

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СИЛОВОМ И ТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРУЖЕНИИ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ С МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

И. А. КОЛЕСАР, Г. В. ЕРМОЛАЕВ

Нац. ун-т кораблестроения им. Адмирала Макарова. 54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9.  
E-mail: welding@nuos.edu.ua

С целью оптимизации процесса диффузионной сварки и пайки узлов из разнородных материалов с мягкими прослойками исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) при нагружении сжатием и изменением температуры. Соединяли материалы, которые имели отличающиеся термические коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) и одинаковые модули упругости. Примером таких соединений могут быть соединения магнитных и немагнитных сталей, полученных с применением диффузионной сварки с мягкими прослойками или пайкой давлением с использованием припоев на основе меди с добавками кремния, марганца, бора. Достаточная прочность материалов в паяном узле сочетается с пластическим деформированием только прослойки. Изучены поля всех составляющих напряжений и деформаций, а также их эпюры в различных сечениях узлов. Анализ результатов моделирования показал, что касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование физического контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении узлов с мягкой прослойкой заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве. При этом распределение пластических деформаций в прослойке более равномерно, т. е. термоциклирование под давлением способствует образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в таких узлах. Библиогр. 8, рис. 10.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, мягкие прослойки, моделирование НДС, температурное и силовое нагружение

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

Одной из важных проблем соединения разнородных материалов этими методами является пластическая деформация и активация поверхности более прочного материала. Для решения существующих проблем применяют ДС с промежуточными прокладками и с управляемым напряженно-деформированным состоянием (НДС) [1]. В случае применения пайки промежуточной прокладкой часто является сам припой, который может иметь разные физико-механические свойства (ФМС) как до пайки, так и после взаимодействия с основным материалом.

В последние годы уделяется большое внимание исследованию НДС при ДС и пайке узлов из разнородных материалов [2–7], поэтому исследование влияния соотношений прочности соединяемых материалов и прослойки на НДС узлов и установление общих закономерностей актуально.

Цель настоящей работы – установление влияния низкой прочности материала промежуточных прокладок (прослоек) по сравнению с соединяемыми материалами (мягкие прослойки) и форми-

рование НДС как в процессе ДС, так и при остывании после сварки и пайки.

Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса ANSYS (10 версии). Решали осесимметричные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) типа PLANE 182. Адекватность результатов моделирования ранее проверена экспериментально [8].

Исследовали типы узлов, которые наиболее часто встречаются при ДС и пайке: втулка-втулка (В-В) и цилиндр-цилиндр (Ц-Ц). Последний тип узла можно рассматривать как частный случай первого, когда обращается в нуль внутренний диаметр. Общий вид физических и КЭ моделей показан на рис. 1. Толщину прослойки принимали равной 1 мм, общую высоту всех узлов  $2h = 20$  мм, радиус цилиндра и толщину втулки 10 мм.

Исследование выполняли на узлах из материалов одинаковой жесткости (модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа) и прочности (предел текучести  $\sigma_T \geq 200$  МПа) с прослойками такой же жесткости, но меньшей, чем у основных материалов, прочности  $\sigma_T = 38$  МПа). Для материала 1 термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha \cdot 10^6 = 20$  град<sup>-1</sup>; для материала 2 — 10; прослойки — 15. ФМС материалов и уровень нагрузок подбирали так, чтобы пластически деформировал-

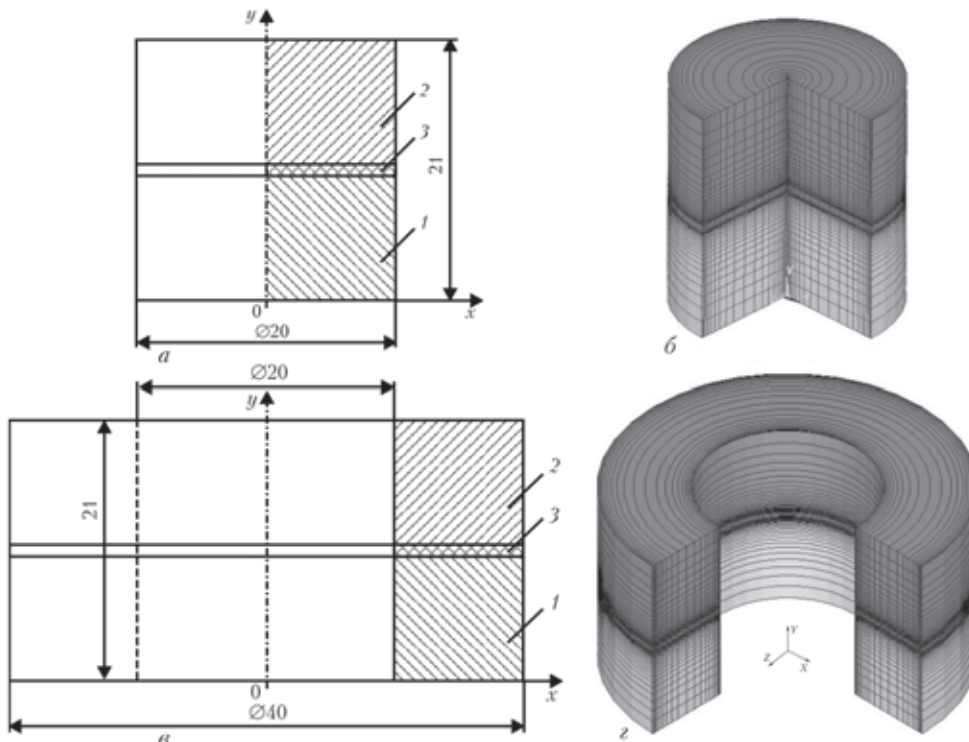


Рис. 1. Физические (а, в) и КЭ (б, з) модели узлов типа Ц-Ц (а, б) и В-В (в, з) с прослойкой (1–3 — соответственно материал 1, материал 2 и прослойка)

ся только материал прослойки, при этом деформирование охватывало большую часть прослойки.

Рассматривалось силовое (сжатие 40 МПа), температурное (охлаждение на 100 °С, когда НДС создается за счет отличия ТКЛР соединяемых материалов) и совместное температурно-силовое нагружение узла (после образования соединения). Очевидно, что полученные при таком нагружении результаты имеют место и при смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием), но материалы 1 и 2, имеющие разные ТКЛР, при этом поменяются местами. Результаты моделирования сравнивали с аналогичными узлами при разных видах нагружения и между собой.

Анализировали поля и эпюры всех составляющих напряжений и пластических деформаций

узлов. Как показал анализ результатов моделирования в узлах Ц-Ц и В-В характер НДС в целом соответствует общим принципам механики и закономерностям, установленным ранее [2, 5–7], при этом НДС узлов Ц-Ц и В-В отличается только вблизи внутренней поверхности втулки, которая отсутствует в узлах Ц-Ц. Поэтому на рис. 2–4 приводятся только поля в узлах В-В.

В области прослойки создается объемное напряженное состояние, наиболее выраженное при температурном и совместном температурно-силовом нагружениях. При чисто силовом нагружении напряженное состояние меняется незначительно, оставаясь близким к линейному.

В узлах обоих типов эффекты температурного и силового нагружения алгебраически суммируются, в результате чего поля радиальных и окружных напряжений остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении. Осевые сжимающие напряжения в материале 1 увеличиваются, а растягивающие в материале 2 уменьшаются на величину сжимающей нагрузки (рис. 2).

Касательные напряжения заметно увеличиваются на границе раздела мягкой прослойки и ма-

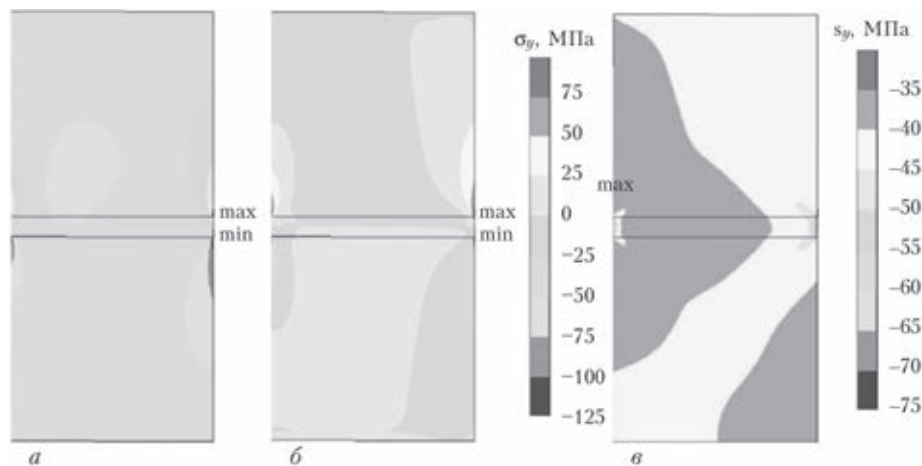


Рис. 2. Поля осевых напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

териала 1 и уменьшаются на границе раздела с материалом 2 (рис. 3) по сравнению с чисто температурным нагружением. Здесь наглядно проявляется алгебраическое суммирование эффектов от разности ТКЛР и пластического деформирования прослойки.

Аналогично изменяется и поле эквивалентных напряжений (рис. 4). 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 (рис. 5). 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 эпюр распределения радиальных, окружных и касательных напряжений в соединяемых материалах при совместном температурном и силовом нагружении совпадает с характером соответствующих эпюр при чисто температурном нагружении. При этом максимальные радиальные напряжения в соединяемых материалах снижаются на 15...20 МПа, а окружные на 10...15 МПа. Эпюры осевых напряжений смещаются в сторону сжатия на 40 МПа (рис. 6).

Максимальные касательные напряжения вблизи внешней цилиндрической поверхности увеличиваются со стороны материала 1 на 10 МПа (рис. 7, а) и уменьшаются на 10 МПа со стороны материала 2 (рис. 7, б).

Соответственно изменяются и эпюры эквивалентных напряжений. Уровень этих напряжений растет на величину приложенного давления 40 МПа в материале 1 и снижается на 40 МПа в материале 2 (рис. 8). Распределение их в обо-

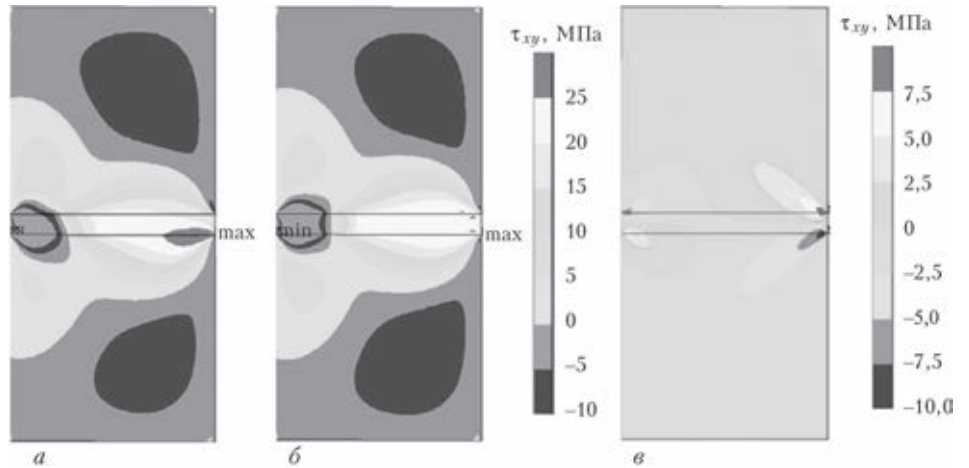


Рис. 3. Поля касательных напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

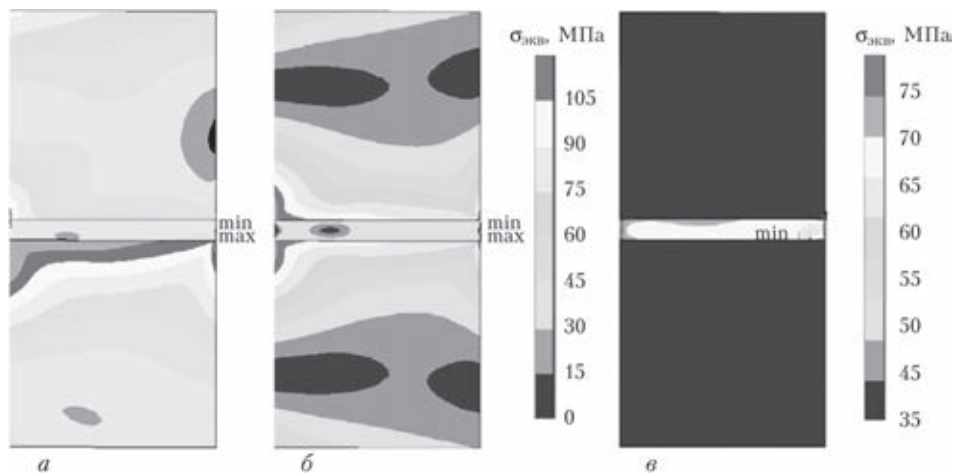


Рис. 4. Поля эквивалентных напряжений в узлах В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

их 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. Со стороны материала 1 распределение неравномерное, имеются четко выраженные зоны застоя (вблизи оси узлов Ц-Ц и на 1/3 толщины от внутренней поверхности узлов В-В), в которых эквивалентные напряжения снижаются до 10...25 МПа. Вблизи внешней поверхности узлов они напротив увеличиваются за счет наклепа при больших пластических деформациях.

Анализ эпюр пластических деформаций в материале мягкой прослойки также показывает, что они 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. 9, а). На границе с материалом 2, напротив, распределение более равно-

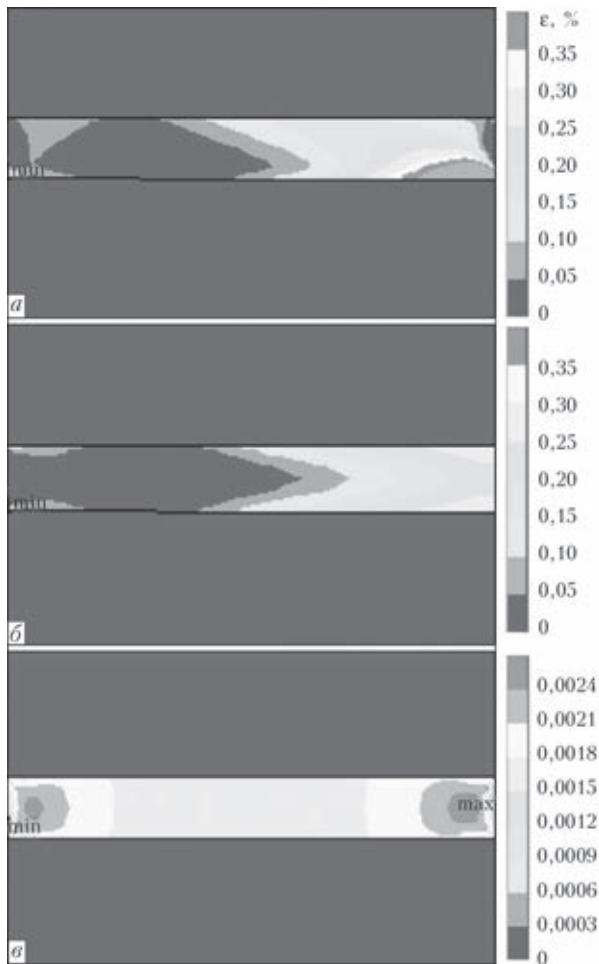


Рис. 5. Поля пластических деформаций в мягкой прослойке узлов В-В при температурно-силовом (а), температурном (б) и силовом (в) нагружении

мерное, чем при чисто температурном нагружении (рис. 9, б), но уровень их ниже.

Таким образом, совместное силовое (сжатие) и температурное (охлаждение) нагружение соз-

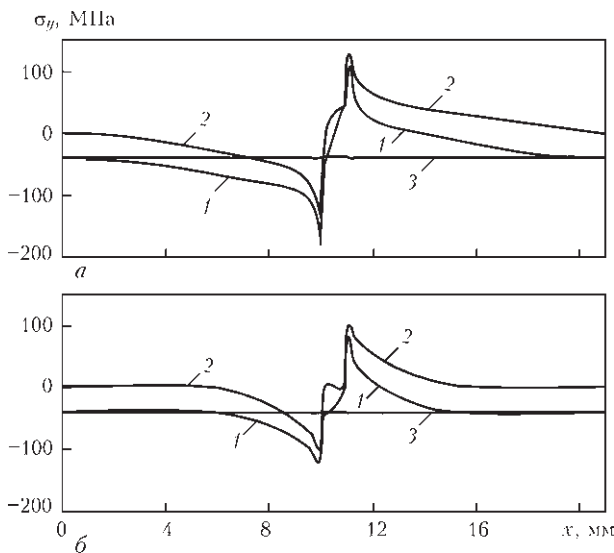


Рис. 6. Эпюры осевых напряжений вдоль внешней (а) и внутренней (б) поверхностей узла В-В с мягкой прослойкой при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

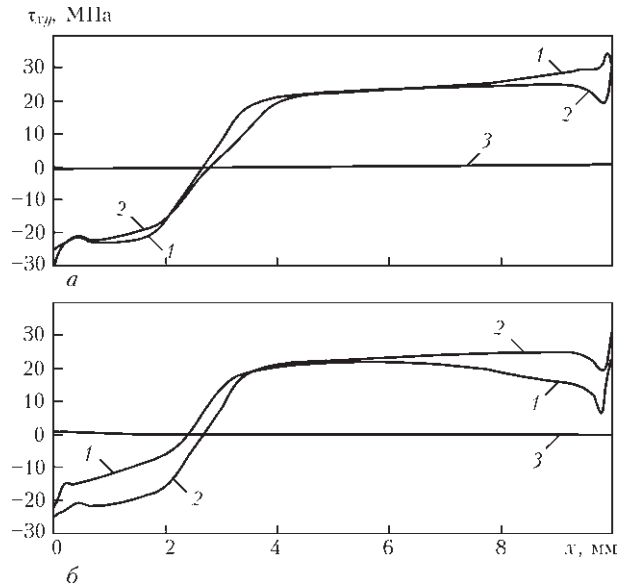


Рис. 7. Эпюры касательных напряжений по стыкам соединяемых материалов 1 (а) и 2 (б) с прослойкой в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

дает более благоприятные условия для развития пластических деформаций в мягкой прослойке, чем чисто термическое. Со стороны материала 1 (с большим ТКЛР) увеличивается их уровень 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 физического контакта и активации процессов формирования соединения.

Для удобства сравнения на рис. 10 приведены диаграммы максимальных по модулю напряжений

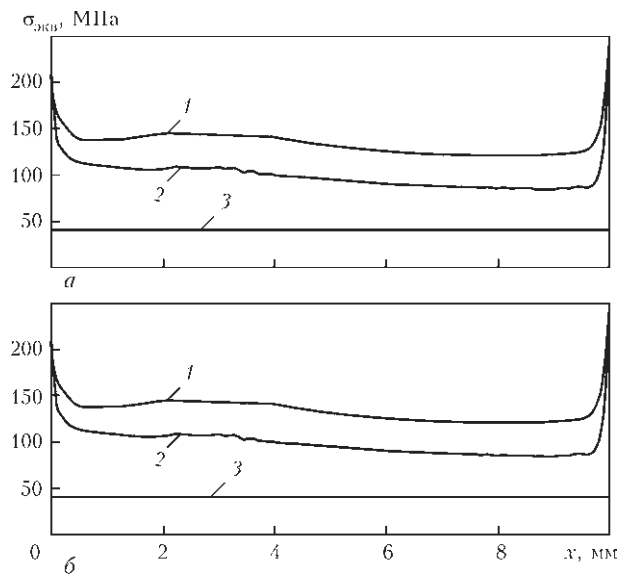


Рис. 8. Эпюры эквивалентных напряжений в соединяемых материалах 1 (а) и 2 (б) по стыкам с прослойкой в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

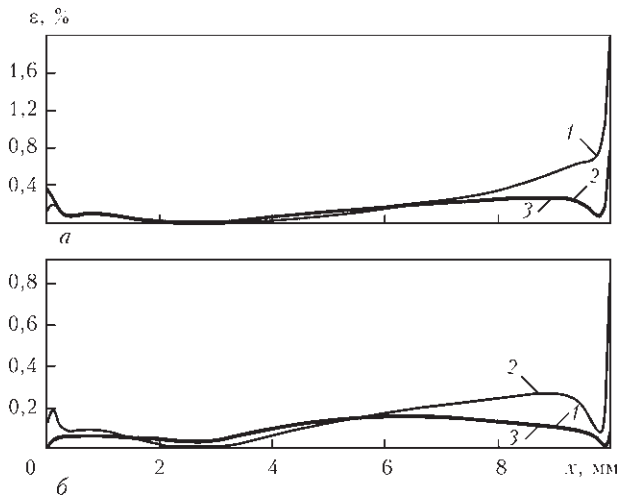


Рис. 9. Эпюры пластических деформаций в материале прослойки на стыке с соединяемыми материалами 1 (а) и 2 (б) в узлах В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении

в соединяемых материалах и прослойке при разных вариантах нагружения.

Анализ диаграмм подтверждает, что эффект совместного температурного и силового нагружения узлов с мягкими прослойками проявляется в некотором увеличении радиальных и тангенциальных напряжений во всех материалах, увеличении эквивалентных в материале 1 и прослойке и осевых в соединяемых материалах и, соответственно, уменьшении эквивалентных в материале 2 и осевых в материале прослойки, касательные напряжения при этом остаются практически такими же, как при чисто температурном нагружении.

## Выводы

1. Касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование физического контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при совместном нагружении 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, т. е. термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с мягкой прослойкой.

2. Пластические деформации в материале мягкой прослойки на границе с материалом с меньшим ТКЛР при совместном нагружении сжатием и охлаждением распределены более равномерно, но уровень их ниже, чем при чисто температурном нагружении. При совместном сжатии и нагреве то же происходит на границе с материалом

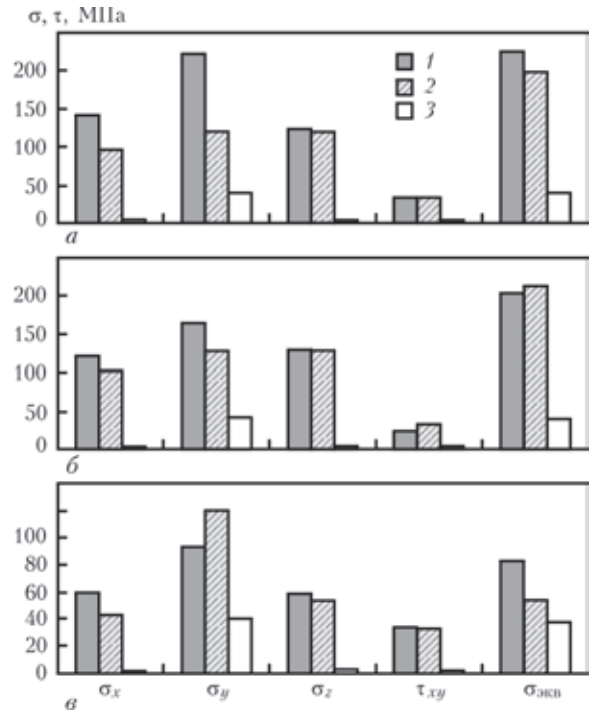


Рис. 10. Максимальные (по модулю) напряжения в материале 1 (а), 2 (б) и мягкой прослойки (в) узлов В-В при температурно-силовом (1), температурном (2) и силовом (3) нагружении с большим ТКЛР, т. е. сварка с термоциклированием под давлением в узлах с мягкой прослойкой обеспечивает более равномерное распределение пластических деформаций в прослойке.

1. Пат. 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.
2. Квасницький В. В., Ермолаєв Г. В., Матвієнко М. В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных материалов применительно к узлам цилиндр-цилиндр и втулка-втулка // 36. наук. праць НУК. – 2007. – № 5. – С. 57–65.
3. Zhong Z., Zhou Z., Ge C. Residual stress distribution and effect of interlayer in doped graphite/copper joints // Welding Technology. – 2004. – № 6. – P. 14–16.
4. Zhong Z., Zhou Z., Ge C. Brazing of doped graphite to Cu using stress relief interlayers // J. Materials Processing Technology. – 2009. – 209. – P. 2662–2670.
5. Махненко В. И., Квасницький В. В. Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке // Автомат. сварка. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
6. Махненко В. И., Квасницький В. В. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой // Там же. – 2009. – № 8. – С. 11–16.
7. Квасницький В. В., Єрмолаєв Г. В., Колесар І. А. Напряжено-деформований стан зварних та спаяних з'єднань різнорідних матеріалів однакової жорсткості з проміжними прошарками // 36. наук. праць НУК. – 2011. – № 5. – С. 36–43.
8. Экспериментальное исследование деформации сварного узла типа втулка-втулка из разнородных материалов / В. В. Квасницький, Ю.Г. Золотой, А. В. Лабарткава и др. // 36. наук. праць НУК. – 2008. – № 4. – С. 65–73.

Поступила в редакцию 30.05.2014