

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

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

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

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

Компьютерное моделирование методом конечных элементов использовали для исследования напряженно-деформированного состояния в соединениях однородных материалов при осевой нагрузке. Исследования выполнены с учетом пластических деформаций в мягких прослойках, которые обычно используют при диффузионной сварке для активации поверхностей и снижения остаточных напряжений, а при пайке промежуточной прослойкой является паяный шов, отличающийся от основного металла по физико-механическим свойствам. Показано, что вдоль стыка, как в соединяемых металлах, так и прослойке, эквивалентные напряжения распределены более равномерно, чем при упругом деформировании. Пластические деформации в прослойке отсутствуют в зоне застоя (на оси цилиндрического узла) и почти линейно увеличиваются, достигая максимальных значений (около 6,5 %) у внешней цилиндрической поверхности узла. Высокий уровень пластических деформаций свидетельствует о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке разнородных материалов с мягкими прослойками. Степень «мягкости» прослойки и ее влияние на напряженно-деформированное состояние узла при пластическом деформировании определяется главным образом ее прочностью (пределом текучести) и практически не зависит от ее жесткости (модуля упругости). Библиогр. 8, рис. 10.

Ключевые слова: сварные и паяные узлы, мягкая прослойка, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, термическое нагружение

В современной технике все более широкое применение находят пайка и диффузионная сварка, они позволяют получать узлы из разнородных материалов, которые нельзя соединить сваркой плавлением. Одной из проблем в таких узлах является их прочность при силовом и термическом нагружении.

Напряженное состояние и работа соединений с прослойками, в частности, с мягкой прослойкой, исследовались в работах [1, 2] аналитическими методами, которые не позволяют учесть все факторы влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС).

В данной работе использован программный комплекс ANSYS, основанный на методе конечных элементов (КЭ), который позволяет учесть конструктивные и технологические факторы, особенности материалов, виды нагружения и другие, а также установить основные закономерности образования НДС [3, 4].

В работе [5] установлено, что в соединениях с мягкой прослойкой при действии осевой нагрузки на образующей узла и непосредственно вблизи стыка формируется объемное напряженное состояние, при котором возможно разупрочнение более прочного и упрочнение менее прочного металла, что влияет на работоспособность соединения.

При охлаждении после сварки и при изменении температуры во время работы узла возможен такой же эффект. Учитывая, что формирование НДС в узлах с прослойкой изучено мало и имеет важное значение не только для формирования соединений, но и их работоспособности, данная работа является актуальной.

Целью настоящей работы было исследование НДС сварных и паяных узлов из разнородных материалов, в частности, разнородных сталей с мягкой прослойкой на основе меди при термическом нагружении изменением температуры с учетом пластического деформирования материала прослойки, которое определяли по условию пластичности Мизеса.

Исследование выполнялось на узлах цилиндр-цилиндр (Ц-Ц) из материалов одинаковой жесткости и прочности с прослойками меньшей прочности. Размеры узла: общая высота $2h = 40$ мм, диаметр $d = 20$ мм и толщина прослойки $s = 0,05$ мм (рис. 1).

Соединяемые материалы при этом имели отличающиеся температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), равные $20 \cdot 10^{-6}$ и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град в материалах 1 и 2, а материал прослойки 3 — среднее значение ТКЛР, равное $15 \cdot 10^{-6}$ 1/град (табл. 1).

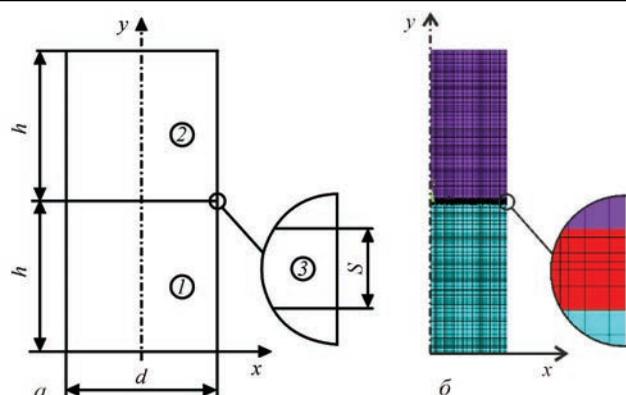


Рис. 1. Физическая (а) и КЭ (б) модели узлов типа Ц-Ц с прослойкой (1, 2 — соответственно материалы 1, 2; 3 — прослойка)

Как видно из табл. 1, в вариантах 1' и 2' соединяются материалы, имеющие одинаковые модули упругости и пределы текучести, но соединение выполняется через «мягкую» прослойку, имеющую меньший предел текучести, чем соединяемые материалы и меньший (вариант 1') или такой же (вариант 2') модуль упругости. Величины пределов текучести основных материалов и прослойки в этом варианте подбирались так, чтобы пластически деформировался только материал прослойки, а основной материал деформировался только упруго. Коэффициент упрочнения при пластическом деформировании материала прослойки принят равным $1 \cdot 10^3$ МПа для варианта 1' и $2 \cdot 10^3$ МПа для варианта 2'. Сравнение вариантов позволяет выделить влияние именно пластической составляющей деформаций на НДС узла.

Нагружение выполнялось снижением температуры узла на 100 град после образования соединения, при котором НДС создается за счет разных ТКЛР соединяемых материалов. При смене охлаждения нагревом на 100 град уровень напряжений и деформаций не изменяется, а знаки меняются на обратные.

Результаты сравнивались с подобными узлами (прослойки с малой и средней жесткостью) при упругом деформировании (варианты 1, 2), рассмотренными в работе [6].

Анализ полей и эпюр всех составляющих напряжений в узлах и их сравнение с результатами моделирования НДС аналогичных узлов с про-

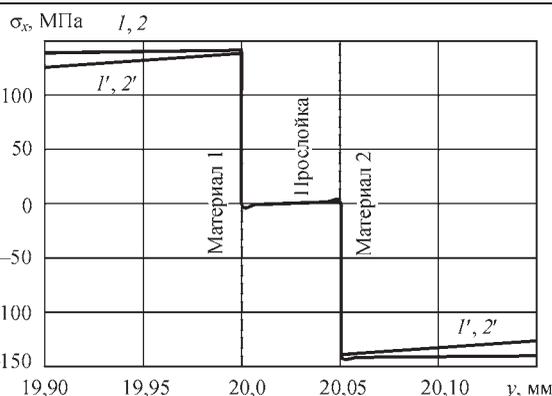


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений по оси цилиндра вблизи стыка (варианты 1, 2, 1' и 2')

слойкой при работе в упругой стадии (варианты 1 и 2) показали, что НДС в соединяемых материалах вблизи стыка и в прослойке имеет сложный объемный характер, с неравномерным распределением по сечению узла как в упругом, так и пластическом вариантах, но уровень напряжений на большей части стыка за счет пластических деформаций снижается.

Характер распределения радиальных σ_x и окружных σ_z напряжений в узле при наличии пластических деформаций в целом сохраняется, но изменяется их величина. Максимальных значений в соединяемых материалах они достигают вблизи плоскости стыка (на границах раздела с прослойкой) в средней его части, но более резко, чем при чисто упругом деформировании, уменьшаются по мере удаления от стыка (рис. 2). Вдоль стыка в основном металле (рис. 3, а, б) радиальные напряжения при наличии пластических деформаций в прослойке распределены более неравномерно, быстро уменьшаясь от максимума на оси узла до минимума вблизи кромки и снова резко возрастают на самой кромке.

Вдоль стыков внутри прослойки характер распределения радиальных напряжений более равномерный, на большей части стыка они небольшие (не превышают 5 МПа) и заметно возрастают (до 90 МПа) вблизи внешней цилиндрической поверхности узла (рис. 3, в, г). При этом характер и уровень напряжений в материалах 1, 2 и прослойки на стыках с ними отличаются только знаком.

Таблица 1. Варианты сочетаний свойств материалов (модулей упругости E , пределов текучести σ_T и ТКЛР α в узлах)

Номер варианта	Материал 1			Материал 2			Прослойка		
	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$	E , 10^5 МПа	σ_T , МПа	α , $10^{-6} \cdot 1/\text{град}$
1	2,0	-	20,0	2,0	-	10,0	1,0	-	15,0
2	2,0	-	20,0	2,0	-	10,0	2,0	-	15,0
1'	2,0	200,0	20,0	2,0	200,0	10,0	1,0	38,0	15,0
2'	2,0	200,0	20,0	2,0	200,0	10,0	2,0	38,0	15,0

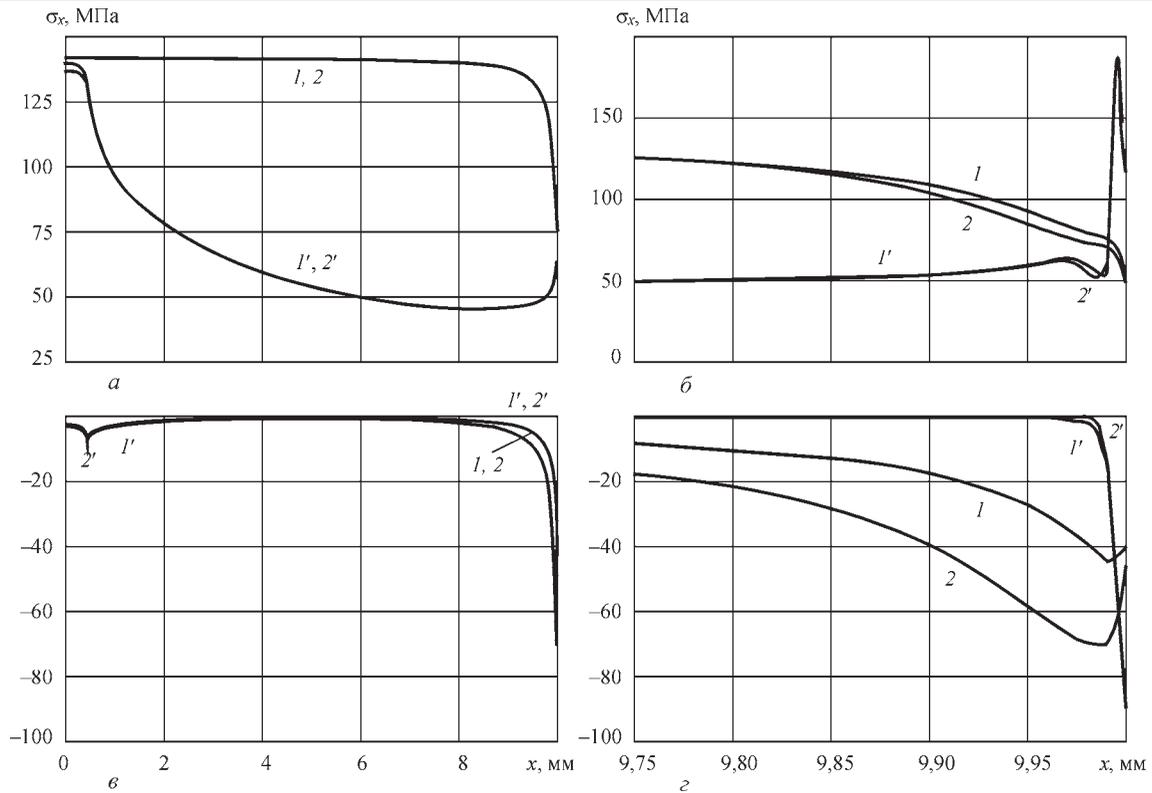


Рис. 3. Эпюры радиальных напряжений σ_x в металле 1 ($a, б$) и прослойке ($в, г$) по всему стыку ($a, в$) и вблизи наружной кромки ($б, г$) узлов (варианты $1, 2, 1'$ и $2'$)

Максимальные осевые напряжения σ_y , также, как и в упругой стадии работы, сосредоточены

вблизи стыка в непосредственной близости от внешней поверхности цилиндра и убывают по мере удаления от них (рис. 4, 5). При этом характер и уровень напряжений в материалах 1 и 2 также отличаются только знаком. На большей части стыка и боковой поверхности осевые напряжения заметно ниже, чем в упругой стадии работы.

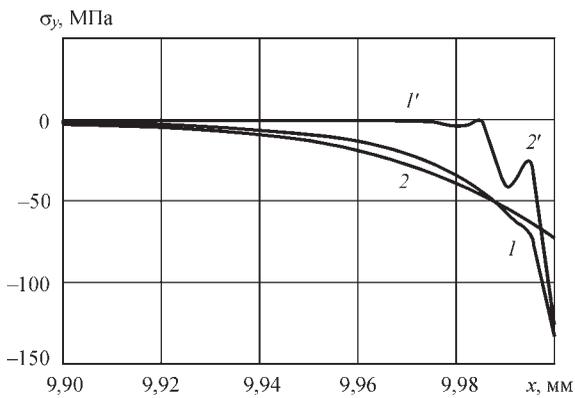


Рис. 4. Эпюры осевых σ_y напряжений по стыку основного металла 1 и прослойки вблизи наружной кромки (варианты $1, 2, 1', 2'$)

Касательные напряжения сосредоточены вблизи прослойки, при этом наибольшую величину они имеют на границах раздела прослойки и основных материалов. Они незначительно возрастают на большей части длины стыка, в меньшей степени, чем в упругой стадии деформирования, достигая максимума у самой кромки стыка (рис. 6). Максимальные касательные напряжения при наличии мягкой прослойки (с малым пределом текучести) в обоих

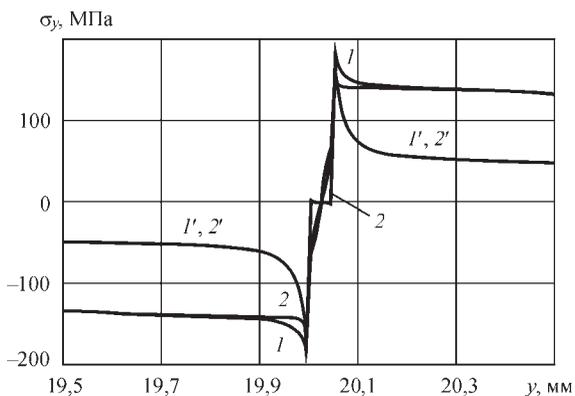


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений по образующей цилиндра вблизи прослойки (варианты $1, 2, 1'$ и $2'$)

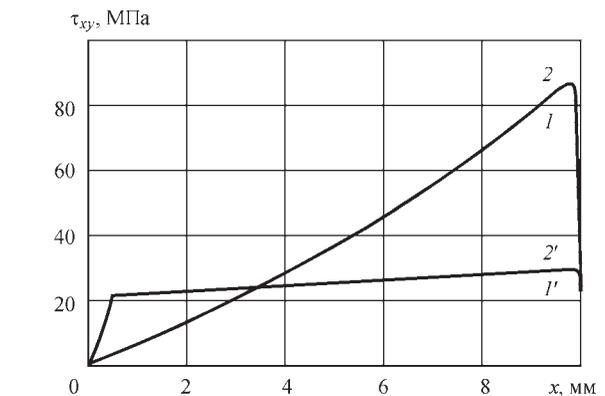


Рис. 6. Эпюры касательных τ_{xy} напряжений по стыку основного металла и прослойки (варианты $1, 2, 1', 2'$)

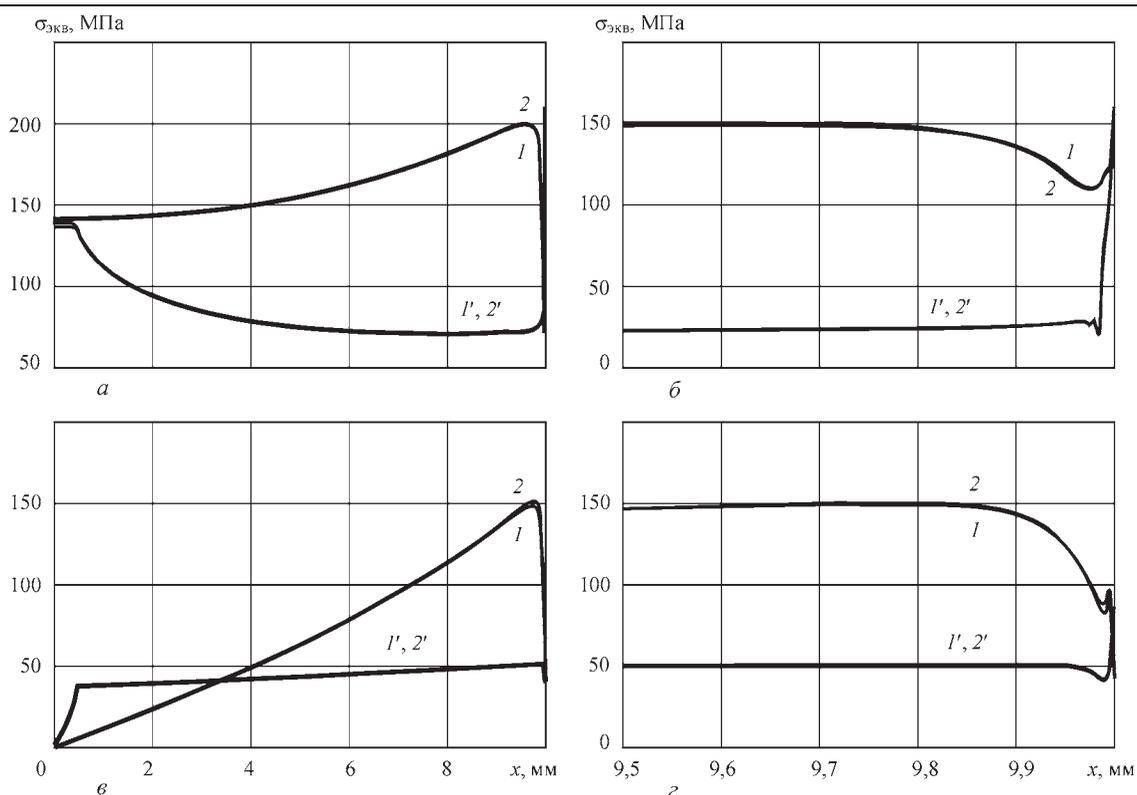


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в основном металле (а, б) и в прослойке (в, з) по всему стыку (а, в) и вблизи его наружной кромки (б, з) (варианты 1, 2, 1' и 2')

материалах и узлах снижаются одинаково, вне зависимости от жесткости прослойки. На границах раздела обоих материалов и прослойки зависимость отличается только знаком напряжений.

Максимальные эквивалентные напряжения, как и все составляющие, сосредоточены вблизи стыков, т. е. границ разделов материалов 1, 2 и прослойки. При этом в соединяемых материалах, в отличие от упругой стадии, они уменьшаются по мере удаления от оси узла до двух раз и только у самой кромки стыка резко возрастают до 200 МПа (рис. 7, а, б).

В прослойке эквивалентные напряжения значительно ниже, чем в упругой стадии работы, несколько превышают предел текучести материала прослойки за счет упрочнения при пластическом

деформировании и распределены практически равномерно вдоль всего стыка (рис. 7, в, з).

Пластические деформации в прослойке вдоль стыка распределены неравномерно, практически одинаково в вариантах 1' и 2' с прослойкой разной жесткости (рис. 8). Они отсутствуют в «зоне застоя» [7] на оси цилиндрического узла и постепенно увеличиваются по мере приближения к образующей поверхности цилиндра, достигая максимальных значений (6,5 %). Высокий уровень пластических деформаций свидетельствуют о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке с мягкими прослойками.

Наиболее полное и наглядное представление об изменении уровня максимальных значений всех составляющих напряжений в материалах узлов при наличии мягкой прослойки с учетом пластических деформаций в ней (вар. 1' и 2') и сравнение с упругой стадией работы (вар. 1 и 2) узлов с прослойкой малой (вар. 1 и 1') и нормальной (вар. 2 и 2') жесткости дают диаграммы на рис. 9 и 10.

Максимальные радиальные напряжения при наличии мягкой прослойки (вар. 1' и 2') увеличиваются в обоих соединяемых материалах, при этом несколько больше в варианте 2', т. е. в узлах с прослойкой, у которой «мягкость» определяется только меньшим пределом текучести при одинаковом с основным металлом модулем упругости (рис. 9).

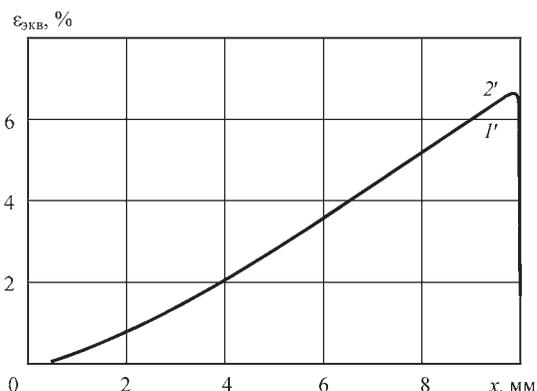


Рис. 8. Эпюры пластических деформаций в прослойке на стыках с соединяемыми материалами (варианты 1' и 2')

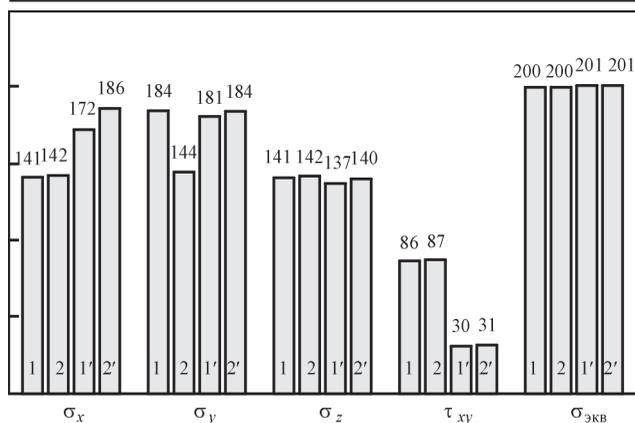


Рис. 9. Максимальные (по модулю) напряжения (МПа) в материалах 1 и 2 узлов Ц-Ц (варианты 1, 2, 1' и 2')

Максимальные осевые напряжения при наличии «мягкой» прослойки (вар. 1' и 2'), в отличие от узлов с прослойкой малой жесткости в упругой стадии (вар. 2), остаются практически такими же, как и в узлах с прослойкой нормальной жесткости в упругой стадии нагружения (вар. 1'), т. е. в данном случае эффекты от снижения жесткости и прочности материала прослойки отличаются [8].

Максимальные окружные напряжения в обоих вариантах мягкой прослойки остаются практически такими же, как и в упругой стадии нагружения, т. е. возникающие в прослойке пластические деформации мало влияют на их величину.

Наиболее заметно (более, чем в 2 раза) снижаются максимальные касательные напряжения при наличии мягкой прослойки (вар. 1' и 2'), при этом в одинаковой степени в обоих вариантах узлов.

Несмотря на изменение максимальных значений отдельных составляющих напряжений, максимальные эквивалентные напряжения в основном металле остаются практически на том же уровне, что и при нагружении узла в упругой стадии.

В прослойке картина иная (рис. 10). Пластические деформации заметно изменяют как отдельные составляющие, так и эквивалентные напряжения, но при этом изменение модуля упругости (жесткости) прослойки практически не влияет на уровень максимальных напряжений.

Радиальные напряжения при наличии пластических деформаций увеличиваются до двух раз по сравнению с упругим деформированием узлов с прослойкой малой жесткости (вар. 1) и на 30 % по сравнению с узлами с прослойкой нормальной жесткости (вар. 2).

Осевые напряжения, напротив, при пластическом деформировании прослойки заметно возрастают только по сравнению с вариантом упругого деформирования прослойки нормальной жесткости (вар. 2) и незначительно по сравнению с прослойкой малой жесткости (вар. 1). При этом

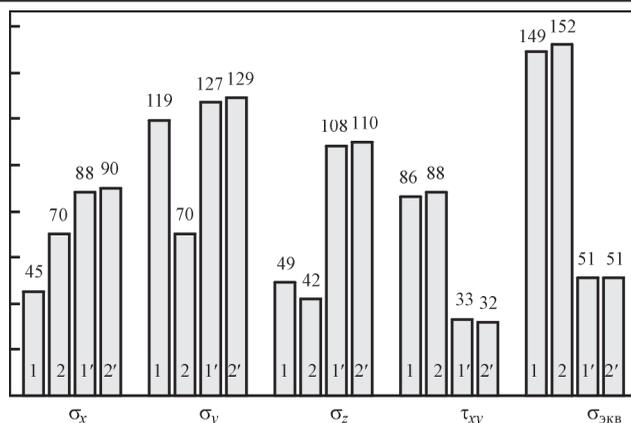


Рис. 10. Максимальные (по модулю) напряжения (МПа) в прослойке узлов Ц-Ц (варианты 1, 2, 1' и 2')

уровень этих напряжений при пластическом деформировании практически не зависит от жесткости прослойки (вар. 1' и 2').

Окружные напряжения в мягкой (малой прочности) прослойке заметно возрастают по сравнению с упругой стадией нагружения (более, чем в 2 раза), практически одинаково вне зависимости от жесткости (модуля упругости) прослойки.

Касательные напряжения в пластически деформирующейся мягкой прослойке (вар. 1' и 2'), напротив, значительно (более, чем в 2 раза), ниже, чем в упругой стадии работы как при нормальной (вар. 2'), так и малой (вар. 1') ее жесткости.

В результате пластического деформирования материала прослойки существенно (до трех раз) снижаются и эквивалентные напряжения в ней, при этом их уровень также не зависит от модуля упругости прослойки.

Выводы

1. При термическом нагружении в условиях мгновенной пластичности в узлах с «мягкой» прослойкой, имеющей меньший предел текучести, чем основной металл, аналогично узлам с прослойкой с меньшим модулем упругости в упругой задаче, НДС в узлах вблизи стыков имеет сложный объемный характер, с неравномерным распределением по сечению узла как в упругом, так и пластическом вариантах.

2. В рассматриваемых вариантах, при смене охлаждения на нагрев, все составляющие напряжений в соединяемых материалах меняют только знак, а эквивалентные напряжения полностью одинаковы. При этом их уровень на большей части узла как в соединяемых материалах, так и в прослойке, за счет пластических деформаций снижается и практически не зависит от модуля упругости.

3. Компьютерное моделирование НДС показало, что основные закономерности, установ-

ленные для упругой стадии деформирования, сохраняются.

4. Пластические деформации в прослойке вдоль стыка распределены неравномерно и не зависят от ее модуля упругости. На оси узла они образуют зону застоя и увеличиваются по мере удаления от нее, достигая максимальных значений (около 6,5 %) у внешней цилиндрической поверхности узла, что свидетельствует о целесообразности использования термического нагружения при диффузионной сварке с мягкими прослойками, т. е. диффузионной сварке с термоциклированием.

5. Степень «мягкости» прослойки и ее влияние на НДС узла при пластическом деформировании определяется главным образом ее пределом текучести и практически не зависит от ее модуля упругости, что необходимо учитывать при выборе материала прослойки или припоя.

Список литературы

1. Бакши О.А., Качанов Л.М. (1965) О напряженном состоянии пластичной прослойки при осимметричной деформации. *Изв. АН СССР. Механика*, **2**, 134–137.
2. Бакши О.А., Шрон Р.З. (1971) О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой. *Сварочное производство*, **3**, 3–5.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. (2004) *ANSYS для инженеров. Справ. пособие*. Москва, Машиностроение-1.
4. Басов К.А. (2005) *ANSYS. Справочник пользователя*. Москва, ДМК Пресс.
5. Квасницкий В.В., Квасницкий В.Ф., Chunlin Dong и др. (2018) Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке. *Автоматическая сварка*, **4**, 7–13.

6. Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. (2017) *Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости*. Николаев, НУК.
7. Махненко В.И., Квасницкий В.В. (2009) Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*, **8**, 11–16.
8. Ermolaev G.V., Martynenko V.A., Olekseenko S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**, **3**, 422–428.

References

1. Bakshi, O.A., Kachanov, L.M. (1965) On stressed state of plastic interlayer under axisymmetric deformation. *Izv. AN SSSR, Mekhanika*, **2**, 134–137 [in Russian].
2. Bakshi, O.A., Shron, R.Z. (1971) On calculated evaluation of strength of welded joints with soft interlayer. *Svaroch. Proizvodstvo*, **3**, 3–5 [in Russian].
3. Chigarev, A.V., Kravchuk, A.S., Smalyuk, A.F. (2004) *ANSYS for engineers: Reference book*. Moscow, Mashinostroenie-1 [in Russian].
4. Basov, K.A. (2005) *ANSYS: User directory*. Moscow, DMK Press [in Russian].
5. 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.
6. Kvasnytskyi, V.V., Yermolayev, H.V., Matviienko, M.V. (2017) *Mechanics of bonds in diffusion welding, soldering and spraying of dissimilar materials under elasticity conditions*. In: Monography. Nikolaev, NUK [in Russian].
7. Makhnenko, V.I., Kvasnitsky, V.V. (2009) Peculiarities of formation of stress-strain state in diffusion bonds between dissimilar materials. *The Paton Welding J.*, **8**, 7–11.
8. Ermolaev, G.V., Martynenko, V.A., Olekseenko, S.V. et al. (2017) Effect of the rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under thermal loading. *Strength of Materials*, **49**(**3**), 422–428.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗВАРНИХ ТА ПАЯНИХ ВУЗЛІВ З РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З М'ЯКИМ ПРОШАРКОМ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

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

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

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

Комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів використовували для дослідження напружено-деформованого стану в з'єднаннях однорідних матеріалів при осьовому навантаженні. Дослідження виконані з урахуванням пластичних деформацій в м'яких прошарках, які зазвичай використовують при дифузійному зварюванні для активації поверхонь і зменшення залишкових напружень, а при паянні проміжним прошарком є паяний шов, що відрізняється від основного металу за фізико-механічними властивостями. Показано, що уздовж стику як в металах, що з'єднуються, так і в прошарку, еквівалентні напруження розподілені більш рівномірно, ніж при пружному деформуванні. Пластичні деформації в прошарку відсутні в зоні застою (на осі циліндричного вузла) і майже лінійно збільшуються, досягаючи максимальних значень (близько 6,5 %) біля зовнішньої циліндричної поверхні вузла. Високий рівень пластичних деформацій свідчить про доцільність використання термічного навантаження при дифузійному зварюванні різнорідних матеріалів з м'якими прошарками. Ступінь «м'якості» прошарку і його вплив на напружено-деформований стан вузла при пластичному деформуванні визначається головним чином і його міцністю (межею плинності) і практично не залежить від його жорсткості (модуля пружності). Бібліогр. 8, рис. 10.

Ключові слова: зварні та паяні вузли, м'який прошарок, комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан, термічне навантаження

