

Влияние толщины жесткой прослойки на напряженно-деформированное состояние металлографитовых узлов при термическом нагружении

Г. В. Ермолаев^а, В. А. Мартыненко^{а,1}, С. В. Алексеенко^б, А. В. Лабарткава^а, М. В. Матвиенко^а

^а Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

^б Черниговский национальный технический университет, Чернигов, Украина

¹ volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Определено влияние толщины промежуточной твердой прослойки на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов. Методом компьютерного моделирования решена осесимметричная упругопластическая задача для быстрого охлаждения узла после сварки. Проведено сравнение полей и эпюр напряжений в узлах при различной толщине прослойки и в случае ее отсутствия. Установлено, что все напряжения в узле сосредоточены в непосредственной близости от места стыка соединяемых материалов и прослойки. При этом характер полей напряжений в соединяемых материалах существенно не изменяется с изменением толщины прослойки, однако изменяется их уровень. С увеличением толщины прослойки точка максимума напряжений растяжения в графите постепенно удаляется от стыка, и его величина уменьшается. Для уменьшения опасности разрушения графита после охлаждения узла целесообразно использовать жесткую прослойку толщиной не менее 1 мм.

Ключевые слова: диффузионная сварка, напряженно-деформированное состояние, разнородные материалы, компьютерное моделирование, пластическая деформация, жесткая прослойка, узел цилиндр–цилиндр.

Введение. Паяные узлы из разнородных материалов, в частности медно-графитовые, все более широко применяются в современном энергомашиностроении благодаря уникальному сочетанию в одном узле различных теплофизических свойств (высокие жаропрочность, тепло- и электропроводность).

Одной из основных проблем получения таких узлов, обусловленной существенным различием температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов, является неблагоприятное остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС), которое снижает их работоспособность или даже вызывает хрупкое разрушение графита после охлаждения [1, 2]. Для снижения уровня возникающих напряжений широко используются промежуточные прослойки [1, 2].

Исследования методом компьютерного моделирования [2–4] позволили установить некоторые общие закономерности образования остаточного НДС узлов из разнородных материалов и основные факторы влияния. При этом недостаточно изучены остаются вопросы влияния свойств и толщины промежуточных прослоек, в частности, прослоек повышенной жесткости и прочности на НДС узлов.

Известная из литературных источников информация о методах регулирования собственных напряжений в конструкциях из разнородных материалов путем регулирования термического цикла, использования процессов релаксации и оптимального конструктивного оформления соединений имеет, как правило, качественный характер [2].

Поэтому исследование НДС металлографитовых узлов при различной толщине промежуточной прослойки из жесткого материала является актуальным.

Цель настоящей работы заключается в определении влияния толщины промежуточной жесткой (твердой) прослойки на НДС при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов, в частности графита с металлом, и возможности (целесообразности) использования их для снижения остаточных напряжений при охлаждении узлов после сварки (пайки).

Методика исследования. Исследования выполняли методом компьютерного моделирования, основанного на методе конечных элементов, на узлах типа цилиндр–цилиндр. Общий вид узла и схема конечноэлементной (КЭ) модели показаны на рис. 1.

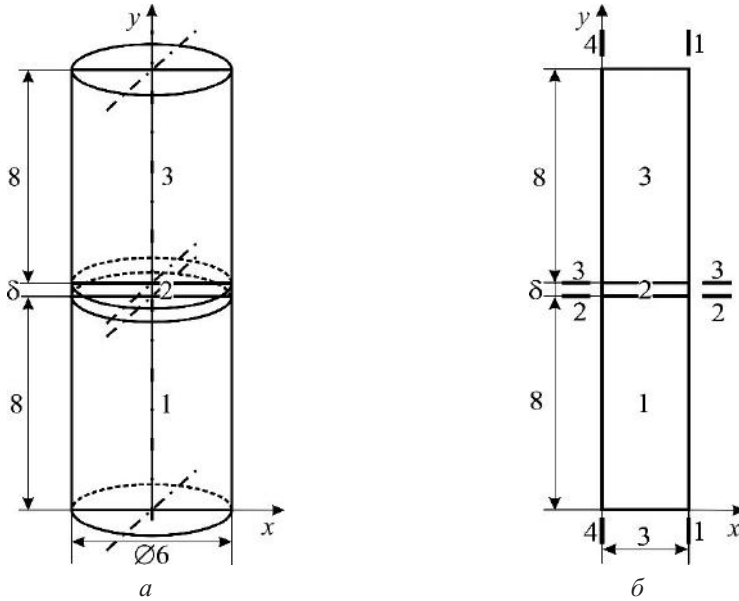


Рис. 1. Общий вид узла (а) и схема осесимметричной КЭ модели (б).

Размеры узла следующие: диаметр $d = 6$ мм; общая высота $h = 8 + 8 + \delta$ мм; толщина прослойки δ изменялась от 0,5 до 3,0 мм, соответственно степень вытянутости δ/d – от 0,083 до 0,5. Узел изготовлен из графита (на рис. 1 поз. 1) и меди (3), прослойка (2) – из молибдена. Физико-механические свойства материалов, принятые в расчете, приведены в таблице.

Физико-механические свойства соединяемых материалов

Материал	ТКЛР, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Коэффициент упрочнения, МПа
Графит	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^5$	0,18	–	–
Медь	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^5$	0,34	60	$1,1 \cdot 10^3$
Молибден	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^5$	0,30	–	–

Решалась осесимметричная упругопластическая задача для быстрого охлаждения узла после сварки (пайки) с 850°C до нуля при давлении сжатия вдоль оси узла 5 МПа. Сравнивались поля и эпюры напряжений в узлах при различной толщине прослойки (0,5...3,0 мм) и в случае ее отсутствия.

Обсуждение результатов. Анализ полей осевых (рис. 2), радиальных, окружных, касательных и эквивалентных (рис. 3) напряжений показывает, что все напряжения сосредоточены в непосредственной близости от стыка соединяемых материалов и прослойки. При этом характер полей напряжений в соединяемых материалах существенно не изменяется с изменением толщины прослойки, однако изменяется их уровень. Характер распределения, уровень и знаки радиальных и окружных напряжений во всех вариантах узлов будут практически одинаковыми.

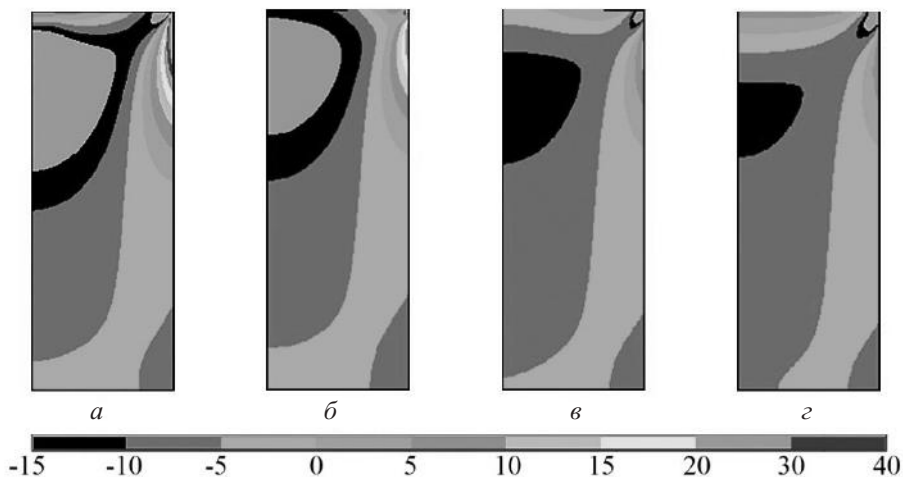


Рис. 2. Поля осевых напряжений (в МПа) в графите узла без прослойки (а) и с прослойкой толщиной 0,5 (б), 1,5 (в) и 3,0 мм (г).

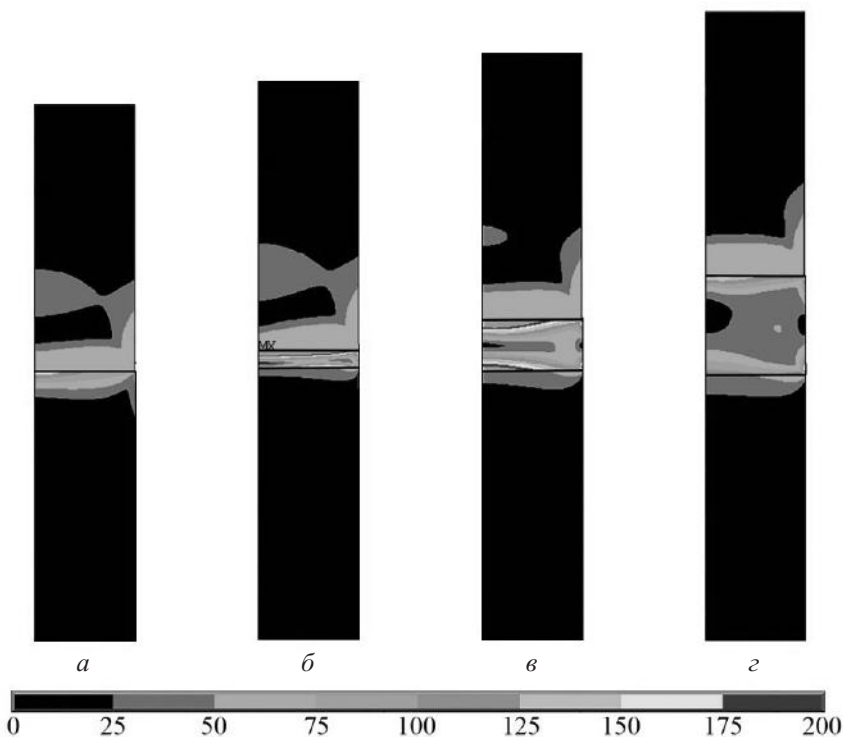


Рис. 3. Поля эквивалентных напряжений (в МПа) в узле без прослойки (а) и с прослойкой толщиной 0,5 (б), 1,5 (в) и 3,0 мм (г).

Максимальные осевые напряжения растяжения, определяющие вероятность появления трещин (разрушения) на поверхности графита, сосредоточены на образующей вблизи стыка (рис. 2 и 4). С увеличением толщины прослойки точка максимума напряжений постепенно удаляется от стыка, и его величина уменьшается (от 106 МПа в узле без прослойки до 10 МПа в узле с прослойкой толщиной 3,0 мм) – рис. 4. В непосредственной близости от стыка в узлах с прослойкой напряжения переходят в сжимающие, и их уровень с ростом толщины прослойки увеличивается (–150...–250 МПа).

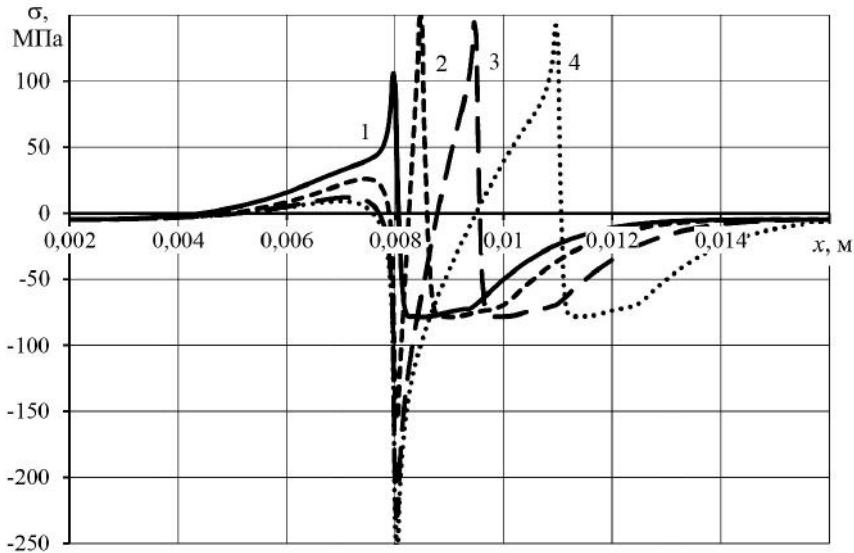


Рис. 4. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей (сечение I-I) в узле без прослойки (1) и с прослойкой толщиной 0,5 (2), 1,5 (3) и 3,0 мм (4).

На стыке осевые напряжения резко меняют знак, при этом уровень максимальных напряжений сжатия в соединении без прослойки увеличивается до –75 МПа, в прослойке толщиной 0,5 мм – до –150 МПа и в прослойке толщиной 3,0 мм – до –250 МПа. Внутри прослойки они снова уменьшаются до нуля, меняют знак в средней части ее толщины и увеличиваются по мере приближения к поверхности стыка с медью. Уровень максимальных напряжений растяжения в материале прослойки на стыке с медью практически не зависит от толщины прослойки и составляет примерно 150 МПа.

На стыке с медью осевые напряжения опять резко переходят в сжимающие, их максимум (79 МПа) при этом не зависит от толщины прослойки. Этот уровень мало изменяется на расстоянии около 1,5 мм от стыка, что свидетельствует о появлении пластических деформаций в меди. За пределами этого участка напряжения постепенно уменьшаются до –5 МПа, и на расстоянии более 5 мм от стыка остаются на этом уровне.

Такой характер распределения осевых напряжений вдоль образующей узла обусловлен ее искривлением вследствие различия в температурных деформациях соединяемых материалов [5]. Поверхность графита с меньшим ТКЛР в непосредственной близости от стыка изгибается выпуклостью наружу, а меди с большим ТКЛР – внутрь. Соответственно на выпуклой части узла напряжения – растягивающие, а на вогнутой – сжимающие.

Уровень осевых напряжений вдоль оси узла меньше, чем на поверхности (рис. 2). В графите такие напряжения сжимающие, максимум их расположен на расстоянии

0,5–1,0 мм от стыка, его величина уменьшается по мере увеличения толщины прослойки (от 30 МПа в узле без прослойки до 10 МПа с прослойкой толщиной 3,0 мм). По мере приближения к стыку уровень осевых напряжений уменьшается до ± 10 МПа. В узлах без прослойки и с прослойкой толщиной 3,0 мм эти напряжения меняют знак, с прослойкой толщиной 0,5 и 1,0 мм они сжимающие и небольшие.

Вблизи стыка медь–прослойка они – растягивающие для всех вариантов узлов (от 35 МПа при толщине прослойки 3,0 мм до 70 МПа при 0,5 мм), по мере удаления от стыка они постепенно уменьшаются до нуля.

В жесткой прослойке осевые напряжения по толщине сначала возрастают в сторону сжатия (до 50...70 МПа при толщине прослойки 1,5 и 3,0 мм), а затем снова уменьшаются (до 30...50 МПа соответственно).

Вдоль стыка графит–прослойка осевые напряжения на большей части длины в вариантах с прослойкой толщиной 1,5–3,0 мм изменяются мало и только по мере приближения к внешней цилиндрической поверхности резко возрастают со сменой знака (рис. 5,а). В узлах с тонкой прослойкой (0,5 мм) их распределение по длине стыка более сложное. На большей части длины во внутренней части сжимающие напряжения медленно уменьшаются от –13 МПа до нуля, меняют знак, увеличиваются до 9 МПа, затем снова снижаются, меняют знак и резко возрастают в непосредственной близости от поверхности узла.

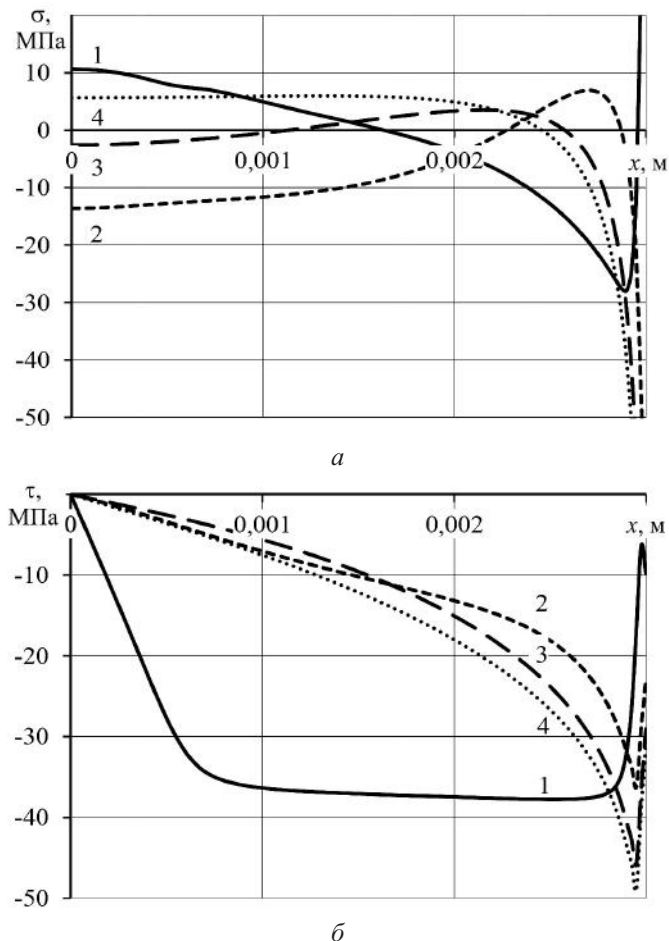


Рис. 5. Эпюры осевых (а) и касательных (б) напряжений вдоль стыка графит–молибден (сечение 2–2) в узлах без прослойки (1) и с прослойкой толщиной 0,5 (2), 1,5 (3) и 3,0 мм (4).

Для сравнения в узле без прослойки имеет место иная картина. От растягивающих напряжений 10 МПа вдоль оси узла они постепенно уменьшаются до нуля, меняют знак, увеличиваются до -28 МПа вблизи наружной поверхности, затем резко снижаются, меняют знак, и на поверхности растягивающие напряжения достигают 100 МПа.

Вдоль стыка медь–прослойка осевые напряжения распределены неравномерно. В узлах без прослойки и с прослойкой толщиной 0,5 мм в средней части стыка они – растягивающие (около 15...30 МПа), постепенно снижаются до нуля, переходят в сжимающие, которые возрастают до -25 ... -30 МПа вблизи поверхности. Затем они резко уменьшаются, переходят в растягивающие на поверхности и составляют примерно 50 МПа.

В узлах с прослойкой толщиной более 1 мм вблизи оси осевые напряжения переходят в сжимающие (-30 ... -50 МПа), которые постепенно уменьшаются, и вблизи внешней поверхности резко возрастают в сторону растяжения (до 50 МПа).

Радиальные и окружные напряжения в графите – сжимающие и сосредоточены в непосредственной близости от стыка. Вдоль стыка в узлах с прослойкой они распределены равномерно (-39 ... -48 МПа), радиальные напряжения резко уменьшаются до нуля только у боковой поверхности. В узле без прослойки эти напряжения в средней части стыка намного выше (-129 МПа). По мере удаления от стыка они для всех вариантов узлов быстро уменьшаются, и на расстоянии 2 мм от стыка равны нулю.

По толщине жесткой прослойки радиальные и окружные напряжения вдоль оси узла изменяются от максимальных растягивающих (75...260 МПа) на стыке с графитом до максимальных сжимающих (-241 ... -428 МПа) на стыке с медью. При этом вдоль стыков они постепенно снижаются (до 100 МПа и -65 МПа на границе с графитом и медью соответственно). На внешней поверхности радиальные напряжения уменьшаются до нуля.

Радиальные и окружные напряжения в меди – растягивающие и также сосредоточены вблизи стыка. Вдоль стыка в узлах с прослойкой они распределены неравномерно и их максимальное значение заметно уменьшается (в узле без прослойки составляет 85 МПа) по мере удаления от оси узла. При наличии прослойки толщиной 0,5 мм их максимум изменяется мало (90 МПа), но с увеличением толщины он заметно снижается (до 39 и 20 МПа при толщине прослойки 1,5 и 3,0 мм соответственно).

По мере удаления от стыка эти напряжения для всех вариантов узлов сначала несколько увеличиваются, достигая максимума (95...140 МПа), затем быстро уменьшаются, и на расстоянии около 2 мм от стыка равны нулю.

Касательные напряжения также сосредоточены в области соединения (рис. 5,б). Вдоль стыка графита с жесткой прослойкой они распределены неравномерно, постепенно увеличиваются от нуля вдоль оси узла до максимума вблизи наружной поверхности. Уровень максимума при этом увеличивается с ростом толщины прослойки: от 36 МПа при толщине 0,5 мм до 50 МПа при 3,0 мм. На рис. 5 показана также эпюра напряжений в узле без прослойки. Сравнение показывает, что при отсутствии прослойки касательные напряжения по мере удаления от оси узла растут быстрее, достигая максимума уже на расстоянии около 7 мм, и дальше практически не изменяются вплоть до наружной поверхности узла (35...38 МПа).

Распределение касательных напряжений вдоль стыка меди с жесткой прослойкой аналогично таковому в узле без прослойки, их увеличение от нуля до максимума наблюдается на расстоянии 0,5–1,0 мм от стыка, дальше они практически не изменяются вплоть до поверхности узла (35...38 МПа).

В соответствии с отдельными составляющими распределены в узле и эквивалентные напряжения, которые также сосредоточены вблизи стыков соединяемых материалов и прослойки (рис. 3).

При наличии прослойки вдоль стыка с графитом их величина изменяется от минимума (30...45 МПа) в центре стыка до максимума (до 120 МПа) на внешней боковой поверхности. В узле без прослойки картина обратная, максимальные напряжения (140 МПа) уменьшаются к периферии до 50 МПа.

В прослойке вдоль стыка с графитом эквивалентные напряжения снижаются от максимума (120...275 МПа) по оси узла до минимума (100...150 МПа) вблизи боковой поверхности и затем резко возрастают (до 300 МПа) на самой поверхности. С увеличением толщины прослойки средний уровень напряжений заметно снижается. Исключение составляет прослойка толщиной 0,5 мм, в которой распределение эквивалентных напряжений вдоль стыка с графитом более неравномерное. Вдоль оси узла их значение минимальное (около 80 МПа), по мере удаления от оси они возрастают (до 200 МПа), затем снова снижаются (до 120 МПа) и, наконец, на поверхности резко увеличиваются до 300 МПа.

В прослойке вдоль стыка с медью эквивалентные напряжения почти линейно снижаются с 180...410 МПа по оси узла до 100...150 МПа у поверхности, и на самой поверхности скачком увеличиваются до 250 МПа. Распределение эквивалентных напряжений в прослойке толщиной 0,5 мм и на этом стыке несколько отличается от таковых в прослойке толщиной 1,0–3,0 мм.

В меди по всей длине стыка с жесткой прослойкой эквивалентные напряжения остаются на уровне 66...68 МПа, т.е. несколько превышают принятый в расчете предел текучести меди (60 МПа). Это обусловлено упрочнением (наклепом) металла за счет пластических деформаций в этой области.

Пластические деформации в меди при наличии жесткой прослойки разной толщины изменяются по величине и характеру распределения вдоль стыка. В узле без прослойки они от минимальных ($1,5 \cdot 10^{-9}$) вблизи оси узла постепенно увеличиваются до максимальных ($4 \cdot 10^{-8}$), затем у внешней поверхности снова уменьшаются до минимальных.

При наличии тонкой прослойки (0,5 мм) заметно увеличивается уровень минимальных и максимальных пластических деформаций (до $1 \cdot 10^{-8}$ и $5,5 \cdot 10^{-8}$ соответственно). Характер их распределения вдоль стыка при этом меняется мало. Для прослойки большей толщины минимальные деформации не изменяются ($1 \cdot 10^{-8}$), однако изменяется характер их распределения вдоль стыка: по мере удаления от оси узла они постепенно увеличиваются до $(1,0...1,2) \cdot 10^{-7}$.

Анализ расчетов показывает, что при наличии жесткой прослойки уровень пластических деформаций в меди увеличивается. При толщине прослойки 0,5 мм они наиболее равномерно распределяются вдоль стыка.

Сравнение максимальных растягивающих осевых напряжений на поверхности графита, определяющих вероятность появления трещины в нем, свидетельствует о том, что уже при толщине прослойки 0,5 мм максимальные растягивающие напряжения снижаются в четыре раза. При толщине прослойки 1 мм они уменьшаются более чем в шесть раз. При толщине прослойки больше 2 мм они уменьшаются в 11 раз и стабилизируются. С дальнейшим ростом толщины прослойки уровень максимальных растягивающих напряжений практически не изменяется.

Таким образом, для уменьшения опасности разрушения графита после охлаждения узла целесообразно использовать твердую (жесткую) прослойку толщиной не менее 1 мм.

Выводы

1. Все напряжения в узле сосредоточены в непосредственной близости от стыка соединяемых материалов и прослойки. Характер полей напряжений при изменении

толщины прослойки принципиально не изменяется, однако меняется уровень напряжений.

2. Максимальные осевые напряжения растяжения, определяющие вероятность появления трещин (разрушения) на поверхности графита, сосредоточены на образующей узла вблизи стыка. При увеличении толщины прослойки точка максимума постепенно удаляется от стыка, и его величина уменьшается.

3. Для уменьшения опасности разрушения графита после охлаждения узла целесообразно использовать твердую (жесткую) прослойку толщиной не менее 1 мм.

Резюме

Визначено вплив товщини проміжного твердого прошарку на напружено-деформований стан під час дифузійного зварювання і паяння вузлів із різнорідних матеріалів. Методом комп'ютерного моделювання розв'язано вісесиметричну пружно-пластичну задачу при швидкому охолодженні вузла після зварювання. Проведено порівняння полів і епюр напружень у вузлах за різної товщини прошарку і за його відсутності. Установлено, що все напруження у вузлі зосереджено досить близько від місця стику з'єднаних матеріалів і прошарку. При цьому характер полів напружень зі зміною товщини прошарку суттєво не змінюється, але змінюється їх рівень. Зі збільшенням товщини прошарку точка максимуму розтяжних напружень у графіті поступово віддаляється від стику, і його величина зменшується. Щоб зменшити небезпеку руйнування графіту після охолодження вузла, доцільно використовувати жорсткий прошарок товщиною не менше, ніж 1 мм.

1. Zhong Z., Zhou Z., and Ge C. Brazing of dopen grafite to Cu using stress relief interlayers // J. Mater. Process. Tech. – 2009. – **209**, No. 5. – P. 2662–2670.
2. Єрмолаєв Г. В., Квасницький В. В., Квасницький В. Ф. та ін. Паяння матеріалів. – Миколаїв: МУК, 2015. – 340 с.
3. Махненко В. И., Квасницький В. В., Ермолаєв Г. В. Влияние физико-механических свойств соединяемых металлов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке // Автомат. сварка. – 2008. – № 1. – С. 5–11.
4. Ермолаєв Г. В., Лабарткава А. В., Андреев Д. Я., Татаренко М. А. Исследование методом компьютерного моделирования напряженного состояния паяного медно-графитового бруса // Вісн. МУК. – 2010. – № 3. <http://evn.nous.edu.ua>.
5. Квасницький В. В., Ермолаєв Г. В., Матвиенко М. В. Влияние режима охлаждения после диффузионной сварки и пайки на остаточные напряжения в торцевых соединениях графита и меди // Автомат. сварка. – 2015. – № 11. – С. 25–31.

Поступила 26. 04. 2016