

Научная статья

УДК 621.192.22

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.51>

Влияние температурных изменений на адгезионные свойства структуры «кремний–эпоксидный компаунд»

Т. Ю. Могильная^{1✉}, А. А. Жуков¹, А. И. Вялов², Л. Л. Пагава³, Н. А. Петелин¹

¹- Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Российская Федерация, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

²-АО «Композит»,

Российская Федерация, 141070, Московская область, Королёв, ул. Пионерская, 4

³Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О. В. Успенского,

Российская Федерация, 127055, Москва, ул. Образцова, 7

mogilnay@mail.ru ✉

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения эпоксидного компаунда с наполнителем SiO₂ для изготовления кремниевых многослойных структур с применением системы «кремний–эпоксидный компаунд». Построена математическая модель распределения напряжений на границе раздела. Расчёты показали, что, при изменении температуры выше 120 °С и ниже -60 °С, структура перестает удовлетворять предъявляемым требованиям. Предложено компенсировать избыточное напряжение за счёт нанесения наноплёнок на границы раздела материалов.

Ключевые слова: стековая конструкция; коэффициент теплового расширения; пластическая деформация; клеевое соединение

Введение. Развитие микроэлектроники базируется на тенденциях уменьшения массогабаритных характеристик электронных компонентов при одновременном возрастании их функциональных возможностей, что реализуется в стекловых конструкциях микромодулей, в которых кремниевые кристаллы малой толщины монтируются один над другим в один многослойный блок в виде законченной функциональной системы с последующей инкапсуляцией специальными полимерными материалами [1]. Материалы, используемые в микромодулях, должны обеспечивать их изготовление и надёжную эксплуатацию в широком температурном диапазоне, что вызывает необходимость разработки материалов со свойствами, удовлетворяющими условиям эксплуатации в диапазоне температур от минус 150° С до плюс 150°С. Микромодули представляют, по сути, гетерострук-

туры, составленные из различных материалов, на границе которых должны сохраняться механические параметры, в том числе и коэффициент линейного теплового расширения в диапазоне температур, определяемые требованиями к работе. В противном случае граница раздела служит источником избыточных напряжений и других трудноудаляемых эффектов. Это приводит к необходимости создания новых клеевых соединений – высоконаполненных компаундов, обеспечивающих уменьшение указанных эффектов, что в целом и определяет актуальность выбранного направления исследований.

Целью данной работы является анализ стекловых конструкций с клеевыми соединениями, состоящими из компаунда, а именно эпоксидной матрицы с инкорпорированным наполнителем SiO₂, для их эксплуатации в широком диапазоне температур.

© Могильная Т. Ю., Жуков А. А., Вялов А. И., Пагава Л. Л., Петелин Н. А., 2022.

Для цитирования: Влияние температурных изменений на адгезионные свойства структуры «кремний–эпоксидный компаунд» / Т. Ю. Могильная, А. А. Жуков, А. И. Вялов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 4 (56). С. 5-46. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.51>

Задачи, поставленные в ходе данной работы:

- анализ образцов компаунда;
- получение инфракрасных спектров для образцов компаунда;
- разработка модели развития напряжений на границе слоёв «кремний–эпоксидный компаунд» и последующее моделирование.

Анализ образцов компаунда. Образцы компаунда имели следующие средние значения основных параметров: теплопроводность $0,369 \text{ м}^2/\text{с}$; теплопроводность $0,772 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, теплоёмкость $1219 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; температура стеклования (T_g) ($159 \text{ }^\circ\text{C} - 167 \text{ }^\circ\text{C}$).

Эпоксидные компаунды демонстрируют высокие смачивание и адгезию к поверхностям, деформационно-прочностные характеристики, малую усадку при отверждении и сравнительно высокую теплостойкость [2]. Чистые компаунды не годятся для подобных задач ввиду сильного размягчения при воздействии температур. Уменьшить данные явления возможно путём увеличения плотности сшивки и добавления различных наполнителей (наиболее применяемые – диоксид кремния, оксид алюминия и другие). Комбинация классического эпоксидного компаунда с SiO_2 позволяет получить компаунд, обладающий не только низким коэффициентом линейного теплового расширения, но и высокой прочностью, жёсткостью и теплостойкостью. В то же время представляет интерес исследовать влияние границы раздела «кремний–эпоксидный компаунд» на конечные характеристики эпоксидных материалов в зависимости от таких сильно влияющих параметров, как химическая структура, свойства и условия отверждения, поскольку фазовая стабильность, топология и изменение размера выделений являются важными факторами, определяющими механические свойства материалов [3].

Для получения эпоксидного компаунда, как правило, используются классические эпоксидно-диановые смолы, отвердители аминного типа и кремнийоргани-

ческие адгезионные добавки [4]. В качестве наполнителя – SiO_2 разных фракций. Особенностью структуры границы «компаунд–кремний» является формирование на поверхности частиц наполнителя межфазного слоя, представляющего собой часть объёма матрицы, в котором под влиянием физического и химического взаимодействия с поверхностью наполнителя свойства существенно меняются. Межфазный слой оказывает значительное влияние на когезионное и адгезионное разрушение как в объёме компаунда, так и на границе раздела слоёв «кремний–эпоксидный компаунд», в том числе и на характер и величины напряжений, возникающих в матрице; он оказывает также влияние на стойкость структуры к воздействию эксплуатационных факторов (влажность, химическая стойкость). Формирование межфазного слоя между пластиной монокристаллического кремния, частицами SiO_2 и компаундом происходит при контакте связующего материала с наполнителем. Решающая роль при этом принадлежит смачивающей способности связующего материала, которая определяется соотношением поверхностных энергий компонентов [5].

Снятые нами сканирующие электронные микрофотографии поверхности наполненного эпоксидного компаунда (рис. 1) показывают, что поверхность раздела неоднородна, частицы SiO_2 касаются поверхности эпоксидного компаунда и, как следствие, создают неравномерность распределения поверхностной энергии на границе компаунда. Это вызывает усиление скорости распространения дефектов по пластине в силу различных механизмов зарождения дефектов и трещин [5].

При наличии неравномерной границы в слое кремния наблюдается так называемый внешний геттер, который представляет собой структурно нарушенный слой, состоящий в основном из дислокаций [5]. В этом слое при геттерировании из объёма локализуется большая часть загрязняющих примесей. К таким примесям в

первую очередь относят те, которые в дальнейшем уже не влияют на параметры электронных структур [5]. Поэтому при разработке новых типов компаундов с уникальными свойствами необходимо учитывать не только совпадение коэффициента линейного теплового расширения плёнки клеевого материала и кремния, но и вероятность образования и дальнейшего изменения дефектов в приграничной области, которые приводят в конечном случае к разрушению структуры. Для исследования этих процессов важно провести экспериментальный и теоретический анализ разработанного компаунда на возможность работы структуры во всём требуемом диапазоне температур.

В таблице представлены экспериментальные данные зависимости среднего коэффициента теплового линейного расширения эпоксидного компаунда при варьируемой толщине слоя компаунда в различных диапазонах температур. Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) определяли методом термомеханического анализа на приборе ТМА Q40.

Известно, что большая разница в коэффициентах линейного расширения при переходе из жидкой в твёрдую фазу может привести к возникновению дефектов по типу внешнего геттера [5].

Одним из распространенных видов макроскопических дефектов компаундов является нарушение сплошности, проявляющееся в образовании пор и трещин. Появление трещин связано с внутренними напряжениями [5]. Размер и форма пор в компаунде определяются структурой

наполнителя и зависят главным образом от формы пространства, образованного между полимерной матрицей и кластерами наполнителя. Как правило, поры в эпоксидных материалах закрытые, т. е. не образуют непрерывной системы, связанной с поверхностью, поэтому эпоксидные материалы обладают повышенной герметичностью, электрической прочностью и влагостойкостью [3, 4]. Поры в таких материалах образуются в основном на границе раздела из-за неоднородности поверхности компаунда.

На рис. 1 приведена типичная сканирующая электронная микрофотография образца 1 (см. таблицу). Видно, что поверхность раздела неоднородна и частицы SiO_2 касаются поверхности эпоксидного компаунда. Матрица модуля первого образца имеет типичное гетерофазное («микрокомпозитное») строение, её микроструктура образована двумя фазами, одна из которых (светлые участки) представляет собой дисперсные частицы, занимающие около 23 % объёма эпоксидного слоя и достаточно равномерно распределённые в изотропной дисперсионной среде (темное поле). Эти образовавшиеся дисперсные частицы имеют неправильную форму, а их размеры колеблются в диапазоне от 20 до 50 мкм. В то же время, как показали результаты нашего исследования методом электронной микроскопии с элементным анализом, размер частиц наполнителя (SiO_2) колеблется от 0,3 до 70 мкм. Разность в размерах составляющих может привести при появлении температурной деформации к существенному усилению укрупнения выделений [6].

Зависимость коэффициента теплового линейного расширения эпоксидного компаунда при варьируемой толщине слоя компаунда

Relationship between the coefficient of thermal linear expansion and the required thickness of the epoxy compound layer

Образец, №	Толщина слоя компаунда, мм	Температура стеклования T_g , °C	Средний коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$	
			при T менее T_g	при T более T_g
1	1,5	156	15,2	62,0
2	5,2	154	17,1	57,6

Для уточнения состава полученного соединения был проведён спектральный анализ образцов. Инфракрасные спектры всех образцов компаундов, полученных на ИК-Фурье спектроанализаторе фирмы Thermo scientific Nicolet iS50 FT-IR, идентичны, и в этих спектральных распределениях присутствуют полосы в диапазонах, характерных для аморфного гидроксидированного кремнезёма (SiO_2 – 1114,74 и 799,57 см^{-1} [7]). Полосы при 1105 и 895 см^{-1} (рис. 2) соответствуют асимметричным и симметричным валентным колебаниям связи Si-O-Si, 940 деформационным колебаниям связей Si-OH и Si-O-Si [7, 8]. В спектре также наблюдаются характерные для эпоксидной смолы пики (1495 и 1509 см^{-1}) интенсивностей полос 1457 и 1509 см^{-1} , соответствующих деформационным колебаниям аминных групп [8]. Это свидетельствует о достаточно равномерном распределении SiO_2 по объёму материала.

Свойства соединений, заполненных наполнителями, характеризуются существенной анизотропией. Механические характеристики в различных направлениях определяются в основном концентрацией наполнителя на границе раздела. Особен-

ностью этого компаунда является сложная зависимость модуля упругости от температуры, представленная на рис. 3. Измерения были проведены на термомеханическом анализаторе модели TMAQ400. Видно, что величина модуля упругости снижается (размягчается, что свойственно подобным эпоксидным системам) с 13310 МПа (при минус 60 °С) до 438 МПа (при 250 °С) (см. рис. 3). Высокое значение модуля упругости при отрицательной температуре характерно для высоконаполненных полимеров с высокой плотностью сшивки. Наклон каждой из этих кривых, т.е. коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение и деформацию, характеризует модуль упругости, а именно G – модуль сдвига (касательной упругости). Модули упругости определяют жёсткость материала, т.е. интенсивность увеличения напряжения по мере упругой деформации [9]. При образовании сетки в такой системе происходят химические превращения, которые приводят к изменению параметров растворимости фрагментов цепей, расположенных между узлами этой сетки. В частности, параметр растворимости эпоксидных фрагментов становится равным 8,9 $\text{кал}/\text{см}^3$.

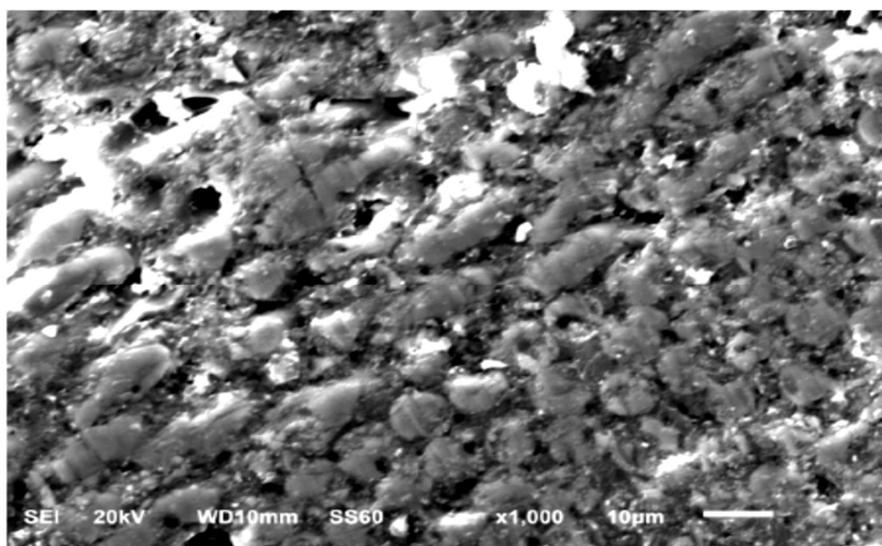


Рис. 1. Сканирующая электронная микрофотография поверхности наполненного эпоксидного компаунда (вкрапления – SiO_2)

Fig. 1. Scanning electron micrograph of the surface of the filled epoxy compound (inclusions – SiO_2)

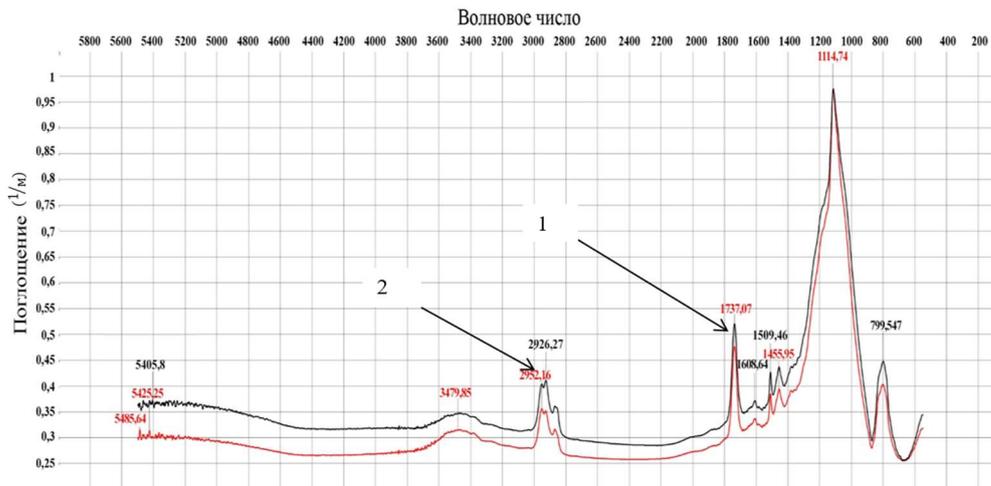


Рис. 2. ИК-спектры образцов эпоксидного компаунда: 1 – пик эпоксидной смолы, 2 – пик SiO₂
 Fig. 2. IR-spectra of epoxy compound samples: 1 – peak of epoxy resin, 2 – peak of SiO₂

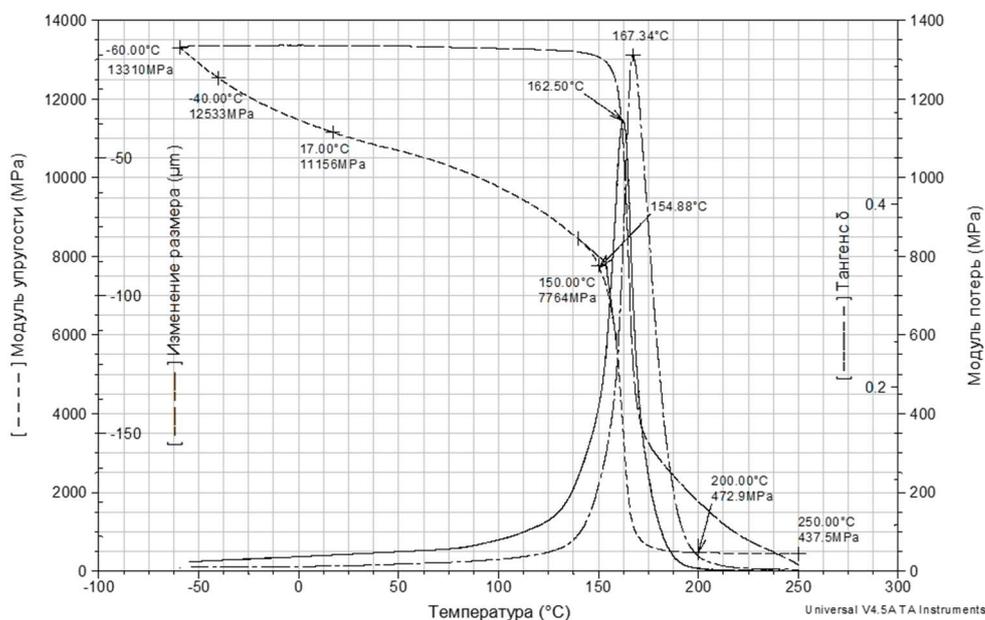


Рис. 3. Зависимость модуля упругости компаунда от температуры
 Fig. 3. Dependence of the elastic modulus of the compound on temperature

В результате наступает частичное микрорасслаивание системы, которое хорошо контролируется по изменению температурной зависимости тангенса угла механических потерь. На этой зависимости становится заметным максимум и резкое возрастание $\text{tg } \delta$, что соответствует размягчению каждого из компонентов наполнителя.

Очевидно, как это уже было отмечено выше, поры в рассматриваемых эпоксидных пластиках закрытые, т. е. не образуют

непрерывной системы, связанной с поверхностью, поэтому эпоксидные пластики обладают повышенной герметичностью, электрической прочностью и влагостойкостью [10]. Именно этим фактором можно объяснить то, что модуль упругости системы крайне неравномерно зависит от температуры. Анализ смещения и напряжения с учётом этого фактора даст много информации о прочности компаунда при разных температурных режимах его использования.

Модель развития напряжений на границе слоёв «кремний–эпоксидный компаунд». На основе полученных экспериментальных данных была разработана модель процесса отверждения эпоксидного компаунда и развития внутренних напряжений при изменении температуры с учётом трещинообразования материала (с учётом образований внутренних напряжений при отверждении) и проведены расчёты смещений и напряжений на границе раздела «кремний–эпоксидный компаунд» с использованием программного пакета Comsol 5.5. Модель представляет собой контакт однородной квадратной пластины кремния и жидкого эпоксидного компаунда в процессе застывания при понижении температуры. Расчёты были проведены с учётом изменения удельной теплоты затвердевания при температуре стеклования и учётом шероховатости поверхности кремния. Поскольку температура стеклования близка к рабочей температуре, при расчётах учитывалась адгезия материала. При моделировании адгезии использовалась концепция двухфазной квазиравновесной зоны [3, 10], которая описывается уравнениями

$$T_l = \varphi(C) \quad a\Delta T - \Theta \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla(DS\nabla C) + k(C)C \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial(SC)}{\partial t}, \quad (2)$$

где T – температура примесного компонента (Si, O); C – концентрация; S – доля жидкой фазы; D – коэффициент диффузии кремния; k – коэффициент температуропроводности; t – время.

Зависимость доли жидкой фазы от концентрации выражалась соотношением

$$S = \left(\frac{C_0}{C} \right)^{\frac{1}{(1-k)}}. \quad (3)$$

Полагая, что при температуре выше температуры кристаллизации (см. рис. 3) изменением модуля упругости можно пренебречь, градиент изменения температуры мы можем определить как

$$a\Delta T = \psi(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

при этом он зависит только от температуры.

Здесь $\psi(T)$ – функция эффективной теплоёмкости внутри двухфазной зоны, имеющая вид

$$\psi(T) = \begin{cases} 1, (T > T_L), \\ 1, (T < T_S), \\ 1 + \left(\frac{\theta}{(1-k)(T_a - T_L)} \right) \times \\ \times \left(\frac{T_a - T_L}{T_a - T} \right)^{\frac{2-k}{1-k}}, (T_S < T < T_L), \end{cases} \quad (5)$$

где T_L – температура ликвидуса исходного состава, T_S – температура окончания затвердевания (солидуса), T_a – температура кристаллизации основного компонента.

При расчётах учитывалась линейная зависимость коэффициента линейного расширения кремния от температуры [9]. Температура во всём объёме кристаллизующейся структуры (рис. 4) описывается замкнутым квазилинейным уравнением теплопереноса [8] с эффективным коэффициентом температуропроводности, зависящим от температуры и имеющим разрывы непрерывности при некоторых температурах. Разрушение эпоксиполимеров при сжатии, сдвиге и изгибе происходит по так называемому «торсионному» механизму, а разрушающие напряжения сдвига при образовании торсионов достигают предельных значений раньше, чем при классическом «плоском» сдвиге, вследствие чего возникает наибольшая вероятность торсионного разрушения полимера. Поэтому уравнения механики в твёрдой фазе представлялись в виде (6) и (7).

Уравнение массопереноса для жидкости при движении в направлении отверждению:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial T} + \left(u - \frac{\partial x}{\partial T} \right) \cdot \nabla_x u \right) = \nabla_x \cdot \sigma. \quad (6)$$

Уравнение массопереноса для границы раздела «жидкость–твёрдая фаза»:

$$\rho \frac{\partial^2 u_{solid}}{\partial t^2} = \nabla_x \cdot \sigma_{solid}. \quad (7)$$

Граничные условия на поверхности раздела «жидкость–твёрдая фаза»:

$$u = \frac{\partial u_{solid}}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\sigma_{solid} n = A \sigma n, \quad (9)$$

$$A: x \rightarrow X, \quad (10)$$

$$X + u_{solid} = x_{fs-interface}. \quad (11)$$

Подстановка отношения «напряжение–деформация» и отношения «деформация–смещение» в уравнение статического равновесия приводит к уравнению равновесия Навье-Стокса, выраженному в смещениях. Для статических условий, включая температуру, уравнение Навье-Стокса имеет вид

$$-\nabla \cdot (c \nabla u) = F. \quad (12)$$

Собственная частота f относится к собственному значению λ как

$$f = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi}, \quad (13)$$

$$\lambda d_a u - \nabla \cdot c_{sta} \nabla u = 0. \quad (14)$$

При расчётах были учтены переходные процессы в объеме компаунда и на его поверхности, а именно изменение модуля упругости от температуры.

Переходная проблема изменения вязкости требует введения второго закона Ньютона, с учётом введения вязкого коэффициента демпфирования [9].

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot c \nabla u = F. \quad (15)$$

При расчётах используется приближение демпфирования по Рэлею для моделирования вязкого демпфирования. При этом применяются два критических коэффициента вязкого демпфирования в различных направлениях застывания компаунда [9].

Особенность данного компаунда, как отмечалось выше, – нестандартная зависимость модуля упругости от температуры (см. рис. 3). Модуль упругости является

практически линейной функцией от температуры в диапазоне от 140 °С до 180 °С. При более низких температурах зависимость приобретает экспоненциальный характер, а при более высоких модуль становится постоянной величиной. Это привело к тому, что расчёт напряжений и смещений был проведён для каждой температуры с учётом изменений модуля упругости и коэффициента Пуассона процесса отверждения. Расчёт проводился для главных напряжений по Мизесу. Для главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ напряжение по Мизесу выражается как [9]

$$\sigma_{vonMises} = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

При этом температура окружающей среды изменялась от комнатной температуры до верхнего значения за время, равное времени стабилизации процесса. При таком подходе температура структуры приравнивалась к температуре внешнего пространства на каждом итерационном шаге.

Результаты расчётов представлены на рис. 4-6. На рис. 4 приведён график распределения внутренних напряжений на границе раздела слоёв «эпоксидный компаунд–кремний» при комнатной температуре, а на рис. 5 – при температуре 120 °С. При этом напряжение в структуре распределено неравномерно, особенно при высоких температурах, где нельзя пренебречь эффектом адгезии в связи с близостью температур начала стеклования и высоких рабочих температур использования данной структуры.

Расчёты показали, что неравномерное распределение внутренних напряжений наблюдается на границе раздела слоёв «эпоксидный компаунд–кремний» и при комнатной температуре. Неравномерность данного распределения является дополнительной функцией увеличения скорости распространения дислокаций [9].

На рис. 4 представлены графики смещения слоёв вблизи центра пластины.

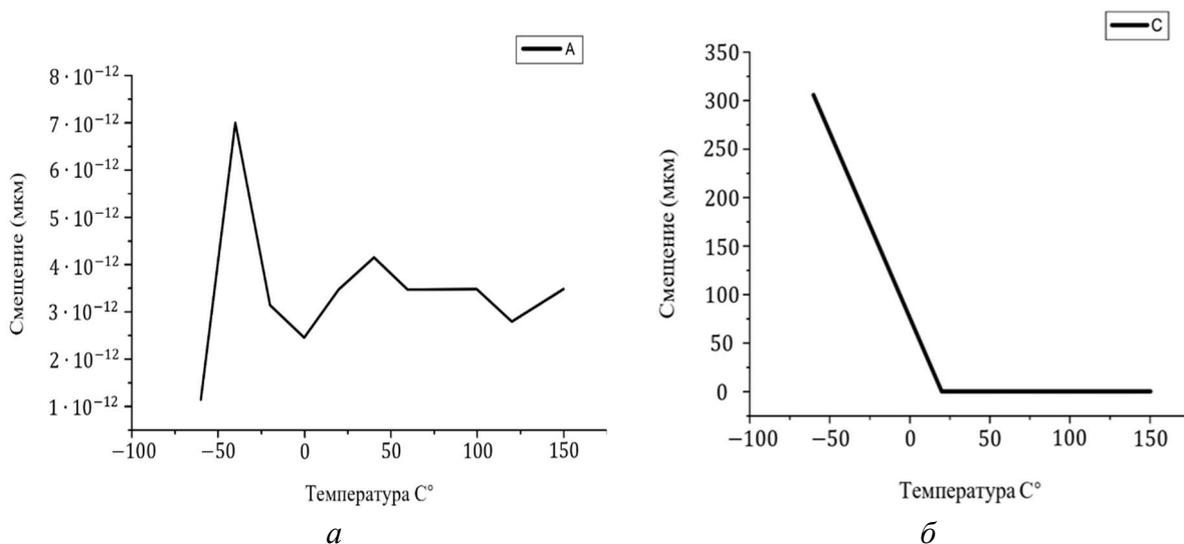


Рис. 4. График смещения слоёв вблизи центра пластины:

а) результирующий график для точки минимума; б) результирующий график максимума смещения от температуры

Fig. 4. Graph of the displacement of layers near the center of the plate: a) the resulting graph for the minimum point; b) the resulting graph of the maximum displacement from the temperature

Максимум при минус 60 °С объясняется резким изменением коэффициента линейного расширения, как это хорошо иллюстрирует рис. 3. Резкое возрастание, как правило, приводит также к началу движения сетки дислокаций и затягиванию примесей, всегда существующих на границах разделов двух материалов [3, 9]. На рис. 5 представлено распределение внутренних напряжений на границе раздела слоёв «кремний–эпоксидный компаунд» при температуре 120 °С.

В качестве критерия разрушения часто берут критерий максимального разрушения по Мизесу, который основывается на теории Мизес-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии формоизменения. Рассчитанное по нашей модели максимальное напряжение по Мизесу на границе раздела слоёв равно $2,1 \cdot 10^8$ Н/м, а максимальное напряжение разрушения кремния – $8,7 \cdot 10^7$ Н/м. Это говорит о том, что для данных объектов существует достаточно большой запас прочности.

В то же время известно, что максимальное напряжение по Мизесу значительно выше, чем остаточное напряжение в структуре (так называемое «техническое

напряжение образования трещин»), при котором начинается трещинообразование.

Зоны с включением примесей SiO₂ приводят к тому, что напряжение по Мизесу [1]) становится больше предельного разрушения σ_{limit} ($\sigma_{\text{vonMises}} > \sigma_{\text{limit}}$).

Считается, что дислокации несоответствия образуют сетки и залегают (в зависимости от толщины нанесённого оксида) на глубине до десятков микрометров от поверхности раздела Si-SiO₂ и параллельны ей [10]. Наличие остаточных механических напряжений в районе ядер дислокаций и повышенная температура понижают порог пластического течения кремния (σ_{limit}). Дислокационные сетки образуются на границе «разупорядоченный кремний–кристаллический кремний» вследствие различия в температурных коэффициентах расширения (для разупорядоченного кремния $\alpha_1 = 7,6 \cdot 10^{-6}$, для кристаллического – $\alpha_2 = 2,5 \cdot 10^{-6}$). Критическое напряжение распада границы характеризует начальную стадию пластической деформации и развития полос сдвига. Согласно расчётам [9], напряжение варьируется от 0,5 до 2,5 ГПа (для 100 0,5 ГПа (для $2\theta \approx 2$ гр) до 2,5 ГПа ≈ 10). Практически оно наблюдалось уже

при значениях модуля упругости 10^{-4} G- 10^{-5} G [9].

Наши расчёты показывают (рис. 5), что уже при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ возникает вероятность пластической деформации границы раздела и, как следствие, создаются условия для начала трещинообразования. При низких температурах начинает работать другой механизм разрушения, в основном это объясняется образованием дополнительной сетки дислокаций, типа дислокаций двойникования [9, 10]. Этот эффект при минус $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается при напряжении порядка $9 \cdot 10^7$ Па, а смещение может достигать от $9,09 \cdot 10^{-9}$ до $9,09 \cdot 10^{-7}$ нм [9]. Во всех случаях для их получения необходимы очень высокие значения модуля сдвига, которые достигаются в нашем случае только при низких температурах. Однако критические деформации двойникования сильно зависят от состояния кристалла кремния и для их оценки требуются дополнительные экспериментальные исследования с целью использования этого компаунда при температурах ниже $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

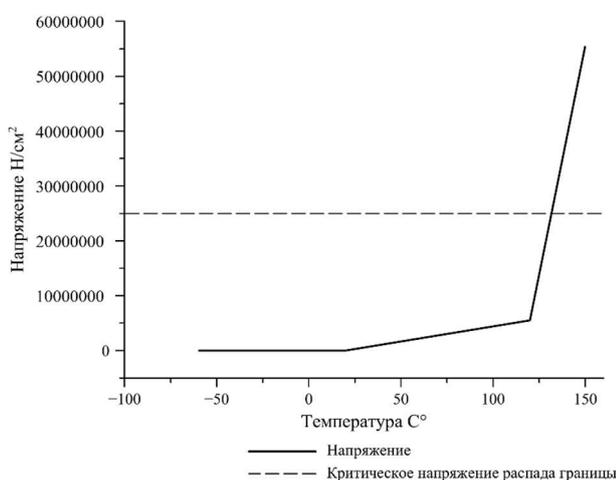


Рис. 5. Результирующий график максимума от температуры вблизи центра пластины
Fig. 5. The resulting graph of the maximum displacement of layers near the center of the plate as a function of temperature

Одним из способов уменьшения подобных деформаций является нанесение нанопленки клея на границу раздела «компаунд–кремний». Это может быть

выполнено и как уменьшение толщины компаунда, и как реализация двойного слоя «компаунд–наноконпаунд» или «нанокремний–компаунд». Силы поверхностного натяжения, которые в массивных образцах не играют существенной роли, в нанобъектах становятся существенными. А поскольку они действуют в приповерхностном слое, их действие можно уподобить приложению внешнего давления, которое, как известно, может изменить как температуру плавления, так и межплоскостные расстояния. Известно применение таких двухслойных структур для обеспечения возможности химической однородности по всему объёму плёнки, а также получения совершенной границы раздела между слоями [9].

Заключение. В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование определения возможности применения клеевого соединения на основе эпоксидного компаунда с добавками SiO_2 в диапазоне температур от минус $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведен анализ основных экспериментальных характеристик модуля упругости разработанного компаунда в диапазоне температур от минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, построена модель развития напряжений в структуре «кремний–эпоксидный компаунд–кремний» в программном пакете Comsol 5.5.

Для прогнозирования развития напряжений при низких температурах была введена линейная экстраполяция модуля упругости. Расчёты показали, что только в диапазоне от минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения на границах раздела структуры «кремний–эпоксидный компаунд–кремний» ниже критических напряжений разрушения. При температуре выше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается критическое напряжение распада границы раздела, возникает вероятность пластической деформации этой границы и развития полос сдвига и, как следствие, появляются условия для начала трещинообразования.

При низких температурах (от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) напряжения становятся порядка

$9 \cdot 10^{-7}$ Па, а смещение может достигать от $9,09 \cdot 10^{-9}$ до $9,09 \cdot 10^{-7}$ нм, также начинает работать другой механизм разрушения, в основном это происходит за счет образования дополнительной сетки дислокаций, типа дислокаций двойникования. При темпе-

ратурах от плюс 120 до плюс 150°C и от минус 120 до минус 60 °C требуются дополнительные экспериментальные исследования влияния неравномерности напряжений на скорость распространения дислокационных структур.

Список литературы

1. Зотов В. PicoBlaze – семейство восьмиразрядных микропроцессорных ядер, реализуемых на основе ПЛИС фирмы Xilinx // Компоненты и технологии. 2003. № 4. С. 194–198.
2. Харченко В.А. Геттеры в кремнии // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2018. Т. 21, № 1. С. 5–17.
3. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе / В. Б. Литвинов, М. С. Токсанбаев и др. // Материаловедение. 2011. № 7. С. 49.
4. Effects of internal stresses and intermediate phases on the coarsening of coherent precipitates: a phase-field study / Asle Zaem, H. El. Kadiri, M. F. Horstemeyer et al. // Journal Current Applied Physics. Mar. 2012. Vol. 12. Pp. 570–580.
5. Investigation of the causes of silicon MOS – transistor parameters catastrophic degradation / O. A. Kulnich, M. A. Glauberman, I. R. Yatsunskiy et al. // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. Sensor Electronics. 2005. No. 1. Pp. 85–89.
6. Казаринов Ю.И. Прочность элементов конструкций с вырезами и повреждениями. Тюмень: ТИУ, 2017. 187 с.
7. Инфракрасные спектры поглощения и структура композитов TiO_2-SiO_2 / Т. Н. Мурашкевич, А. С. Лавицкая, Т. И. Баранникова и др. // Журнал прикладной спектроскопии. 2008. Т. 75, № 5. С. 724–728.
8. ИК спектроскопическое исследование структуры эпоксидной композиции, модифицированной медь/углеродным нанокompозитом, и процессов, связанных с её модификацией / М. А. Чашкин, В. В. Тринеева, М. А. Вахрушина и др. // Химическая физика и мезоскопия. Т. 14, № 2. 2012. С. 223–230.
9. Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Чикичев С.И. Кремний-германиевые эпитаксиальные пленки: физические основы получения напряжённых и полностью релаксированных гетероструктур // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 7. С. 689–715.
10. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде C M. X. Comsol Multiphysics 5.2. / А. В. Коваленко, А. М. Узденова, М.Х. Уртенев и др. СПб: Лань. 2017. С. 228.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 07.12.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

МОГИЛЬНАЯ Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов, Московский авиационный институт (НИУ). Область научных интересов – технология приборостроения. Автор 200 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-0718>

ЖУКОВ Андрей Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов, Московский авиационный институт (НИУ). Область научных интересов – технология приборостроения, микро- и нанотехнологии. Автор 200 научных публикаций.

ВЯЛОВ Андрей Игоревич – кандидат химических наук, начальник отдела клеев, электроизоляционных и герметизирующих материалов, АО «Композит». Область научных интересов – технология приборостроения. Автор 32 научных публикаций.

ПАГАВА Леонид Леонидович – аспирант кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов, начальник сектора электрорадиотехнических средств измерений в отделе Главного метролога, АО МНПК «Авионика». Область научных интересов – технология приборостроения. Автор 14 научных публикаций.

ПЕТЕЛИН Никита Александрович – аспирант, инженер 2-й категории кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов, Московский авиационный институт (НИУ). Область научных интересов – технология приборостроения. Автор трёх научных публикаций.

Вклад авторов:

Могильная Т. Ю. – концепция работы, интерпретация данных, разработка модели.

Жуков А. А. – общее руководство.

Вялов А. И. – проведение экспериментов.

Пагава Л. Л. – разработка и программная реализация алгоритмов.

Петелин Н. А. – участие в экспериментальных исследованиях.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.192.22

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.51>

The Effect of Temperature Changes on the Adhesive Properties of a Silicon-Epoxy Compound Structure

T. Yu. Mogilnaya^{1✉}, A. A. Zhukov¹, A. I. Vyalov², L. L. Pagava³, N. A. Petelin¹

¹ Moscow Aviation Institute (MAI),

4, Volokolamskoye shosse, GSP-3, A-80, Moscow, 125993, Russian Federation

² JSC «Kompozit»,

4, Pionerskaya St., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation

³ JSC Moscow Research and Production Complex «Avionika»,

7, Obraztsova St., Moscow, 127055, Russian Federation

mogilnay@mail.ru ✉

Keywords: stack construction; coefficient of linear expansion; plastic deformation; adhesive connection

ABSTRACT

Introduction. The development of microelectronics is driven by the need to reduce the weight and size of electronic components while increasing their functionality. This is achieved through stacked micromodules, where small silicon crystals are mounted one above the other in a multilayer block, forming a complete functional system that is then encapsulated with specialized polymeric materials. The materials used in micromodules must possess properties that enable their reliable operation in a wide temperature range, spanning from -150°C to $+150^{\circ}\text{C}$. Therefore, the development of materials with suitable properties that can withstand the operating conditions in this range is essential. The **objective** of this study is to investigate the properties of the "silicon-adhesive" structure for stacked microelectronic systems across a wide temperature range. **Findings.** This study examined the use of an epoxy compound with a SiO_2 filler in the production of multilayer structures based on a silicon-epoxy compound. A mathematical model was constructed to analyze the stress distribution at the interface. **Conclusion.** Our calculations revealed that the structure fails to meet the requirements when subjected to temperature changes exceeding 120°C and falling below -60°C .

REFERENCES

1. Zotov V. PicoBlaze – semejstvo vos'mi-razrjadnyh mikroprocessornyh jader, realizuemyh na osnove PLIS firmy Xilinx [PicoBlaze – a family of eight-bit microprocessor cores based on Xilinx FPGAs]. *Komponenty i tehnologii* [Components and technologies]. 2003. No. 4. Pp. 194–198. (In Russ.).
2. Harchenko V.A. Gettery v kremnii [The getters in silicon]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. materialy elektronnoi tekhniki* [Materials of Electronics Engineering]. 2018. Vol. 21, No. 1. Pp. 5–17. (In Russ.).
3. Litvinov V.B., Toksanbaev M.S., Deev I.S. et al. Kinetika otverzhdjenja jepoksidnyh svjazujushhih i mikrostruktura polimernyh matric v ugleplastikah na ih osnove [Kinetics of curing of epoxy binders and microstructure of polymer matrices in carbon fiber reinforced plastics based on them]. *Materialovedenie* [Materials Science]. 2011. No. 7. P. 49. (In Russ.).
4. Asle Zaeem, Kadiri H. El., Horstemeyer M. F. et al. Effects of internal stresses and intermediate phases on the coarsening of coherent precipitates:

a phase-field study. *Journal Current Applied Physics*. Mar. 2012. Vol. 12. Pp. 570–580.

5. Kulinich O. A., Glauberman M. A., Yatsunskiy I. R. et al. Investigation of the causes of silicon MOS – transistor parameters catastrophic degradation. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies. Sensor Electronics*. 2005. No. 1. Pp. 85–89.

6. Kazarinov Ju.I. Prochnost' jelementov konstrukcij vyrezami povrezhdenijami [Strength of structural elements by cutouts and damage]. Tyumen: Industrial University of Tyumen, 2017. 187 p. (In Russ.).

7. Murashkevich T. N., Lavitskaya A. S., Barannikova T. I. et al. Infrazrasnye spektry pogloshhenija i struktura kompozitov TiO₂—SiO₂ [Infrared Absorption Spectra and Structure of TiO₂-SiO₂ Composites]. *Zhurnal Prikladnoii Spektroskopii*. 2008. Vol. 75, No. 5. Pp. 724–728. (In Russ.).

8. Chashkin M.A., Trineeva V.V., Vahrushina M.A. et al. IK spektroskopicheskoe issledovanie struktury jepoksidnoj kompozicii, modificirovannoj med'uglerodnym nanokompozitom i processov, svjaznyh s ee modifikaciej [IR spectroscopic investigations of structure epoxy compositions modified by copper/carbon nanocomposite and processes associate with modification]. *Himicheskaja fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy]. 2012. Vol. 14. No. 2. Pp. 223–230. (In Russ.).

9. Bolhovitjanov Ju.B., Pcheljakov O.P., Chikichev S.I. Kremnij-germanievye jepitaksial'nye plenki: fizicheskie osnovy poluchenija naprjazhennyh i polnost'ju relaksirovannyh geterostruktur [Silicon-Germanium Epitaxial Films: Physical Basis for Obtaining Stressed and Completely Relaxed Heterostructures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 2001. Vol. 171, No. 7. Pp. 689–715. (In Russ.).

10. Kovalenko A.V., Uzdenova A.M., Urtenov M.H. et al. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-himicheskikh processov v srede Comsol Multiphysics 5.2. [Mathematical modeling of physical and chemical processes in the Comsol Multiphysics environment 5.2]. SPb, Lan', 2017. 228 p. (In Russ.).

The article was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 07.12.2022; accepted for publication 15.12.2022

For citation: Mogilnaya T. Yu., Zhukov A. A., Vyalov A. I., Pagava L. L., Petelin N. A. The Effect of Temperature Changes on the Adhesive Properties of a Silicon-Epoxy Compound Structure. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No. 4 (56). Pp. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.51>

Information about the authors

Tatyana Yu. Mogilnaya – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Department of Technology for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control at Moscow Aviation Institute (MAI). Research interests – technology of instrumentation. The author of 200 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-0718>

Andrey A. Zhukov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technology for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control at Moscow Aviation Institute (MAI). Research interests – technology of instrumentation, micro- and nanotechnologies. The author of 200 scientific publications.

Andrey I. Vyalov – Candidate of Chemical Sciences, Head of the Department of Adhesives, Electrical Insulation and Sealing Materials at JSC «Kompozit». Research interests – technology of instrumentation. The author of 32 scientific publications.

Leonid L. Pagava – PhD student at the Department of Technology for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control at Moscow Aviation Institute (MAI), Head of the Sector of Electro-Radio Engineering Measuring Instruments in the Department of the Chief Metrologist at JSC Moscow Research and Production Complex «Avionika». Research interests – technology of instrumentation. The author of 14 scientific publications.

Nikita A. Petelin – PhD student, engineer of the 2nd category of the Department of Technology for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control, Moscow Aviation Institute (MAI). Research interests – technology of instrumentation. The author of 3 scientific publications.

Contribution of authors:

Mogilnaya T. Yu. – developed the work concept, interpreted the data, and developed the model.

Zhukov A. A. – provided general guidance throughout the project.

Vyalov A. I. – conducted the experiments.

Pagava L. L. – developed and implemented software algorithms.

Petelin N. A. – contributed to the experimental studies.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.