

УДК 621.791

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ И ПАЙКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УЗЛОВ
С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО
И ТЕРМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ УПРУГОСТИ**

В.В. Квасницкий

д.т.н., профессор, зав.кафедрой Сварочного производства
НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

М.В. Матвиенко

к.т.н., доцент кафедры Сварки
Херсонский филиал Национального университета
кораблестроения имени адмирала Макарова

Е.А. Бугурля

аспирант кафедры сварочного производства

В.Ф. Квасницкий

д.т.н., профессор, зав.кафедрой Сварочного производства
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Г.В. Ермолаев

к.т.н., профессор, заведующий кафедрой Сварки
Херсонский филиал Национального университета
кораблестроения имени адмирала Макарова

Аннотация. В работе проведено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS в цилиндрических узлах с мягкой прослойкой, имеющей модуль упругости меньший чем у основного металла. Исследовано влияние относительной толщины прослойки на формирование НДС. 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 НДС с радиальными, осевыми, окружными и касательными напряжениями. С увеличением относительной толщины прослойки эквивалентные напряжения в ней возрастают, что способствует образованию соединения при диффузионной сварке с мягкой прослойкой.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, упругая стадия, совместное силовое и термическое нагружение.

УДК 621.791

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН
ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТА ПАЯННІ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ВУЗЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ В УМОВАХ СИЛОВОГО
ТА ТЕРМІЧНОГО НАГРУЖЕННЯ В МЕЖАХ ПРУЖНОСТІ**

В.В. Квасницький

д.т.н., професор, завідувач кафедри Зварювального виробництва

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

М.В. Матвієнко

к.т.н., доцент кафедри Зварювання

*Херсонська філія Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова*

Є.А. Бутурля

аспірант кафедри Зварювального виробництва

В.Ф. Квасницький

д.т.н., професор, завідувач кафедри Зварювального виробництва

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Г.В. Єрмолаєв

к.т.н., професор, завідувач кафедри Зварювання

*Херсонська філія Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова*

Анотація. В роботі проведено моделювання напружено-деформованого стану (НДС) методом скінченних елементів з використанням програмного комплексу ANSYS в циліндричних вузлах з м'яким прошарком, що має модуль пружності менший ніж у основного металу. Досліджено вплив відносної товщини прошарку на формування НДС. Встановлено, що при спільному навантаженні стискуванням й 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 про-шарком і в самому прошарку виникає складний НДС з радіальними, осьовими, окружними та дотичними напруженнями. Зі збільшенням відносної товщини прошарку еквівалентні напруги в ній зростають, що сприяє утворенню з'єднання при дифузійному зварюванні з м'яким прошарком.

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

УДК 621.791

**STRESSED-DEFORMED CONDITION
IN DIFFUSION WELDING AND DECKING OF CYLINDRICAL KNOTS
WITH A SOFT INTERIOR IN CONDITIONS OF FORCE
AND THERMAL STRESS WITHIN THE LIMITS OF ELASTICITY**

V.V. Kvasnytskyi

doctor of technical sciences, professor
head of welding production department

NTUU «Igor Sikorskii Kyiv Polytechnic Institute»

M.V. Matvienko

candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the department of welding

Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Y.A. Buturlia

graduate welding production departments

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

V.F. Kvasnytskyi

doctor of technical sciences, professor,
head of welding production department

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

G.V. Yermolayev

candidate of technical sciences, professor NUK,
head of the department of welding

Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract. *In this work, the simulation of the stress-strain state (SSS) was carried out using the finite-element method using the ANSYS software package in cylindrical nodes with a soft interlayer having a modulus of elasticity lower than that of the base metal. The influence of the relative thickness of the interlayer on the formation of SSS. It has been established that with simultaneous loading with compression and a decrease in temperature (during cooling), the level of equivalent stresses is higher in a material with a large temperature coefficient of linear expansion (TCLE), with an increase in temperature - with a smaller TCLE. In a small zone of the base metal, near the outer surface, at the junction with the interlayer and in the interlayer itself, a complex SSS arises with radial, axial, circumferential and tangential stresses. With an increase in the relative thickness of the interlayer, the equivalent*

stresses in it increase, which promotes the formation of a joint in diffusion welding with a soft interlayer.

Keywords: *welded and brazed joints, soft interlayer, computer modeling, stress-strain state, elastic stage, joint force and thermal loading.*

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 используют пластические прослойки, находящиеся в твердом состоянии, или при пайке прослойкой является паяный шов, которые по механическим свойствам уступают основному материалу и могут влиять на работоспособность соединений. 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 НДС с учетом всех конструкционных и технологических факторов в инжиниринге многих процессов [5, 6], в том числе сварочного производства [7; 8], в которых установлено влияние НДС как на формирование соединений, так и на работоспособность деталей конструкций. Учитывая то, что формирование НДС в узлах с прослойкой изучено мало, данная работа **является актуальной**.

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

Задачи работы:

- исследовать влияние относительной толщины прослойки на формирование НДС;
- 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 (см. рисунок 1). Узлы нагружались снижением температуры на 100 °С совместно со сжатием 40 МПа. Решалась упругая задача. Варианты исследованных моделей и свойства соединяемых материалов приведены в таблице 1.

Анализовались поля и эпюры 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.

Сравнение полей напряжений показало, что при изменении степени вытянутости прослойки в целом характер полей меняется мало. По мере уменьшения относительной толщины прослойки характер полей всех составляющих и эквивалентных напряжений в основном металле приближается к узлу без прослойки.

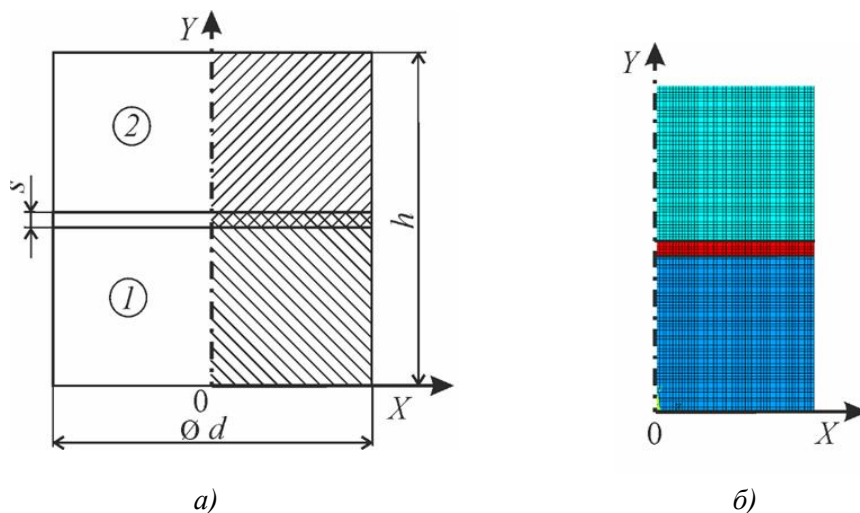


Рис. 1. Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов с прослойкой

Таблица 1

Варианты узлов с различной относительной толщиной
(степенью вытянутости) прослойки

Номер 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

Анализ эпюр распределения напряжений вдоль границы раздела в соединяемых материалах и прослойке показывает, что эпюры радиальных напряжений по стыку в соединяемых материалах и прослойке (см. рисунок 2) можно разделить на 2 участка.

На первом, внутреннем, участке напряжения остаются практически постоянными, на втором, прилегающем к внешней поверхности узла, они резко уменьшаются в соединяемых материалах и возрастают в материале прослойки. Протяженность первого участка увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки, а второго остается практически неизменной и равной около 10 толщин прослойки. Соответственно в вариантах 1 и 2 с большой относительной толщиной (0,1 и 0,05), первый участок отсутствует, а второй начинается уже на оси цилиндра. Аналогично распределены и окружные напряжения.

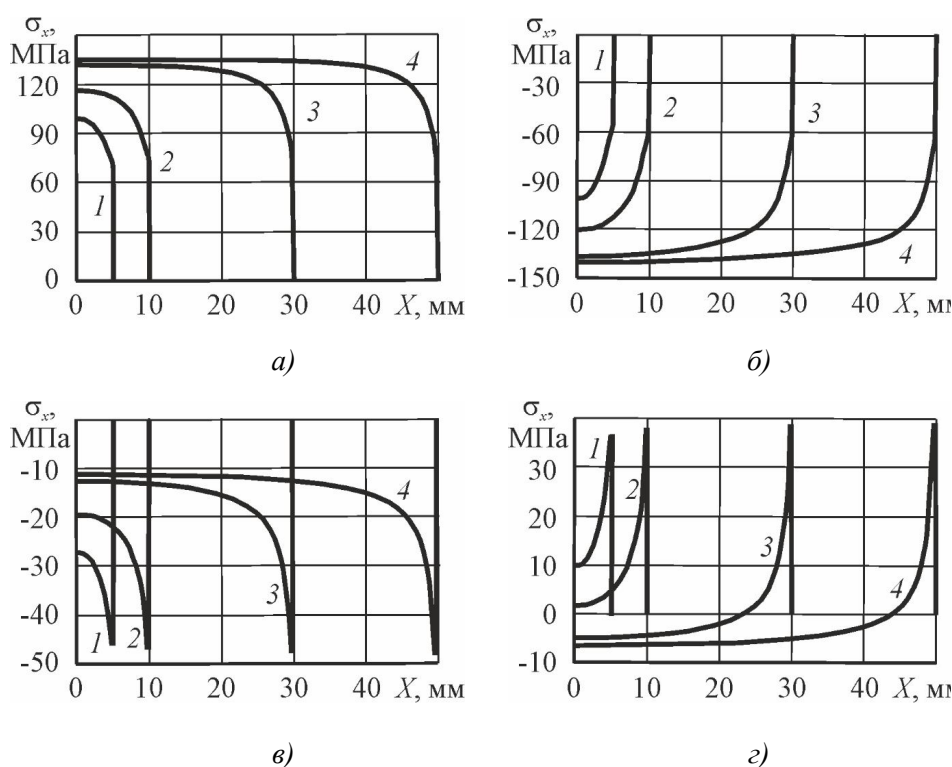


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений в материалах 1 (а), 2 (б) и «мягкой» прослойки по стыку с материалами 1 (в) и 2 (г), варианты 1, 2, 3 и 4

Уровень радиальных напряжений (см. рисунки 3, а, б) на большей части стыка в соединяемых материалах увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки. В средней части стыка они увеличи-

ваются 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 окружающие 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 (см. рисунок 4). В непосредственной близости от наружной поверхности они резко возрастают в материале 1 (до -200 МПа) и уменьшаются в материале 2, где они переходят в растягивающие (около 100 МПа).

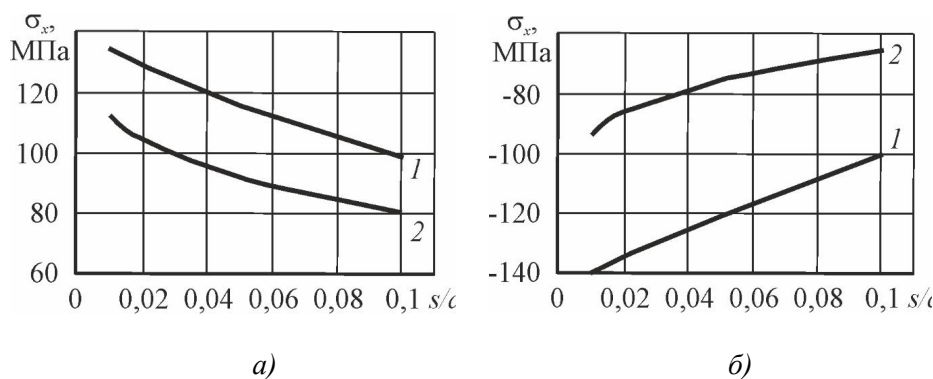


Рис. 3. Зависимость уровня радиальных напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в основном материале 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

Уровень осевых напряжений в средней части стыка, как в соединяемых материалах, так и в материале прослойки, мало зависит от ее толщины (см. рисунок 5, кривые 1). На периферии (вблизи поверхности узла) он заметно увеличивается с уменьшением относительной толщины прослойки (см. рисунок 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.

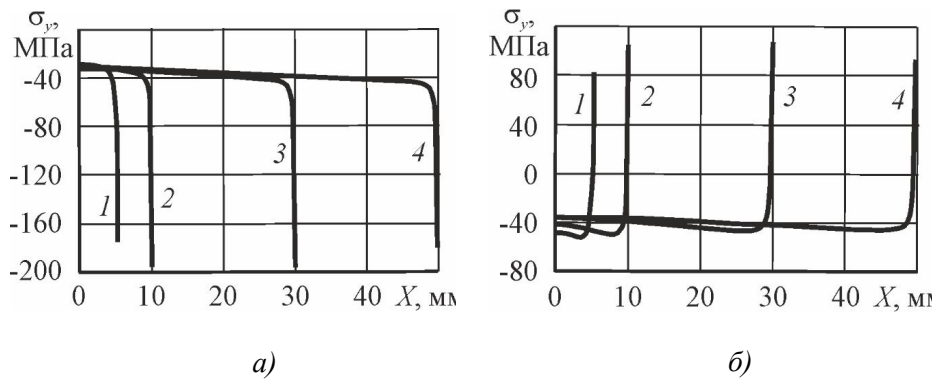


Рис. 4. Эпюры осевых напряжений по стыку прослойки и материалов 1 (а) и 2 (б), варианты 1, 2, 3 и 4

Характер распределения осевых напряжений вдоль оси узла (см. рисунок 6, а) и его боковой поверхности (см. рисунок 6, б) мало меняется с изменением 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 меньше и точки максимальных напряжений несколько удаляются от стыка.

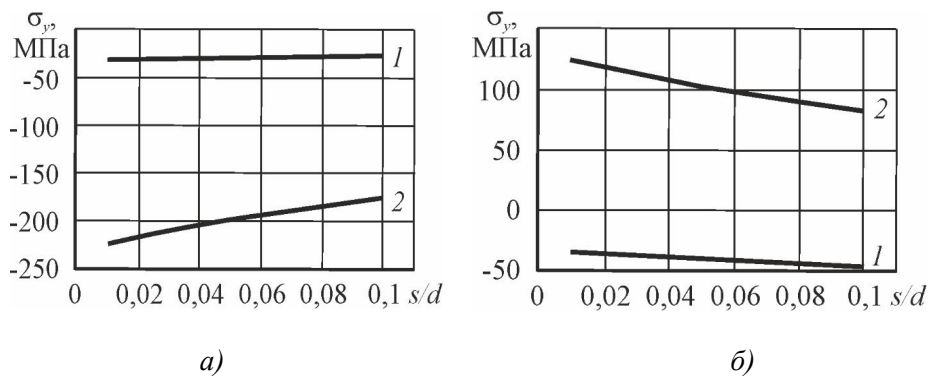


Рис. 5. Зависимость уровня осевых напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в материалах 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

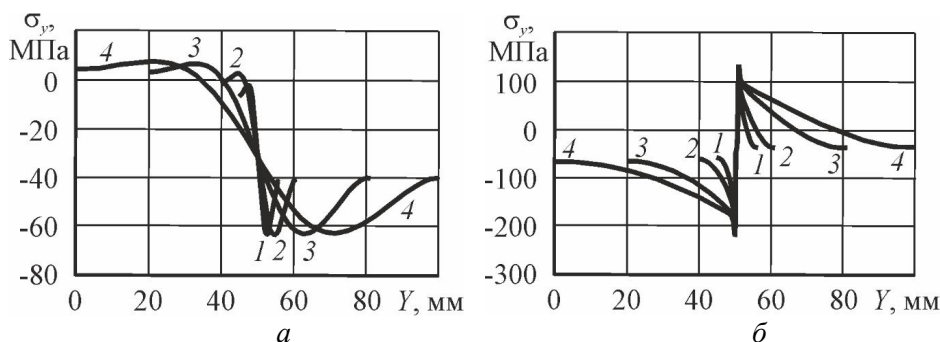


Рис. 6. Эпюры осевых напряжений по оси (а)
и внешней поверхности (б) узла, варианты 1, 2, 3 и 4

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 (см. рисунок 7). 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 они резко возрастают (см. рисунки 8, а, б).

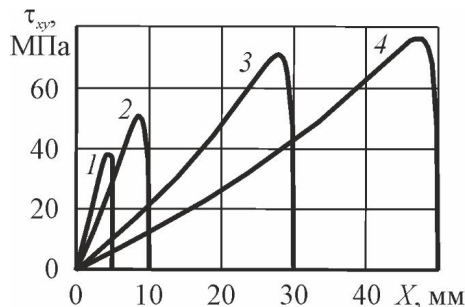


Рис. 7. Эпюры касательных напряжений по границам раздела прослойки
и материалов 1 и 2, варианты 1, 2, 3 и 4

Уровень максимальных напряжений в материале 1 с уменьшением относительной толщины прослойки растет от 252 до 333 МПа, удаляясь от максимума в узле без прослойки (251 МПа). В материале 2, напротив, он растет от 153 до 238 МПа, приближаясь к максимуму в узле без прослойки (см. рисунки 9, а, б).

В материале прослойки эквивалентные напряжения почти линейно увеличиваются от минимума на оси узла до максимума (около 140 МПа) на периферии (см. рисунки 8, в, г). При этом с уменьшением относительной толщины прослойки минимальные напряжения (на оси узла) на границе с материалом 1 растут от 0 до 20 МПа (см. рисунок 8, в), 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 (см. рисунки 8, в, г).

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 (см. рисунок 9). На большей части стыка он увеличивается в обоих соединяемых материалах, приближаясь к уровню напряжений в аналогичном узле без прослойки.

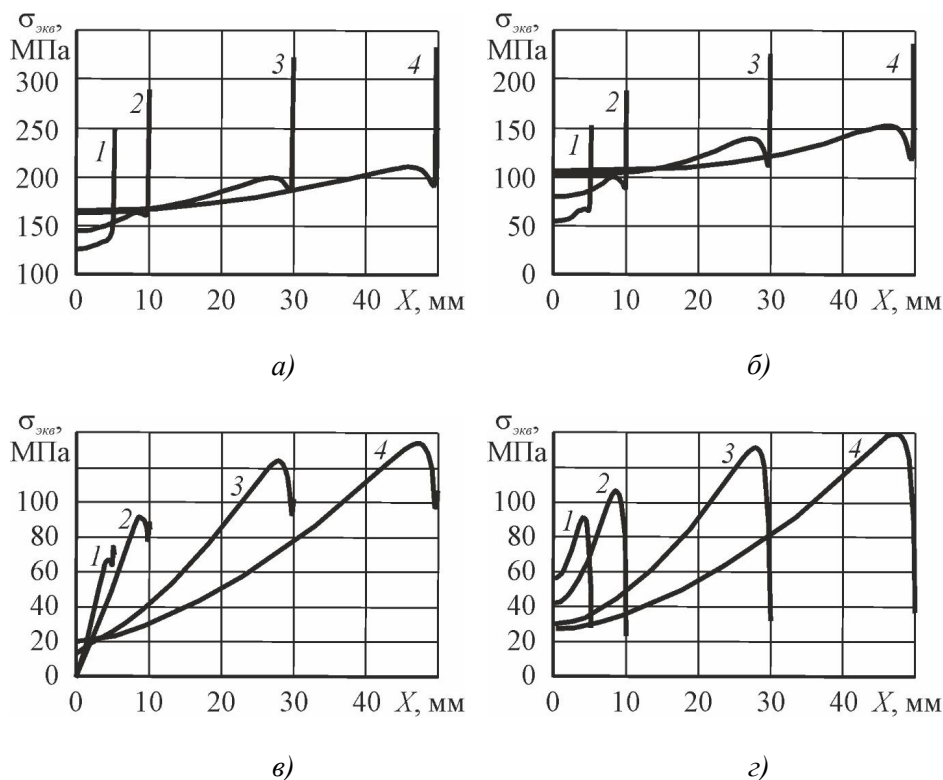


Рис. 8. Эпюры эквивалентных напряжений в материалах 1 (а), 2 (б) и «мягкой» прослойке по стыку с материалами 1 (в), 2 (г), варианты 1, 2, 3 и 4

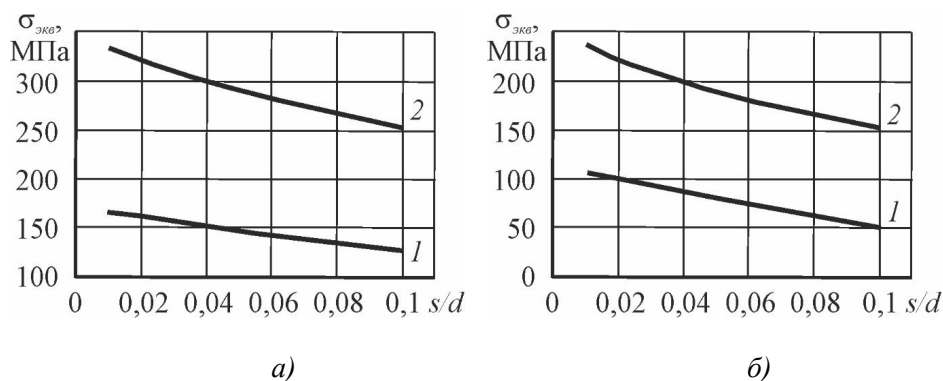


Рис. 9. Зависимость уровня эквивалентных напряжений в средней части (1) и на периферии (2) стыка в основном материале 1 (а) и 2 (б) от относительной толщины прослойки

То есть, 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 одном и другом материале, что подтверждает целесообразность применения термоциклирования при сварке [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 говорит о том, что применение мягких прослоек большой толщины способствует активации процессов образования соединения, что очень важно для получения соединений малопластичных и хрупких материалов, например, керамики, графита, с металлами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Спеціальні способи зварювання: Підручник / І.В. Кривцун, В.В. Квасницький, С.Ю. Максимов, Г.В. Єрмолаєв; за заг. ред. акад. НАН України, д.т. наук, професора 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; за заг. ред. В.Ф. Хорунова і В.Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с.
3. Бакиш О.А. О напряженном состоянии пластичной прослойки при осимметричной 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. Ermolaev G.V. 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 Materials. – May, 2017. – Vol. 49. – Issue 3. – P. 422-428.

9. Квасницкий В.В. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке / В.В. Квасницкий, В.Ф. Квасницкий, Dong Chunlin, М.В. Матвиенко, Г.В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2018. – № 4. – С. 7-13.
10. Патент на винахід 81583 Україна, МПК В23К 20/14. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.В. Єрмолаєв та ін. – Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Заявл. 21.11.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. 1.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2019

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор кафедри Фізика Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова **О.О. Мочалов**

доктор технічних наук, професор кафедри Механіки та конструкцій судна Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова **Л.І. Коростильов**