

Квасницкий В. В.<sup>1</sup>, Квасницкий В. Ф.<sup>2</sup>, Ермолаев Г. В.<sup>2</sup>, Матвиенко М. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Национальный университет кораблестроения. Украина, г. Николаев

<sup>3</sup> Херсонский филиал Национального университета кораблестроения. Украина, г. Херсон

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ГРАФИТА И МЕДИ

*Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при различных режимах охлаждения цилиндрических узлов из графита и меди, с учетом пластических деформаций, кратковременных и ползучести. Установлено влияние режима охлаждения на пластические деформации в зоне стыка и осевые напряжения на поверхности узлов, определяющие вероятность разрушения хрупкого графита.*

*Ключевые слова:* диффузионная сварка; пайка; соединение графит-медь; напряженно-деформированное состояние; режимы охлаждения.

### Введение

В современной технике графитовые изделия применяются в композиции со многими металлами. Для их соединения используют пайку и диффузионную сварку. Общей проблемой для обоих способов соединения являются остаточные напряжения, обусловленные разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов, которые могут вызвать образование трещин и разрушение графита уже при охлаждении.

Для снижения напряжений в таких узлах выбирают металлы с близкими к графиту ТКЛР, например, титан, который далек от графита по электро- и теплопроводности. Оптимальным 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. Для предотвращения этого используют различные технологические приемы [1,2,3]. В работе [3] исследовались соединения металла и керамики в узлах типа втулка-втулка, в которых модули упругости соединяемых материалов одинаковы. При соединении графита с медью их модули упругости отличаются на порядок, что может существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла. В работе [4] приводятся результаты исследования влияния режима охлаждения медно-графитовых узлов в диапазоне высоких температур от 900 °С до 500 °С.

Известно, что при более низких температурах заметно повышается модуль упругости меди, что

должно привести к повышению остаточных напряжений и, соответственно, риска разрушения графита. Поэтому исследование НДС при охлаждении под давлением в медно-графитовых узлах во всем диапазоне температур от кристаллизации припоя до комнатной является актуальным.

### Постановка задачи

Цель работы — изучение особенностей формирования НДС при диффузионной сварке и пайке металлографитовых узлов при охлаждении до комнатной температуры с приложением давления и без него.

### Основная часть

В работе выполнено компьютерное моделирование НДС узлов с торцовым соединением типа втулка-втулка (В-В). Общий вид узла и сечение его конечно-элементной модели показаны на рис. 1, где цифрой 1 обозначена медная втулка, цифрой 2 — графитовая.

Теплофизические свойства меди и графита, принятые в расчетах, приведены в работе [4].

Моделирование проводили для 5-ти вариантов снижения температуры с 900 °С до 20 °С при охлаждении как без давления, так и под давлением. При этом под быстрым охлаждением подразумевалось такое, когда процессами ползучести в меди можно пренебречь:

- упругое решение при быстром снижении температуры до 20 °С (вар. 1);

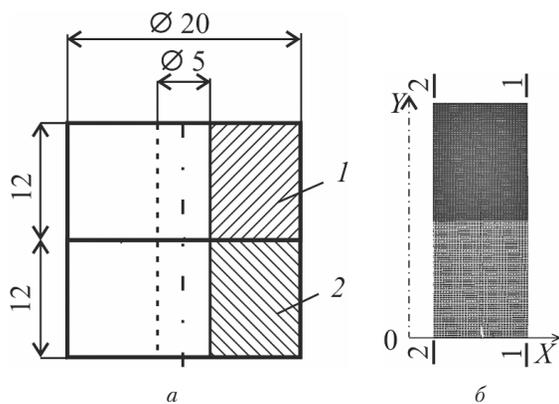


Рис. 1. Общий вид узла В-В (а) и сечение его конечно-элементной модели (б)

- упруго-пластическое решение при быстром снижении температуры до 20 °С (вар. 2);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 60 с (400 °С/мин), последующей выдержкой до 6000 с при 500 °С и затем медленным охлаждением до 20 °С со скоростью 4 °С/мин (вар. 3);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 500 °С в течение 600 с (40 °С/мин), последующей выдержкой до 6000 с при 500 °С и затем медленным охлаждением до 20 °С со скоростью 4 °С/мин (вар. 4);
- упруго-пластическое решение с учетом ползучести при постепенном снижении температуры до 20 °С в течение 13000 с со скоростью 4 °С/мин (вар. 5).

При охлаждении под давлением прикладываемое усилие сжатия повышалось в зависимости от изменения прочности меди со снижением температуры от 5 МПа при температуре 900...800 °С и 7,5 МПа при 800...700 °С до 10 МПа при температуре ниже 700 °С.

В вариантах 3–5 скорость ползучести меди определялась по уравнению Нортона с коэффициентами  $C_1 = 1,67 \cdot 10^{-30}$  и  $C_2 = 5$  при всех температурах, а  $C_3$  изменялся в зависимости от температуры (таблица 1).

Анализировали поля и эпюры распределения напряжений, деформаций и перемещений на разных стадиях охлаждения до 20 °С. Результаты сравнивали с полями и эпюрами соответствующих вариантов без давления.

Как показал анализ полей напряжений при различных вариантах охлаждения, как без давления, так

и с ним, все составляющие напряжений, включая эквивалентные, снижаются с уменьшением скорости охлаждения. При этом радиальные, окружные, касательные и эквивалентные напряжения сосредоточены вблизи стыка, а осевые напряжения — у внутренней и внешней поверхностей втулки.

В соответствии с уровнем действующих напряжений локализованы и пластические деформации — со стороны меди вблизи стыка, в большей степени на его части, прилегающей к внешней поверхности.

Анализ полей пластических деформаций показал, что с уменьшением скорости охлаждения мгновенные деформации в меди уменьшаются, приближаясь к нулю в варианте 5, при охлаждении, как без сжатия, так и с ним. Деформации ползучести в процессе охлаждения, напротив, заметно увеличиваются с уменьшением скорости охлаждения до температуры 20 °С. В результате максимальные суммарные пластические деформации при сварке без давления и с ним уменьшаются со снижением скорости охлаждения до 1,5...2 раз (табл. 2).

Упругое и пластическое деформирование материала втулки приводит к изменению формы ее поверхностей. Эпюры радиальных перемещений точек наружной поверхности и характер изгиба образующей в целом сохраняются такими же, как и при одинаковой жесткости соединяемых материалов, как показано в работе [3], но заметно нарушается их кососимметрия относительно плоскости стыка при упругом нагружении. Образующая со стороны более жесткого материала (меди) изгибается меньше, приближаясь к состоянию характерному при свободном сокращении. Со стороны менее жесткого материала (графита) картина обратная, изгиб заметно увеличивается.

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

Снятие давления после охлаждения практически не влияет на величину и характер изгиба образующей, как в графитовой, так и медной частях узла.

Таблица 1

Зависимость коэффициента  $C_3$  от температуры

T °K	293	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173
$C_3$	9000	12180	15360	18540	21720	24800	25872	25872	25872	25872

Максимальные пластические (эквивалентные) деформации в меди, %

Вариант	Окончание охлаждения		
	Мгновенные	Ползучести	Сумма
после охлаждения до 20 °С без давления			
2	7,6	-	7,6
3	2,17	1,96	4,13
4	1,37	2,38	3,75
5	0,73	2,79	3,52
после охлаждения под давлением до 20 °С			
2	3,35	—	3,35
3	0,91	1,67	2,58
4	0,33	2,1	2,43
5	0,08	2,06	2,14

Характер радиального перемещения точек внутренней боковой поверхности (сечение 2-2) более сложный, что в работе [3] объясняется встречным влиянием двух факторов. С одной стороны это разность взаимного смещения верхней и нижней частей втулки вследствие разного изменения их диаметров, с другой стороны — разное изменение ширины сечения при температурном сокращении материалов верхней (металлической) и нижней (графитовой) частей узла.

При изменении режима охлаждения характер изгиба внутренней поверхности сохраняется, но величина перемещений уменьшается при медленном охлаждении, вне зависимости от его режима. После снятия давления характер и величина радиальных перемещений по всей длине образующей узла практически не изменяются.

В соответствии с деформацией поверхностей распределены осевые напряжения в них (рис. 2 и 3).

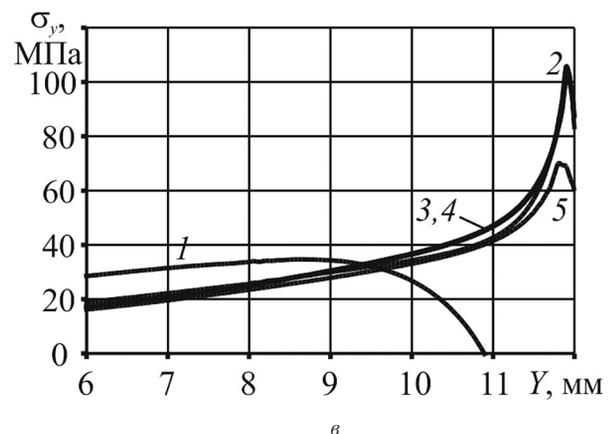
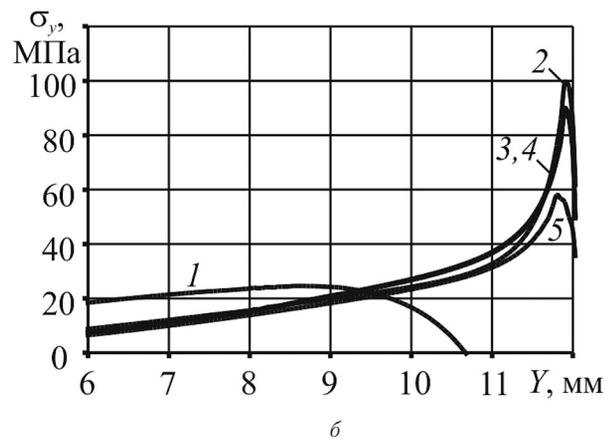
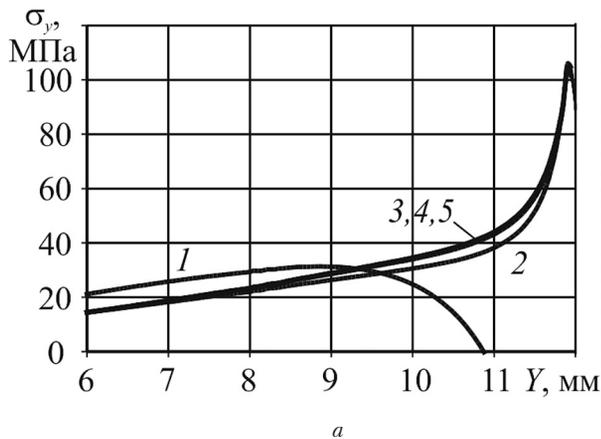
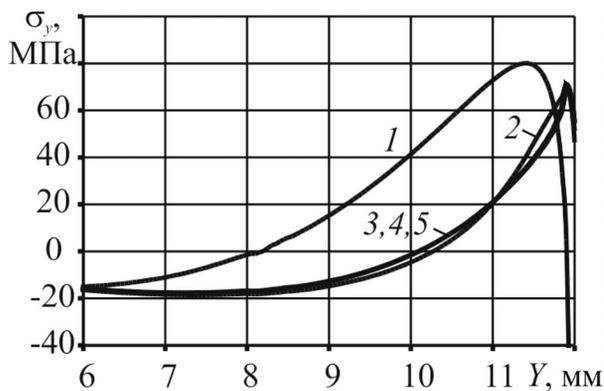
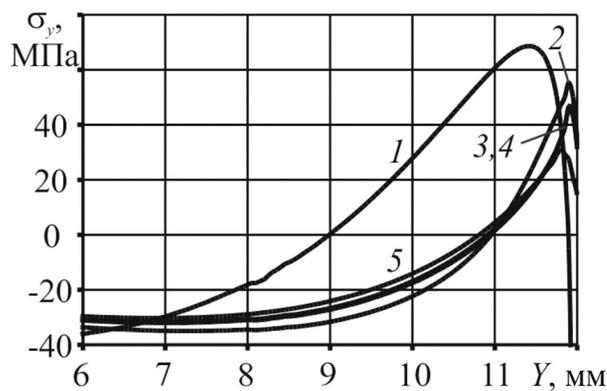


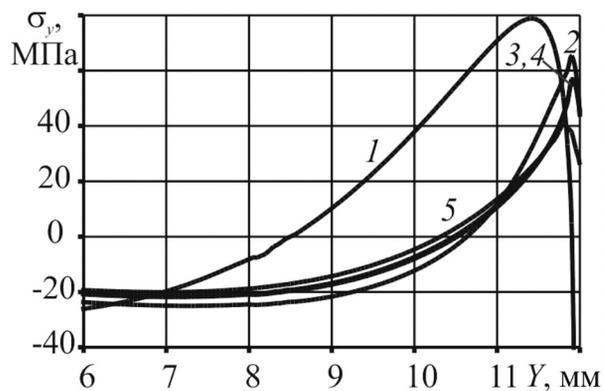
Рис. 2. Эпюры осевых напряжений на наружной поверхности графита вблизи стыка моделей 1...5 (соответствующие номера кривых) после охлаждения до 20 °С без давления (а), под давлением (б) и после снятия давления (в)



*a*



*б*



*в*

**Рис. 3.** Эпюры осевых напряжений на внутренней поверхности графита вблизи стыка моделей 1...5 (соответствующие номера кривых) после охлаждения до 20 °С без давления (*а*), под давлением (*б*) и после снятия давления

На наружной поверхности они — сжимающие в верхней медной втулке (с большим ТКЛР) и растягивающие в нижней графитовой (с меньшим ТКЛР) (рис. 2). Величина и характер их распределения при охлаждении без давления (рис. 2, *а*) практически не зависит от его режима. Максимальной величины растягивающие напряжения достигают в непосредственной близости от стыка, постепенно уменьшаясь по мере удаления от него.

При охлаждении под давлением (рис. 2, *б*) при разных режимах охлаждения характер распределения напряжений сохраняется, а уровень растягивающих напряжений в графите заметно изменяется, уменьшаясь в вариантах 3, 4 и, особенно, 5. После остывания и снятия давления характер распределения напряжений во всех вариантах сохраняется, а уровень повышается на величину снятого давления 10 МПа (рис. 2, *в*).

На внутренней поверхности распределение напряжений более сложное (рис. 3). В нижней графитовой втулке осевые напряжения вблизи стыка — растягивающие, они постепенно уменьшаются до нуля и переходят в сжимающие по мере удаления от стыка, затем снова уменьшаются до нуля на торце. Здесь также охлаждение без давления не влияет на характер распределения и уровень напряжений (рис. 3, *а*). Медленное охлаждение под давлением (варианты 3, 4 и, осо-

бенно, 5) обеспечивает снижение значений растягивающих напряжений в графите (рис. 3, *б*). Последующее снятие давления после охлаждения повышает этот уровень на 10 МПа (рис. 3, *в*).

Для удобства сравнения вариантов на рис. 4 и 5 приведены диаграммы максимальных растягивающих напряжений в графите после охлаждения до 20 °С.

Анализ полученных результатов показывает, что с точки зрения образования трещин в графите после охлаждения при условии упругого деформирования меди наиболее опасна внутренняя поверхность, где максимальные растягивающие напряжения более чем в два раза превышают напряжения на наружной поверхности. При быстром охлаждении (вариант 2), за счет мгновенных пластических деформаций, внутренняя поверхность несколько разгружается, а наружная, напротив, догружается. В результате в этом варианте наиболее опасной становится наружная поверхность.

В условиях медленного охлаждения (варианты 3, 4 и 5) с учетом пластических деформаций в меди, как мгновенных, так и ползучести, более опасна наружная поверхность. Здесь при охлаждении без давления растягивающие напряжения превышают 100 МПа при всех вариантах циклов, тогда как на внутренней поверхности их величина около 70 МПа. При охлаждении под давлением их величина

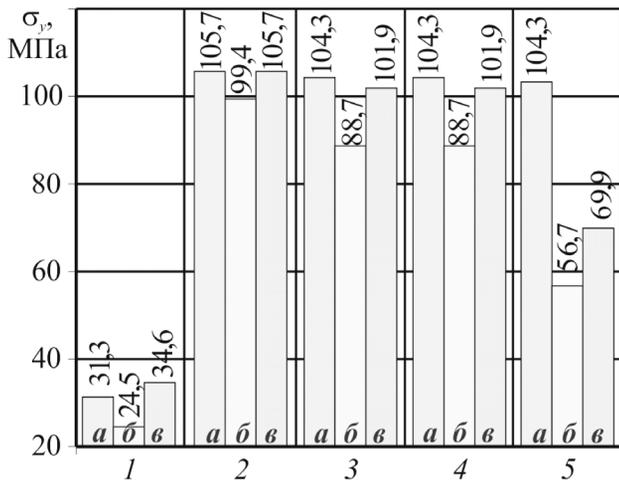


Рис. 4. Максимальные растягивающие напряжения на наружной поверхности графита в вариантах 1...5 после охлаждения до 20 °С без давления (а), под давлением (б) и после снятия давления (в)

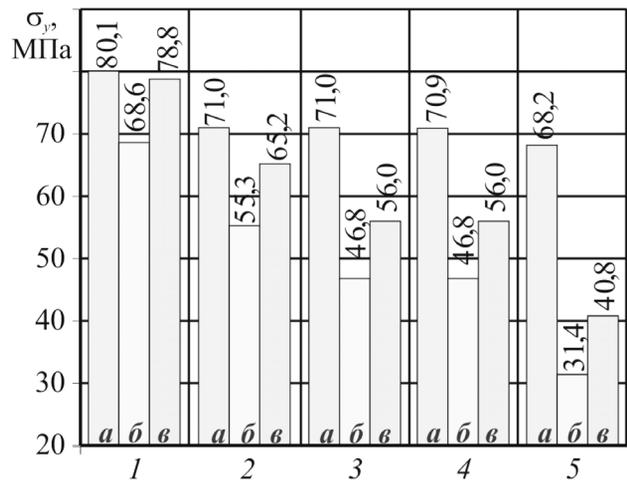


Рис. 5. Максимальные растягивающие напряжения внутренней поверхности графита в вариантах 1...5 после охлаждения до 20 °С без давления (а), под давлением (б) и после снятия давления (в)

снижается до уровня около 56 МПа в варианте 5 и в меньшей степени (до 89 МПа) в вариантах 3 и 4. После снятия давления уровень растягивающих напряжений в графите увеличивается на величину, близкую к 10 МПа.

Таким образом, для снижения уровня остаточных напряжений наиболее благоприятным является медленное охлаждение под давлением (вариант 5), при котором растягивающие напряжения не превышают 70 МПа.

### Выводы

Несмотря на эффективное влияние деформаций мгновенной пластичности и ползучести при медленном охлаждении под давлением на величину остаточных растягивающих напряжений, применение диффузионной сварки и пайки высокотемпературными припоями может привести к разрушению графита. Поэтому для изготовления медно-графитовых узлов наиболее целесообразно применять пайку низкотемпературными безсвинцовыми припоями, а для обеспечения смачивания графита припоями использовать предварительное лужение поверхности графита.

### Литература

- [1] Квасницкий В. В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Зб. наукових праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2008, № 1. — С. 100 — 107.
- [2] Махненко В. И. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с разными физико-механическими свойствами [Текст] / В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка, 2008, № 8. — С. 5 — 10.
- [3] Квасницкий В. В. Влияние прочности и сопротивления ползучести на остаточное напряженно-деформированное состояние металлокерамических соединений [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, Ал. В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2009, № 3. — С. 83 — 92.
- [4] Квасницкий В. В. Влияние режима охлаждения на напряженно-деформированное состояние втулки медь-графит [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Автоматическая сварка, 2015, № 11. — С. 25 — 31.

*Kvasnytskyi V. V.<sup>1</sup>, Kvasnytskyi V. F.<sup>2</sup>, Yermolayev H. V.<sup>2</sup>, Matviienko M. V.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> National University of Shipbuilding. Ukraine, Nikolaev

<sup>3</sup> The Kherson Branch of the National University of Shipbuilding. Ukraine, Kherson

## INFLUENCE OF COOLING REGIME ON DISTRIBUTION AND LEVEL OF RESIDUAL STRESSES OF GRAPHITE-COPPER JOINTS

*Considered the stress-strain state at different cooling regimes of cylindrical node of graphite and copper, based on the short-term and creep plastic deformation. The influence of cooling conditions on plastic deformation in the joint area and axial stresses on the surface of components were determined. The level of that deformation and stresses determines destruction probability of fragile graphite.*

Keywords: *diffusion welding; soldering; compound graphite-copper; stress-strain state; cooling regimes.*

### References

- [1] Kvasnytskyi V. V. Vliyanie plasticheskikh deformatsii na napryajenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionnoi svarke raznorodnih metallov primenitelno k uzlam cilindr-cilindr i vtulka-vtulka [Tekst] / V. V. Kvasnytskyi, G. V. Ermolaev, M. V. Matviienko // Zb. nauk. prats NUK, 2008, № 1. – P. 100 – 107.
- [2] Makhnenko V. I. Napriazhonno-deformirovannoe sostoianie pri diffuzionnoy svarke materialov s razlichnymi fiziko-mehanicheskimi svoystvami [Tekst] / V. I. Makhnenko, V. V. Kvasnytskyi, G. V. Ermolaev // Avtomaticheskai svarka, 2008, № 8. – P. 5 – 10.
- [3] Kvasnytskyi V. V. Vliyanie prochnosti i soprotivleniya polzuchesti na ostatochnoe napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie metallokeramicheskikh soedineniy [Tekst] / V. V. Kvasnytskyi, G. V. Ermolaev, Al. V. Labartkava // Zb. nauk. prats NUK, 2009, № 3. – P. 83 – 92.
- [4] Kvasnytskyi V. V. Vliyanie rezhima ohlazhdeniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vtulki med-grafit [Tekst] / V. V. Kvasnytskyi, G. V. Ermolaev, M. V. Matviienko // Avtomaticheskai svarka, 2015, № 11. – P. 25 – 31.