

УДК 621.791  
И 85**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СЖАТИЕМ**И. А. Колесар, магистр<sup>1</sup>;  
В. В. Квасницкий, д-р техн. наук<sup>2</sup>;  
Г. В. Ермолаев, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
В. А. Мартыненко, канд. техн. наук<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения, г. Николаев<sup>2</sup>Национальный технический университет «КПИ», г. Киев

**Аннотация.** Методом компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние при силовом нагружении сварных и паяных узлов из разнородных материалов в упругой и пластической стадиях. Установлено влияние жесткости и прочности материала промежуточных прослоек на пластические деформации в зоне стыка и напряженно-деформированное состояние узлов в целом.

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, мягкие и жесткие прослойки, напряженно-деформированное состояние, нагружение сжатием.

**Анотація.** Методом комп'ютерного моделювання досліджено напружено-деформований стан при силовому навантаженні зварних та паяних вузлів з різнорідних матеріалів у пружній та пластичній стадіях. Установлено вплив жорсткості і міцності матеріалу проміжних прошарків на пластичні деформації в зоні стику і напружено-деформований стан вузлів у цілому.

**Ключові слова:** дифузійне зварювання, паяння, різнорідні матеріали, м'які та жорсткі прошарки, напружено-деформований стан, навантаження стиском.

**Abstract.** The stress-strain state under the force loading of welded and brazed assemblies from heterogeneous materials at the elastic and plastic stages has been studied by the computer simulation method. The stiffness influence and material strength of intermediate layers in the plastic deformation at the interface and the stress-strain state of assemblies in general are set.

**Keywords:** diffusion welding, brazing, heterogeneous materials, soft and hard interlayer, the stress-strain state, the loading by compression.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Диффузионная сварка (ДС) и пайка являются основными способами соединения многих материалов, которые не подлежат сварке плавлением в связи с потерей структуры и свойств, в частности металлов с неметаллами.

Одной из важных проблем получения соединения разнородных материалов диффузионной сваркой является пластическая деформация и активация поверхности более прочного материала. Для решения существующих проблем применяют ДС с промежуточными прокладками. В случае применения пайки промежуточной прокладкой является припой, который, как правило, имеет физико-механические свойства (ФМС), отличные от основного материала. При наличии промежуточных прослоек возникает еще одна проблема – несущая способность такого узла [1–4, 6, 11].

Металл мягких прослоек имеет пониженные характеристики жесткости или прочности в сравнении с основным металлом, а металл твердых прослоек – повышенные прочностные характеристики, но, как правило, более низкие вязко-пластические показатели [1]. При определенных условиях мягкие и твер-

дые (жесткие) прослойки могут по-разному влиять на работоспособность соединений [11]. Задаче о напряженном состоянии, прочности и деформационной способности мягкой прослойки посвящено достаточно большое количество работ [1–4, 6, 9, 11]. Однако в этих работах не рассматривались процессы пластического деформирования металла прослоек и основного металла в зоне стыка.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И ПУБЛИКАЦИЙ**

В последние годы появился ряд публикаций, посвященных проблеме работоспособности сварных соединений с мягкой прослойкой, в которых были рассмотрены принципы рационального проектирования, обеспечивающего равнопрочность соединения и эффект контактного упрочнения [10, 12]. Однако не было рассмотрено поведение мягкой прослойки при диффузионном соединении и нагружении.

Проведенный анализ [5, 7–9] показал, что существует ряд закономерностей формирования НД состояния в узлах из разнородных материалов. Исследования НД состояния проводились в основном при соединении разнородных материалов с одинаковыми

или близкими жесткостями (модулями упругости), но без учета прочности (предела текучести). Были рассмотрены конкретные материалы прослоек (медь, титан, молибден, никель) [8], однако это не позволяет установить общие закономерности влияния конкретных факторов в процессе сварки.

Поэтому исследование влияния соотношений жесткости и прочности соединяемых материалов и прослойки на НДС состояния узлов при нагружении осевой нагрузкой и установление общих закономерностей являются *актуальными*.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – установить закономерности влияния физико-механических свойств (жесткости и прочности) промежуточных прослоек в зависимости от свойств соединяемых материалов на формирование НДС состояния сварных и паяных соединений в упругой и пластической стадиях деформирования.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

Исследования НДС состояния выполнялись при нагружении сжатием (усилием 40 МПа) с использованием конечно-элементного (КЭ) программного комплекса ANSYS на цилиндрических узлах втул-

ка-втулка (В-В) и цилиндр-цилиндр (Ц-Ц) [8]. Исследовались узлы одинаковой жесткости (прочности) при наличии промежуточных прослоек. Общий вид физических и КЭ моделей узлов с прослойками показан на рис. 1.

Исследовано два варианта прослоек: мягкая прослойка, имеющая по сравнению с соединяемыми материалами меньший модуль упругости (упругая задача) или меньший предел текучести (пластическая задача); жесткая (твердая) прослойка, имеющая больший модуль упругости или предел текучести (табл. 1).

Таблица 1. Варианты сочетаний соединяемых материалов в узле

Номер варианта	Материалы 1 и 2		Прослойка	
	$E, 10^5$ МПа	$\sigma_p$ МПа	$E, 10^5$ МПа	$\sigma_p$ МПа
$1_y^p$	2	–	1	–
$2_y^p$	2	–	3	–
$1_n^p$	2	200	2	38
$2_n^p$	2	40	2	200

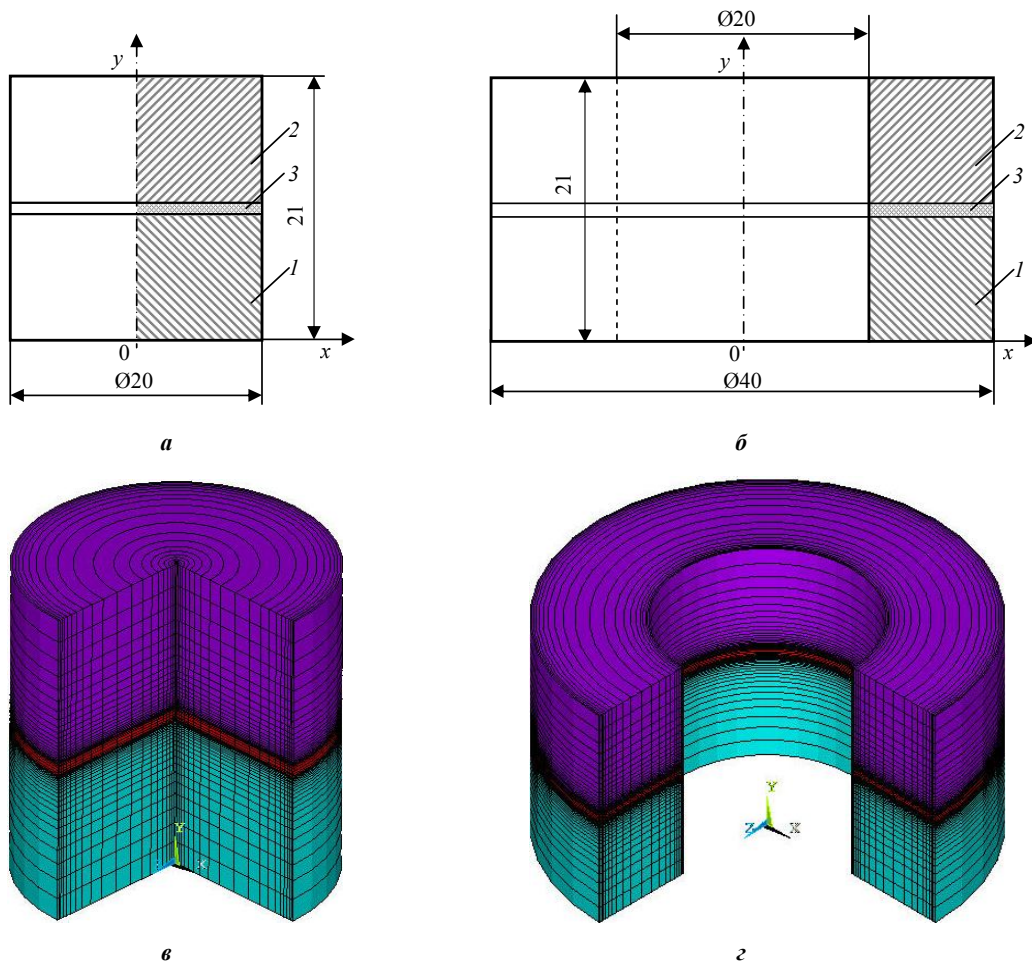


Рис. 1. Физические (а, б) и КЭ (в, з) модели узлов типа Ц-Ц (а, в) и В-В (б, з) с прослойками: 1 – материал 1; 2 – материал 2; 3 – материал прослойки

Анализ полей и эпюр напряжений в узлах соединения через мягкую (с малым модулем упругости) и жесткую (с большим модулем упругости, чем соединяемые материалы) прослойку и их сравнение с результатами моделирования НДС состояния узлов без прослоек показали, что характер НДС состояния в соединяемых материалах изменяется, становится сложным, объемным, неравномерно распределенным по сечению узла, особенно в непосредственной близости от прослойки.

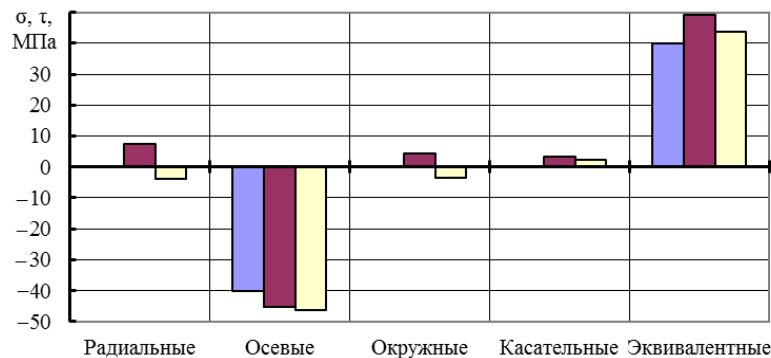
Радиальные напряжения при наличии прослойки возникают в обоих соединяемых материалах и прослойке. При соединении с мягкой прослойкой в основном материале они растягивающие, а в прослойке – сжимающие.

Окружные напряжения аналогичны, только их уровень в основном материале (по модулю) ниже, чем в материале прослойки. При жесткой прослойке в основном материале они сжимающие, а в прослойке – растягивающие. Осевые напряжения при наличии прослоек возрастают почти одинаково в обоих соединяемых материалах (около 15%), а в материале прослойки – на 1,5% при мягкой прослойке и на 20% при жесткой от уровня основного материала.

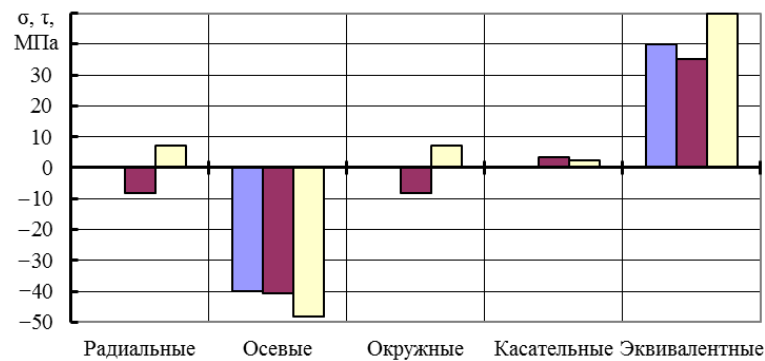
Касательные напряжения при силовом нагружении и наличии прослоек малой и большой жесткости составляют 3,40 и 2,25 МПа соответственно (рис. 2).

Установлено, что при силовом нагружении сжатием (по традиционной технологии) в упругой стадии работы узлов с мягкой прослойкой (имеющей малую жесткость) по сравнению с такими же узлами без прослойки в зоне стыка эквивалентные напряжения в соединяемых материалах возрастают (на 22%), распределение их вдоль стыка остается близким к равномерному, за исключением небольших участков на периферии стыка. Это благоприятно влияет на локализацию деформаций, образование физического контакта и активацию процессов формирования соединения в зоне стыка. При этом в материале прослойки уровень эквивалентных напряжений снижается (до 12%) (см. рис. 2 и 3).

При силовом нагружении в упругой стадии узлов с жесткой прослойкой (имеющей большую жесткость) по сравнению с узлами без прослойки в зоне стыка эквивалентные напряжения в соединяемых материалах снижаются (на 11%) по сравнению с такими же узлами с мягкой прослойкой, что неблагоприятно с точки зрения формирования соединения в зоне стыка (см. рис. 2 и 3). При этом в материале прослойки уровень эквивалентных напряжений, наоборот, повышается (до 25%), проявляется эффект разупрочнения жесткой прослойки, что может компенсировать уменьшение деформаций в основных материалах.



а



б

Рис. 2. Сравнение максимальных напряжений в соединяемых материалах (а) и в материале прослойки (б) в узлах с различными прослойками: ■ – без прослойки; ■ – с мягкой (вар. 1<sup>р</sup>); ■ – с жесткой (вар. 2<sup>р</sup>)

Сравнение уровней максимальных значений всех составляющих напряжений в обоих узлах (Ц–Ц и В–В) при наличии прослоек показало, что характер влияния промежуточных прослоек в обоих типах узлов практически одинаковый.

Таким образом, при нагружении сжатием узла с мягкой прослойкой, имеющей меньший модуль упругости, чем основной металл, в более жестком основном материале эквивалентные напряжения увеличиваются, а в менее жестком материале прослойки уменьшаются. Происходит механическое разупрочнение основного материала и упрочнение прослойки, что в данном случае выражается в следующем: более жесткий материал догружается, а менее жесткий материал прослойки разгружается. Это должно способствовать развитию пластических деформаций в зоне стыка именно основного материала, имеющего большую жесткость. Влияние жесткой прослойки заключается в том, что догружается как более жесткий материал прослойки, так и менее жесткий основной материал, что должно способствовать развитию в нем пластических деформаций при меньшей величине нагружения, то есть эффект так называемого разупрочнения проявляется как в материале прослойки, так и в соединяемых материалах.

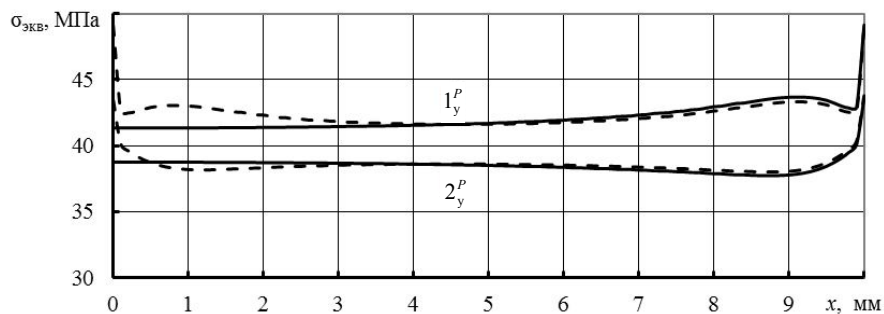
Анализ результатов решения пластической задачи показал, что при силовом нагружении в пластической стадии узлов с мягкой прослойкой (имеющей меньшую прочность, чем основной материал) по сравнению с на-

гружением в упругой стадии узлов с мягкой прослойкой (имеющей меньшую жесткость) радиальные напряжения также возникают в обоих соединяемых материалах и прослойке. При этом их максимальная величина в основном материале в пластической задаче в 4 раза меньше, чем в упругой (рис. 4).

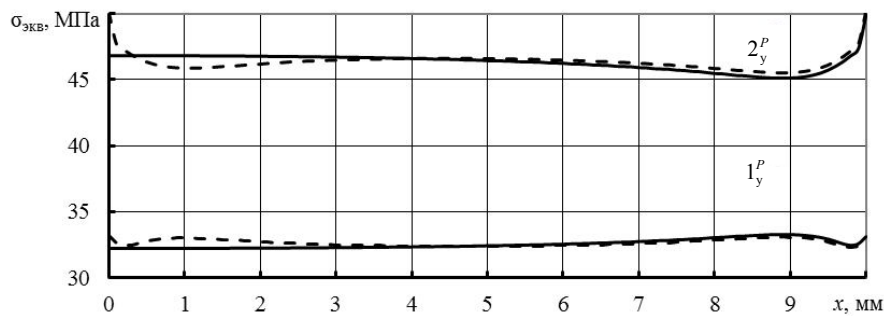
В прослойке радиальные напряжения по модулю практически такие же, как и в основном металле. Окружные напряжения примерно аналогичны, только их уровень в основном материале несколько ниже. Осевые напряжения незначительно снижаются одинаково в обоих соединяемых материалах (около 10 %), а в материале прослойки практически не изменяются, оставаясь на уровне около 40 МПа. Касательные напряжения очень малы и составляют менее 1 МПа, что в 4 раза меньше, чем в упругой задаче (см. рис. 4).

В зоне стыка эквивалентные напряжения в соединяемых материалах повышаются значительно меньше (всего до 41 МПа). В материале прослойки при этом эквивалентные напряжения находятся на уровне предела текучести (38 МПа), оставаясь ниже приложенного нагружения сжатием (40 МПа). Распределение пластических деформаций в прослойке вдоль стыка близко к равномерному. На большей части стыка они равны 0,0018...0,0020 %, повышаясь на краях до 0,0028 % (рис. 5, а, б и 6).

Таким образом, при ДС нагружение давлением мягкой прослойки, имеющей меньший предел



а



б

Рис. 3. Эпюры эквивалентных напряжений в узлах с мягкой ( $1_y^p$ ) и жесткой ( $2_y^p$ ) прослойками в соединяемых материалах (а) и прослойке (б) в узлах Ц–Ц (сплошные) и В–В (пунктирные)

текучести, чем основные материалы, обеспечивает локализацию пластических деформаций в прослойке и ее физическое упрочнение (наклеп). Одновременно проявляется и другой эффект – снижение эквивалентных напряжений, то есть механическое упрочнение.

При силовом нагружении в пластической стадии узлов с твердой прослойкой, имеющей большую прочность, чем соединяемые материалы, по сравнению с узлами без прослойки и при работе в упругой стадии узлов с жесткими прослойками качественная картина в целом сохраняется (рис. 7). Наличие

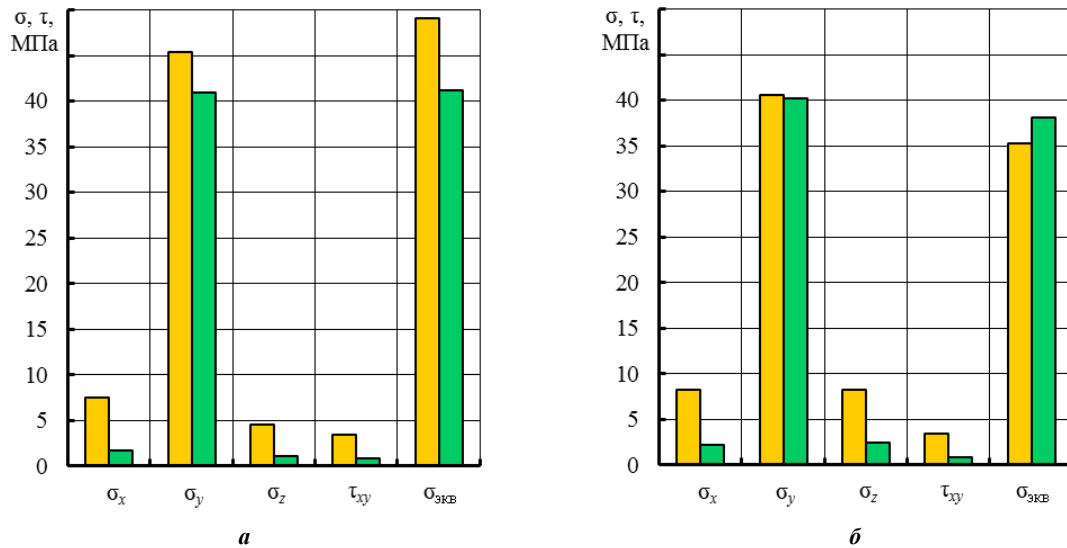


Рис. 4. Сравнение максимальных (по модулю) напряжений при упругом нагружении (■ – вар.  $1_y^p$ ) и с учетом пластических деформаций (■ – вар.  $1_n^p$ ) в материалах 1, 2 (а) и прослойке (б) в узлах Ц–Ц и В–В с мягкой прослойкой

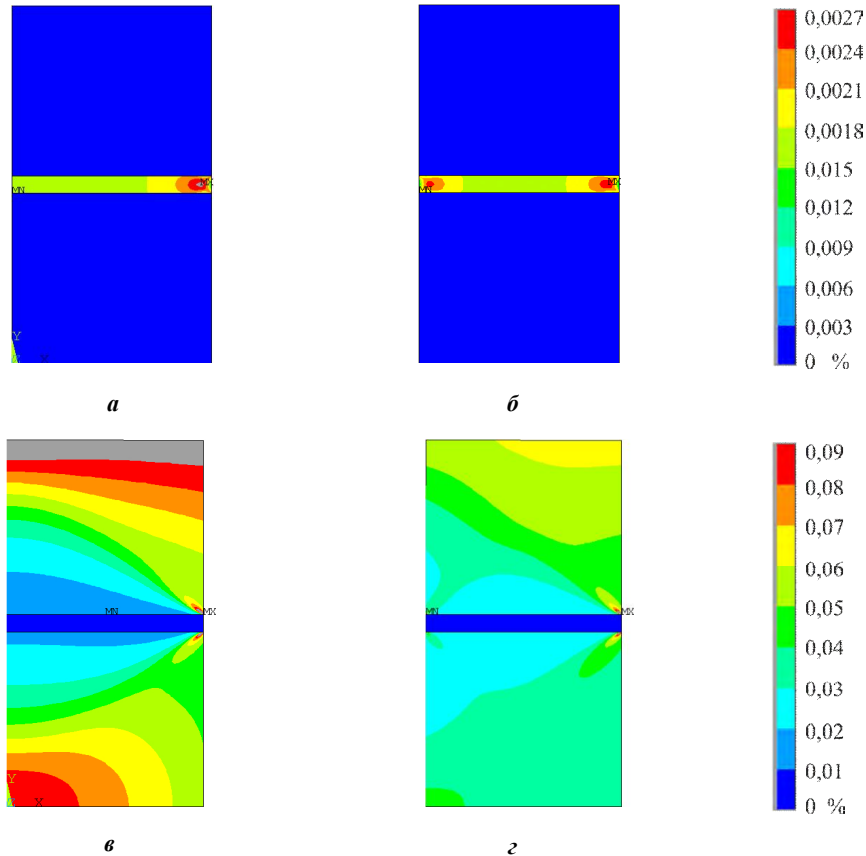


Рис. 5. Поля пластических деформаций при наличии мягкой (а, б) и твердой (в, г) прослоек

жесткой (прочной) прослойки в обоих случаях при нагружении узла равномерной осевой нагрузкой создает дополнительно радиальные, окружные и касательные напряжения, при этом уровень максимальных осевых и эквивалентных напряжений превышает приложенную нагрузку.

На большей части стыка эквивалентные напряжения в соединяемых материалах снижаются (около 5%), их уровень становится ниже приложенного напряжения сжатия (40 МПа), т.е. проявляется эффект некоторого упрочнения металла в контакте с более прочной прослойкой. Пластические деформации распределены по всему объему узла, возрастая по мере

удаления от стыка (см. рис. 5, в, г). Очевидно, что твердая прослойка неблагоприятно влияет на деформации узла, уменьшая их в зоне стыка и увеличивая вдали от него.

В материале твердой прослойки эквивалентные напряжения вдоль стыка находятся на уровне 65...70 МПа, повышаясь на внешней и внутренней кромках до 90...95 МПа. Это значительно превышает внешнее давление (40 МПа), т.е. проявляется эффект механического разупрочнения прослойки в контакте с менее прочным основным металлом. Этот эффект более выражен, чем в упругой стадии нагружения.

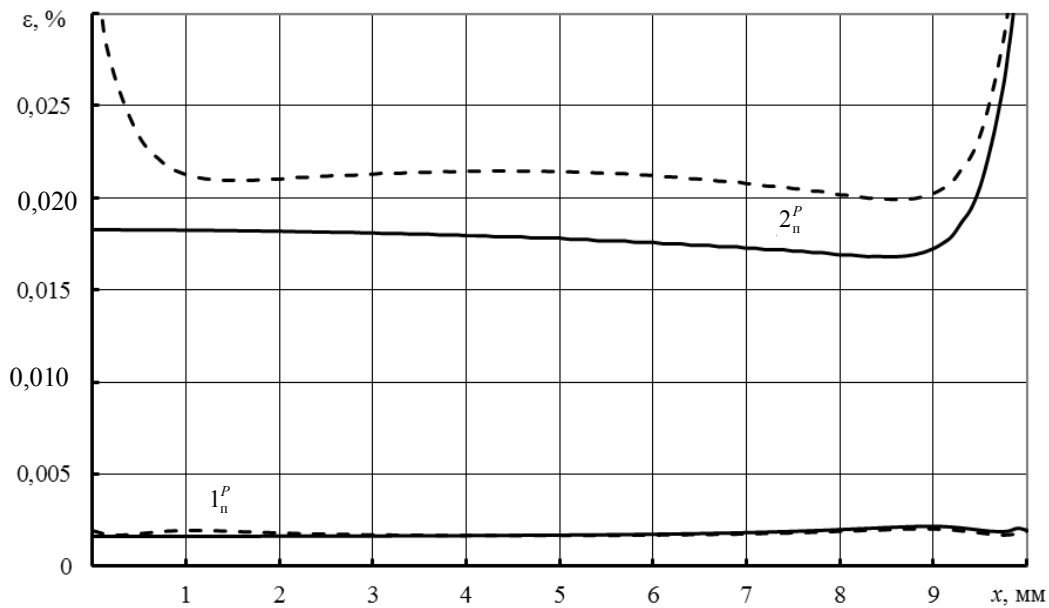


Рис. 6. Эпюры пластических деформаций в узлах с мягкой ( $1_n^P$  – в материале прослойки) и твердой ( $2_n^P$  – в соединяемых материалах) прослойками в узлах Ц–Ц (сплошные) и В–В (пунктирные)

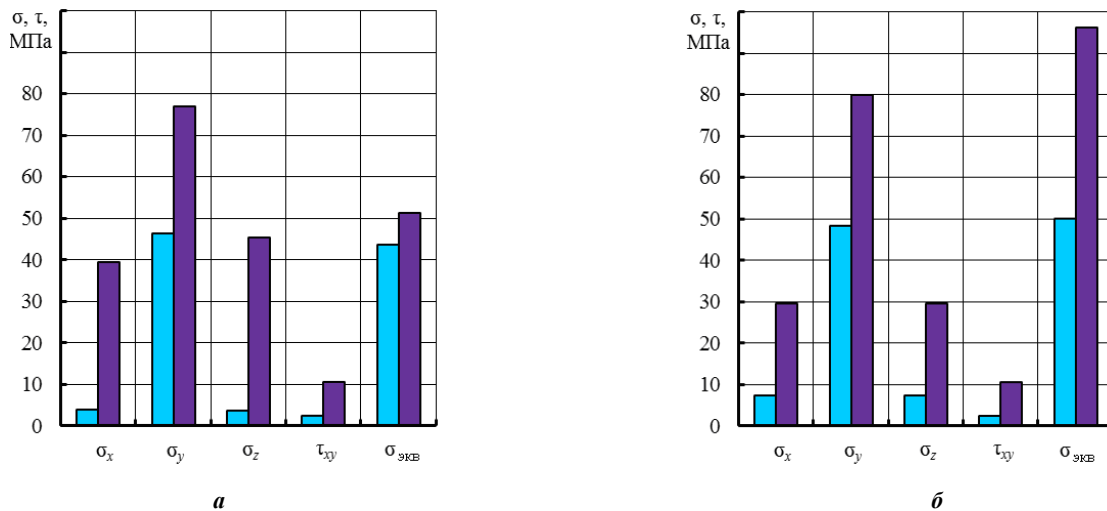


Рис. 7. Сравнение максимальных (по модулю) напряжений при упругом нагружении (■ – вар.  $2_y^P$ ) и с учетом пластических деформаций (■ – вар.  $2_n^P$ ) в материалах 1, 2 (а) и прослойке (б) в узлах Ц–Ц и В–В с прослойками большей прочности

Таким образом, влияние твердой прослойки выражается в том, что повышаются эквивалентные напряжения в материале прослойки и несколько уменьшаются в основном металле. Это должно способствовать развитию пластических деформаций в прослойке при меньшей величине нагружения, то есть должен проявляться эффект механического разупрочнения материала прослойки.

Сравнение вариантов пластического решения узлов с прослойками малой и большой прочности показывает, что при нагружении сжатием максимальные

значения всех составляющих нормальных напряжений как в соединяемых материалах, так и в материале прослойки при применении прочных (твердых) прослоек резко возрастают (осевые в 2 раза, а радиальные, окружные и касательные – на порядок) по сравнению с узлами с мягкими прослойками (рис. 8).

В результате возрастают и эквивалентные напряжения: в соединяемых материалах на 27 %, а в прослойке более чем в 2 раза. Соответственно на порядок возрастает и величина пластических деформаций в зоне соединения.

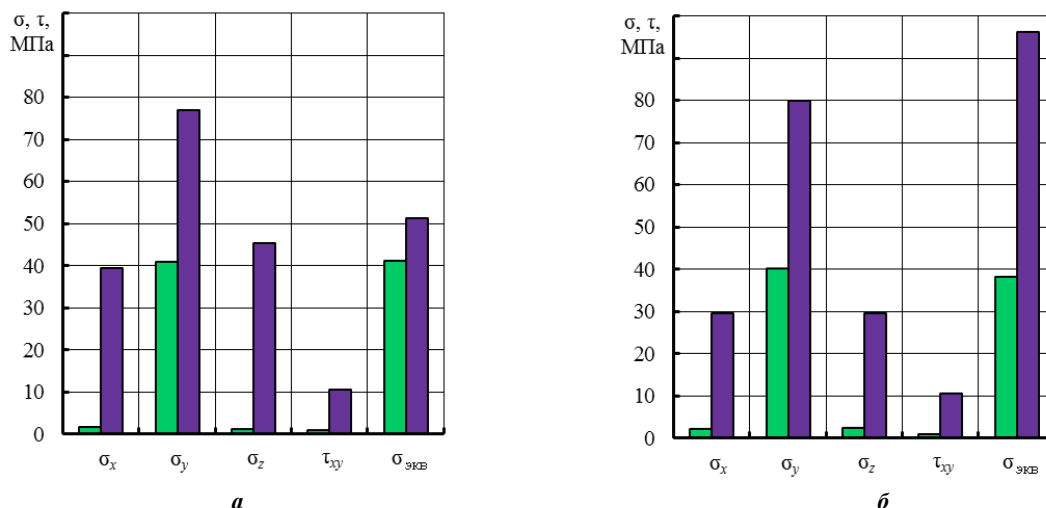


Рис. 8. Сравнение максимальных (по модулю) напряжений в узлах Ц–Ц и В–В в материалах 1, 2 (а) и прослойке (б) в вариантах с прослойкой малой (■ – вар. 1<sup>п</sup>) и большой (■ – вар. 2<sup>п</sup>) прочности с учетом пластических деформаций

### ВЫВОДЫ

1. Уточнен механизм известного явления упрочнения мягкой прослойки, имеющей меньшую жесткость (модуль упругости) при работе в упругой стадии и меньшую прочность (предел текучести) – в пластической. Механизм упрочнения имеет не только физическую основу (упрочнение вследствие наклепа материала), но и механическую (создание напряженного состояния, характеризующегося снижением эквивалентных напряжений и соответственно пластических деформаций).

2. При диффузионной сварке по традиционной технологии (с нагружением сжимающим усилием) только мягкая прослойка, имеющая меньшую прочность, чем соединяемые материалы, обеспечивает локализацию пластических деформаций в зоне стыка

(в материале прослойки). При назначении параметров режима необходимо учитывать некоторое упрочнение мягкой прослойки (уровень эквивалентных напряжений снижается до 20 %) и соответственно повышать давление сварки.

3. Применение твердых прослоек, имеющих большую прочность (предел текучести), чем соединяемые материалы, не создает условий для локализации пластических деформаций соединяемых материалов в зоне стыка и приводит к повышенным общим деформациям узла. Повышение эквивалентных напряжений в материале прослойки и уменьшение в основном материале должны способствовать развитию пластических деформаций в прослойке при меньшей величине нагружения, то есть должен проявляться эффект механического разупрочнения материала прослойки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бакши, О. А. О напряженном состоянии пластичной прослойки при осесимметричной деформации [Текст] / О. А. Бакши, Л. М. Качанов // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 2. – С. 134–137.
- [2] Бакши, О. А. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 3–5.
- [3] Бакши, О. А. О снятии сварочных напряжений в соединениях с механической неоднородностью приложением внешней нагрузки [Текст] / О. А. Бакши, Р. С. Зайнуллин // Сварочное производство. – 1973. – № 7. – С. 3–7.

- [4] **Бакши, О. А.** Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 6–10.
- [5] Влияние соотношения жесткостей материалов на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке узлов из разнородных материалов [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, В. Ф. Квасницкий, М. В. Матвиенко, Ал. В. Лабарткава // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 6(441). – С. 23–31.
- [6] **Зайнуллин, Р. С.** Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости [Текст] / Р. С. Зайнуллин. – Уфа : МНТЦ «БЭСТС», 1997. – 426 с.
- [7] **Квасницкий, В. В.** Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр–цилиндр и втулка–втулка [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 5(416). – С. 57–65.
- [8] **Квасницкий, В. В.** Напружено-деформований стан зварних та спаяних з'єднань різнорідних матеріалів однакової жорсткості з проміжними прошарками [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, І. А. Колесар // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 5(440). – С. 36–43.
- [9] **Колесар, И. А.** Исследование напряженно-деформированного состояния сварных и паяных узлов из разнородных материалов с промежуточными прослойками при температурном и силовом нагружении [Текст] / И. А. Колесар // Матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів «Зварювання та споріднені процеси і технології», 4–8 вересня 2012 р. – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 119–122.
- [10] О реализации равнопрочности кольцевых швов (мягких прослоек) разнородных труб и сосудов [Текст] / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, О. С. Киселев // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та : межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – № 4(64). – 188 с.
- [11] Прочность и деформационная способность сварных соединений с композиционной мягкой прослойкой [Текст] / О. А. Бакши, Ю. И. Анисимов, Р. С. Зайнуллин [и др.] // Сварочное производство. – 1974. – № 10. – С. 3–5.
- [12] **Трыков, Ю. П.** Титан–сталь: от биметалла до интерметаллидных композитов [Текст] / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та : межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград : ВолгГТУ, 2008. – № 10(48). – 168 с.

---

© І. А. Колесар, В. В. Квасницький, Г. В. Єрмолаєв, В. О. Мартиненко

Надійшла до редколегії 16.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013