

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСЛЕ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ И ПАЙКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОРЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ГРАФИТА И МЕДИ

В.В. КВАСНИЦКИЙ¹, Г.В. ЕРМОЛАЕВ², М.В. МАТВИЕНКО³

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».
03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Национальный университет кораблестроения. 54025, г. Николаев, пр-т Героев Сталинграда, 9.
E-mail: welding@nuos.edu.ua

³Херсонский филиал Национального университета кораблестроения.
73022, г. Херсон, пр-т Ушакова, 44. E-mail: matvienkomv@i.ua

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при различных режимах охлаждения цилиндрических узлов из графита и меди в упругой и пластической стадиях с учетом как кратковременных пластических деформаций, так и ползучести. Установлено влияние режима охлаждения на пластические деформации в зоне стыка и осевые напряжения на поверхности узлов, определяющие вероятность разрушения хрупкого графита. Библиогр. 7, табл. 3, рис. 12.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, соединение графит–медь, напряженно-деформированное состояние, режимы охлаждения, остаточные напряжения, математическое моделирование

В современной технике графитовые изделия применяются в композиции со многими металлами. Графит, имеющий высокую электро- и теплопроводность, широко применяется при создании токоподводящих или токосъемных устройств различных установок и машин, графитизированных электродов, уплотнительных устройств и пр., где его необходимо соединять с металлами. Для этого используют пайку и диффузионную сварку [1, 2]. Общей проблемой для обоих способов соединения являются остаточные напряжения, обусловленные различными термическими коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов. Остаточные напряжения в соединяемых пластичных материалах обычно приводят к искажению формы и размеров, а в графите, который является хрупким материалом, могут вызвать образование трещин и разрушение.

Для снижения напряжений в металлографитовых узлах выбирают металлы с близкими к графиту ТКЛР. Во многих узлах применяют титан, который далек от графита по электро- и теплопроводности. Лучшим выбором для указанных устройств является медь, но она имеет ТКЛР значительно больший, чем графит, что часто приводит к образованию трещин в графите после остывания узла.

Ранее выполненные нами исследования [3, 4] были посвящены изучению закономерностей формирования полей напряжений и деформаций в зоне стыка при диффузионной сварке (ДС) и пай-

ке деталей из разнородных материалов, знание которых необходимо для оптимизации конструкции узлов и получения качественного соединения. Некоторые общие закономерности образования остаточных напряжений получены для соединений металла и керамики в узлах типа втулка-втулка, в которых модули упругости соединяемых материалов одинаковы [5]. Но у графита и меди они отличаются на порядок, что может при их соединении существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла. Поэтому исследование формирования НДС в медно-неметаллических узлах является актуальным.

Исследования соединений графита (керамики) с металлами показали, что разрушение начинается с трещин, возникающих у стыка в неметалле [1]. После полного разрушения на поверхности металла остается тонкий слой графита, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Поверхность разрушения соединения металла (1) с графитом (2)

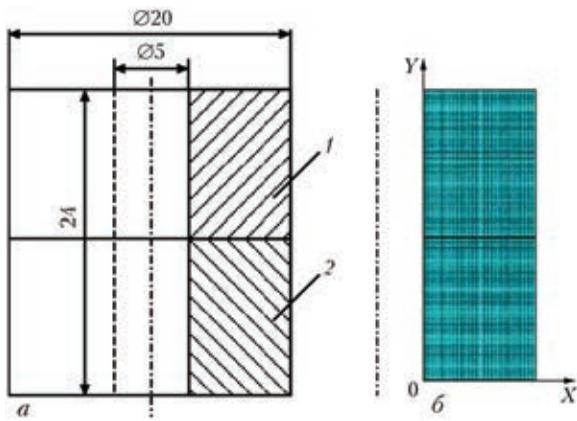


Рис. 2. Общий вид узла В-В (а) и его конечно-элементная модель (б)

Целью работы является исследование методом компьютерного моделирования особенностей формирования НДС при остывании после диффузионной сварки и пайки металлографитовых узлов и влияния на него технологии соединения графита и меди.

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решались осесимметричные задачи с конечными элементами (КЭ) типа PLANE 182.

В токоподводящих устройствах обычно используют торцевые соединения, которые и выбраны для исследований. Моделирование выполнялось для узла втулка-втулка (В-В). Эта модель по сравнению с бруском или цилиндром более информативна, поскольку имеет две боковые поверхности и легко трансформируется в цилиндр при внутреннем радиусе, равном нулю, а закономерности формирования НДС в узлах типа цилиндр-цилиндр, как показано в работах [6, 7], сохраняются и в узлах типа брус-брус.

Общий вид узла В-В и сечение его конечно-элементной модели показаны на рис. 2, где цифрой 1 обозначена медная втулка, цифрой 2 — графитовая. Эту модель можно использовать и для соединений, изготовленных пайкой с давлением,

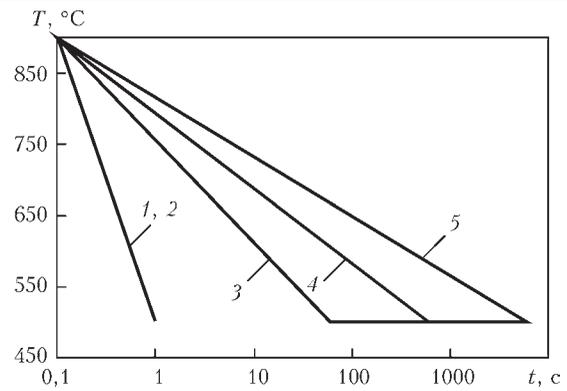


Рис. 3. Термические циклы охлаждения для рассмотренных вариантов

пренебрегая прослойкой припоя вследствие ее малой толщины.

Теплофизические свойства меди и графита, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Для изучения общих закономерностей формирования НДС рассматривали охлаждение узла в интервале от 900 до 500 °С, в котором ползучесть меди оказывает существенное влияние на релаксацию напряжений.

Моделирование проводили для 5-ти вариантов снижения температуры в указанном интервале:

- упругое решение при снижении температуры до 500 °С (вар. 1);
- упруго-пластическое решение при быстром снижении температуры до 500 °С (вар. 2), когда деформации ползучести пренебрежимо малы;
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 60 с и последующей выдержке до 6000 с при 500 °С (вар. 3);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 600 с и последующей выдержке до 6000 с при 500 °С (вар. 4);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 6000 с (вар. 5).

Термические циклы для рассмотренных вариантов приведены на рис. 3.

Таблица 1. Теплофизические свойства соединяемых материалов

Материалы	Температура, °С	Модуль упругости $E \cdot 10^3$, МПа	Коэффициент Пуассона	ТКЛР $\cdot 10^6$, 1/град	Предел текучести, МПа	Модуль упрочнения $\cdot 10^3$, МПа
Графит	20	9,3	0,18	4,8	-	-
	200	9,4		5,0	-	-
	400	9,8		5,1	-	-
	700	10,3		5,5	-	-
	900	10,8		5,7	-	-
Медь	20	125	0,34	16,7	69	1,5
	200	110		17,2	60	1,3
	400	100		17,8	45	0,9
	700	60		19,4	17,3	0,8
	800	40		20,5	11,5	0,7
	900	38		19,8	8,5	0,6

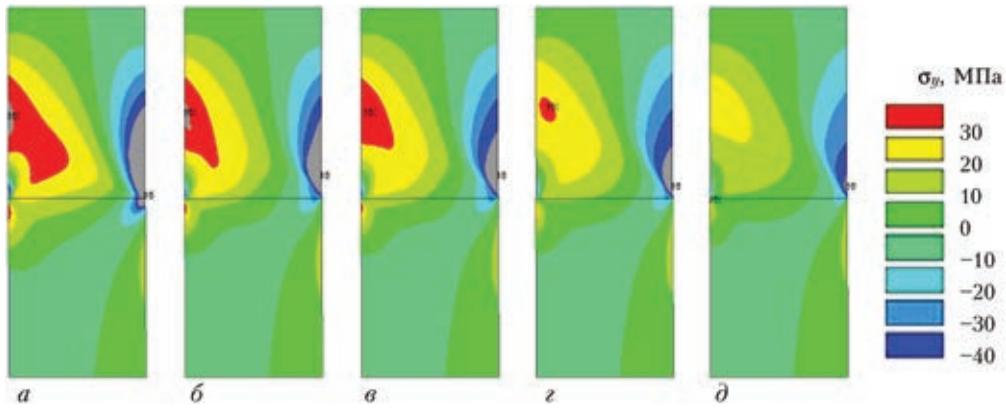


Рис. 4. Осевые напряжения после охлаждения до 500 °С в вариантах 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

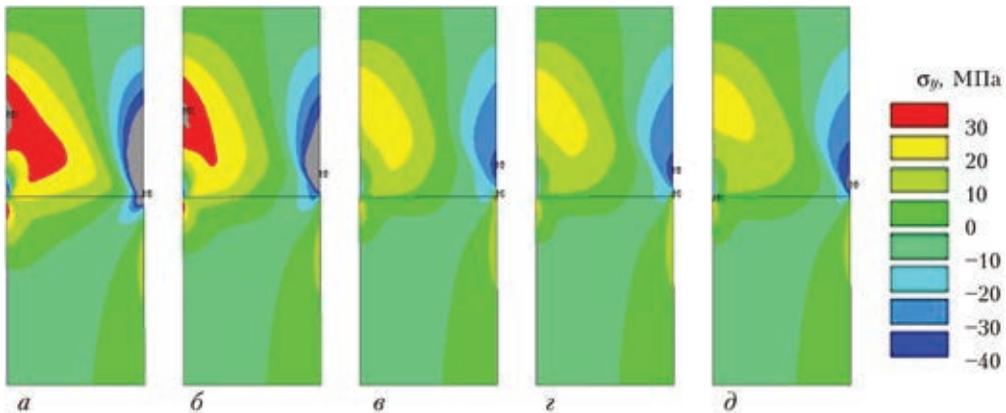


Рис. 5. Осевые напряжения после охлаждения и выдержки в вариантах 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

В вариантах 3–5 скорость ползучести меди определялась по уравнению

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{C_3}{T}},$$

где $C_1 = 1,67 \times 10^{-30}$, $C_2 = 5$, $C_3 = 25872$ — коэффициенты уравнения, полученные нами экспериментально при исследованиях ползучести меди.

Анализировались поля и эпюры распределения напряжений, деформаций и перемещений на различных стадиях охлаждения, включая моменты окончания снижения температуры (все варианты) и окончания выдержки при температуре 500 °С (варианты 3 и 4). Далее приводятся только поля и эпюры осевых напряжений, которые, как показано в работе [5], являются основной причиной хрупкого разрушения материалов с низким ТКЛР.

Как показал анализ полей напряжений при различных вариантах охлаждения, все составляющие

напряжений, включая эквивалентные, заметно изменяются с изменением скорости охлаждения, особенно в меди (рис. 4). Последующая выдержка при температуре 500 °С (вар. 3 и 4) еще больше изменяет их (рис. 5). При этом радиальные, окружные, касательные и эквивалентные напряжения сосредоточены вблизи стыка, а осевые напряжения — у внутренней и внешней поверхностей втулки.

В соответствии с напряжениями распределены и пластические деформации — со стороны меди в непосредственной близости от стыка, в большей степени на расстоянии около четверти толщины втулки от ее наружной поверхности (рис. 6 и 7).

Анализ полей и величин пластических деформаций (табл. 2) показал, что с увеличением времени охлаждения мгновенные деформации в меди уменьшаются от 1,4 % в вар. 1 вплоть до нуля в вар. 5. Деформации ползучести на стадии сни-

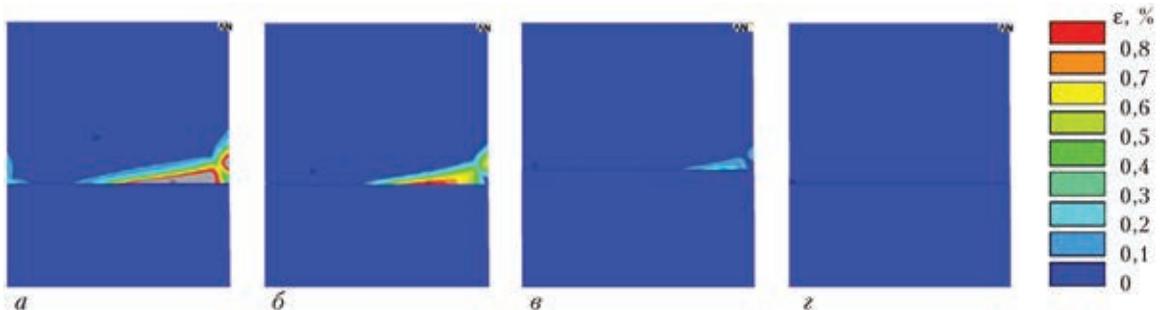


Рис. 6. Эквивалентные деформации мгновенной пластичности после охлаждения до 500 °С в вариантах 2 (а), 3 (б), 4 (в) и 5 (г)

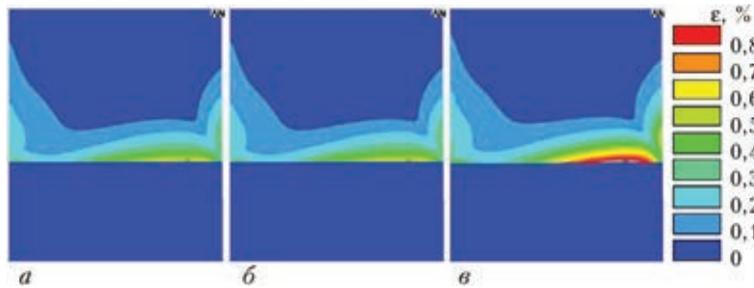


Рис. 7. Эквивалентные деформации ползучести после охлаждения и выдержки в вариантах 3 (а), 4 (б) и 5 (в)

жения температуры, напротив, заметно увеличиваются с увеличением времени охлаждения до температуры 500 °С (от 0,4 % в вар. 3 до 1,05 % в вар. 5). Суммарные пластические деформации на стадии охлаждения уменьшаются от 1,4 % в варианте 2 до 1,05 % в варианте 5.

В процессе выдержки при постоянной температуре 500 °С (вар. 3 и 4) деформации ползучести увеличиваются незначительно (0,19 и 0,22 %). В резуль-

Таблица 2. Максимальные пластические (эквивалентные) деформации в меди, %

Вариант	Окончание охлаждения			Окончание выдержки	
	Мгновенные деформации	Деформации ползучести	Сумма	Деформации ползучести	Сумма
2	1,4	0	1,4	0	1,4
3	0,9	0,4	1,3	0,59	1,49
4	0,23	0,75	0,98	0,97	1,21
5	0	1,05	1,05	1,05	1,05

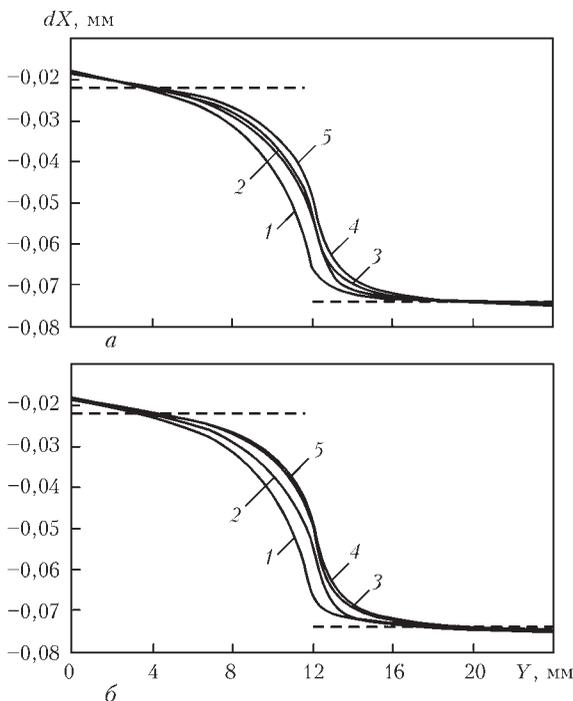


Рис. 8. Эпюры радиальных перемещений точек наружной поверхности втулки после охлаждения до 500 °С (а) и после охлаждения и выдержки (б); варианты 1...5 (соответствуют номерам кривых)

тате суммарные деформации ползучести за весь период охлаждения и выдержки при 500 °С растут с увеличением времени охлаждения и соответствующем уменьшении времени выдержки от 0 (вар. 2) до 1,05 % (вар. 5), тогда как суммарные (мгновенные и пластические) уменьшаются с 1,4 % (вар. 2) до 1,05 % (вар. 5).

Таким образом, с точки зрения развития кратковременных пластических деформаций в меди, более эффективно увеличение скорости охлаждения, чем увеличение времени выдержки после снижения температуры. С точки зрения деформаций ползучести — наоборот, более эффективно медленное охлаждение.

Различается также и характер полей пластических деформаций кратковременных и ползучести (рис. 6 и 7). Кратковременные деформации сосредоточены более концентрировано вблизи стыка на его части, прилегающей к наружной поверхности (рис. 6). Деформации ползучести охватывают всю площадь стыка на расстоянии от него, соизмеримом с толщиной втулки (рис. 7). При этом они в процессе длительной выдержки при 500 °С (вариант 3) заметно уменьшаются (рис. 6, б и 7, а).

Влияние пластических деформаций в меди на осевые напряжения, возникающие на боковой поверхности графита, обусловлено двумя механизмами. С одной стороны, в соответствии с общими принципами механики, пластическое деформирование меди обеспечивает снижение уровня напряжений в ней и, соответственно, в графите, сохраняя условия равновесия узла. С другой стороны они влияют на форму изгиба образующей, которая также влияет на уровень и характер распределения напряжений в меди [5]. Характер этого влияния неоднозначен. Пластические деформации в меди могут как увеличить, так и уменьшить кривизну поверхности, соответственно увеличивая или уменьшая уровень напряжений.

Упругое и пластическое деформирование материала втулки приводит к изменению формы ее поверхностей. Анализ эпюр радиальных перемещений точек наружной поверхности (рис. 8) показал, что характер изгиба образующей в целом сохраняется таким же, как и при одинаковой жесткости соединяемых материалов [5], но заметно нарушаются их кососимметрии относительно плоскости стыка при упругом нагружении (вар. 1). Образующая со стороны более жесткого материала (меди) изгибается меньше, приближаясь к состоянию при свободном сокращении (пунктирная линия). Со стороны менее жесткого материала (графита) картина обратная, изгиб заметно увеличивается.

При возникновении пластических деформаций, мгновенных и ползучести (вар. 2–5), изгиб в более жестком, но пластичном, материале (медь) увеличивается, а в менее жестком упругом материале (графит) уменьшается, форма изгиба образующей приближается к симметричной. То есть, кратковременные пластические деформации, развивающиеся при быстром охлаждении и деформации ползучести (вар. 3–5) компенсируют более высокую жесткость меди в упругом состоянии по сравнению с графитом, уравнивая деформации наружной поверхности в районе стыка.

При этом эпюры радиальных перемещений точек наружной поверхности после охлаждения и выдержки в вариантах 3–5 практически совпадают, несмотря на некоторое различие в величине максимальных пластических деформаций в меди (см. табл. 2).

Характер радиального перемещения точек внутренней боковой поверхности более сложный (рис. 9). Выпуклая часть поверхности графита (материала с меньшим ТКЛР) в непосредственной близости от стыка (1...2 мм) постепенно переходит в вогнутую по мере удаления от него. В меди (материале с большим ТКЛР) картина обратная, вогнутая поверхность вблизи стыка постепенно переходит в выпуклую при удалении от него.

Такая сложная форма изгиба образующей на внутренней поверхности втулки в работе [5] объясняется встречным влиянием двух факторов. С одной стороны это разность взаимного смещения верхней и нижней частей втулки вследствие раз-

ного изменения их диаметров, с другой стороны — разное изменение ширины сечения при температурном сокращении материалов верхней (металлической) и нижней (графитовой) частей узла.

Взаимное смещение верхней и нижней частей втулок приводит к образованию выпуклости на наружной и вогнутости на внутренней поверхности материала с меньшим ТКЛР (графита). Разное изменение ширины приводит к образованию выпуклости на обеих поверхностях этого материала. В результате одновременного действия обоих факторов характер искривления внешней поверхности, т. е. выпуклость наружу, сохраняется, а внутренней заметно изменяется.

Наличие (влияние) двух механизмов перемещений подтверждается также отсутствием симметрии полей пластических деформаций и эпюр касательных напряжений относительно середины толщины втулки. Количественной характеристикой влияния сдвига частей втулки может служить уровень касательных напряжений посередине толщины втулки (около 20 МПа).

При изменении режима охлаждения характер изгиба внутренней поверхности сохраняется, но величина перемещений уменьшается при снижении скорости охлаждения (вар. 3–5). При последующей выдержке различие в перемещениях уменьшается (рис. 9).

В соответствии с деформацией поверхностей распределены осевые напряжения в них (рис. 10, 11). На наружной поверхности они сжимающие в верхней медной втулке (с большим ТКЛР) и

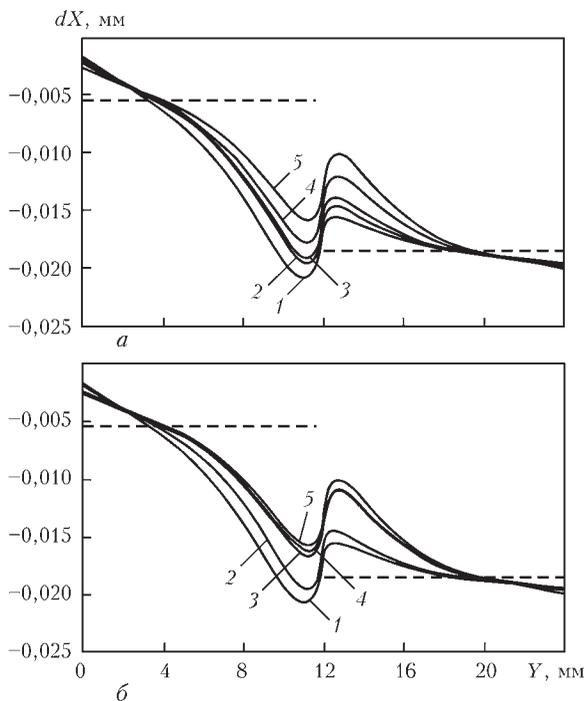


Рис. 9. Эпюры радиальных перемещений точек внутренней поверхности втулки после охлаждения до 500 °С (а) и после полного охлаждения и выдержки (б); варианты 1...5 (соответствуют номерам кривых)

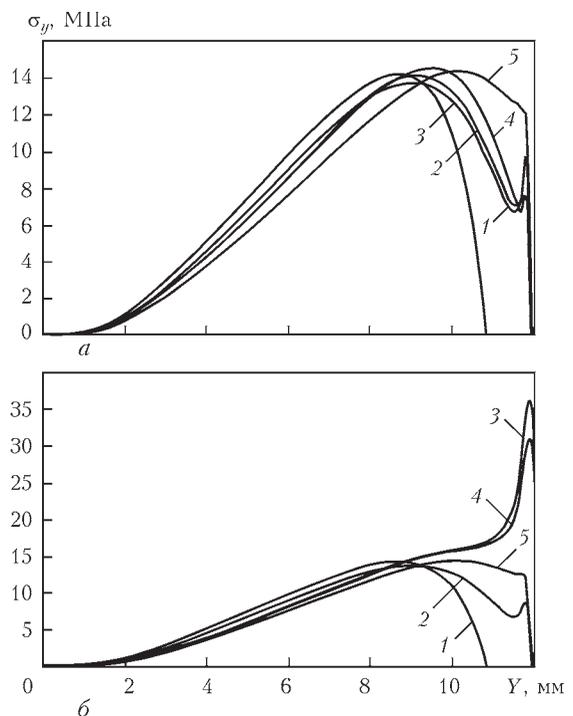


Рис. 10. Эпюры осевых напряжений на наружной поверхности графита после охлаждения (а) и после охлаждения и выдержки при 500 °С (б) моделей 1...5

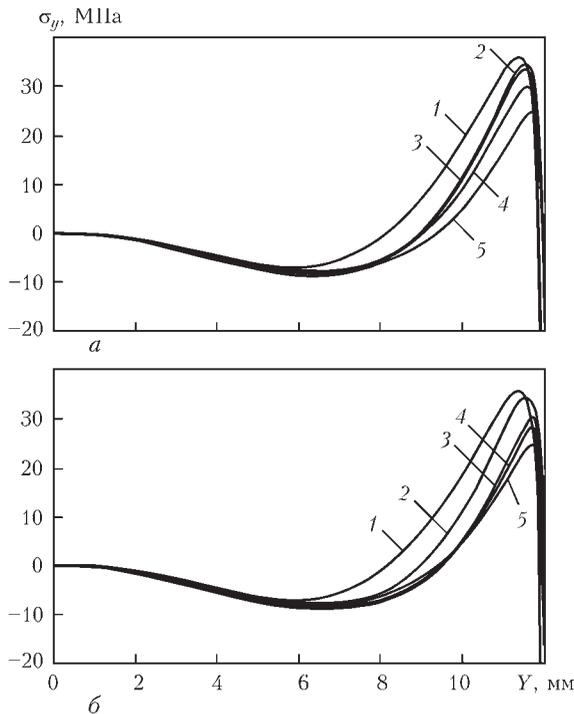


Рис. 11. Эпюры осевых напряжений на внутренней поверхности графита после охлаждения (а) и после охлаждения и выдержки при 500 °С (б) моделей 1...5

растягивающие в нижней графитовой (с меньшим ТКЛР) (рис. 4, 5 и 10).

После охлаждения во всех вариантах максимальной величины (около 14 МПа) растягивающие напряжения достигают вблизи стыка, на расстоянии 2...3 мм, постепенно уменьшаясь до 2-х раз по мере приближения к нему (рис. 10, а). Последующая выдержка при 500 °С в вариантах 3 и 4, когда к кратковременным деформациям добавляются деформации ползучести, приводит к тому, что максимальные напряжения в графите у стыка, напротив, резко возрастают до 30...35 МПа (рис. 10, б), точка максимума вплотную приближается к стыку.

На внутренней поверхности распределение более сложное (рис. 11). В нижней графитовой втулке осевые напряжения вблизи стыка — растягивающие, они постепенно уменьшаются до нуля (на расстоянии 2...3 мм от стыка) и переходят в сжимающие по мере удаления от стыка, затем снова уменьшаются до нуля на торце.

Для удобства сравнения вариантов в табл. 3 и на рис. 12 приведены значения и диаграммы максимальных растягивающих напряжений в графите после охлаждения до 500 °С и выдержки при этой температуре до 6000 с.

Анализ таблицы и рисунков показывает, что с точки зрения образования трещин в графите после охлаждения наиболее опасна внутренняя поверхность, где при всех вариантах, кроме 5, максимальные растягивающие напряжения приближаются к пределу прочности графита на изгиб

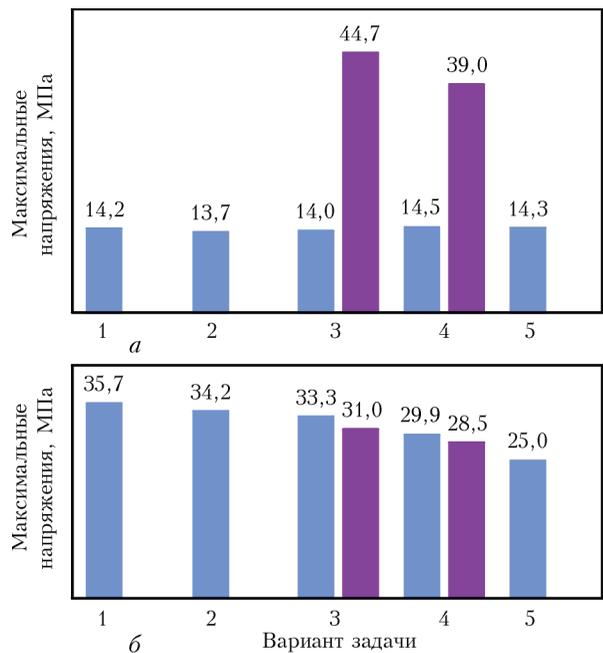


Рис. 12. Максимальные растягивающие напряжения на наружной (а) и внутренней (б) поверхностях графита в вариантах 1...5 после охлаждения до 500 °С и выдержки (вар. 3 и 4) при этой температуре

(45 МПа для графита МПГ-8 и 34,3 МПа для графитов МПГ-6 и МПГ-7). Для наружной поверхности опасными являются варианты 3 и 4, при которых выдержка после охлаждения приводит к большему растягивающим напряжениям.

Таким образом, оптимальным, с точки зрения уменьшения опасности образования трещин в графите после охлаждения до 500 °С, следует считать вариант 5 (постепенное снижение температуры с 900 до 500 °С в течение 6000 с), при котором напряжения растяжения не превышают 25 МПа.

Варианты с быстрым охлаждением и последующей выдержкой не целесообразны, так как при них создаются большие напряжения на внешней поверхности графита.

Дальнейшее охлаждение узла до 20 °С происходит в условиях роста предела текучести и сопротивления ползучести. Скорость ползучести уменьшается и даже при охлаждении от 500 до 20 °С

Таблица 3. Максимальные растягивающие напряжения в графите

Вариант	Максимальные растягивающие напряжения в графите, МПа			
	на наружной поверхности		на внутренней поверхности	
	Окончание охлаждения	Окончание выдержки	Окончание охлаждения	Окончание выдержки
1	14,2	-	35,7	-
2	13,7	-	34,2	-
3	14,0	44,7	33,3	31,0
4	14,5	39,0	29,9	28,5
5	14,3	14,3	25,0	25,0

в течение 3,8 ч остаточные напряжения превышают предел прочности графита (более 65 МПа).

Таким образом, несмотря на эффективное влияние деформаций мгновенной пластичности и ползучести в интервале температур 900...500 °С, применение диффузионной сварки или пайки медными (серебряными) припоями может привести к разрушению узла.

Рассматривая технологические варианты соединения графита с медью, следует отметить достаточно высокие температуры диффузионной сварки. В работе [2] исследовали три варианта диффузионной сварки графита с титаном: с никелевой прослойкой толщиной 10...30 мкм, нанесенной на графит гальваническим путем, с никелевой фольгой толщиной 10 мкм и графита с титаном непосредственно. При сварке с никелевой прокладкой выбрана температура 850 °С, без прокладок 1100 °С. Столь высокие температуры диффузионной сварки не позволяют применять этот способ в данных узлах.

Пайка позволяет регулировать уровень напряжений, изменяя температурный интервал охлаждения путем выбора припоев с необходимой температурой плавления, обеспечивающих работоспособность узлов в конкретных условиях. Расчеты показали, что применение низкотемпературных припоев с температурой плавления до 250 °С гарантирует получение бездефектных соединений. Например, припой ПОС-50 с температурой плавления 209 °С обеспечивает предел прочности на растяжение, равный 36 МПа, т. е. на уровне графита. Учитывая токсичность свинца, целесообразно использовать заменители оловянно-свинцовых припоев, например, разработанный ИЭС им. Е.О. Патона низкотемпературный припой, в котором свинец заменен небольшими добавками серебра. Если для смачивания графита припоем необходима более высокая температура, то целесообразно проводить пайку по двухступенчатой технологии с предварительным лужением поверхности графита. Таким образом, более целесообразно проводить пайку графита с медью с последующим медленным охлаждением. Время охлаждения необходимо рассчитывать для конкретного узла с использованием параметров ползучести меди.

Выводы

1. Все составляющие напряжений и деформаций заметно изменяются с изменением скорости охлаждения.

Последующая выдержка при температуре 500 °С еще больше изменяет их.

2. С точки зрения развития пластических деформаций уменьшение скорости охлаждения более эффективно, чем увеличение времени выдержки после снижения температуры до 500 °С. Это способствует снижению уровня напряжений в узле при остывании.

3. С точки зрения образования трещин в графите после охлаждения наиболее опасна внутренняя поверхность, где при всех вариантах, кроме 5, максимальные растягивающие напряжения приближаются к пределу прочности графита на изгиб.

4. С точки зрения уменьшения опасности образования трещин в графите после охлаждения до 500 °С оптимальным следует считать вариант 5 (постепенное снижение температуры с 900 до 500 °С в течение 6000 с), при котором напряжения растяжения не превышают 25 МПа.

5. Варианты с быстрым охлаждением и последующей выдержкой не целесообразны, так как при них создаются большие напряжения на внешней поверхности графита.

6. Наиболее целесообразно для изготовления медно-графитовых узлов из низкопрочных графитов применять пайку низкотемпературными безсвинцовыми припоями.

1. *Паяння матеріалів: підручник / Г.В. Ермолаєв, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький та ін. // Під заг. ред. В.Ф. Хорунова і В.Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с.*
2. *Казаків Н.Ф. Диффузійна сварка матеріалів. – М.: Машинобудування, 1976. – 312 с.*
3. *Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В., Матвієнко М.В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – № 1. – С. 100–107.*
4. *Махненко В.И., Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с разными физико-механическими свойствами // Автомат. сварка. – 2008. – № 8. – С. 5–10.*
5. *Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В., Матвієнко М.В. Влияние прочности и сопротивления ползучести на остаточное напряженно-деформированное состояние металлокерамических соединений // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2009. – № 3. – С. 83–92.*
6. *Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В., Матвієнко М.В. Влияние геометрии деталей из разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке // Там же. – 2008. – № 5. – С. 42–46.*
7. *Роль соотношения размеров цилиндрических деталей из разнородных материалов на их напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке / Квасницький В.Ф., Матвієнко М.В., Лабарткава А.В. и др. // Автомат. сварка. – 2009. – № 8. – С. 23–27.*

Поступила в редакцию 21.07.2015