

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

В.В. Квасницкий¹, М.В. Матвиенко², Е.А. Бутурля², В.Ф. Квасницкий², Г.В. Ермолаев²

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

²Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Украины, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) при температурно-силовом нагружении цилиндрических узлов из материалов одинаковой прочности, но отличающихся температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР), с мягкой (с меньшим пределом текучести, чем у основного материала) прослойкой и средним температурным коэффициентом линейного расширения. Анализировались поля и эпюры напряжений и пластических деформаций узлов. Исследования НДС показали, что эффект совместного температурного (охлаждением) и силового (сжатием) нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в увеличении радиальных и окружных напряжений в обоих материалах, увеличении эквивалентных в материале с большим ТКЛР и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале с меньшим ТКЛР. Касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении. При смене охлаждения нагревом материалы меняются местами. Величина максимальных пластических деформаций в материале прослойки по границе раздела с основными материалами вблизи внешней поверхности при совместном температурно-силовом нагружении достигает 2,3 %. При этом осевые напряжения растяжения в хрупких материалах с низким ТКЛР (керамика, графит и др.) при охлаждении в узлах с мягкой прослойкой уменьшаются на величину сжимающих внешних напряжений, т. е. риск хрупкого разрушения снижается. Библиогр. 7, рис. 8.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, мягкая прослойка, напряжения, деформация, компьютерное моделирование, совместное температурное и силовое нагружение

Основными проблемами соединения разнородных материалов являются процессы активации соединяемых поверхностей и формирование остаточных напряжений [1, 2]. Для решения этих проблем используют промежуточные прослойки. При пайке такой прослойкой является паяный шов. Остаточные напряжения играют важную роль также в работоспособности готовых узлов после остывания [3, 4]. Поэтому исследование таких узлов является актуальным.

Наиболее простыми методами оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) являются инженерные методы расчета в пределах упругости, основанные на гипотезе плоских сечений, однако они не позволяют учитывать влияние многих факторов даже для простых узлов. На современном этапе развития компьютерной техники и программирования наиболее универсальными и перспективными являются методы математического моделирования. В работах [5–7] методом конечных элементов с использованием компьютерного комплекса ANSYS исследованы процессы формирования НДС при соединении разнородных материалов, в том числе металлов с неметалла-

ми. В работах [6, 7] исследованы НДС соединений с прослойками при осевом и температурном нагружении соответственно. Поскольку во многих узлах происходит как осевое, так и термическое нагружение, то в данной работе исследовано НДС при совместном нагружении с учетом пластических деформаций.

Цель настоящей работы — установление влияния мягких промежуточных прослоек, имеющих меньший предел текучести по сравнению с соединяемыми материалами, на формирование НДС при дуговой диффузионной сварке и пайке.

Основной материал исследований. Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Решали осесимметричные задачи для узлов типа цилиндр–цилиндр диаметром 20 мм, общей высотой $h = 21$ мм и с толщиной прослойки $s = 1$ мм (рис. 1). С учетом специфики узлов, наличия больших градиентов напряжений в узкой зоне вблизи прослойки использовалась градиентная разбивка с переменными размерами конечных элементов, размеры которых в зоне соединения выбирались так, чтобы по толщине

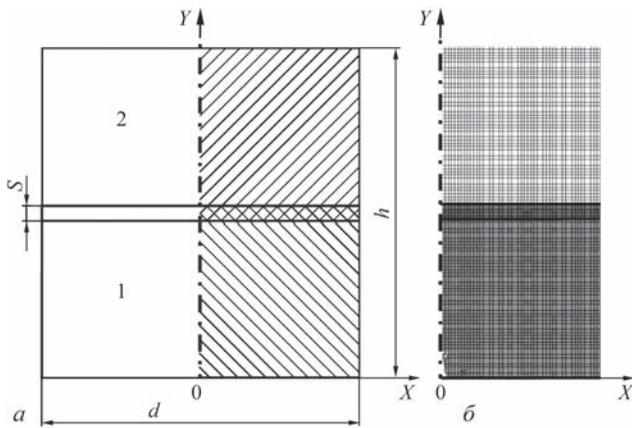


Рис. 1. Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов с прослойкой (1, 2 — соединяемые материалы)

прослойки их было менее 10. Использовались конечные элементы типа PLANE 183. Соединяемые материалы 1 и 2 имели одинаковые пределы текучести, но отличающиеся температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР = $20 \cdot 10^{-6}$ и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Мягкая прослойка имела значительно меньший предел текучести ($\sigma_T = 38$ МПа), чем у основного металла ($\sigma_T = 250$ МПа), и средний ТКЛР ($15 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Модули упругости и коэффициенты Пуассона всех материалов принимались одинаковыми и равными $2 \cdot 10^5$ МПа и 0,3 соответственно, что позволяет выделить влияние именно пластической составляющей деформаций на НДС узла. Принятые свойства материалов при данном нагружении обеспечили пластическое деформирование только прослойки. Соединяемые материалы при этом деформировались упруго по всему объему, что позволяет применить полученные результаты к соединениям хрупких материалов.

Нагружение выполнялось совместным сжатием усилием 40 МПа и снижением температуры узла (после образования соединения) на 100° . Полученные при таком нагружении результаты справедливы и при смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием), но материалы 1 и 2, имеющие разные ТКЛР, при этом меняются местами. Результаты моделирования сравнивались с аналогичными узлами при разных видах нагружения (только силовом и только температурном). Анализировались поля и эпюры всех составляющих напряжений и пластических деформаций узлов.

Как показал анализ результатов моделирования, характер НДС в целом соответствует общим принципам механики и закономерностям, установленным ранее [5–7]. Эффекты температурного и силового нагружения алгебраически суммируются, в результате чего поля радиальных и окружных напряжений остаются практически та-

кими же, как при чисто температурном нагружении. Осевые сжимающие напряжения в материале 1 увеличиваются, а растягивающие в материале 2 уменьшаются на величину сжимающей нагрузки. Касательные напряжения заметно увеличиваются на границе раздела «мягкой» прослойки с материалом 1 и уменьшаются на границе раздела с материалом 2 по сравнению с чисто температурным нагружением. Здесь наглядно проявляется алгебраическое суммирование эффектов от разности ТКЛР и пластического деформирования прослойки и значительно больший уровень напряжений при температурном нагружении по сравнению с силовым.

Аналогично изменяется и поле эквивалентных напряжений. Последние при совместном нагружении заметно увеличиваются в материале 1 и уменьшаются в материале 2 по сравнению с чисто температурным нагружением.

В соответствии с эквивалентными напряжениями изменяется и поле пластических деформаций. Как и при чисто температурном нагружении максимум последних сосредоточен вблизи внешней поверхности узла, но заметно изменяется их распределение по толщине прослойки. Они максимальны на границе раздела с материалом 1 и уменьшаются по мере удаления от нее.

Характер и уровень эпюр распределения радиальных напряжений вдоль стыка в соединяемых материалах при совместном температурном и силовом нагружении совпадает с характером соответствующих эпюр при чисто температурном нагружении (рис. 2). При этом максимальные радиальные напряжения в соединяемых материалах снижаются на 15...20 МПа. Аналогично радиальным распределены и окружные напряжения в соединяемых материалах.

В материале мягкой прослойки картина совершенно иная. Приложение давления при снижении температуры существенно (в несколько раз) увеличивает пластические деформации со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) и в меньшей степени со стороны материала 2 (с меньшим ТКЛР), меняя при этом их знак (рис. 3).

Эпюры осевых напряжений вдоль образующей узла смещаются в сторону сжатия на величину осевой нагрузки 40 МПа (рис. 4). В результате растягивающие напряжения в материале 2 (с малым ТКЛР) уменьшаются, снижая риск его хрупкого разрушения.

Касательные напряжения, оставаясь неизменными на большей части стыка, увеличиваются вблизи внешней цилиндрической поверхности, увеличиваясь со стороны материала 1 на 10 МПа

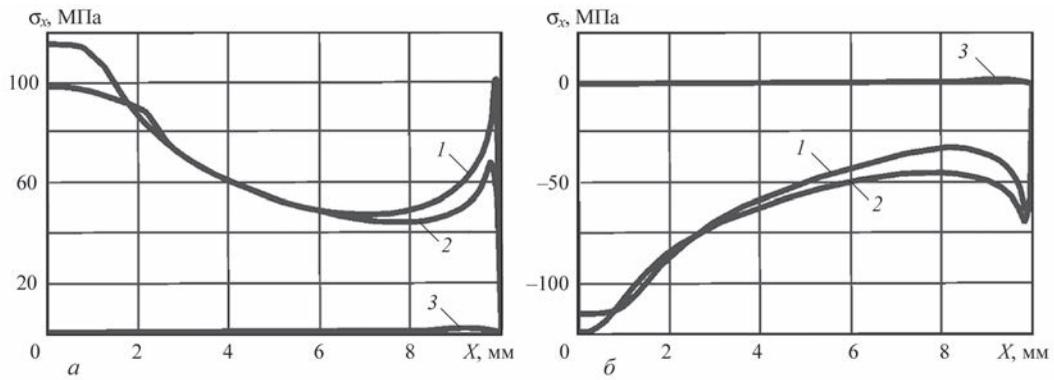


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений в материалах 1 (а) и 2 (б) по стыку с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

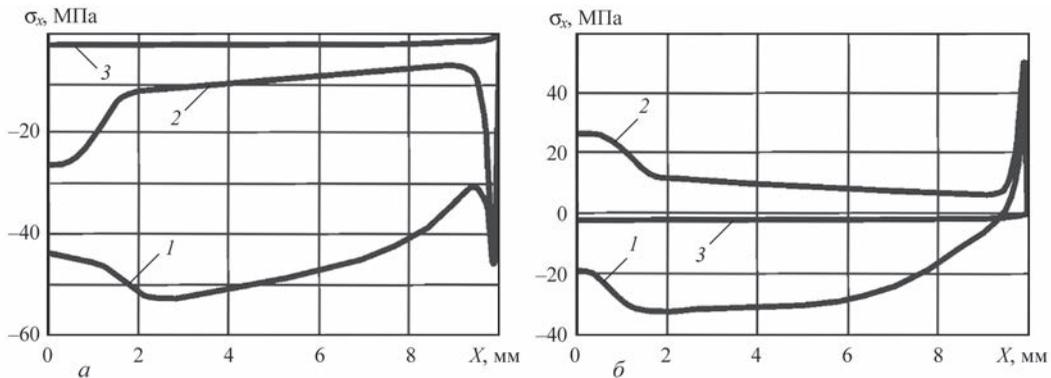


Рис. 3. Эпюры радиальных напряжений в материале «мягкой» прослойки по стыкам с материалом 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

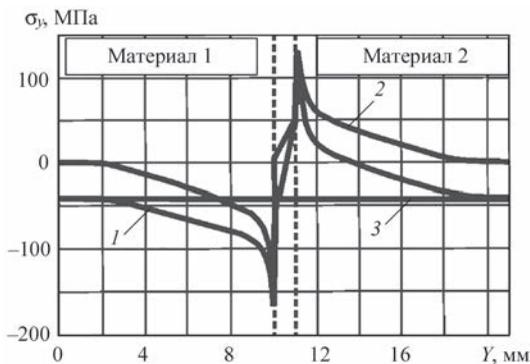


Рис. 4. Эпюры осевых напряжений по образующей узла с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

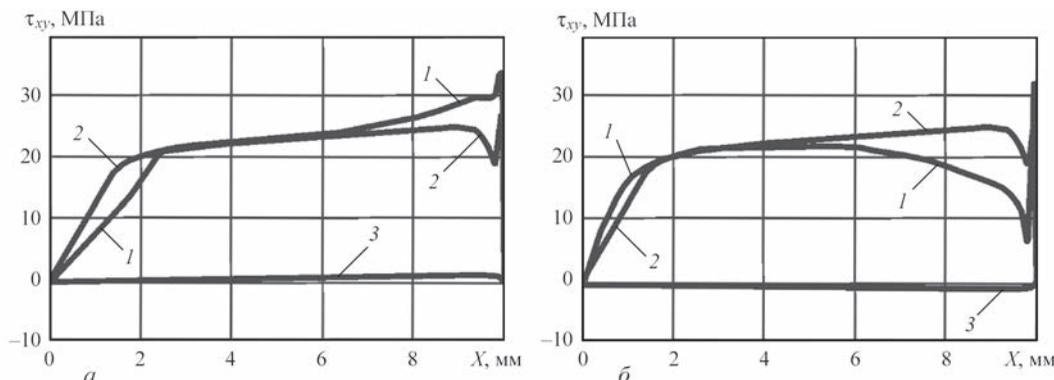


Рис. 5. Эпюры касательных напряжений по стыкам материалов 1 (а) и 2 (б) с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

(рис. 5, а) и уменьшаясь на 10 МПа со стороны материала 2 (рис. 5, б).

Соответственно изменяются и эпюры эквивалентных напряжений. Уровень этих напряжений увеличивается на величину приложенного давления 40 МПа в материале 1 (рис. 6, а) и уменьшается на 40 МПа в материале 2 (рис. 6, б). Распределение их в обоих соединяемых материалах остается близким к равномерному.

В материале «мягкой» прослойки, деформирующемся пластически, величина эквивалентных напряжений на большей части стыка остается на уровне около 40 МПа со стороны материала 2 с меньшим ТКЛР (рис. 7, б). Со стороны материала 1 с большим ТКЛР распределение неравномерное,

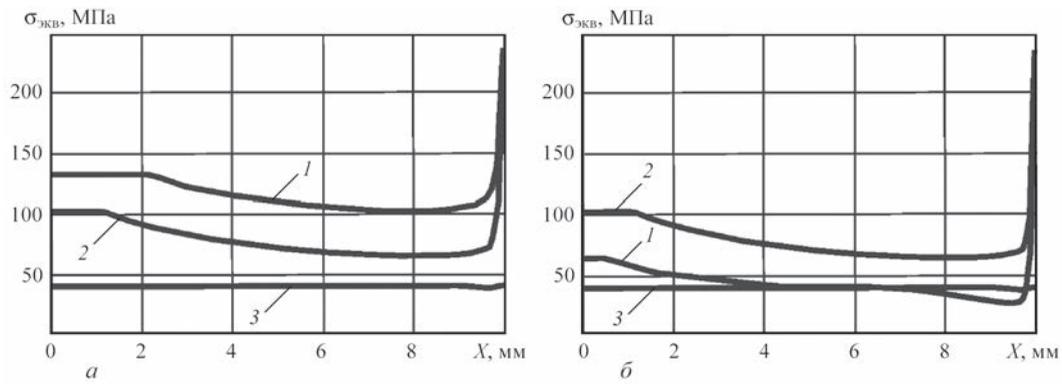


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений в соединяемых материалах 1 (а) и 2 (б) на стыке с «мягкой» прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

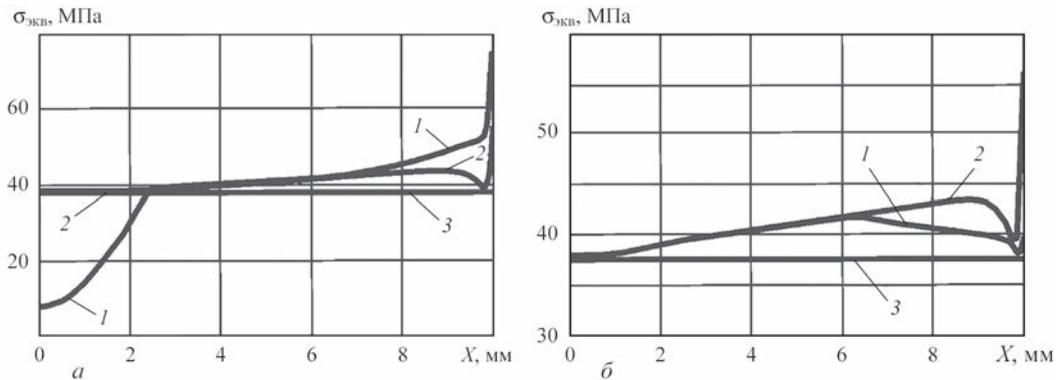


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений в материале прослойки на стыке с материалами 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

имеется четко выраженная зона застоя вблизи оси узла, в которой эквивалентные напряжения снижаются до 10 МПа. Вблизи внешней поверхности узлов они напротив увеличиваются до 80 МПа (рис. 7, а).

Пластические деформации в материале «мягкой» прослойки распределены неравномерно, постепенно увеличиваясь от близких к 0, в зоне застоя, до 1 % и более, вблизи наружной поверхности. При этом на границе с материалом 1 в этой зоне при совместном нагружении они в несколько раз больше, чем при чисто температурном нагружении (рис. 8, а). На границе с материалом 2, напротив, распределение более равномерное, чем

при чисто температурном нагружении (рис. 8, б), но уровень их ниже.

Совместное силовое (сжатие) и температурное (охлаждение) нагружение создает более благоприятные условия для развития пластических деформаций в «мягкой» прослойке, чем чисто температурное. Со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) растет их величина и неравномерность распределения, со стороны материала 2 (с меньшим ТКЛР) они уменьшаются, но распределение становится более равномерным. Очевидно, что при смене охлаждения нагревом материалы меняются местами, т. е. термоциклирование под давлением должно способствовать образованию

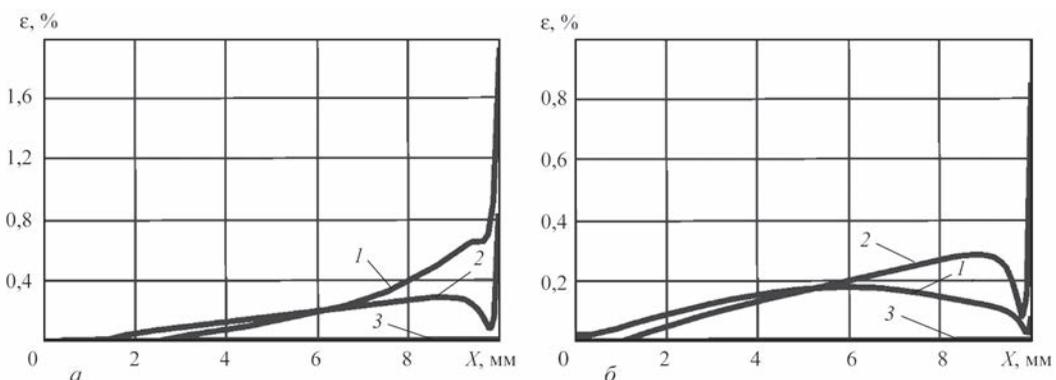


Рис. 8. Эпюры пластических деформаций в материале прослойки на стыке с материалами 1 (а) и 2 (б) при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

физического контакта и активации процессов формирования соединения.

Анализ результатов исследования НДС показал, что эффект совместного температурного и силового нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в некотором увеличении радиальных и окружных напряжений в обоих материалах, увеличении эквивалентных в материале 1 и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале 2, касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении.

Величина максимальных пластических деформаций в материале прослойки по границе раздела с основными материалами вблизи внешней поверхности при температурно-силовом нагружении значительно увеличивается и составляет около 2,3 %.

Выводы

1. При совместном нагружении сжатием и охлаждением (охлаждение под давлением) осевые напряжения растяжения в хрупких материалах с низким ТКЛР (керамика, графит и т. п.), ответственные за их разрушение при остывании после сварки (пайки) в узлах с «мягкой» прослойкой, уменьшаются на величину сжимающей нагрузки. Это означает, что при остывании под давлением в узлах с «мягкой» прослойкой уменьшается риск хрупкого разрушения.

2. Касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование металлического (физического) контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении сжатием и охлаждением узлов с мягкой прослойкой заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве. При этом распределение эквивалентных напряжений близко к равномерному. Таким образом, термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с «мягкой» прослойкой.

3. Пластические деформации в материале «мягкой» прослойки на границе с материалом с меньшим ТКЛР при совместном нагружении на стадии охлаждения распределены более равно-

мерно, но уровень их ниже, чем при чисто температурном нагружении. При совместном сжатии и нагреве то же происходит на границе с материалом с большим ТКЛР. Можно полагать, что сварка с термоциклированием под давлением в узлах с «мягкой» прослойкой обеспечивает более равномерное распределение пластических деформаций в прослойке.

Список литературы

1. Лобанов Л.М., Ермолаев Г.В., Квасницкий В.В. та ін. (2016) *Напруження та деформації при зварюванні і паянні. Підручник*. Лобанов Л.М. (ред.). Миколаїв, НУК.
2. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. (2017) *Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости*. Ермолаев Г.В. (ред.). Николаев, НУК.
3. Махненко В.И. (2006) *Ресурс эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Київ, Наукова думка.
4. Махненко В.И., Квасницкий В.Ф. (2006) Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке. *Автоматическая сварка*, 2, 5–10.
5. Ermolaev G.V., Martynenko V.A., Olekseenko S.V. et al. (2017) Effect of the Rigid Interlayer Thickness on the Stress-Strain State of Metal-Graphite Assemblies under Thermal Loading. *Strength of Materials*, 9, 422–428.
6. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Chunlin Dong и др. (2018) Напряженное состояние сварных и паяных соединений узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке. *Автоматическая сварка*, 4, 3–13.
7. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Матвиенко М.В. и др. (2019) *Напряженно-деформированное состояние сварных и паяных узлов из разнородных материалов с мягкой прослойкой при термическом нагружении*, 5, 18–24.

References

1. Lobanov, L.M., Kvasnytskyi, V.V. et al. (2016) *Stresses and strains in welding and soldering: Manual*. Ed. by L.M. Lobanov. Mukolaiv, NUK [in Ukrainian].
2. Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, H.V., Matviienko, M.V. (2017) *Mechanics of joints in diffusion welding, soldering and spraying of dissimilar materials under elasticity conditions*. Ed. by H.V. Yermolayev. Nikolaev, NUK [in Russian].
3. Makhnenko, V.I. (2006) *Service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Makhnenko, V.I., Kvasnitsky, V.F. (2006) Stress-strain state of assemblies of cylindrical shape in diffusion bonding. *The Paton Welding J.*, 2, 2-7.
5. Ermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain state of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, 9, 422-428.
6. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Dong Chunlin et al. (2018) Stressed state of welded and brazed assemblies from similar materials with a soft interlayer under axial loading. *The Paton Welding J.*, 4, 6-10.
7. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Matviienko, M.V. et al. (2019) Stress-strain state of welded and brazed assemblies from dissimilar materials with soft interlayer at thermal loading. *Ibid.*, 5, 13-17.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ ВУЗЛІВ ІЗ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В.В. Квасницький¹, М.В. Матвієнко², Є.А. Бутурля², В.Ф. Квасницький², Г.В. Єрмолаєв²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

²Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9. E-mail: welding@nuos.edu.ua

Досліджено напружено-деформований стан (НДС) при температурно-силовому навантаженні циліндричних вузлів з матеріалів однакової міцності, але різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення (ТКЛР), з м'яким (з меншою межою плинності, ніж у основного матеріалу) прошарком і середнім ТКЛР. Аналізувалися поля і епюри напружень і пластичних деформацій вузлів. Дослідження НДС показали, що ефект спільного температурного (охладження) і силового (стиснення) навантаження вузлів з м'якими прошарками проявляється в збільшенні радіальних і окружних напружень в обох матеріалах, збільшенні еквівалентних в матеріалі з більшим ТКЛР і прошарку і осьових в матеріалах, що з'єднуються, і, відповідно, зменшенні еквівалентних в матеріалі з меншим ТКЛР. Дотичні напруження при цьому залишаються практично такими ж, як при чисто температурному навантаженні. При зміні охолодження нагріванням матеріали міняються місцями. Величина максимальних пластичних деформацій в матеріалі прошарку по границі розділу з основними матеріалами поблизу зовнішньої поверхні при спільному температурно-силовому навантаженні досягає 2,3 %. При цьому осьові напруження розтягнення в крихких матеріалах з низьким ТКЛР (кераміка, графіт та ін.) при охолодженні в вузлах з м'яким прошарком зменшуються на величину стискаючих зовнішніх напружень, тобто ризик крихкого руйнування знижується. Бібліогр. 7, рис. 8.

Ключові слова: дифузійне зварювання, паяння, різнорідні матеріали, м'який прошарок, напруження, деформація, комп'ютерне моделювання, спільне температурне й силове навантаження

STRESS-STRAIN STATE OF WELDED AND BRAZED ASSEMBLIES OF DISSIMILAR MATERIALS WITH SOFT INTERLAYER AT TEMPERATURE-STRENGTH LOADING

V.V. Kvasnytskyi¹, M.V. Matviienko², E.A. Buturlya², V.F. Kvasnytskyi², G.V. Ermolaev²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
37 Pobedy Ave., Kyiv, 03056. E-mail: kvas69@ukr.net

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 9 Geroev Ukrainy Ave, Mykolaiv, 54025

There was researched a stress-strain state (SSS) at temperature – strength loading of cylinder assemblies of materials of similar strength, but different by temperature coefficient of linear expansion (TCLE), with soft (with lower yield limit than in base metal) interlayer and average temperature coefficient of linear expansion. Fields and distribution diagrams of stresses and plastic deformations of assemblies were analyzed. Investigation of SSS showed that effect of mutual temperature (cooling) and strength (compression) loading of assemblies with soft interlayers appears in increase of radial and circumferential stresses in both materials, increase of equivalent ones in the material with high TCLE and the interlayer and axial ones in the joined materials, and, respectively, decrease of equivalent in the material with lower TCLE. Tangential stresses at that remain virtually the same as at purely temperature loading. In change of cooling by heating the materials change their places. The value of maximum plastic deformations in the interlayer material at interface with base material close to external surface at mutual temperature-strength loading reaches 2.3%. At that, axial tension stresses in brittle materials with low TCLE (ceramics, graphite etc.) during cooling in the assemblies with soft interlayer reduce by value of compression external stresses, i.e. risk of brittle fracture reduces. 7 Ref., 8 Fig. .

Keywords: diffusion welding, brazing, dissimilar materials, soft interlayer, stresses, deformation, computer modelling, mutual temperature and strength loading

Поступила в редакцію 08.05.2019