

УДК 621.791
Н 27

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОСЛОЙКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ

И. А. Колесар, магистр¹;
В. В. Квасницкий, д-р техн. наук²;
Г. В. Ермолаев, канд. техн. наук¹;
А. М. Костин, канд. техн. наук¹

¹Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

²Национальный технический университет «КПИ», г. Киев

Аннотация. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при термическом нагружении узлов из разнородных материалов в упругой и пластической стадиях. Установлено влияние жесткости и прочности материала промежуточных прослоек на пластические деформации в зоне стыка и осевые напряжения на поверхности узлов, определяющие вероятность разрушения хрупких материалов.

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

Анотація. Розглянуто напружено-деформований стан при термічному навантаженні вузлів з різнорідних матеріалів у пружній та пластичній стадіях. Установлено вплив жорсткості і міцності матеріалу проміжних прошарків на пластичні деформації в зоні стику та осеві напруження на поверхні вузлів, що визначають імовірність руйнування крихких матеріалів.

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

Abstract. The stress-strain state in the process of the thermal loading of assemblies from heterogeneous materials in the elastic and plastic stages has been studied. The influence of the hardness and strength of the material of interlayers on plastic deformations in the joining zone is defined. The axial stresses on the surface of the assemblies which define the failure probability of brittle materials are also determined.

Keywords: diffusion welding, soldering, dissimilar materials, soft and hard layers, stress-strain state, thermal loading.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Диффузионная сварка (ДС) и пайка являются основными способами соединения многих материалов, которые в связи с потерей структуры и свойств не подлежат сварке плавлением, в частности композиционных, неметаллических, с направленной структурой или монокристаллических материалов, дисперсионно-упрочняемых никелевых сплавов, тугоплавких металлов, а также металлов с неметаллами.

Одна из сложных проблем соединения разнородных материалов этими методами – формирование остаточных собственных напряжений, которые могут снизить работоспособность или вызвать разрушение узла при охлаждении. Другой проблемой при ДС таких материалов являются пластическая деформация и активация поверхности более прочного материала. Для решения этих проблем применяют ДС с промежуточными прокладками. При пайке промежуточной прокладкой служит припой, который может иметь разные физико-механические свойства (ФМС) как до пайки, так и после взаимодействия с основным материалом.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ показал, что в последние годы уделяется большое внимание исследованию напряженно-деформированного (НД) состояния при ДС и пайке узлов из разнородных материалов [1–3]. Однако они практически все посвящены узлам из конкретных материалов с конкретным сочетанием ФМС, что затрудняет установление общих закономерностей и использование этих закономерностей для узлов из других материалов. Таким образом, исследование влияния соотношений жесткости и прочности соединяемых материалов и прослойки на НД состояние узлов и установление общих закономерностей *актуально*.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – исследовать методом компьютерного моделирования влияние ФМС соединяемых материалов и промежуточных прокладок (прослоек) на формирование НД состояния как в условиях упругости, так и при наличии мгновенных пластических деформаций.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с применением программного комплекса ANSYS (10-я версия). Решались осесимметричные задачи с использованием конечных элементов (КЭ) типа PLANE 182.

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 внутренний диаметр обращается в нуль. Общий вид физических и КЭ моделей показан на рис. 1. Толщина прослойки принималась 1 мм, общая высота всех узлов ($2h$) – 20 мм.

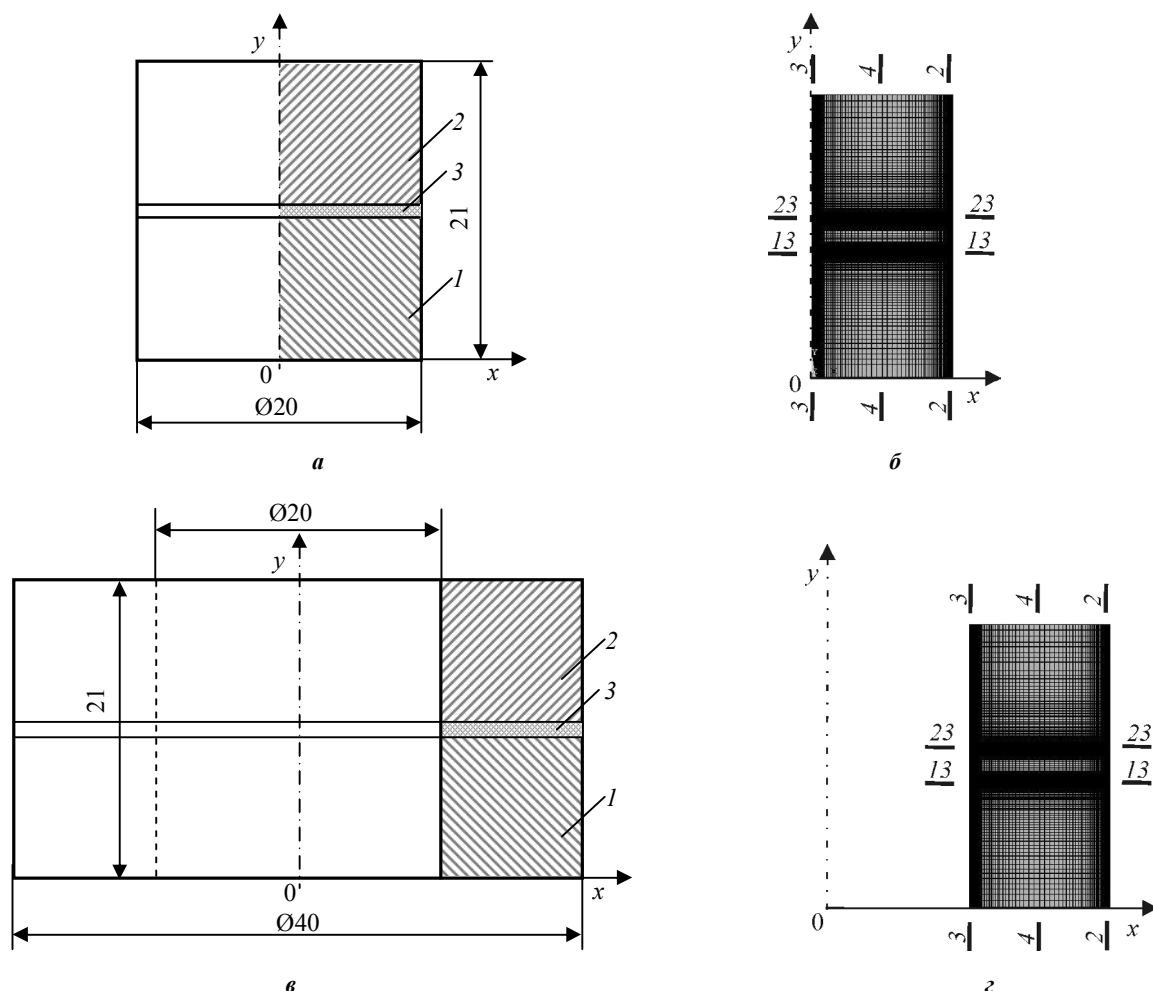


Рис. 1. Физические (а, в) и КЭ (б, г) модели узлов типа Ц–Ц (а, б) и В–В (в, г) с прослойкой: 1 – материал; 2 – материал 2; 3 – материал прослойки

В упругой стадии работы исследовались узлы из материалов одинаковой жесткости, но с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). Прослойки использовались с промежуточным ТКЛР и разными модулями упругости (табл. 1):

1 – модуль упругости прослойки в 2 раза меньше, чем у соединяемых материалов («мягкая прослойка», вариант 1_y^T);

2 – модули упругости прослойки и соединяемых материалов одинаковы («нейтральная прослойка», вариант 2_y^T);

3 – модуль упругости прослойки в 1,5 раза выше, чем у соединяемых материалов («жесткая, твердая прослойка», вариант 3_y^T).

Результаты сравнивались с аналогичными узлами без прослойки.

В пластической стадии исследование выполнялось на тех же узлах Ц–Ц и В–В из материалов одинаковой жесткости (модулей упругости) и прочности (пределов текучести), с прослойками такой же жесткости, но меньшей и большей, чем у основных материалов, прочности (см. табл. 1). Результаты сравнивались с подобными узлами (прослойки с малой, средней и большой жесткостью) при упругом деформировании (варианты 1_y^T , 2_y^T , 3_y^T) и между собой.

Рассмотрено термическое нагружение узла (после образования соединения) при охлаждении на 100°C . Напряженно-деформированное состояние создается за счет разных ТКЛР соединяемых материалов.

Таблица 1. Варианты сочетаний свойств соединяемых материалов в пластической задаче

Номер варианта	Материал 1		Материал 2		Прослойка	
	σ_T , МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/град	σ_T , МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/град	σ_T , МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/град
1 ^г	200,0	20,0	200,0	10,0	38,0	15,0
2 ^г	38,0	20,0	38,0	10,0	200,0	15,0

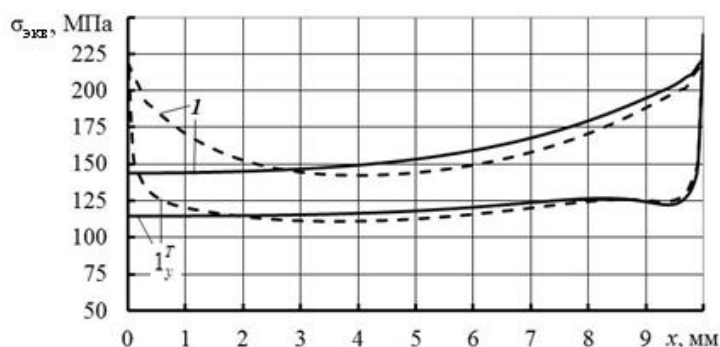
Как показали анализ полей напряжений в узлах и их сравнение с результатами моделирования НДС состояния узлов без прослоек (вариант 1), в упругой стадии работы характер НДС состояния в соединяемых материалах во всех рассмотренных вариантах меняется мало: он остается сложным, объемным, неравномерно распределенным по сечению узла. При этом напряжения сосредоточены в основном вблизи стыка и быстро убывают по мере удаления от него. Исключение составляют осевые напряжения, сосредоточенные на внешней (узлы Ц-Ц и В-В) и внутренней (узлы В-В) цилиндрических поверхностях.

Анализ эпюр распределения напряжений вдоль стыка (рис. 2,а) показал, что при термическом нагружении снижением температуры узлов с «мягкой» прослойкой (малой жесткости) в упругой стадии в районе стыка уровень эквивалентных напряжений в соединяемых материалах, несколько снижается по

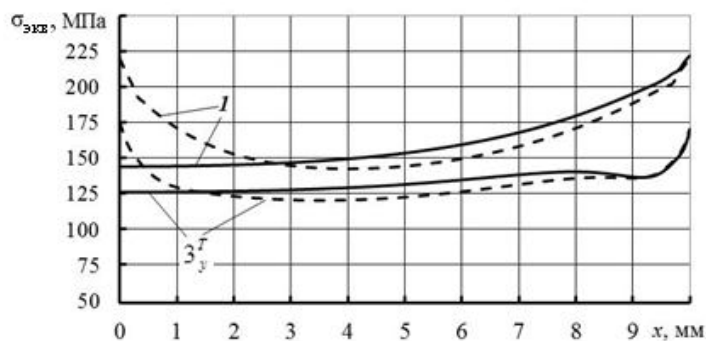
сравнению с аналогичными узлами без прослойки. Распределение становится практически равномерным на большей части стыка (рис. 2,а).

При термическом нагружении снижением температуры узлов с жесткой прослойкой (большой жесткости) по сравнению с аналогичными узлами без прослойки в упругой стадии в районе стыка уровень эквивалентных напряжений аналогичен уровню в узлах с прослойкой малой жесткости, напряжения также снижаются, но в несколько меньшей степени, и их распределение также становится более равномерным (рис. 2,б).

Анализ результатов моделирования полей и эпюр осевых напряжений на цилиндрических поверхностях узлов показал, что характер их распределения при наличии прослоек разной жесткости меняется мало, но несколько изменяются их максимальные значения вблизи стыка (рис. 3).



а



б

Рис. 2. Эпюры эквивалентных напряжений в соединяемых материалах в узлах Ц-Ц (сплошные) и В-В (пунктирные) на стыке с «мягкой», вариант 1^г (а) и «жесткой», вариант 3^г (б) прослойками. Вариант 1 – без прослойки

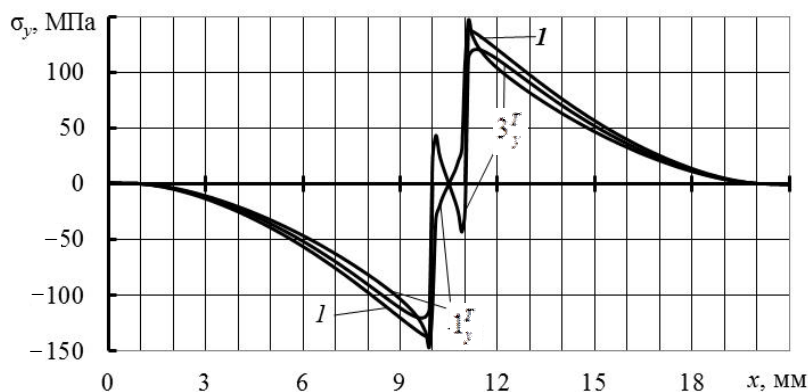


Рис. 3. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей на внешней поверхности узла В–В в упругом состоянии, варианты 1 (без прослойки), 1^T («мягкая» прослойка) и 3^T («твердая» прослойка)

В узлах с «мягкой» прослойкой на внешней цилиндрической поверхности уровень растягивающих осевых напряжений в материале с малым ТКЛР увеличивается (около 10 %), что повышает вероятность образования трещин в хрупком материале при остывании.

В узлах с «жесткой» прослойкой уровень растягивающих осевых напряжений в материале с малым ТКЛР несколько уменьшается (около 20 %), что снижает вероятность образования трещин в хрупком материале при остывании.

Таким образом, при термическом нагружении в упругой стадии решающую роль в формировании НД состояния в зоне стыка играет различие ТКЛР на границе раздела материалов. Различие жесткости при этом влияет в значительно меньшей степени.

При термическом нагружении снижением температуры узлов с «мягкой» прослойкой (малой прочности) в пластической стадии характер НД состояния меняется мало по сравнению с узлами с «мягкой» прослойкой в упругой стадии. В районе стыка эквивалентные напряжения в соединяемых материалах снижаются, особенно заметно вдали от зоны застоя (до 2 раз). Это не создает благоприятных условий для интенсификации процессов образования соединения со стороны основного металла.

Пластические деформации сосредоточены в материале прослойки. Их распределение вдоль стыка неравномерное (рис. 4, а). Они растут от нуля в зоне застоя до 0,2...0,3 % вблизи внутренней и внешней поверхностей узла.

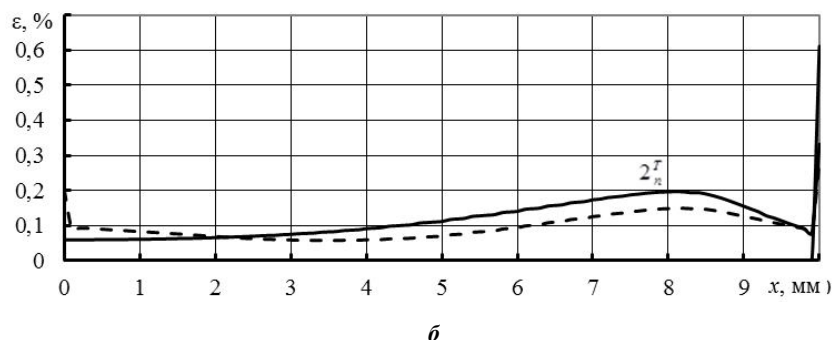
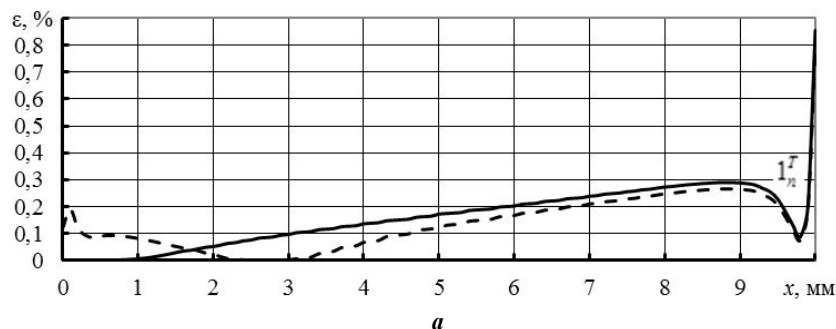


Рис. 4. Эпюры пластических деформаций вдоль стыка в соединяемых материалах (б) и в прослойке (а) в узлах с «мягкой», вариант 1^T (а), и «твердой», вариант 2^T (б), прослойками, в узлах Ц–Ц (сплошные) и В–В (пунктирные)

В узлах с «твердой» прослойкой (большой прочностью) пластические деформации сосредоточены в соединяемых материалах, распределение пластических деформаций в них более равномерное (рис. 4,б), на большей части стыка они изменяются в пределах 0,05...0,2 %.

Прочность прослойки влияет и на осевые напряжения на поверхностях соединяемых материалов (рис. 5). В узлах с «мягкой» прослойкой на внешней цилиндрической поверхности уровень максималь-

ных растягивающих осевых напряжений в материале с малым ТКЛР уменьшается (около 6 %), что повышает вероятность образования трещин в хрупком материале при остывании.

В узлах с «твердой» прослойкой уровень растягивающих осевых напряжений в материале с малым ТКЛР, наоборот, несколько уменьшается (около 50 %), что снижает вероятность образования трещин в хрупком материале при остывании.

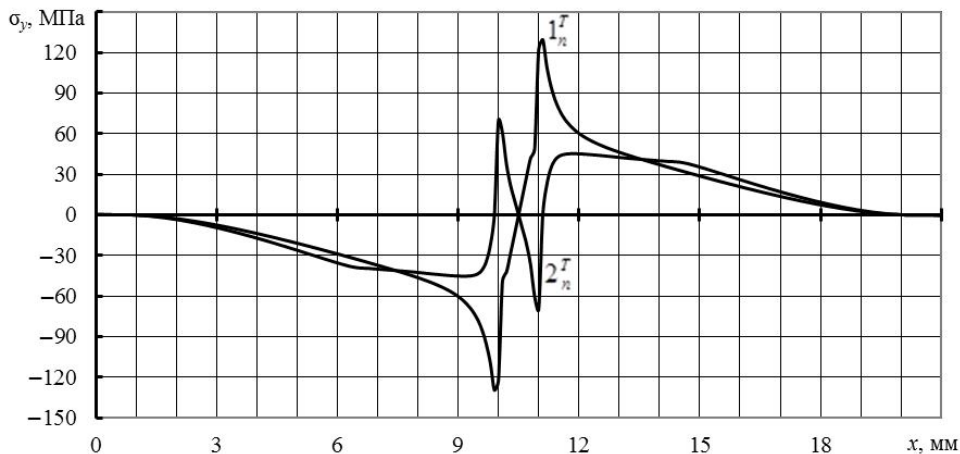


Рис. 5. Эпюры осевых напряжений вдоль образующей на внешней поверхности узла В–В с учетом пластической деформации, вариант 1_y^T («мягкая» прослойка) и 2_y^T («твердая» прослойка)

ВЫВОДЫ

1. При диффузионной сварке разнородных материалов с нагружением изменением температуры в образовании НД состояния в упругой стадии работы материалов главную роль играет разница ТКЛР материалов на границе раздела, отличие их жесткости влияет очень мало.

2. Применение твердых прослоек, имеющих большую прочность (предел текучести), чем соединяемые

материалы, создает благоприятные условия для локализации и достаточно равномерного распределения в зоне стыка пластических деформаций соединяемых материалов.

3. На снижение вероятности образования трещин в хрупком материале при остывании благоприятно влияет «твердая» прослойка, которая значительно уменьшает (около 50 %) осевые напряжения на поверхности узла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **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.
- [2] **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.
- [3] Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы [Текст] / В. Д. Кузнецов, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 6(417). – С. 62–73.

© Авторський колектив

Надійшла до редколегії 24.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

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