

Квасницкий В. В., Матвиенко М. В., Бутурля Е. А.,
Квасницкий В. Ф., Ермолаев Г. В.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

В работе проведено моделирование напряженного состояния (НС) методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS в цилиндрических узлах с мягкой прослойкой, имеющей модуль упругости меньший чем у основного металла в условиях силового и термического нагружения. Исследовано влияние относительной толщины прослойки на формирование НС. Проанализированы поля и эпюры распределения нормальных (радиальных, осевых, окружных), касательных и эквивалентных напряжений, а также уровень максимальных и минимальных напряжений в различных участках стыка. Установлено, что при совместном нагружении сжатием и снижением температуры (при охлаждении) уровень эквивалентных напряжений выше в материале с большим температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), при повышении температуры – с меньшим ТКЛР. В небольшой зоне основного металла вблизи внешней поверхности у стыка с прослойкой и в самой прослойке возникает сложное НС с радиальными, осевыми, окружными и касательными напряжениями. Радиальные напряжения на стыке прослойка-материал с большим ТКЛР имеют сжимающий характер, а на стыке прослойка-материал с меньшим ТКЛР – растягивающий. Осевые напряжения резко возрастают в материале имеющим больший ТКЛР и уменьшаются в материале с меньшим ТКЛР, из-за чего они переходят в растягивающие напряжения. Окружные и касательные напряжения линейно возрастают от нуля в центре стыка до максимума на периферии. Эквивалентные напряжения распределены достаточно равномерно практически вдоль всего стыка. Характер распределения мало зависит от толщины прослойки, однако уровень напряжений изменяется при уменьшении относительной толщины прослойки. В случае увеличения относительной толщины прослойки эквивалентные напряжения в ней возрастают, что способствует активации процессов образования соединения между материалами с разными ТКЛР при диффузионной сварке с мягкой прослойкой.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженное состояние, упругая стадия, совместное силовое и термическое нагружения.

Постановка проблемы.

Диффузионная сварка и пайка в вакууме (ПВ) широко применяются при соединении жаропрочных никелевых сплавов, материалов композиционных с направленной кристаллизацией или монокристаллитных и других, которые нельзя сваривать плавлением [1,2]. Для активации соединяемых поверхностей при диффузионной сварке используют пластичные прослойки, находящиеся в твердом состоянии. При пайке прослойкой является паяный шов, который по механическим свойствам уступает основному материалу. Такие прослойки могут влиять на работоспособность соединений.

Анализ последних достижений и публикаций.

Соединения с такими прослойками представляют собой сочетание материалов с различными свойствами. В работе [1] показано, что в таких соединениях в процессе охлаждения или нагрева и действия внешней нагрузки возникают радиальные, окружные, осевые и касательные напряжения, т. е. формируется более жесткое объемное напряженное

состояние, которое зависит от характера нагружения и определяет несущую способность изделия или конструкции. Поэтому исследование является **актуальным**. Влияние прослоек на свойства соединений начали исследовать в работах [3,4] аналитическими методами, которые не могут учитывать все факторы. С развитием компьютерной техники и программных комплексов стало возможным моделирование НС с учетом всех конструкционных и технологических факторов в инжиниринге многих процессов [5,6], в том числе сварочного производства [7-9], в которых установлено влияние НС как на формирование соединений, так и на работоспособность деталей конструкций.

Цель и задачи работы – изучить формирование НС при диффузионной сварке и пайке цилиндрических узлов с «мягкой» прослойкой в условиях силового и термического нагружения.

Задачи работы:

- исследовать влияние относительной толщины прослойки на формирование НС;
- изучить влияние ТКЛР на уровень эквивалентных напряжений;
- определить распределение эквивалентных напряжений по площади стыка.

Основной материал исследований.

Влияние относительной толщины (степени вытянутости) прослойки исследовалось на цилиндрических узлах и моделях с мягкой (малой жесткости) прослойкой, в которых при постоянной толщине прослойки $s=1$ мм диаметр d и высота узла h менялись от 10 до 100 мм. При этом соотношение общей высоты узла h к его диаметру d оставалось неизменным и равным 1 ($d/h = 1$), а относительная толщина прослойки s/d изменялись от 0,01 до 0,10.

Соединяемые основные материалы 1 и 2 имели одинаковые модули упругости ($E=2 \cdot 10^5$ МПа) и разные ТКЛР ($\alpha_1=20 \cdot 10^{-6}$ и $\alpha_2=10 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Материал прослойки отличался меньшим модулем упругости ($E_{np}=1 \cdot 10^5$ МПа) и средним ТКЛР ($\alpha_{np}=15 \cdot 10^{-6}$ 1/град).

Исследования выполнялись на цилиндрических узлах (рис. 1). Узлы нагружались снижением температуры на 100°C совместно со сжатием 40 МПа. Решалась упругая задача. Варианты исследованных моделей и свойства соединяемых материалов приведены в табл. 1.

Анализ полей и эпюр распределения нормальных (радиальных, осевых, окружных), касательных и эквивалентных напряжений, а также уровень максимальных и минимальных напряжений в различных участках стыка: в основном металле и материале прослойки, на периферии и в средней части стыка. При изменении степени вытянутости прослойки в целом характер полей меняется мало. Анализ эпюр распределения напряжений вдоль границы раздела в соединяемых материалах и прослойке показывает, что эпюры радиальных напряжений по стыку в соединяемых материалах и прослойке (рис. 2) можно разделить на 2 участка.

На внутреннем участке напряжения остаются практически постоянными. На участке, прилегающем к внешней поверхности узла, они резко уменьшаются в соединяемых материалах и возрастают в материале прослойки. В материале с большим ТКЛР радиальные напряжения растягивающие, а с меньшим – сжимающие. По стыку с прослойкой и материалом с большим ТКЛР радиальные напряжения сжимающие, а по стыку с материалом с меньшим ТКЛР – растягивающие. Протяженность внутреннего участка увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки, а вблизи внешней поверхности протяженность остается практически неизменной и равной около 10 толщин прослойки. Окружные напряжения распределены аналогично.

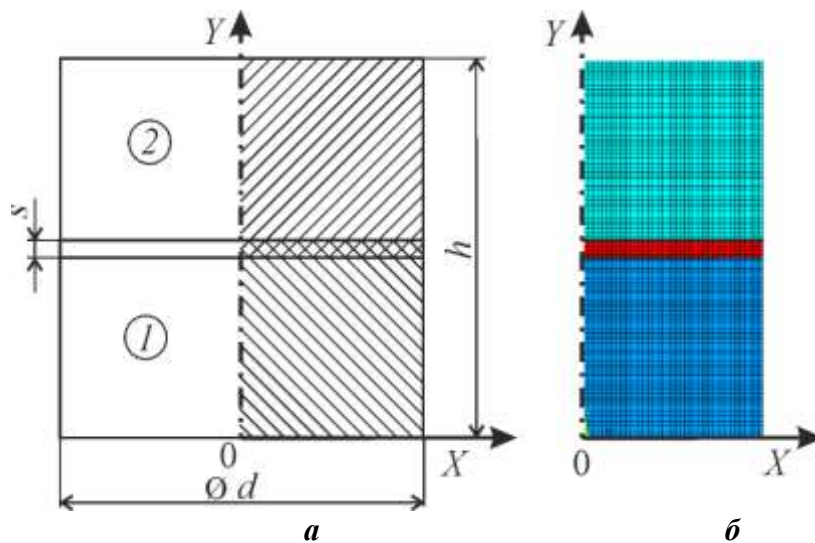


Рисунок 1 – Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов с прослойкой

Таблица 1 – Варианты узлов с различной относительной толщиной (степенью вытянутости) прослойки

№ варианта	1	2	3	4
Толщина прослойки, b мм	1	1	1	1
Высота узла, h мм	10	20	60	100
Диаметр узла, d мм	10	20	60	100
Относительная толщина прослойки, b/d	0,1	0,05	0,0167	0,01

Уровень радиальных напряжений (рис. 3, а, б) на большей части стыка в соединяемых материалах увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки. В средней части стыка они увеличиваются от 99 до 135 МПа в материале 1 и от 101 до 141 МПа в материале 2 (кривые 1). При этом их величина приближается к уровню радиальных напряжений в аналогичных узлах без прослойки (143 МПа). На периферии стыка напряжения заметно ниже. Аналогично изменяются и окружные напряжения.

Осевые напряжения в зоне стыка практически на всей его длине, как в соединяемых материалах, так и в прослойке близки к -40 МПа, незначительно увеличиваясь по модулю по мере удаления от оси узла. В непосредственной близости от наружной поверхности они резко возрастают в материале с большим ТКЛР (1) (до -200 МПа) и уменьшаются в материале с меньшим ТКЛР (2), где они переходят в растягивающие (около 100 МПа).

Уровень осевых напряжений в средней части стыка, как в соединяемых материалах, так и в материале прослойки, мало зависит от ее толщины (рис. 4, кривые 1). На периферии (вблизи поверхности узла) он заметно увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки (рис. 5, кривые 2), в материале 1 с -176 до -223 МПа, а в материале 2 с 84 до 128 МПа. При этом уровень максимальных осевых напряжений в узлах с прослойкой малой относительной толщины (варианты 1 и 2) близок к узлам без прослойки. Характер распределения осевых напряжений вдоль оси узла (рис. 5, а) и его боковой поверхности (рис. 5, б) мало меняется с изменением относительной толщины прослойки.

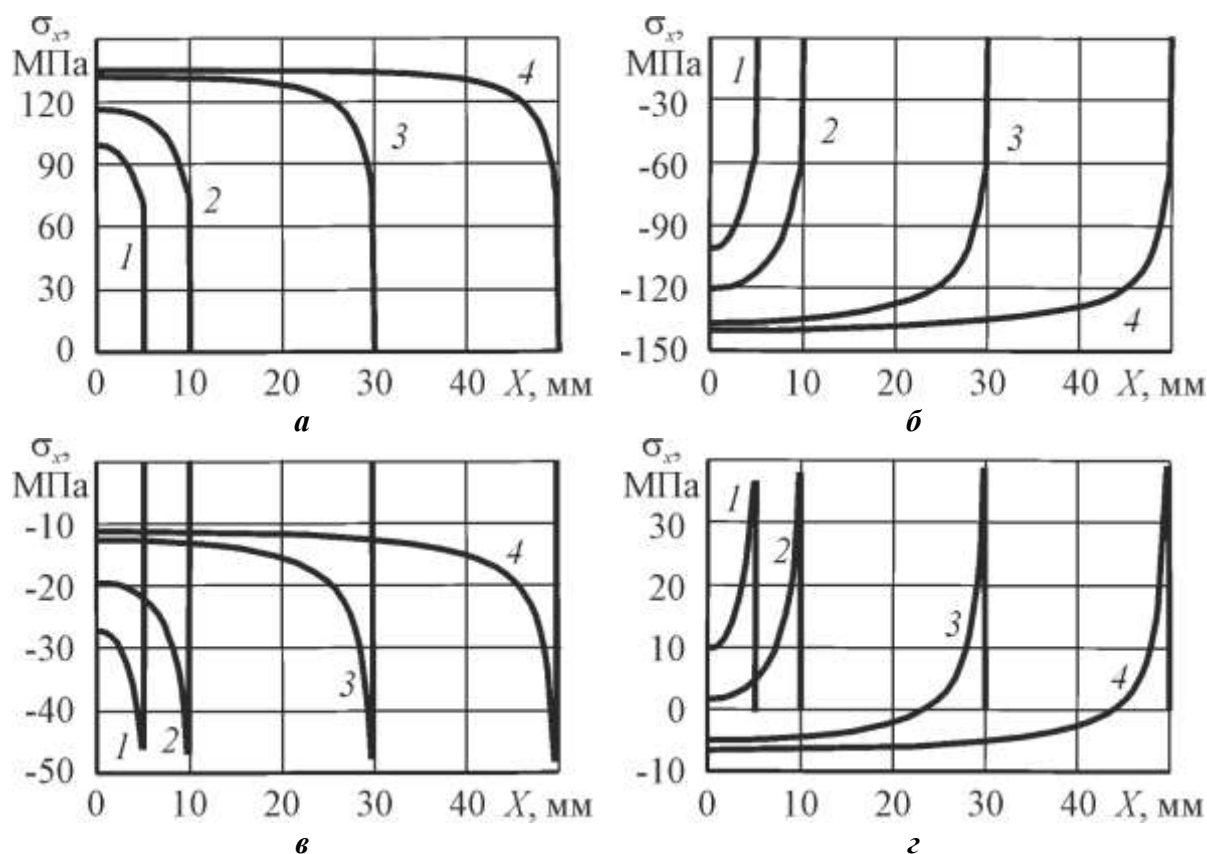


Рисунок 2 – Эпюры радиальных напряжений в основных материалах 1 с большим ТКЛР (а), 2 с меньшим ТКЛР (б) и «мягкой» прослойки по стыку с материалами 1 (в) и 2 (г), варианты 1, 2, 3 и 4

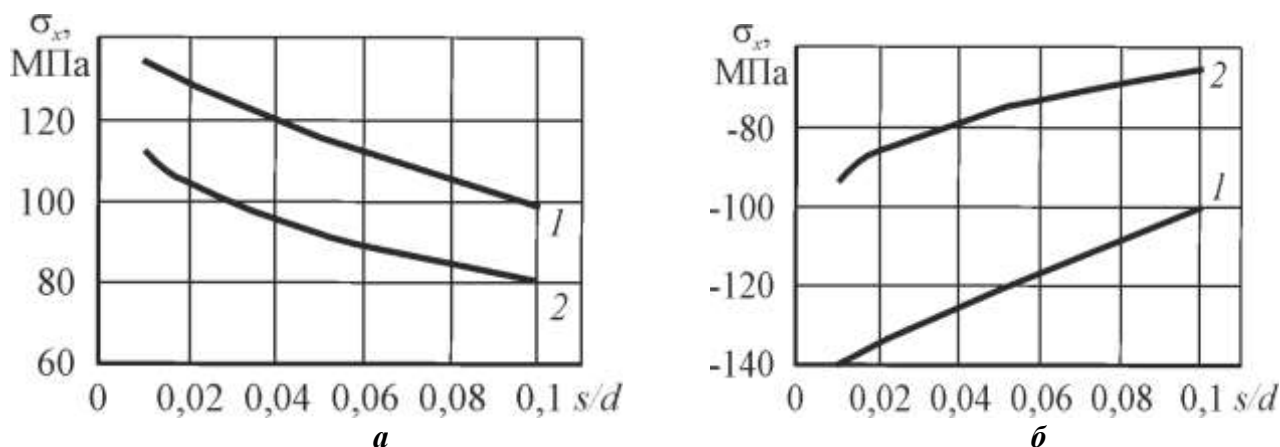


Рисунок 3 – Зависимость уровня радиальных напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в основном материале 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

На внешней боковой поверхности они максимальные на стыке и уменьшаются до минимальных, по мере приближения к торцам узла. В средней части стыка уровень осевых напряжений значительно ниже.

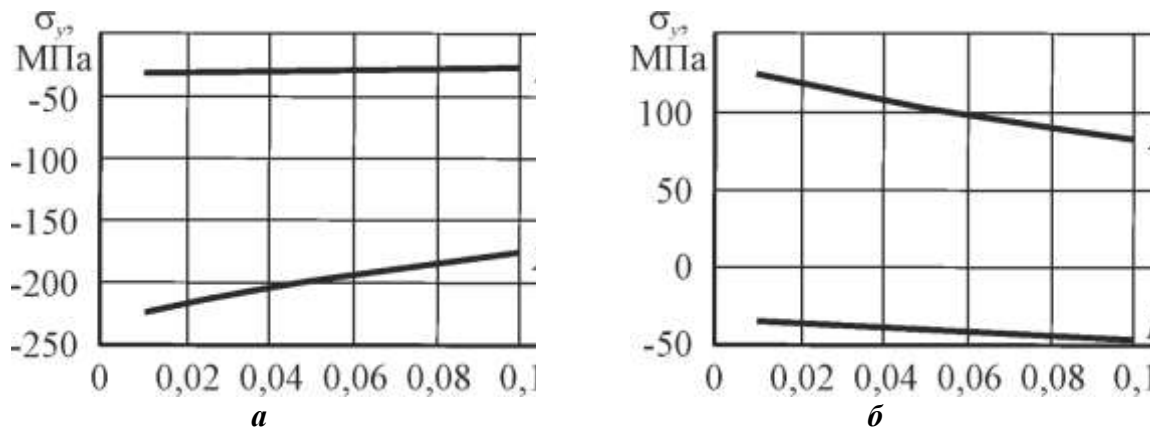


Рисунок 4 – Зависимость уровня осевых напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в материалах 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

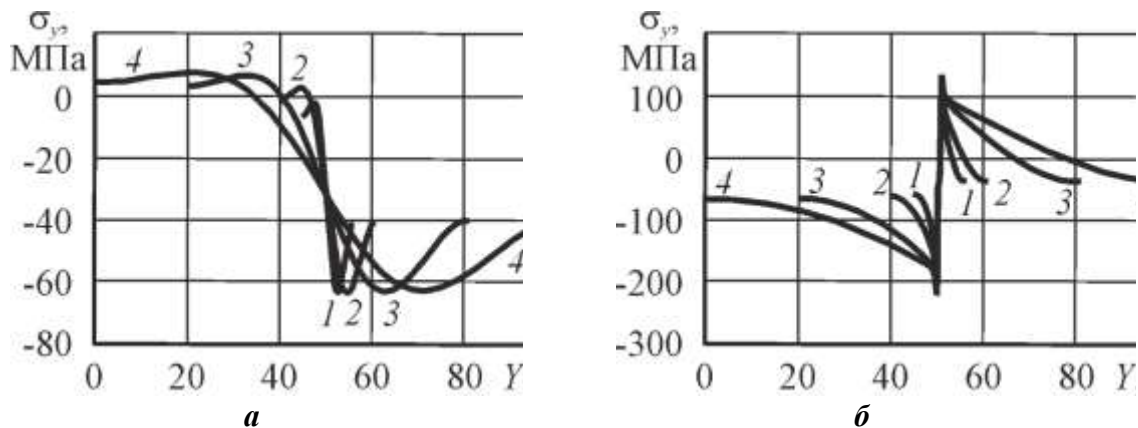


Рисунок 5 – Эпюры осевых напряжений по оси (а) и внешней поверхности (б) узла, варианты 1, 2, 3 и 4

Касательные напряжения по границам раздела соединяемых материалов и прослойки во всех вариантах узлов (при всех относительных толщинах прослойки) практически линейно возрастают от нуля в центре стыка до максимума на периферии (рис. 6). При этом величина максимума растет по мере уменьшения относительной толщины прослойки (от 38 до 76 МПа), приближаясь к уровню напряжений 90 МПа в аналогичном узле без прослойки.

Эквивалентные напряжения в соединяемых материалах практически вдоль всего стыка распределены достаточно равномерно, изменяясь от 126 до 166 МПа в материале 1 и от 51 до 107 МПа в материале 2 по мере уменьшения относительной толщины прослойки и приближаясь к 180 МПа и 145 МПа в аналогичном узле без прослойки. У наружной поверхности узла эквивалентные напряжения возрастают в соответствии с распределением радиальных, окружных, осевых и касательных.

Уровень максимальных напряжений в материале с большим ТКЛР (1) с уменьшением относительной толщины прослойки растет от 252 до 333 МПа, удаляясь от максимума в узле без прослойки (251 МПа). В материале с меньшим ТКЛР (2), он растет от 153 до 238 МПа, приближаясь к максимуму в узле без прослойки (рис. 7а, б).

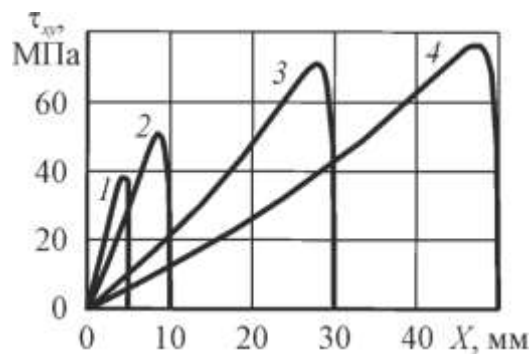


Рисунок 6 – Эпюры касательных напряжений по границам раздела прослойки и материалов 1 и 2, варианты 1, 2, 3 и 4

В материале прослойки эквивалентные напряжения почти линейно увеличиваются от минимума на оси узла до максимума (около 140 МПа) на периферии. При этом с уменьшением относительной толщины прослойки минимальные напряжения (на оси узла) на границе с материалом 1 растут от 0 до 20 МПа, а максимальные (на периферии стыка) от 75 до 138 МПа. На границе с материалом 2 с уменьшением относительной толщины прослойки эквивалентные напряжения в ней уменьшаются в средней части стыка от 57 до 28 МПа и растут на периферии от 90 до 140 МПа.

В целом характер распределения эквивалентных напряжений в соединяемых материалах и в прослойке мало зависит от ее относительной толщины. Вместе с тем, уровень этих напряжений с уменьшением относительной толщины прослойки заметно изменяется (рис. 7). На большей части стыка он увеличивается в обоих соединяемых материалах, приближаясь к уровню напряжений в аналогичном узле без прослойки.

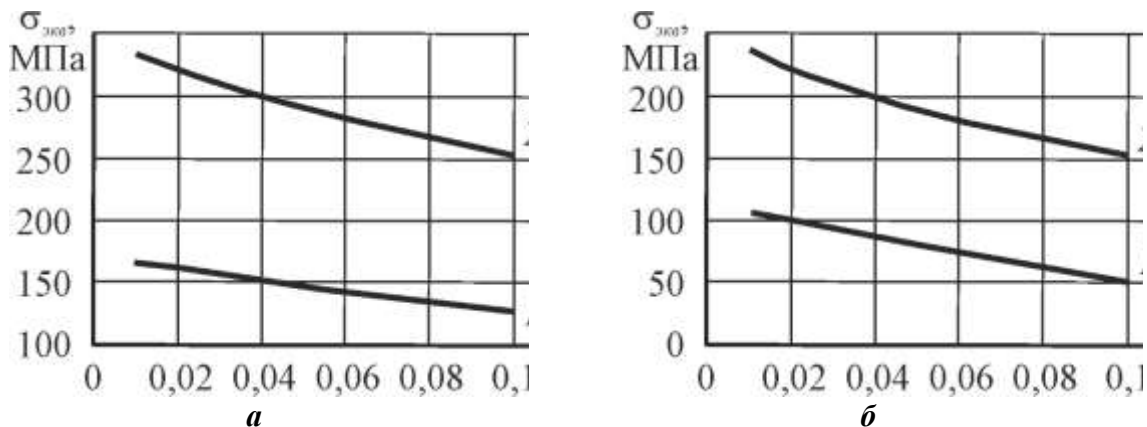


Рисунок 7 – Зависимость уровня эквивалентных напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в основном материале 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

Для активации процесса пластического деформирования в соединяемых материалах (при сварке пластичных материалов) следует по возможности уменьшать толщину прослойки, либо производить сварку без прослоек. Кроме того, при совместном нагружении сжатием и снижением температуры уровень эквивалентных напряжений выше в материале с большим ТКЛР, при нагреве материалы меняются местами. При термоциклировании благоприятные условия для активации процесса образования соединения создаются

поочередно в одному і другому матеріалі, що підтверджує цілесобразність застосування термоциклізації при дифузійній зварці [10].

В прослойке на границе с материалами 1 и 2 эквивалентные напряжения увеличиваются с ростом относительной толщины, что говорит о том, что применение мягких прослоек большой толщины способствует активации процессов образования соединения, что важно для получения соединений малопластичных и хрупких материалов, например, керамики и графита, с металлами.

ВЫВОДЫ

1. При изменении относительной толщины мягкой прослойки в целом характер полей напряжений меняется мало. Для всех вариантов характерно наличие зоны больших градиентов всех составляющих напряжений вблизи периферийных участков прослойки (прилегающих к боковой поверхности узла). Размеры этой зоны практически не зависят от степени вытянутости прослойки и составляют около 10 ее толщин.

2. При совместном нагружении сжатием и снижением температуры уровень эквивалентных напряжений выше в материале с большим ТКЛР, при повышении температуры материалы меняются местами. При термоциклировании благоприятные условия для активации процесса образования соединения создаются поочередно в одном и другом материале.

3. В прослойке эквивалентные напряжения увеличиваются с ростом относительной толщины, что позволяет рекомендовать применение мягких прослоек большой толщины для получения соединений малопластичных и хрупких материалов, например, керамики и графита с металлами.

Список использованных источников:

1. Спеціальні способи зварювання: підручник /І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю.Максимов, Г. В. Єрмолаєв; за ред. Б. Є. Патона. – Миколаїв: НУК, 2017. –348 с.
2. Паяння матеріалів: підручник / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В.Максимова, В. В. Чигарьов. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с.
3. Бакиш, О. А. О напряженном состоянии пластичной прослойки при осесимметричной деформации / О. А. Бакиш, Л. М. Качанов // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 2. –С.134–137.
4. Бакиш, О. А. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой / О. А. Бакиш, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3–5.
5. Чигарёв, А. В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. / А. В. Чигарёв, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
6. Басов, К. А. ANSYS:справочник пользователя / К. А.Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
7. Махненко, В. И. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой / В. И. Махненко, В. В. Квасницький // Автоматическая сварка. – 2009. – № 8. – С. 11–16.
8. Effect of the Rigid interlayer Thickness on the stress-strain of metal-Graphite Assemblies Under Thermal Loading / G. V. Ermolaev, V. A. Martynenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // Strength of Materiale. –2017. – Vol. 49, N 3, May. – P. 422–428.
9. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, Dong Chunlin, М. В.Матвиенко, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2018. – № 4. – С. 7–13.

Машинобудування і зварювальне виробництво

10. Пат. 81583 Україна, МПК В23К 20/14 (2006). Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / Квасницький В. В., Матвієнко М. В., Єрмолаєв Г. В., Волошин В. Ю., Бугаєнко Б. В.; заявник і патентовласник Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № а200612253. – заявл. 21.11.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

**Квасницький В. В., Матвієнко М. В., Бутурля Є. А.,
Квасницький В. Ф., Єрмолаєв Г. В.**

**ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН
З'ЄДНАНЬ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ**

В роботі проведено моделювання напруженого стану (НС) методом кінцевих елементів з використанням програмного комплексу ANSYS в циліндричних вузлах з м'яким прошарком, що має модуль пружності менший ніж у основного металу в умовах силового і термічного навантаження. Досліджено вплив відносної товщини прошарку на формування НС. Проаналізовані поля та епюри розподілу нормальних (радіальних, осьових, окружних), дотичних та еквівалентних напружень, а також рівень максимальних і мінімальних напружень в різних ділянках стику. Встановлено, що при спільному навантаженні стисканням і зниженням температури (при охолодженні) рівень еквівалентних напружень вище в матеріалі з більшим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР), при підвищенні температури - з меншим ТКЛР. У невеликій зоні основного металу поблизу зовнішньої поверхні у стику з прошарком і в самому прошарку виникає складне НС з радіальними, осьовими, окружними та дотичними напруженнями. Радіальні напруження на стику прошарок-матеріал з більшим ТКЛР мають стискаючий характер, а на стику прошарок-матеріал з меншим ТКЛР – розтягуючий. Осьові напруження різко зростають в матеріалі, що має більший ТКЛР і зменшується в матеріалі з меншим ТКЛР, через це вони переходять в розтягуючи напруження. Окружні та дотичні напруження лінійно зростають від нуля в центрі стику до максимуму на периферії. Еквівалентні напруження розподілені досить рівномірно практично вздовж усього стику. Характер розподілу мало залежить від товщини прошарку, однак рівень напружень змінюється при зменшенні відносної товщини прошарку. У разі збільшення відносної товщини прошарку еквівалентні напруження в ньому зростають, що сприяє активації процесів утворення з'єднання між матеріалами з різними ТКЛР при дифузійному зварюванні з м'яким прошарком.

Ключові слова: зварні і паяні вузли, м'який прошарок, комп'ютерне моделювання, напружений стан, пружна стадія, спільне силове і термічне навантаження.

**Kvasnytskyi V. V., Matvienko M. V., Buturlia Y. A.,
Kvasnytskyi V. F., Yermolayev G. V.**

**INFLUENCE OF THE LOAD CHARACTER ON THE STRESS STATE
OF COMPOUNDS WITH A SOFT INTERLAYER**

In the work, the stress state (SS) was simulated by the finite element method using the ANSYS software package in cylindrical nodes with a soft interlayer having an elastic modulus lower than that of the base metal under conditions of power and thermal loading. The influence of the relative thickness of the interlayer on the formation of SS is studied. The fields and diagrams of the distribution of normal (radial, axial, circumferential), tangential and equivalent stresses, as well as the level of maximum and minimum stresses in various sections of the joint are analyzed. It was found that under joint loading by compression and lowering the temperature (during cooling),

the level of equivalent stresses is higher in a material with a high temperature coefficient of linear expansion (TCLE), with increasing temperature - with a lower TCLE. In a small area of the base metal near the outer surface at the junction with the interlayer and in the interlayer itself, a complex SS with radial, axial, circumferential and tangential stresses arises. The radial stresses at the junction of the interlayer-material with a large TCLE are compressive, and at the junction of the interlayer-material with a lower TCLE, they are tensile. Axial stresses increase sharply in a material with a larger TCLE and a decrease in a material with a lower TCLE, which causes them to become tensile stresses. Circumferential and tangential stresses increase linearly from zero at the center of the joint to a maximum at the periphery. Equivalent stresses are distributed fairly evenly along almost the entire joint. The nature of the distribution depends little on the thickness of the interlayer, however, the level of stress changes with a decrease in the relative thickness of the interlayer. In the case of an increase in the relative thickness of the interlayer, the equivalent stresses in it increase, which contributes to the activation of the formation of a joint between materials with different thermal expansion rods during diffusion welding with a soft interlayer.

Keywords: welded and brazed joints, soft interlayer, computer modeling, stresses state, elastic stage, joint force and thermal loading.

Рекомендована к публикации: д-р техн. наук, проф. Мочанов А. А.

Статья принята 10.10.2019 г.

УДК 621.791.753.5

doi.org/10.31498/2522-9990212019187191

Лаврова О. В., Иванов В. П., Кончаківський М. В., Рибалко О. Ю.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ ДВОМА СРІЧКОВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ З КЕРОВАНИМ ПЕРЕНЕСЕННЯМ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ

Представлені результати дослідження ресурсозберігаючої технології наплавлення двома стрічковими електродами з контрольованим перенесенням електродного металу з торців стрічкових електродів і з регульованим співвідношенням швидкостей подачі стрічкових електродів. Для реалізації запропонованої технології наплавлення, розроблено пристрій, що дозволяє змінювати співвідношення швидкостей подачі першого і другого електродів в широкому діапазоні. За рахунок цього досягається контрольоване тепло-масоперенесення в зварювальну ванну. Відповідно, контрольоване оплавлення стрічкових електродів і розподіл теплової енергії в зварювальній ванні. Це дозволяє підвищити якість наплавлених виробів за допомогою простого і надійного ресурсозберігаючого пристрою.

Ключові слова: наплавлення під флюсом, механічне перенесення електродного металу, параметри режиму, доля участі основного металу.

Постанова проблеми.

Важливою проблемою є вирішення питання енергоефективності та забезпечення ресурсозберігаючої технології при напавленні стрічковим електродом. На теперішній час дослідники застосовують з цією метою контрольоване перенесення електродного металу з торцю стрічкового електроду. Встановлено, що при напавленні двома стрічковими електродами з контрольованим механічним тепло- масоперенесенням електродного металу підвищується продуктивність процесу. Однак, відсутні дослідження, в яких розглядається схема пристрою для наплавлення під флюсом двома стрічковими електродами з керованим переносом електродного металу з торців електродів.