

УДК 621.791
И 85

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПАЯНОГО МЕДНО-ГРАФИТОВОГО БРУСА

Г. В. Ермолаев, канд. техн. наук, проф. НУК;
А. В. Лабарткава, доц., канд. техн. наук;
Д. Я. Андреев, магистрант
М. А. Татаренко, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Исследовано напряженное состояние, возникающее при пайке медно-графитового бруса. По результатам исследований выявлены участки наибольших растягивающих напряжений в графите и зависимость этих напряжений от толщин меди, графита и припоя. Предложены некоторые варианты оптимизации узла.

Ключевые слова: паяное соединение, брус, медь-графит, остаточные напряжения, компьютерное моделирование.

Анотация. Досліджено напружений стан, який виникає при паянні мідно-графітового бруса. За результатами досліджень виявлені місця найбільших напружень розтягу, що виникають у графіті, та залежність цих напружень від товщин міді, графіту та припою. Також запропоновані деякі варіанти оптимізації вузла.

Ключові слова: паяне з'єднання, брус, мідь-графіт, залишкові напруження, комп'ютерне моделювання.

Abstract. This work is devoted to the analyzing of questions dealing with the stress state, which occurs during the soldering of copper-graphite beam. According to the analysis results the places of the greatest stretch stress occurring in the graphite are and the dependence of these stretches from the copper, graphite and solder thickness are identified. Also some variants of the unit optimization are offered.

Keywords: soldered joint, beam, copper-graphite, residual stresses, computer modeling.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Настоящая работа возникла в результате сомнений в достоверности некоторых данных, опубликованных в журнале «Journal of materials processing technology» в 2009 г. [1]. Работа посвящена вопросам пайки двухслойных меднографитовых блоков, используемых в качестве теплоизоляции в конструкциях энергетического машиностроения.

Одной из основных проблем при получении таких блоков является неблагоприятное остаточное напряженно-деформированное (НД) состояние после пайки, снижающее прочность или приводящее к хрупкому разрушению узла. Это обусловлено существенным различием физико-механических свойств соединяемых материалов — легированного графита (DG) и меди (Cu), в первую очередь, термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР).

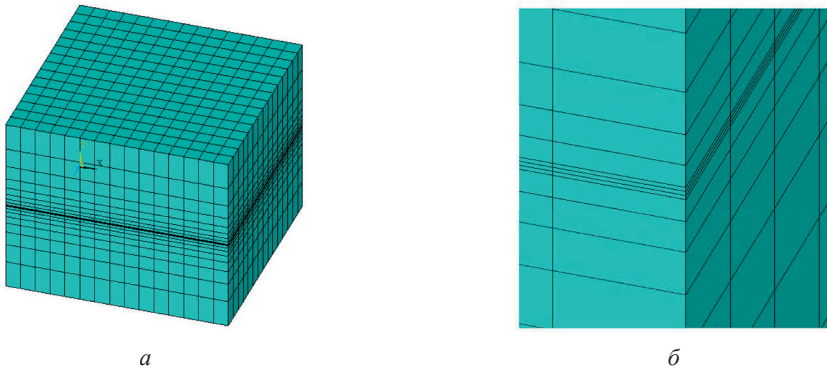


Рис. 1. Схема разбивки на КЭ узла соединения DG-Cu в целом (а) и зоны соединения и концентрации напряжений (б), использованные в источнике [1]

Анализ методики компьютерного моделирования, использованной авторами работы [1], и некоторых их результатов показал, что имеются явные неточности, которые не могли не отразиться на достоверности полученных данных. В частности, необоснованно использован прием взаимной перестановки материалов при смене нагрева охлаждением, который может быть применен только для материалов с одинаковыми упругими свойствами (модулями упругости). Кроме того, выбрана неудачная схема разбивки на конечные элементы (КЭ), в которой используются очень крупные и сильно вытянутые КЭ, особенно в зоне соединения и концентрации напряжений (рис. 1). Исследования авторов [2] показали, что приведенный в работе [1] характер полей напряжений возникает, только если материалы слоев поменять местами. Кроме того, значительно отличается уровень напряжений в узле.

Важность проблемы сохранения целостности и повышения работоспособности таких узлов, находящихся все более широкое применение в современном машиностроении, делает исследование их НДС состояния *актуальным*.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование остаточного НДС состояния паяного медно-графитового бруса и влияния на него соотношения толщин слоев меди и графита и изменения толщины прослойки припоя в пределах 0,1...0,5 мм.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS (версия 10). На данном этапе работы решалась упругая задача.

В качестве образцов для исследований НДС состояния был взят двухслойный брус из меди и графита размерами 15×15×3+3 мм. Нагружение производилось путем равномерного охлаждения образцов после пайки от 800 до 20 °С.

Свойства соединяемых материалов и прослойки, использованные в расчетах, приняты по литературным данным средними в исследованном интервале температур (см. таблицы).

Свойства материалов исследуемого узла

Свойства	Соединяемые материалы		Припой
	Cu	DG	
Модуль упругости E, 10 ¹¹ Па	1,2	0,093	1,08
Коэффициент Пуассона μ	0,34	0,18	0,34
ТКЛР α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	16,7	4,8	7,6

Первый этап работы был направлен на поиск конечных элементов модели для исследований, которая обеспечивала бы оптимальное сочетание достаточной точности результатов, с одной стороны, и времени расчета и необходимых ресурсов ЭВМ — с другой.

Исследованные типы моделей, физической и конечно-элементной, показаны на рис. 2. Выполнялось и сравнивалось решение двух типов моделей: объемной и плоскодеформированной (рис. 2, б, в). Плоские задачи решались для двух сечений объемной модели, по продольной и диагональной плоскостям (рис. 2, а).

С учетом симметрии объемного узла конечно-элементные модели строились для четверти физической модели и половины плоских сечений (рис. 3) с соответствующим закреплением узлов по двум плоскостям или по вертикальной оси. Количество КЭ (узлов) составляло 330000 в объемной и 7200 в плоской моделях.

Поле напряжений σ_z , представляющих наибольший интерес с точки зрения хрупкого разрушения графита после остывания узла, полученное в результате решения объемной задачи, показано на рис. 3. Для удобства анализа оно построено в двух шкалах, наглядно выделяющих растянутую (рис. 3, а) и сжатую (рис. 3, б) области.

Как видно из рисунка, область сжимающих напряжений σ_z на гранях двухслойного бруса занимает всю грань со стороны меди (нижняя часть бруса) и небольшую часть графита, прилегающую к зоне стыка. Область растягивающих напряжений занимает часть графита, прилегающую к верхней его поверхности, т. е. на некотором расстоянии от зоны стыка (см. рис. 3, а).

Наиболее неравномерно напряжения распределены вдоль ребра бруса (см. рис. 3, а, б). Здесь вблизи стыка создается явно выраженная зона концентрации напряжений, в которой максимальные напряжения в меди (около 800 МПа) более чем в 2,5 раза превышают (по модулю) соответствующие значения на грани (около 300 МПа). В графите максимальные растягивающие напряжения составляют на ребре 17 МПа и в средней части грани 10,5 МПа. Такой характер распределения напряжений можно объяснить различными характером и условиями изгиба грани на различных участках.

На ребре напряжения максимальны, так как они обусловлены изгибом одновременно в двух плоскостях. Знак этих напряжений

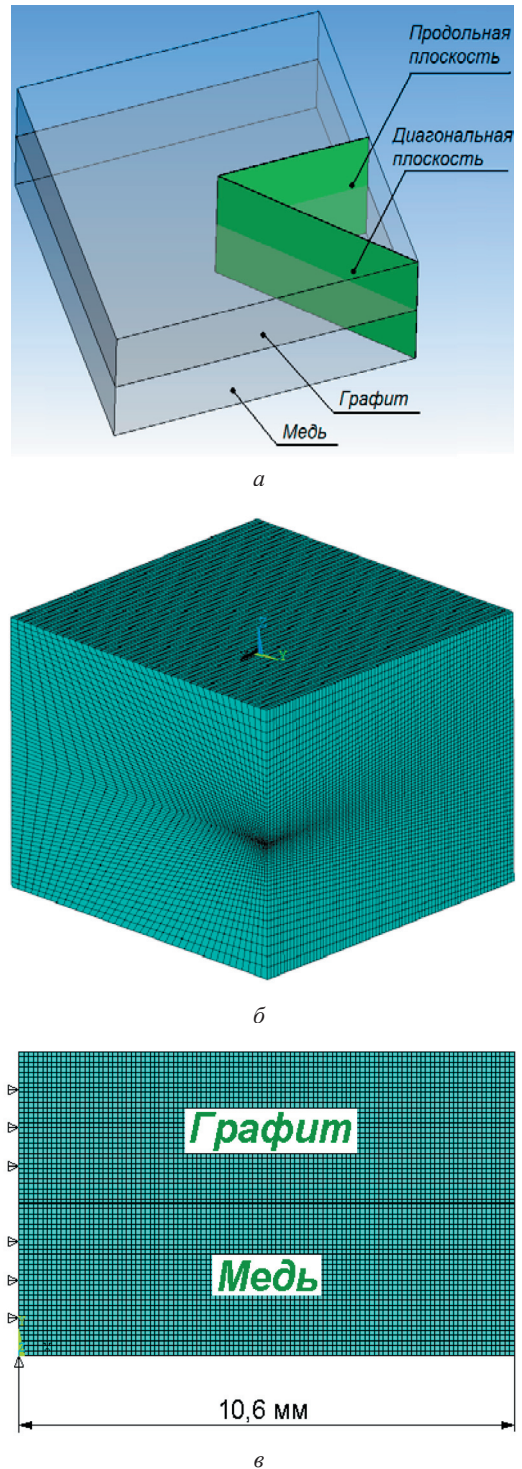


Рис. 2. Исследуемые физическая (а) и конечно-элементные объемная (б) и плоская (в) модели

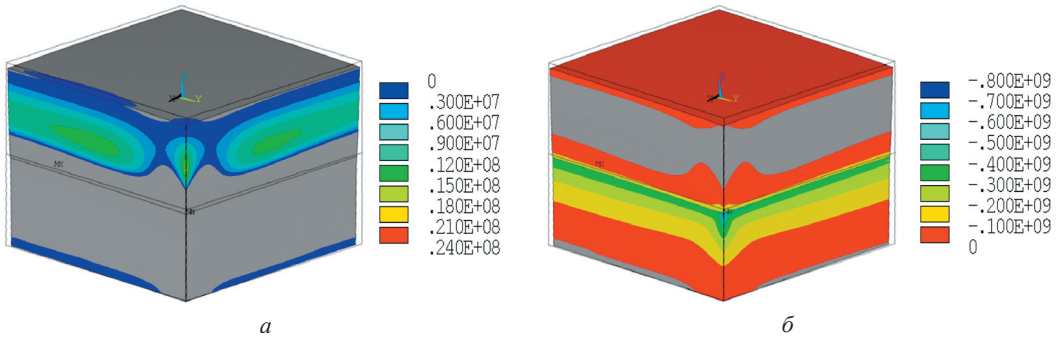


Рис. 3. Поле напряжений σ_z на гранях двухслойного бруса в областях растяжения (а) и сжатия (б)

в меди определяется направлением изгиба: в медной части бруса после его охлаждения изгиб направлен внутрь, поверхность вогнута, поэтому напряжения сжимающие. По мере удаления от ребра влияние изгиба во второй плоскости быстро убывает, соответственно уменьшаются общая кривизна и напряжения. Анализ эпюр распределения соответствующих напряжений по кромке плоских моделей (в продольной и диагональной плоскостях бруса — см. рис. 2,а) показал, что они практически не отличаются, поэтому в дальнейшем изучалась только плоская модель по диагональной плоскости бруса.

Для удобства сравнения результатов решения объемной и плоской задач на рис. 4 показаны эпюры нормальных напряжений σ_z на ребре бруса и соответствующих им напряжений σ_u на кромке плоских моделей для бруса в целом (рис. 4, а), а также участок в области графита (рис. 4, б).

Как видно из рисунков, характер эпюр в целом одинаковый, но уровень напряжений

в плоской модели несколько ниже: в меди -780 и -680 МПа, в графите $16,75$ и $12,8$ МПа. Отличие, таким образом, составляет менее 15% в меди и около 24% в графите.

Сравнение результатов решения различных типов задач для заданной физической модели — двухслойного бруса показало, что наиболее полную и точную картину НДС состояния дает, естественно, объемная модель. Но использование этой модели при разбивке на достаточно мелкие невытянутые КЭ предъявляет очень высокие технические требования к ПК, особенно при переходе к пластической задаче. Поэтому с целью получения максимальной точности решения при доступных технических возможностях ПК, с учетом перспективы решения пластических задач, для дальнейших исследований авторами выбрана плоскодеформированная модель, давшая достаточно близкие к объемной результаты.

На втором этапе работы исследовалось влияние толщины соединяемых слоев меди и

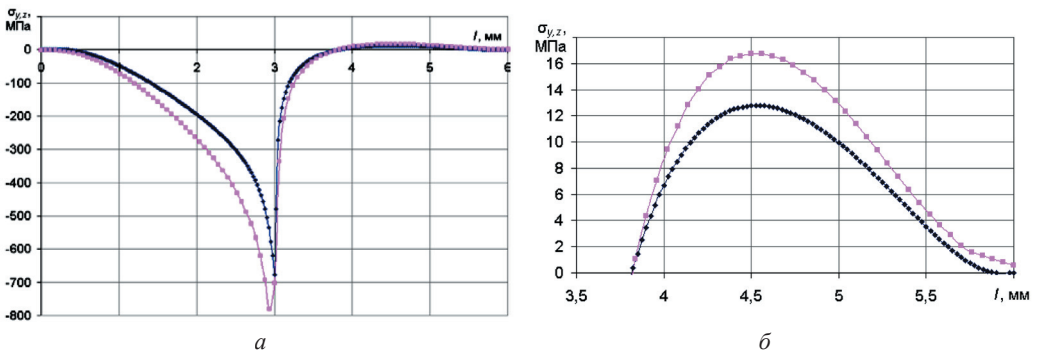


Рис. 4. Эпюры распределения напряжений σ_z вдоль ребра двухслойного бруса (а) и в графите (б) по результатам решения объемной (■) и плоской (◆) моделей

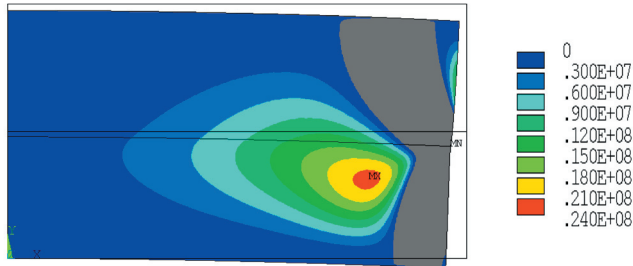


Рис. 5. Поле нормальных напряжений σ_y (вариант 1) в растянутой области

графита на плоских моделях одинаковой ширины (см. рис. 2,в). Модель разбивалась на квадратные КЭ с размером стороны 0,025 мм. Толщина слоев меди и графита принималась 3 + 3 мм (вариант 1) и 6 + 6 мм (вариант 2).

Анализировались поля (рис. 5) и эпюры (рис. 6) нормальных напряжений в слое графита σ_y , которые соответствуют напряжениям σ_z в объемной модели.

Сравнение полей напряжений в вариантах 1 и 2 показало, что при увеличении толщины слоев характер поля изменяется мало, вытягиваясь в направлении толщины и ширины. Уровень максимальных напряжений в графите увеличивается от 13 МПа в варианте 1 до 16 МПа в варианте 2. Точка максимальных растягивающих напряжений в графите, расположенная в варианте 1 на расстоянии 1,5 мм от стыка, удаляется от него в варианте 2 до 2,6 мм, т. е. в 1,7 раза (см. рис. 6).

Вместе с тем следует отметить наличие второй области растягивающих напряжений (см. рис. 5), максимум которой расположен в медном слое, но часть захватывает и слой графита, при этом уровень растягивающих

напряжений здесь соизмерим с максимальными напряжениями на поверхности графита. Можно ожидать, что хрупкое разрушение, зародившееся на поверхности на некотором расстоянии от стыка, затем должно приблизиться к нему и дальше распространяться вдоль него.

Таким образом, увеличение относительной толщины слоев меди и графита в 2 раза при неизменных длине и ширине бруса без изменения в целом характера распределения напряжений в сечении двухслойного бруса несколько увеличивает (около 22 %) уровень максимальных растягивающих напряжений σ_y в графите и смещает его дальше от стыка практически пропорционально увеличению толщины.

С целью изучения влияния соотношения толщин слоев на НДС состояние двухслойного бруса также исследованы плоские модели той же длины и ширины, но толщины слоев меди и графита принимались разными: соответственно 3 + 6 мм (вариант 3) и 6 + 3 мм (вариант 4). Размеры КЭ принимались такими же, как и в вариантах 1 и 2.

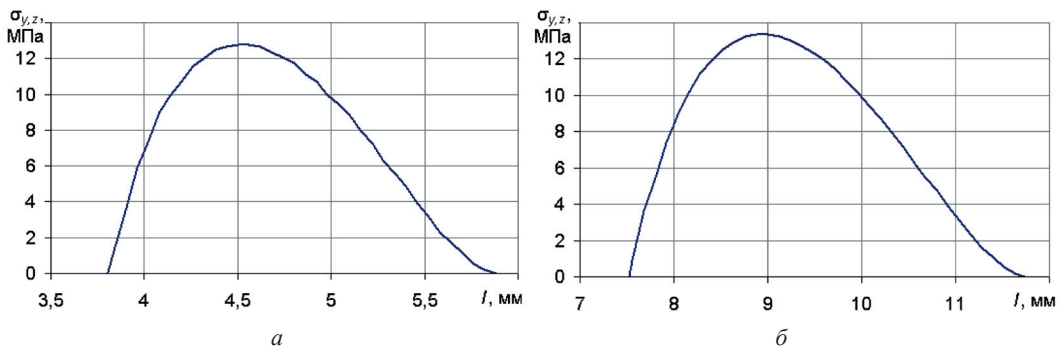


Рис. 6. Эпюры распределения напряжений σ_x по толщине графита в двухслойном брус: а — вариант 1 (3 + 3 мм); б — вариант 2 (6 + 6 мм)

Сравнение полей напряжений показало, что характер в целом сохраняется, расположение растянутых и сжатых областей остается прежним, но степень их сосредоточенности и уровень несколько изменяются. Особенно это заметно в варианте 3, в котором большую толщину имеет менее жесткий материал (графит). В этом варианте существенно увеличивается (до 30 МПа) уровень растягивающих напряжений (рис. 7).

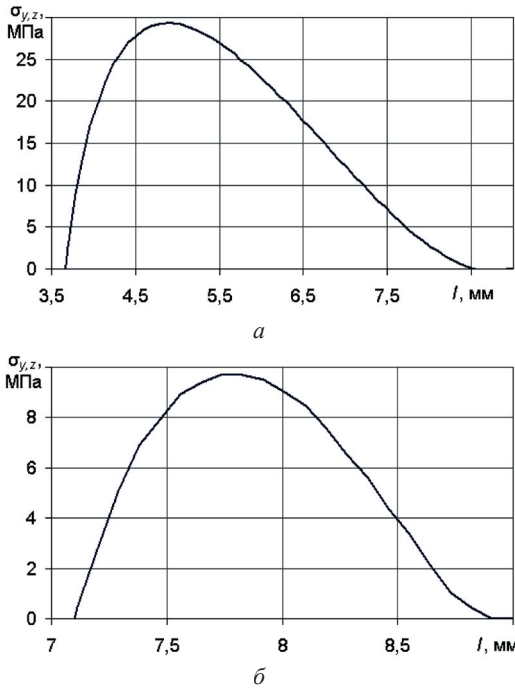


Рис. 7. Эпюры распределения напряжений σ_x по толщине двухслойного бруса: *a* — вариант 3 (3 + 6 мм); *б* — вариант 4 (6 + 3 мм)

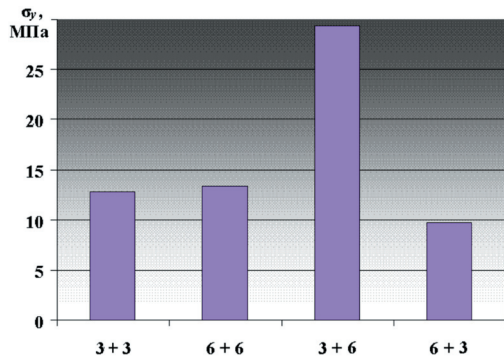


Рис. 8. Максимальные растягивающие напряжения в слое графита для узлов с различным сочетанием толщин слоев (варианты 1–4)

Вместе с тем с уменьшением относительной толщины слоя графита заметно увеличивается уровень растягивающих напряжений внутри слоя в районе стыка, что может привести к зарождению хрупкого разрушения во внутренней части бруса.

Таким образом, сравнение вариантов 1–4 (рис. 8) показывает, что с целью уменьшения остаточных растягивающих напряжений на поверхности графита необходимо по возможности уменьшать толщину графитового слоя по сравнению с медным.

Во всех рассмотренных вариантах предполагалось, что прослойка припоя имеет очень малую толщину и ее влиянием можно пренебречь. В реальных паяных узлах она присутствует и может оказать влияние на уровень остаточных напряжений.

На следующем этапе работы исследовалось влияние толщины прослойки припоя на напряженное состояние паяных узлов медь-графит. Исследования проводили на плоских моделях одинаковой ширины (10,6 мм), толщиной 3 + 3 мм. Толщина прослойки припоя принималась равной 0,1 мм (вариант 1); 0,2 мм (вариант 2); 0,3 мм (вариант 3); 0,4 мм (вариант 4) и 0,5 мм (вариант 5).

Сравнение полей и эпюр узлов без прослойки и с прослойками показало, что наличие последней в целом мало изменяет характер распределения напряжений σ_y , но уровень максимальных (по модулю) напряжений при этом несколько изменяется (рис. 9).

В графите при наличии прослойки припоя растягивающие напряжения увеличиваются от 13 МПа (в соединении без прослойки) до 14 МПа (с прослойкой 0,1 мм) и 23 МПа (с прослойкой 0,5 мм). В самой прослойке припоя напряжения изменяются от сжатия (–150 МПа при толщине 0,1 мм) до нуля (при толщине 0,2 мм) и затем возрастают в сторону растяжения (+170 МПа при толщине 0,5 мм).

Таким образом, с точки зрения уменьшения вероятности хрупкого разрушения графита толщину прослойки припоя целесообразно по возможности уменьшать, например, используя пайку с давлением. Кроме того, прослойки припоя большой толщины при недостаточной пластичности и прочности на растяжение могут вызвать разрушение по стыку.

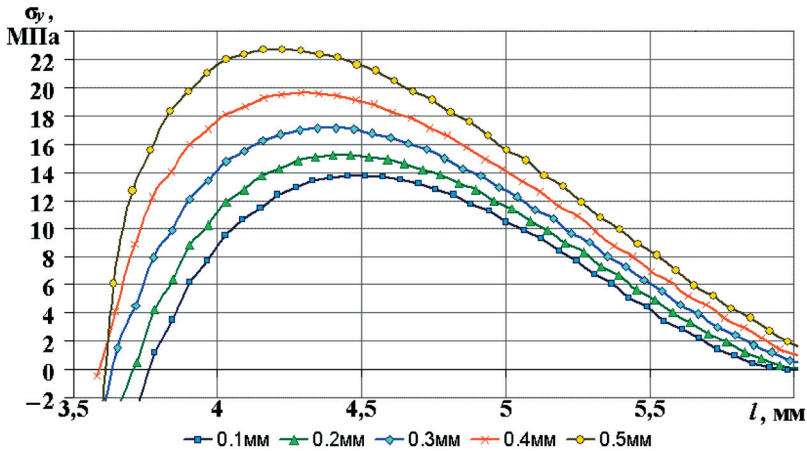


Рис. 9. Эпюры растягивающих напряжений в графите при различной толщине прослойки припоя (от 0,1 до 0,5 мм)

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненного исследования НДС состояния паяного медно-графитового бруса установлено, что максимальные растягивающие остаточные напряжения в графите, которые могут вызвать его разрушение, сосредоточены вблизи стыка на грани и

во внутренней части графита. 2. Для уменьшения остаточных растягивающих напряжений в слое графита необходимо по возможности уменьшать толщину графитового слоя по сравнению с медным. Кроме того, целесообразно уменьшать толщину прослойки припоя, например, используя пайку с давлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Zhihong Zhong*. Brazing of doped graphite to Cu using stress relief interlayers [Text] / Zhong Zhihong, Zhou Zhangsan, Ge Changchun // Journal of materials processing technology. — 2009. — P. 2662–2670.
- [2] *Махненко, В. И.* Влияние физико-механических свойств соединяемых металлов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка. — К., 2008. — № 1. — С. 5–11.