

## Моделирование термомеханических нагрузок в трёхмерных микросборках с различными типами вертикальных соединений

*Д.В. Вертянов, И.А. Беляков, И.А. Соловьев, С.И. Гладкова*

*Национальный исследовательский университет «Московский Институт  
Электронной Техники»*

**Аннотация:** В рамках работы исследовалось влияние типа вертикальных соединений на уровень термомеханических напряжений и температурной деформации в трёхмерной микросборке. Рассматривались три варианта модели микросборки с наиболее распространёнными типами вертикальных соединений: шариками припоя в отверстиях корпуса, металлизированными отверстиями в корпусе и торцевыми коммутационными дорожками. Для каждой из трёх моделей дополнительно исследовалось влияние на термомеханическую нагрузку параметров герметизирующего компаунда.

**Ключевые слова:** микросборка, корпусирование, электронная компонентная база, трёхмерная интеграция, вертикальная коммутация, термомеханическое напряжение, термомеханическая деформация, температурный коэффициент линейного расширения, термомеханическое моделирование.

### Введение

Трёхмерная интеграция находит применение на различных этапах производства электронных устройств, начиная от изготовления полупроводников и заканчивая корпусированием кристаллов и монтажом готовых корпусированных компонентов на печатные платы [1-3]. Этим фактом обусловлено широкое разнообразие направлений трёхмерной интеграции. Одно из таких направлений - изготовление трёхмерных систем в корпусе.

Трёхмерные системы в корпусе (3D СвК) представляют собой многоуровневые микросборки, состоящие из расположенных друг над другом коммутационных плат-уровней со смонтированными на них компонентами. Электрически уровни в системе соединяются с помощью вертикальных элементов коммутации – шариковых выводов, переходных металлизированных отверстий в компаунде, вертикальных коммутационных дорожек. Целостность системы в корпусе и её защиту от внешних воздействий обеспечивает герметизация, которая реализуется с помощью тех

---

же материалов и подходов, что и при корпусировании кристаллов в пластиковые корпуса.

Изготовление трёхмерных систем в корпусе характеризуется и рядом отличий от двухмерного корпусирования. Так, в случае трёхмерных структур необходимо более внимательно, чем в случае с двумерными устройствами, относиться к некоторым параметрам изделия. Например, в трёхмерных структурах более остро стоят вопросы теплоотвода, адгезии между составными частями изделия, и, в особенности, вопросы согласования температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) между материалами микросборки.

Традиционно при корпусировании вопрос согласования ТКЛР решается за счёт использования специализированных материалов герметизации с температурным расширением, близким к кремнию. Эти материалы, называемые эпоксидными монолитизирующими компаундами (EMC – epoxy mold compound), представляют собой высоконаполненные композиты, получаемые с помощью методов гибридного смешивания [4]. Матрицей данным композитам служат смеси эпоксидных смол (как правило, термостойкой новолачной смолы и более дешёвой и менее вязкой – диановой) [5]. Наполнителем чаще всего выступают частицы оксида кремния размером от единиц до нескольких десятков микрон [6]. Хотя в настоящее время исследуются и другие наполнители, такие, как оксид алюминия, нитрид кремния и даже графен [7,8].

Наполнитель вводится в монолитизирующий компаунд в концентрациях 70% и выше. В результате ТКЛР композиции может быть снижен до величины менее 10 миллионных долей на °С [5], что гораздо ближе к ТКЛР кремния в 2,55 миллионных долей на °С [9], чем температурное расширение чистых эпоксидных смол.

---

Однако в системах в корпусе кремний, как материал занимает значительно меньший объём относительно сборки, чем в более высокоинтегрированных структурах (например, в структурах на основе кремниевых интерпозеров). Основной же объём систем в корпусе – это коммутационные подложки, медная коммутация, пассивные компоненты, а также припой, которым монтируются компоненты и которым часто соединяются сами уровни микросборки. ТКЛР материалов всех указанных структур значительно выше, чем ТКЛР кремния. По этой причине в подложках и коммутации систем в корпусе, герметизированных высоконаполненными композитами, при нагреве неизбежно будут возникать повышенные термомеханические напряжения. И если подложки, изготавливаемые из полимеров и композитных материалов на полимерной основе, достаточно устойчивы к подобным нагрузкам, то коммутация в этом плане куда менее стойка.

Существует несколько причин уязвимости вертикальных соединений к термомеханическим воздействиям. Во-первых, такие соединения одновременно испытывают влияние нескольких материалов с разным ТКЛР – диэлектрика подложек, металлизации в плоскости подложек, а также компаунда, через который проходят коммутационные элементы в пространстве между уровнями. Во-вторых, коммутационные элементы имеют малое сечение, а значит, они более уязвимы к когезионным разрывам. В-третьих, вертикальная коммутация в месте соединения с коммутацией подложек имеет неоднородную структуру, обусловленную тем, что эти два типа коммутации создаются в разных техпроцессах. Кроме того, в случае контакта припойных шариков с медными площадками, неоднородность усугубляется различными параметрами материалов соединения.

Указанные обстоятельства говорят о том, что для трёхмерных систем в корпусе нет необходимости в использовании для герметизации всего изделия

---

исключительно высоконаполненного компаунда. Предыдущие исследования авторов по данной тематике [10] показывают, что куда более выгодным оказывается использование комбинации компаундов с различным количеством наполнителя во внешней и внутренней части изделия. Однако ранее в моделировании не учитывалось влияние вертикальной коммутации.

В рамках же данной работы внимание сконцентрировано именно на сравнительном анализе термомеханических нагрузок в микросборках с разными типами вертикальных соединений. При этом в процессе моделирования учитывается влияние на термомеханическую нагрузку параметров, охватывающего вертикальные соединения компаунда.

### **Описание моделей и материалов**

В рамках работы производилось моделирование термомеханической деформации и термомеханических напряжений для трёх моделей двухуровневых систем в корпусе. Модели представляли собой микросборки, состоящие из двух стеклопластиковых подложек толщиной 2 мм, шириной 20 мм и длиной 20 мм с планарными размерами кристаллов 4x4 мм, размещенных в центре подложек. Шариковыми выводами кристаллов при моделировании пренебрегли, заменив их сплошным слоем материала underfill.

Герметизация каждого уровня выполнялась с помощью двух областей компаунда – центральной области с планарными размерами 10x10 мм, охватывающей кристалл, и периферийной.

В периферийной области располагались вертикальные соединения трёх различных типов – по одному типу на каждую модель. В первой модели в качестве вертикальной коммутации использовались припойные бампы диаметром 1 мм в отверстиях компаунда. Во второй модели вертикальная коммутация была реализована с помощью комбинации шариковых выводов с металлизированными отверстиями в компаунде (диаметр отверстий 1 мм,

толщина металлизации 50 мкм). Последний вариант коммутации был представлен вертикальными дорожками шириной 1 мм и толщиной 50 мкм.

Изображения всех трёх моделей систем в корпусе с различными типами вертикальных соединений представлены на рис. 1.

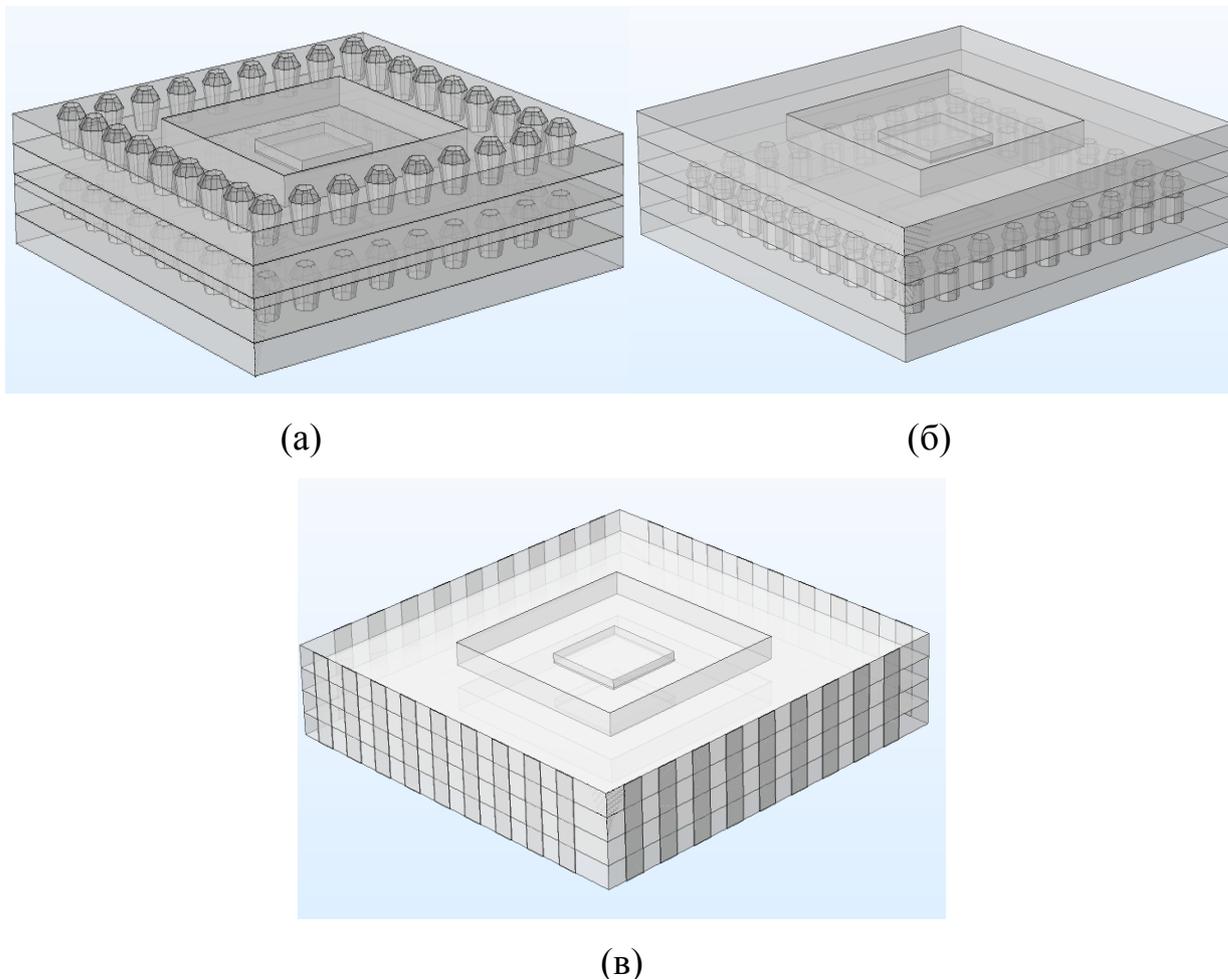


Рис.1. – Модели трёхмерных систем в корпусе с разными типами вертикальной коммутации: в виде припойных бампов в отверстиях компаунда (а), в виде комбинации шариковых выводов с металлизированными отверстиями в компаунде (б) и в виде вертикальных коммутационных дорожек

Параметры материалов, использовавшихся в ходе моделирования, приведены в таблице 1. Для компаундов с разным содержанием наполнителя

взяты теоретические значения параметров модуля Юнга, коэффициента Пуассона и температурного коэффициента линейного расширения [11-13].

Таблица № 1

Параметры упругости и температурного линейного расширения материалов

Материал	ТКЛР, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	Модуль Юнга (ГПа)	Коэффициент Пуассона
Кремний (100)	2,6 (при 20°C)	170	0,28
Underfill	52	5,06	0,33
Припой ПСР 3,5	21,85	51	0,36
Компаунд, 80% наполнителя	7,6	21	0,222
Компаунд, 70% наполнителя	15	18,5	0,238
Компаунд, 60% наполнителя	20	16,5	0,254
Медь	17	110	0,35

Моделирование термомеханических напряжений и деформаций в исследуемых структурах производилось методом конечных элементов.

В простейшем виде значение растягивающего напряжения, возникающего под действием температуры в материале можно определить по формуле [14]:

$$\sigma = \alpha E \Delta T \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного линейного расширения материала,  $E$  – модуль упругости,  $\Delta T$  – расчетный перепад температур.

В данной работе моделирование производилось путём расчёта через уравнения сохранения импульса и соотношения между напряжениями и деформациями [15]:

$$\rho_0 \frac{d^2 u}{dt^2} = \nabla \cdot (FS) + f_{vol} \quad (2)$$

$$S = C : E_{el} \quad (3)$$

В уравнениях  $C$  – тензор упругости, выражающийся через коэффициент Пуассона и модуль Юнга.  $E_{el}$  – тензор упругой деформации, зависящий от температуры через тензор термической деформации.  $F$  – градиент деформации.

### Результаты моделирования

Моделирование трёхмерных систем в корпусе с различными типами вертикальных коммутационных элементов показало следующие результаты.

Самые высокие термомеханические напряжения при одинаковом температурном воздействии (100 °С) наблюдались для случая с вертикальной коммутацией в виде шариковых выводов в отверстиях компаунда. Следующим типом коммутации по уровню термомеханических напряжений оказались металлизированные отверстия в компаунде комбинированные с шариковыми выводами. Минимальные же значения как термомеханической деформации, так и термомеханических напряжений, показал вариант с вертикальной коммутацией в виде торцевых дорожек.

При этом для всех вариантов наблюдалось снижение температурной деформации микросборки при использовании во внешней части компаунда с содержанием наполнителя порядка 70% по массе. При дальнейшем снижении количества наполнителя во внешнем компаунде до величины 60% для варианта вертикальной коммутации с бампами припоя в отверстиях корпуса наблюдалось незначительное увеличение деформации по сравнению с показателем для 70% наполнителя. Для вариантов же с торцевыми дорожками и металлизированными отверстиями в компаунде при снижении количества наполнителя во внешней части сборки до 60%, напротив, наблюдалось дальнейшее снижение температурной деформации.

Результаты исследования приведены на рис. 2 и рис 3 для температурной деформации и термомеханических напряжений по Мизесу, соответственно.

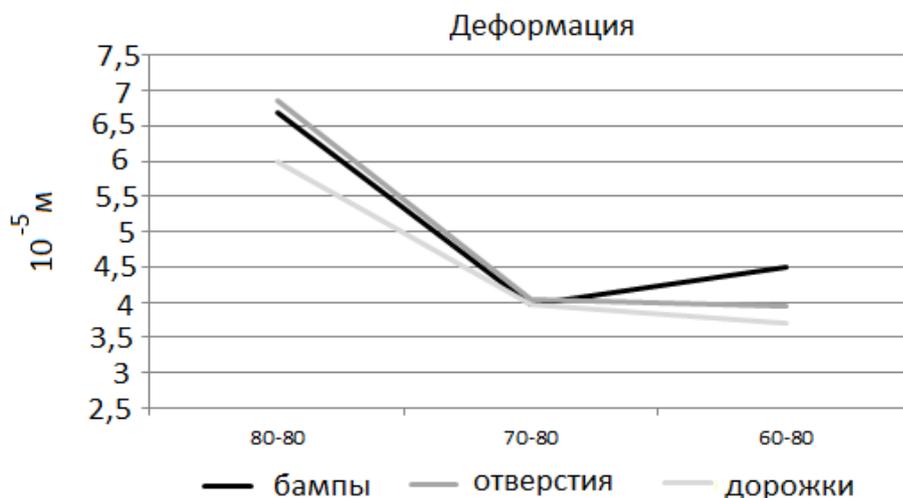


Рис. 2. – Температурная деформация в моделях двухуровневых микросборок с различными типами вертикальной коммутации при разном содержании наполнителя во внешней части компаунда (80%, 70% и 60% слева-направо соответственно)

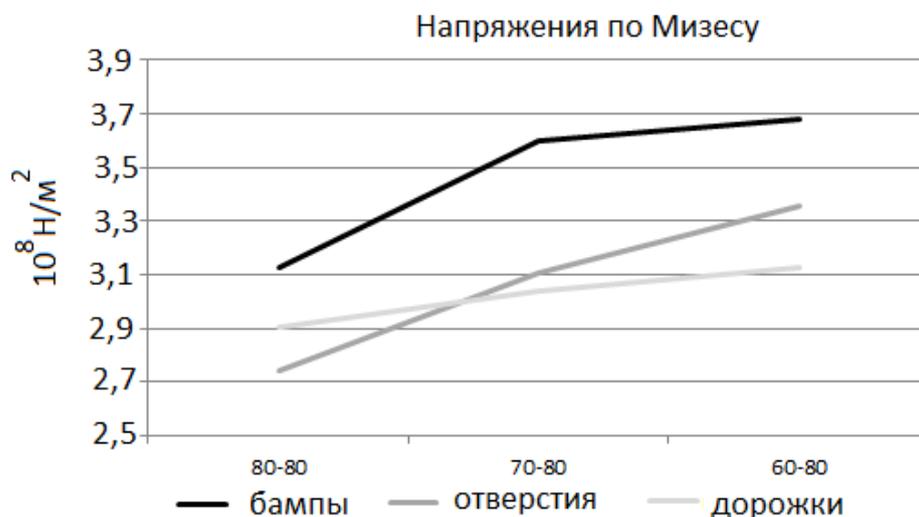


Рис. 3. – Термомеханические напряжения в моделях двухуровневых микросборок с различными типами вертикальной коммутации при разном содержании наполнителя во внешней части компаунда (80%, 70% и 60% слева-направо соответственно)

Максимальные напряжения по результатам моделирования имели место в области кристалла и прилегающего к нему компаунда. Напряжения же в области вертикальной коммутации были на порядок меньше – рис. 4. При этом в случае использования менее наполненного компаунда во внешней части сборки напряжения в элементах вертикальной коммутации значительно уменьшались.

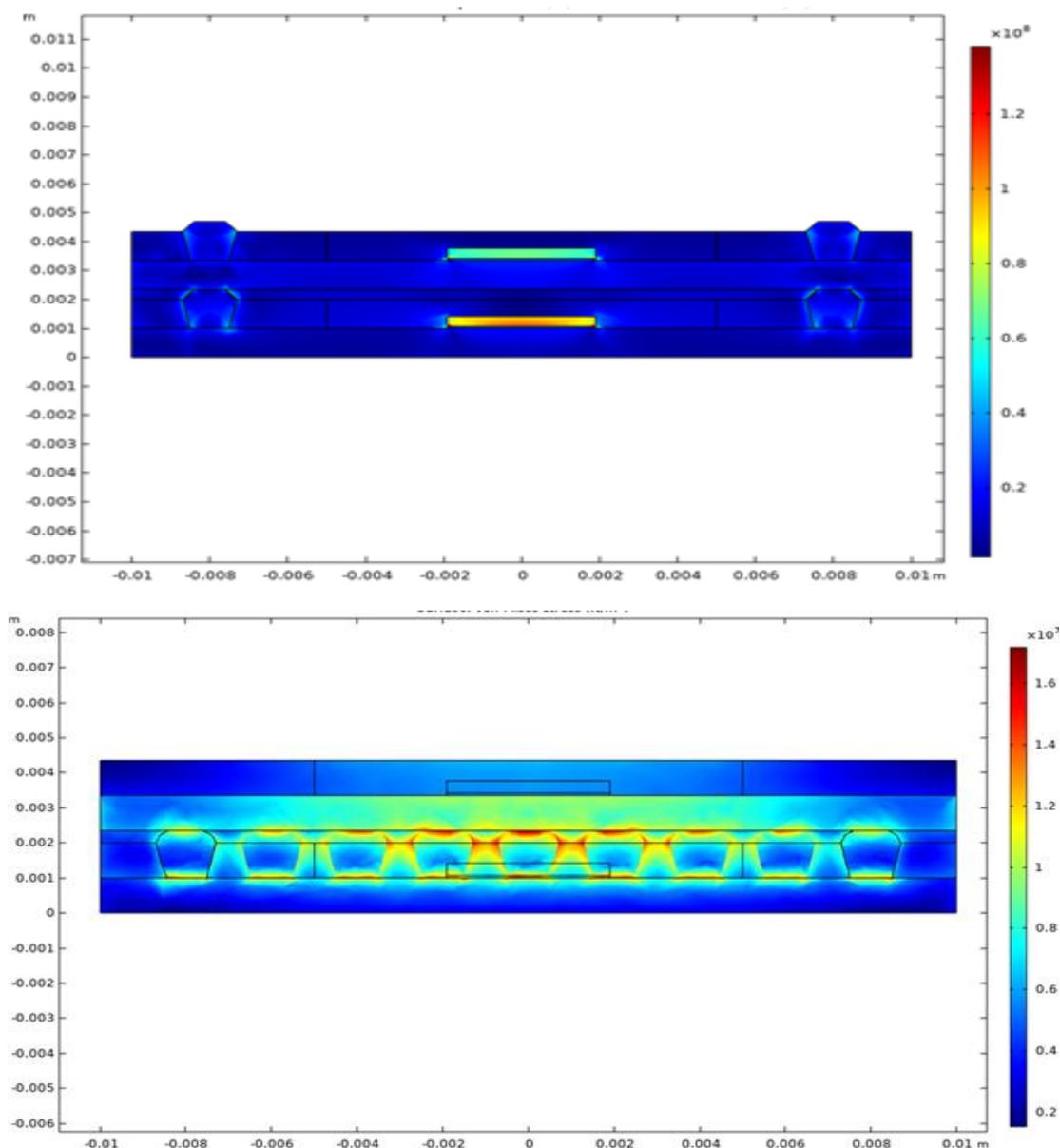


Рис. 4. – Термомеханические напряжения в сечении кристалла и в сечении бампов на примере микросборки с вертикальной коммутацией в виде бампов

## Заключение

Результаты моделирования показали, что среди всех вариантов вертикальной коммутации наименьший уровень термомеханической деформации и термомеханических напряжений обеспечивает вариант с торцевыми коммутационными дорожками. Это объясняется тем, что этот вариант вертикальной коммутации меньше всего влияет на однородность монолитизирующего компаунда за счёт малой толщины коммутации и её расположения на внешней части герметизации.

Тем не менее, даже для варианта микросборки с торцевыми дорожками термомеханическую деформацию удаётся ещё сильнее снизить путём использования во внешней части микросборки менее наполненного компаунда с содержанием наполнителя порядка 70%, хотя такой подход и приводит к незначительному росту напряжений.

Дальнейшее снижение количества наполнителя во внешнем компаунде почти не уменьшает деформации, зато продолжает повышать уровень термомеханических напряжений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания FSMR-2022-0002.*

## Литература

1. Chen W., Bottoms W.R., Pressel K., Wolf J. The Next Step in Assembly and Packaging: System Level Integration in the package (SiP) // SiP White Paper. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2007. p. 81.
2. Xiu L. Time Moore: Exploiting Moore's Law From The Perspective of Time // IEEE Solid-State Circuits Magazine. 2019. p. 39-55.
3. Тимошенко С.П., Тихонов К.С., Титов А.Ю., Петров В.С. Разработка технологий внутреннего монтажа бескорпусных кристаллов на гибкие коммутационные платы // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982).

4. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).

5. Lu D., Wong C. P. Materials for advanced packaging: Second edition. Springer. 2017. p. 974.

6. Carias V., Thompson J., Myers P.D., Kumar P., Racz L.M., Toomey R., Wang J. Development of Mold Compounds With Ultralow Coefficient of Thermal Expansion and High Glass Transition Temperature for Fan-Out Wafer-Level Packaging // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2015. p. 921-929.

7. Shibuya M., Nguyen L. High Thermal Conductivity Mold Compounds for Advanced Packaging Applications // 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference. 2017. p. 1334-1339.

8. Chung S.-L., Lin J.-S. Thermal Conductivity of Epoxy Resin Composites Filled with Combustion Synthesized h-BN Particles // Molecules. 2016. v.21, №670. p. 12.

9. Bartl G., Elster C., Martin J., Schodel R., Voigt M., Walkov A. Thermal expansion and compressibility of single-crystal silicon between 285 K and 320 K // Measurement Science and Technology. 2020. v.31. p. 18.

10. Вертянов Д.В., Беяков И.А., Погудкин А.В., Тимошенко С.П., Сидоренко В.Н. Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. №1. с.28-38.

11. Zeng J., Fu R., Shen Y., He H., Song X. High Thermal Conductive Epoxy Molding Compound with Thermal Conductive Pathway // Journal of Applied Polymer Science. 2009. p. 2117-2125.

12. Li R., Yang D., Zhang P., Niu F., Cai M., Zhan G. Effects of High-Temperature Storage on the Elasticity Modulus of an Epoxy Molding Compound // *Materials*. 2019. v.4. p. 9.
13. Teh P.L., Mariatti M., Akil H.M., Yeoh C.K., Seetharamu K.N., Wagiman A.N.R., Beh K.S. The properties of epoxy resin coated silica fillers composites // *Materials Letters*. 2007. № 61. p. 2156-2158.
14. Зотов А.В., Ляпин А.А. К анализу температурных напряжений в бетонных покрытиях // *Инженерный вестник Дона*. 2013. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
15. Ung P.-C. Теплопередача в деформируемых твердых телах // *Comsol*. 2015. URL: [comsol.ru/blogs?p=190071#Equationpercentage208](http://comsol.ru/blogs?p=190071#Equationpercentage208).

### References

1. Chen W., Bottoms W.R., Pressel K., Wolf J. SiP White Paper. International Technology Roadmap for Semiconductors. 2007. p. 81.
2. Xiu L. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2019. p. 39-55.
3. Timoshenkov S.P., Tikhonov K.S., Titov A.Yu., Petrov V.S. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982).
4. Kudrjavcev P.G., Figovskij O.L. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
5. Lu D., Wong C. P. *Materials for advanced packaging: Second edition*. Springer. 2017. p. 974.
6. Carias V., Thompson J., Myers P.D., Kumar P., Racz L.M., Toomey R., Wang J. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*. 2015. pp. 921-929.
7. Shibuya M., Nguyen L. 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference. 2017. pp. 1334-1339.
8. Chung S.-L., Lin J.-S. *Molecules*. 2016. V.21, №670. p. 12.



9. Bartl G., Elster C., Martin J., Schodel R., Voigt M., Walkov A. Measurement Science and Technology. 2020. v.31. p. 18.
10. Vertjanov D.V., Beljakov I.A., Pogudkin A.V., Timoshenkov S.P., Sidorenko V.N. Izvestiya vuzov. Elektronika. 2022. №1. pp. 28-38.
11. Zeng J., Fu R., Shen Y., He H., Song X. Journal of Applied Polymer Science. 2009. pp. 2117-2125.
12. Li R., Yang D., Zhang P., Niu F., Cai M., Zhan G. Materials. 2019. v.4. p. 9.
13. Teh P.L., Mariatti M., Akil H.M., Yeoh C.K., Seetharamu K.N., Wagiman A.N.R., Beh K.S. Materials Letters. 2007. № 61. pp. 2156-2158.
14. Zotov A.V., Ljapin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
15. Ung P.-C. Comsol. 2015. URL: [comsol.ru/blogs?p=190071#Equation%208](http://comsol.ru/blogs?p=190071#Equation%208).