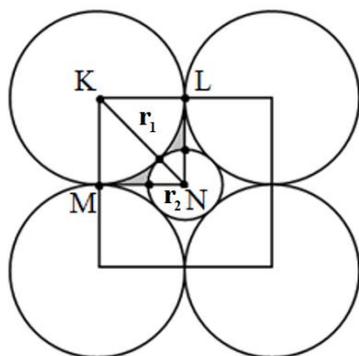


Рисунок 8 – Фрагмент упаковки вольфрамовых частиц фракции В в металлизационном слое

Figure 8 – Fragment of the packing of tungsten particles of fraction B in the metallization layer

Анализ показал, что случай с 3-мя частицами не имеет смысла, поскольку при самой плотной упаковке частиц (как показано на рис. 7) между ними возможно внедрение только ультрадисперсной частицы, которые не используются в реальном производстве. Таким образом, рассмотрен случай с 4-мя частицами и определена возможность внедрения частицы фракции «А» между 4-мя частицами фракции «С» при самой плотной упаковке последних (когда 4 частицы касаются друг с другом). Для этого определен максимальный размер частицы мелкой фракции, которую можно "внедрить" между 4-мя частицами крупной фракции.

Исходя из геометрических соображений, найдено выражение для определения радиуса частицы мелкой фракции:

$$(r_1 + r_2)^2 = 2r_1^2 \rightarrow r_2 \approx 0,41r_1. (2)$$

На основе приведенных расчетов найден максимальный размер частицы мел-

кой фракции, который может поместиться между 4-мя частицами крупной фракции при их самой плотной упаковке, и составляет 0,41 от размера частицы крупной фракции. Для нашего случая  $r_1 = 2$  мкм, тогда максимальное значение  $r_2 = 2 \times 0,41 \approx 0,82$  мкм. Учитывая физико-химические процессы, протекающие при спекании металлических частиц, предложенную модель можно использовать для случая, когда  $r_2 = 0,9$  мкм.

Такое расположение вольфрамовых частиц в металлизационном слое образует 4 одинаковых капилляра, площадь поперечного сечения которых определена следующей формулой:

$$S = S_1 - (S_2 + S_3), (3)$$

где  $S_1$  – площадь квадрата KLMN;  $S_2$  – площадь 1/4 частицы фракции С;  $S_3$  – площадь 1/4 частицы фракции «А».

Выразив данные площади через радиус рассматриваемых частиц, формула (3) приобрела следующий вид:

$$S = r_1^2 - 0,785(r_1^2 + r_2^2), (4)$$

где  $r_1$  – радиус частицы фракции С;  $r_2$  – радиус частицы фракции «А».

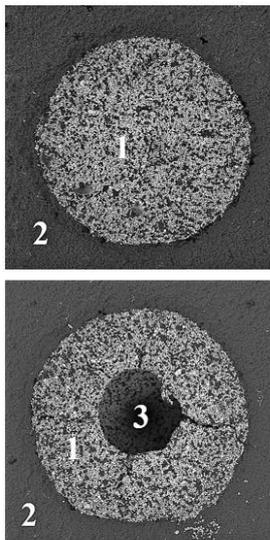
Таким образом, подставляя численные значения в формулу (4), получили, что для фракции В площадь поперечного сечения капилляров составила  $S_B \approx 0,075$  мкм<sup>2</sup>. В итоге получен численный результат, который показывает, что  $S_B < S_A$  в 2,1 раза,  $S_B < S_C$  – в 8,5 раза.

Исходя из современной теории капиллярности межслойный переход с упаковкой частиц фракции «В» будет лучше пропитываться стеклофазой вследствие большей величины капиллярного давления, которая, в свою очередь, возрастает из-за увеличения разности между шириной капилляров в керамике и металлизации. Другими словами, при фиксированной ширине капилляров (площади поперечного сечения) керамики наилучшая степень пропитки межслойного перехода стеклофазой наблюдается при самой плотной упаковке вольфрамовых частиц, при этом формируются наиболее узкие капилляры в металлизационном слое. Это обстоятельство, как показывают результаты экспериментальных исследований, приводит к наилучшей степени согласованности коэффициентов усадки керамики и межслойного перехода.

Исходя из полученных данных, легко объясняется направление деформации металлизационного диска на рисунке 5 в сторону керамики (деформация со знаком "+"). Это значит, что металлизационный слой не пропитался стеклофазой и керамика, изначально имеющая

больший коэффициент усадки в сравнении с металлизационным слоем, сжалась быстрее межслойного перехода. Исходя из полученных данных можно утверждать, что для формирования межслойных переходов использовать монофракционный вольфрамовый порошок со средним размером частиц  $\geq 2$  мкм не рекомендуется.

Причинно-следственный анализ показал, что помимо микроструктуры межслойных переходов на согласованность температурных усадок системы материалов «керамика–межслойный переход» может влиять фактор формы самого межслойного перехода. Анализ производства показал, что форма межслойных переходов может быть представлена в виде тороидального или сплошного цилиндра [1, 16] в зависимости от наличия осесимметричной цилиндрической полости (поры), локализуемой преимущественно в центре межслойного перехода. В соответствии с рис. 9 наглядно представлены фотографии межслойных переходов исследованных форм. Снимки получены на основе шлифов тестовых образцов, изготовленных в условиях массового производства.



**Поперечное сечение сплошного цилиндра**

**Поперечное сечение тороидального цилиндра**

Рисунок 9 – Изображения микроструктуры поперечного сечения межслойного перехода: а) в форме сплошного цилиндра б) в форме тороидального цилиндра; 1 – межслойный переход; 2 – керамика; 3 – полость в межслойном переходе  
Figure 9 – Images of the microstructure of the cross-section of the interlayer junction: a) in the form of a solid cylinder, b) in the form of a toroidal cylinder, 1 - interlayer junction, 2 – ceramics, 3 - a cavity in the interlayer junction

Согласно результатам теоретических расчетов, представленных в работах [1, 16], показано, как влияет тороидальная форма межслойного перехода и размеры цилиндрической полости на образование микротрещин керамики. Для этого

межслойный переход был представлен в виде толстостенной цилиндрической оболочки, подвергающейся действию внутреннего и внешнего давлений. В соответствии с рис. 10 представлена модель межслойного перехода, необходимая для проведения расчетов и оценки напряжений на его внутренней и внешней границе.

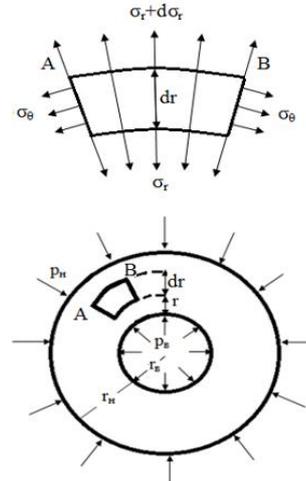


Рисунок 10 – Расчетная модель межслойного перехода тороидальной формы

Figure 10 – Calculation model of a toroidal interlayer transition

На основе данной расчетной модели в работе [1] найдены выражения для оценки радиальных и тангенциальных напряжений на внутренней и внешней границе межслойного перехода тороидальной формы. При этом доказано, что тангенциальные напряжения на наружной и внутренней стенках межслойного перехода возрастают с увеличением диаметра осесимметричной центральной поры, т.е. с уменьшением толщины стенки цилиндрической оболочки, как показано на рисунке 11.

Параметр  $k$ , отмеченный на рисунке 11, введен для удобства оценки уровня тангенциальных напряжений и вычисляется отношением внутреннего диаметра межслойного перехода к внешнему.

Результаты проведенного анализа показывают, что наличие цилиндрической полости в объеме межслойного перехода приводит к появлению тангенциальных напряжений на внутренней и внешней его границе во время спекания металлокерамической платы. При этом структурные напряжения возрастают при увеличении диаметра полости, что приводит к образованию трещин, начинающихся от внутренней границы тороидального межслойного перехода, как показано на рисунке 12.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

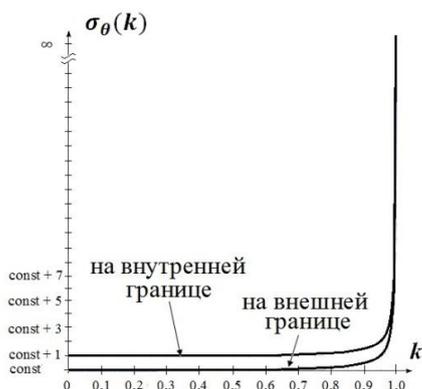


Рисунок 11 – График зависимости тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta}(k)$  на внутренней и внешней границах межслойного перехода от диаметра цилиндрической поры

Figure 11 – Graph of the dependence of the tangential stresses  $\sigma_{\theta}(k)$  at the inner and outer boundaries of the interlayer junction on the diameter of the cylindrical pore

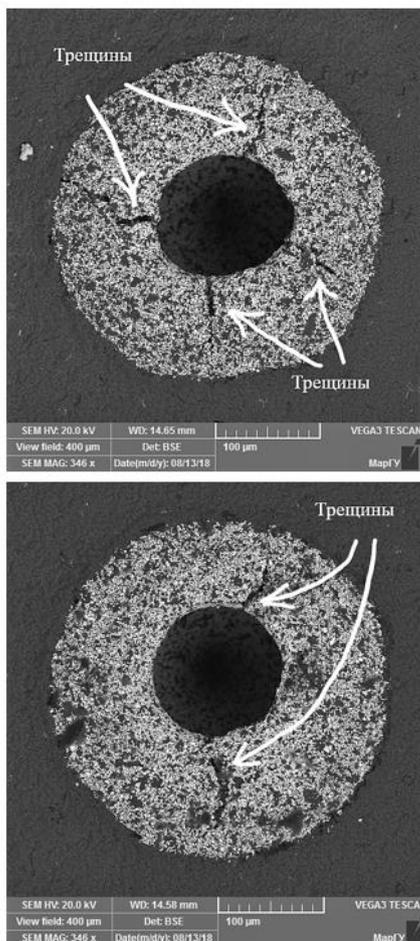


Рисунок 12 – Изображения микроструктуры поперечного сечения торoidalных межслойных переходов с дефектами

Figure 12 – Images of the microstructure of the cross-section of toroidal interlayer transitions with defects

Эта теоретическая гипотеза наряду с полученными изображениями микроструктуры хорошо согласуется с экспериментальными данными по температурной усадке межслойных переходов торoidalной формы и межслойных с формой сплошного цилиндра, которые представлены на рисунке 13.

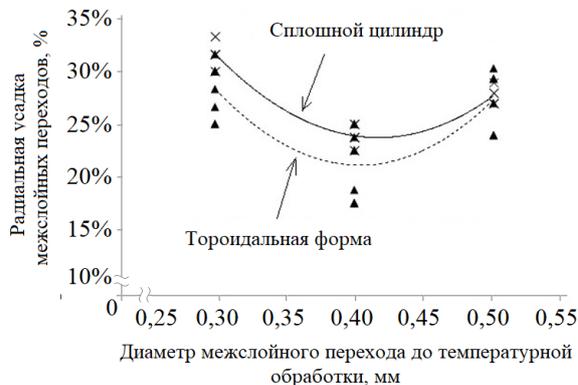


Рисунок 13 – Сравнительные кривые радиальной усадки межслойных переходов торoidalной формы и межслойных переходов в форме сплошного цилиндра для диаметров 0,3, 0,4 и 0,5 мм

Figure 13 – Comparative curves of radial shrinkage of toroidal interlayer junctions and interlayer junctions in the form of a solid cylinder for diameters of 0.3, 0.4 and 0.5 mm.

Результаты исследования показали, что радиальная температурная усадка межслойных переходов торoidalной формы ниже в среднем на 4 % в сравнении с показателем радиальной усадки межслойных переходов, представленных в форме сплошного цилиндра. При этом такая зависимость справедлива для всех исследуемых диаметров межслойных переходов и объясняется тем, что во время спекания межслойного перехода торoidalной формы помимо наличия внешнего давления со стороны керамики, обусловленного остаточным эффектом усадки платы на спадающем участке температурной кривой спекания, отмечается наличие внутреннего давления, обусловленного содержанием газа в полости в виде продуктов деструкции органики, которые оказывают давление на внутренние стенки межслойного перехода и тормозят эффект температурной усадки.

Анализ технологии формирования межслойных переходов показал, что образование осесимметричной цилиндрической полости может происходить из-за несоответствующего диапазона вязкости пасты в соответствии с заполняемым диаметром переходного отверстия. Исследования показали, что для каждого диаметра отверстия существует так называемый низковязкий диапазон металлizaционных паст, способствующий низкой формоустойчивости

межслойного перехода. Необходимо отметить, что низковязкая паста обладает меньшей концентрацией вольфрамового порошка в своем объеме в отличие от высоковязкой.

Вследствие объемной усадки, обусловленной испарением обильного содержания органической составляющей низковязкой пасты, она начинает проваливаться вниз, образуя тем самым глубокую полость (тороидальность межслойного перехода). Оптимальным условием для создания хорошей формоустойчивости межслойных переходов является состав пасты, с определенной объемной долей вольфрамового порошка, обеспечивающего плотное заполнение переходного отверстия и устойчивый каркас контактирующих между собой металлизационных частиц. Как показали результаты экспериментов, этого можно добиться с помощью подбора оптимальной вязкости металлизационной пасты. На рисунке 14 представлены результаты экспериментов по измерению диаметра полости в объеме межслойных переходов диаметром от 0,1 до 0,5 мм.

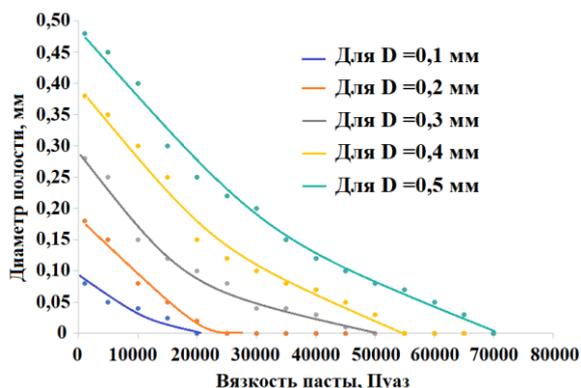


Рисунок 14 – Изменение диаметра полости в объеме межслойного перехода в зависимости от вязкости металлизационной пасты для диаметров переходных отверстий от 0,1 до 0,5 мм

Figure 14 – Change of the cavity dimeter in the volume of the interlayer junction depending on the viscosity of the metallization paste for transition hole diameters from 0.1 to 0.5 mm

Точки пересечения кривых с осью абсцисс определяют оптимальное значение металлизационной пасты для конкретного диаметра переходного отверстия, которое гарантированно позволяет сформировать сплошной межслойный переход без цилиндрической полости, то есть исключить образование тороидальной формы и снизить вероятность развития структурных напряжений внутри объема межслойного перехода. Так, для переходных отверстий диаметром 0,1 мм с целью исключения образования тороидальной формы межслойных переходов необходимо использовать пасту со значением вязкости не менее 20000 Пуаз, для диаметра 0,2 мм – 256

не менее 25000 Пуаз, для диаметра 0,3 мм – не менее 50000 Пуаз, для диаметра 0,4 мм – не менее 55000 Пуаз, и, наконец, для диаметра 0,5 мм – не менее 70000 Пуаз. Измерения значения вязкости формующих металлизационных паст проводили по методу указанного в работе [17] ввиду высоких значений.

Все приведенные результаты исследований получены экспериментальным путем в реальных производственных условиях, являются статистически значимыми, нашли практическое применение в производстве металлокерамических корпусов для интегральных микросхем.

## ВЫВОДЫ

1. Изготовлен ряд модельных образцов из высокоглиноземистой керамической массы с содержанием 91 %  $Al_2O_3$  в виде металлокерамических плат с разными геометрическими параметрами межслойных переходов, согласно описанному в работе методу.

2. Обнаружен размерный эффект зависимости усадок коммутирующих межслойных переходов от плотности их размещения на поверхности плат. Установлено, что усадки межслойных переходов при равных их диаметрах прямо пропорциональны плотностям размещений межслойных переходов. Исследования проведены на межслойных переходах диаметром от 0,1 мм до 0,5 мм, с расстояниями между ними от 1 мм до 3 мм. Предложены возможные механизмы проявления эффекта.

3. Установлено доминирующее влияние параметров металлизационных паст на возможность физико-химического согласования системы «керамика–межслойный переход» в период температурной обработки плат. В качестве реализуемых параметров выступают вязкость металлизационной пасты и дисперсность порошкообразного материала (вольфрама).

4. Проведен сравнительный анализ согласованности коэффициентов усадок керамики и вольфрамовой металлизации в зависимости от дисперсности вольфрамовых порошков и формы межслойного перехода.

5. Выявлено, что тороидальная форма межслойного перехода, характеризующаяся наличием цилиндрической полости, которая, в свою очередь, является инициатором тангенциальных напряжений в объеме перехода, приводит к образованию микротрещин. При этом сплошные межслойные переходы имеют повышенную устойчивость к температурным воздействиям, но не исключается возможность образования микротрещин на границе «керамика–межслойный переход».

6. Проведен сравнительный петрографи-

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ФОРМЫ МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПРОЦЕСС ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ И КОРПУСОВ МИКРОСХЕМ

ческий анализ вольфрамовых металлизаций межслойных переходов различных вариантов тестовых образцов. Результаты анализов позволили усовершенствовать и оптимизировать технологию изготовления межслойных переходов исследуемых диаметров.

7. Выработаны практические рекомендации для проектирования и изготовления коммутационных плат и металлокерамических корпусов. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и изготовлении коммутационных плат, а также перспективных многовыводных корпусов с большим количеством и высокой плотностью размещения межслойных переходов.

8. Анализ литературных источников показал научную новизну обнаруженных размерных эффектов и оригинальность практических разработок. Продолжение работ по данному направлению исследований является практически значимым и крайне актуальным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Ермолаев Е.В. Разгерметизация металлокерамических корпусов в области межслойных проводников в производственных условиях // Вестник ПГТУ. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 87–92.
2. Lee J., Ma Q., Marieb T., Mack A.S., Fujimoto H., Flinn P., Woolery B., Keys L. Measurement and modeling of intrinsic stresses in CVDW lines. Mater Res. Soc. Symp. Proc. (In Russ.).
3. Ma Q., Lee J., Fujimoto H. (1997). Probing stresses in metal trenches using Raman piezospectroscopy. Advances in Electronic Packaging, (19), 8–16. (In Russ.).
4. Greenebaum B., Sauter A.I., Flinn P.A., Nix W.D. (1991). Stress in metal lines under passivation; comparison of experiment with finite element calculations. Journal of Applied Physics Letters, (17), 1845–1847. (In Russ.). DOI: 10.1063/1.105075.
5. Shen Y.L., Suresh S., Blech I.A. (1996). Stresses, curvatures, and shape changes arising from patterned lines on silicon wafers. Journal of Applied Physics, (3), 1388–1398. (In Russ.). DOI: 10.1063/1.362938.
6. Korhonen M.A., Borgesen P. (1993). Stress evolution due to electromigration in confined metal lines. Journal of Applied Physics, (73), 3790–3799. (In Russ.). DOI: 10.1063/1.354073.
7. Suo Z.L. (1998). Stable state of interconnect under temperature change and electric current. Journal of Acta Materialia, (11), 3725–3732.
8. Афионов О.Н. Влияние конструктивных и технологических факторов на коррозию металлокерамических корпусов интегральных схем: автореф. дис. ... на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Йошкар-Ола, 2005. 152 с.
9. Михеева Е.В. Контроль спаев металлоке-

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 15 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.*

*The article was received by the editorial board on 15 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.*

рамических плат и корпусов микросхем в условиях массового производства: автореф. дис. ... на соискание ученой степени кандидата технических наук. Йошкар-Ола, 2004. 153 с.

10. Зуев А.В. Экспертная система контроля качества продукции в процессе производства металлокерамических и коммутационных плат: автореф. дис. ... на соискание ученой степени кандидата техн. наук. Йошкар-Ола, 2006. 149 с.

11. Otsuka K., Ucamí T., Sekihata M. (1981). Interfacial bond strength in alumina ceramics metallized and covered with tungsten, Journal of the American Ceramic Society, (5), 540–545. (In Russ.).

12. D.A. Chance. Refractory Metallization of Green Ceramic. (1970). Journal of Metallurgical Transaction, (1), 685–694. (In Russ.). DOI: 10.1007/BF02811596.

13. Liu X.H., Suo Z., Fujimoto H. (2000). Developing rules to avert cracking and debonding in integrated circuits. Engineering Fracture Mechanics, (66), 387–402. (In Russ.).

14. Freund L., Kim K. Spiral cracking around a strained cylindrical inclusion in a brittle material and implications for vias in integrated circuits. MRS Symposium Proceedings (Materials Research Society). (In Russ.).

15. Xia Z.C., Hutchinson J.W. (2000). Crack patterns in thin films. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, (48), 1107–1131. (In Russ.).

16. Ермолаев Е.В. Структурные напряжения в межслойных проводниках металлокерамических корпусов в производственных условиях // Актуальные вопросы науки, технологии и производства: материалы 1 Международной научно-практической конференции. Пенза, 2014. С. 67–72.

17. Способ измерения вязкости высоковязких жидкофазных сред: пат. 2738911 Рос. Федерация № 2020109808; заявл. 05.03.2020; опубл. 18.12.2020, Бюл. № 35. 8 с.

## Информация об авторах

*Е. В. Ермолаев – старший преподаватель физико-математического факультета Марийского государственного университета.*

*И. А. Жуков – доктор технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Томского государственного университета.*

*Д. А. Ткачев – аспирант Томского государственного университета, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии.*

## Information about the authors

*E.V. Ermolaev - is a senior lecturer at the Faculty of Physics and Mathematics of the Mari State University.*

*I.A. Zhukov - Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Metallurgy Nanotechnologies, Tomsk State University.*

*D.A. Tkachev - post-graduate student of Tomsk State University, junior researcher of the Laboratory of Metallurgy Nanotechnologies.*