

Заключение

Эффективность предлагаемого подхода будет зависеть от степени сокращения числа моделирований (расчетов выходных параметров) исследуемой системы и количества используемых процессоров (клиентов вычислительной сети). Следует ожидать, что наибольший эффект будет достигнут для оптимизационной задачи, в процессе решения которой необходимо многократно осуществлять расчет целевой функции (вероятности нахождения параметров в области допустимых значений) при различных значениях номиналов параметров.

Наилучшего результата можно достичь, если при каждом расчете вероятности $P(x_n, T)$ отмечать те ячейки сетки, которые дают положительный результат, т.е. принадлежность к которым соответствует работоспособному состоянию. В таком случае при всех последующих расчетах для этих ячеек нет необходимости проверять условия работоспособности, а следовательно, осуществлять дорогостоящее моделирование (вычисление выходных параметров).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. – М.: Наука, 1992.
2. *Абрамов О.В., Диго Г.Б., Диго Н.Б., Катусева Я.В.* Параллельные алгоритмы построения области работоспособности // Информатика и системы управления. – 2004. – № 2. – С. 121-133.
3. *Пампуро В.И., Мартынов Г.К.* Прогнозирование стабильности и оценки серийнопригодности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Знание. 1976.
4. *Беккер П., Йенсен Ф.* Проектирование надежных электронных схем. – М.: Советское радио. 1977.

УДК 519.713

© 2008 г. **В.А. Демчук**, канд. физ.-мат. наук,

Н.С. Костюков, д-р техн. наук,

Б.Б. Калиниченко, канд. техн. наук

(Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск)

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ПРИ ПАЙКЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассматривается влияние структуры спая на прочностные свойства металлокерамических соединений. Приведены результаты анализа упругой энергии деформации керамического образца для однослойной, двухслойной и трехслойной структур. Показано, что использование второго слоя с малым коэффициентом термического расширения уменьшает остаточные напряжения.

Введение

В настоящее время наиболее перспективным методом соединения оксидной керамики с другими элементами конструкции принято считать метод активной пайки, основанный на применении активных металлов (Ti, Zr), увеличивающих реакционную способность припоя по отношению к керамическому элементу соединения. Особая роль в этом случае уделяется материалу припоя, который должен ограничивать воздействие остаточных термических напряжений, создавая условия для их равномерного распределения по всему объему переходной зоны между металлом и керамикой. Ключ к получению хорошего соединения лежит в способности модифицировать межфазную область для получения максимальной прочности соединения.

Как показывают результаты экспериментальных исследований, наиболее уязвимой областью спая является поверхность керамической составляющей соединения. Аналитические и численные вычисления показывают, что напряжения, возникающие в этой области, зависят от типа нагрузки и ее величины. Чем меньше остаточные напряжения, возникающие в результате пайки, тем больше прочность соединения, при условии, что на одну и ту же область одновременно воздействуют и механическая и термическая нагрузка. Существенную роль для прогнозирования прочностных свойств спая играет критерий для оценки оптимальной структуры и состава переходной зоны. Для измерения прочности соединения в качестве критерия часто используется максимальное растягивающее остаточное напряжение. Однако нельзя не учитывать влияния других составляющих на процесс разрушения. В качестве величины, определяющей меру повреждения, некоторые авторы предлагают использовать энергию упругой деформации в керамике [1].

Для вычисления наиболее приемлемыми являются численные методы, в первую очередь метод конечных элементов, широко используемый в современных программных пакетах анализа элементов конструкций, – таких как COSMOS/Design STAR, ANSYS, LS Dyna и т. п.

С математической точки зрения, изучаемая проблема сводится к поиску решения $\vec{U}(x, y, z)$ (вектор перемещений) краевой задачи для системы уравнений несвязанной термоупругости, которая может быть сведена к эквивалентной вариационной проблеме, состоящей в отыскании решения $\vec{U}(x, y, z)$, доставляющего минимум функционала свободной энергии [2].

При использовании данного метода энергия упругой деформации вычисляется суммированием значений упругой энергии для всех элементов исследуемой области

$$W_{упр} = \sum \mathbf{s}_{ij} \cdot \mathbf{e}_{ij} \cdot V_{эл},$$

где \mathbf{s}_{ij} и \mathbf{e}_{ij} – характерные значения напряжения и деформации для элемента, имеющего объем $V_{эл}$. Считается, что минимальная упругая энергия, обусловленная остаточными термическими напряжениями, соответствует максимальной прочности спая.

Постановка задачи

Для поиска ответа на вопрос, какими же физико-механическими характеристиками должна обладать межфазная область спаиваемых металлов, рассматривается упрощенная модель (на рис. 1б представлен общий вид модели металлокерамического паяного соединения с одним промежуточным слоем).

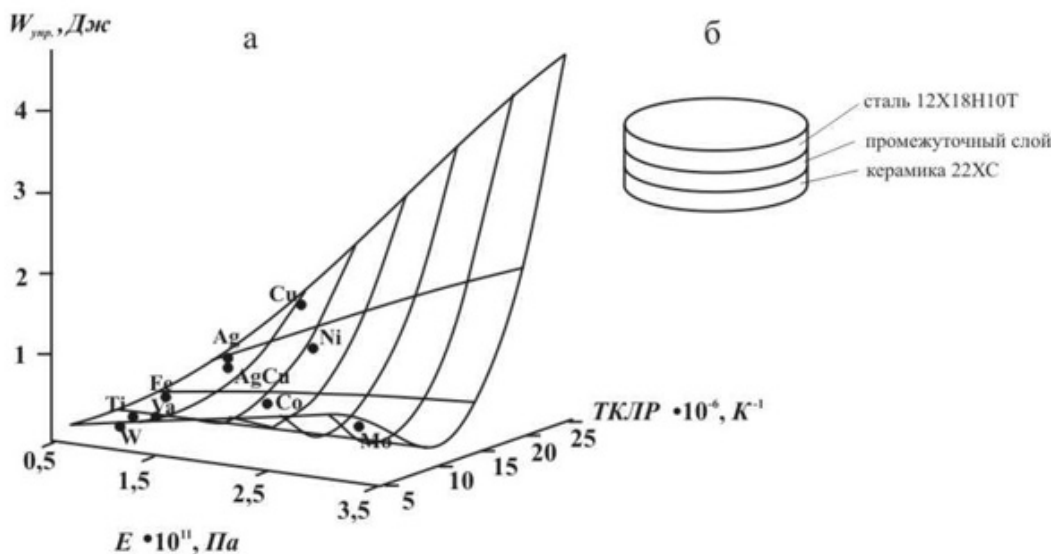


Рис. 1.

Модель представляет собой структуру, образованную тремя дисками диаметром 20 мм и высотой 3 мм. В качестве керамической составляющей соединения выбрана высокоглиноземистая керамика 22ХС, широко используемая в электротехнической промышленности. Металлическая основа представлена конструкционной сталью 12х18н10т. Выбор используемых материалов в модели адаптирован к условиям метода активной пайки, применяемой в настоящее время для создания металлокерамических спаев.

При расчете упругой энергии в керамическом материале методом конечных элементов были приняты следующие допущения: внешнее воздействие отсутствует; материал составляющих элементов конструкции работает в пределах упругости на диаграмме $\sigma - \epsilon$; рассматривается только конечное состояние соединения ($T = 300 \text{ }^{\circ}K$), при этом исходное состояние (при пайке $T = 1000 \text{ }^{\circ}K$) считается свободным от напряжений. Кроме того, не учитывается изменение упругих характеристик материала с изменением температуры. С помощью метода конечных элементов по заданному перепаду температур, упругим и термическим свойствам фаз и их геометрическим размерам исследована зависимость энергии упругой деформации в керамике от упругих и термических свойств промежуточного слоя. Были рассчитаны изменения упругой энергии деформации для искусственно созданных прослоек, обладающих различными термофизическими (коэффициент термического расширения, КТР) и упругими свойствами (модуль упругости).

Решение задачи

Однослойная модель. В результате исследования было обнаружено, что изменение упругих характеристик и коэффициента термического расширения про-

слойки оказывает значительное влияние на энергию упругой деформации в керамическом материале (см. рис. 1, где a – зависимость энергии упругой деформации в керамике от упругих и термических свойств слоя для однослойной структуры переходной зоны). При этом идеальным материалом, обеспечивающим минимальную упругую энергию, являются слои, имеющие минимальный модуль упругости и КТР, что в реальных условиях практически не встречается. Как правило, материалы, имеющие малый КТР, обладают значительным модулем упругости. Однако, как следует из представленных результатов, предпочтение необходимо отдавать материалам с малым коэффициентом термического расширения.

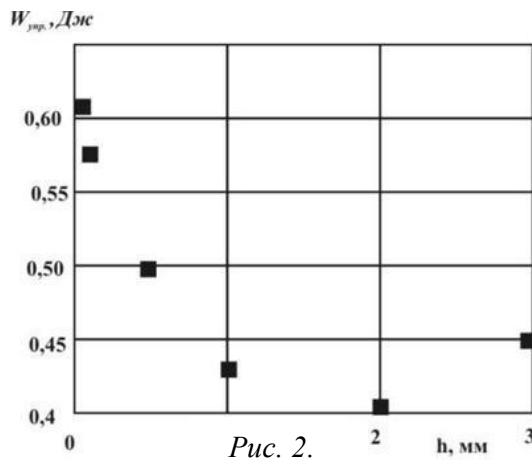


Рис. 2.

Исследование зависимости энергии упругой деформации от толщины прослойки (AgCu) показало, что эти изменения не столь существенны при толщине прослойки более 1 мм. На рис. 2 показана зависимость энергии упругой деформации в керамике от толщины промежуточного слоя.

При толщинах менее 1 мм энергия упругой деформации начинает быстро увеличиваться. Это хорошо согласуется с результатами аналитической модели, представленной в [1], где показано, что $W_{упр} \propto h/r$.

Двухслойная модель. Основываясь на данных, полученных в результате исследования, и учитывая тот факт, что припои AgCuTi обладают повышенным значением модуля упругости, была предложена модель металлокерамического спая с двухслойной структурой переходной зоны (рис. 3б), где в качестве первого слоя выбран материал с высокими значениями термоупругих характеристик ($E = 18,5 \cdot 10^{11}$ Па, ТКЛР = $18,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹). Такой выбор материала был обусловлен результатами экспериментальных исследований области, прилегающей к керамическому образцу, для случая активной пайки, в которой в качестве активного элемента использовалось титановое покрытие.

Методом послойного рентгеноструктурного анализа в этой области было зафиксировано образование интерметаллидной фазы TiCu₄, имеющей высокий модуль упругости. Кроме того, выбор наиболее жестких условий для первого слоя позволял надеяться на более точный выбор материала второго слоя.

Результаты расчетов (представленные на рис. 3а в виде зависимости энергии упругой деформации в керамике от упругих и термических свойств второго слоя для двухслойной структуры переходной зоны) показывают, что двухслойная структура оказывает определенное влияние на величину упругой энергии в керамическом образце. При этом влияние модуля упругости материала второго слоя является неоднозначным и зависит от выбора конкретного материала. Для прослоек, имеющих малый КТР, увеличение модуля упругости способствует уменьшению упругой энергии в керамике и соответственно уменьшению максимальных напряжений. Увеличение ТКЛР второго слоя является отрицательным фактором, аналогично структуре с одним промежуточным слоем.

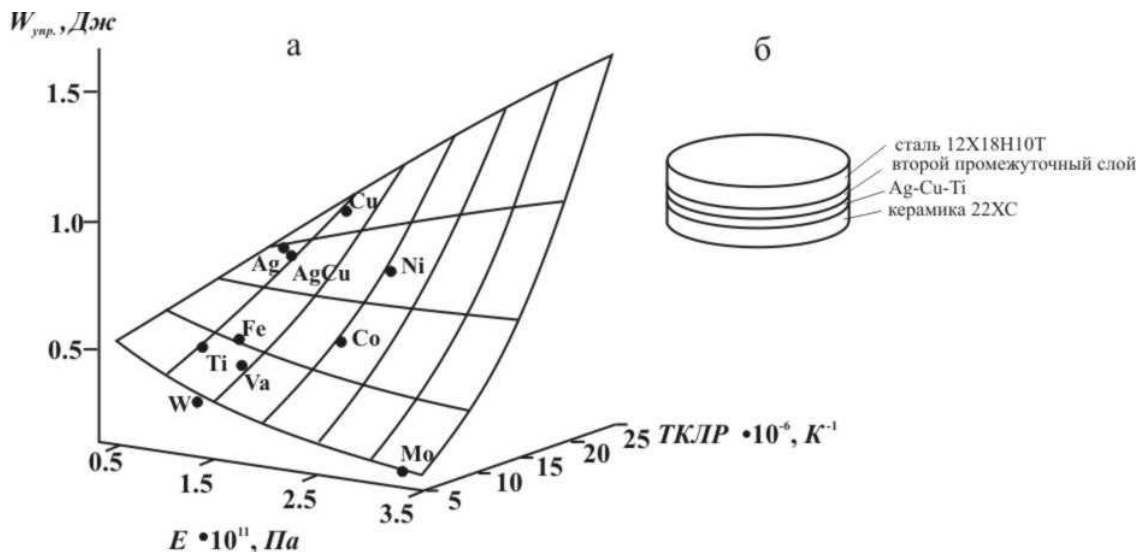


Рис. 3.

Трехслойная модель. Используя результаты, полученные выше, и учитывая реальные условия пайки, для тестирования влияния третьего слоя исследовалась структура (рис. 4б), где в модели металлокерамического спая с трехслойной структурой переходной зоны в качестве второго слоя был выбран Ti. Общая толщина переходной зоны оставалась неизменной и равной 3мм.

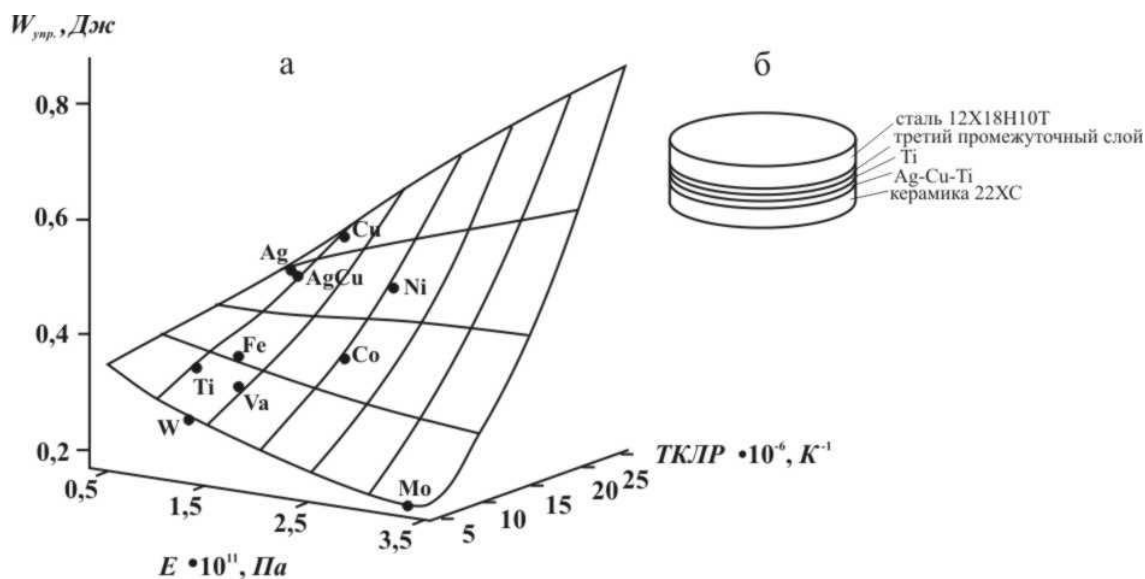


Рис. 4.

Как следует из результатов численного анализа, представленного на рис. 4а, где показана зависимость энергии упругой деформации в керамике от упругих и термических свойств третьего слоя для трехслойной структуры переходной зоны, влияние термоупругих свойств материала третьего слоя повторяет функциональную зависимость, характерную для второго слоя, уменьшая при этом значение энергии деформации. Подобное изменение объясняется влиянием относительных размеров промежуточных слоев на энергию упругой деформации в керамике, что подтверждается результатами численного эксперимента, представленными в таблице.

Толщина первого промежуточного слоя AgCuTi, мм	Толщина второго промежуточного слоя Ti, мм	$W_{упр}$, Дж
0,1	2,9	0,11
0,5	2,5	0,19
1	2	0,34
1,5	1,5	0,49
2	1	0,62

Заключение

Исследования, проведенные с помощью компьютерного моделирования, показывают, что использование слоистой структуры с различными термоупругими свойствами позволяет уменьшить энергию упругой деформации в керамике при пайке металлокерамических соединений.

При этом необходимо учитывать следующее:

уменьшение ТКЛР промежуточных слоев является положительным фактором и способствует увеличению прочности соединения;

материал слоя, прилегающего к керамике, должен иметь минимальный модуль упругости. В качестве второго слоя предпочтительно использовать материал с малым коэффициентом термического расширения и повышенным модулем упругости;

при образовании на поверхности керамики соединений с высоким модулем упругости реакционный слой должен иметь минимальную толщину.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Park J.-W., Mendez P.F., Eagar T.W.* Strain energy distribution in ceramic to metal joints // *Acta Materialia*. – 2002. – V. 50. – P.883-889.
2. *Мусин Р.А., Конюшков Г.В.* Соединение металлов с керамическими материалами. – М.: Машиностроение, 1991.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Плутенко.