

УДК 621.791 (075.8)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ УЗЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Квасницкий¹ В.В., Ермолаев² Г.В., Матвиенко³ М.В.

1 - КПИ имени Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

2 - НУК имени адмирала Макарова, г. Николаев, Украина

3 - ХФ НУК имени адмирала Макарова, г. Херсон, Украина

Аннотация: С целью установления влияния прочности (предела текучести) материала промежуточных прослоек по сравнению с соединяемыми материалами (мягкие и твердые прослойки) при диффузионной сварке и пайке исследовано напряженно-деформированное состояние при температурно-силовом нагружении. Соединяли материалы одинаковой прочности, но отличающихся температурными коэффициентами линейного расширения, с мягкой (с меньшим пределом текучести) и твердой (с большим, чем у основного металла, пределом текучести) прослойками и средним ТКЛР. Анализировались поля и эпюры напряжений и пластических деформаций узлов. Анализ результатов моделирования показал, что термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с как с мягкой, так и твердой прослойкой, но недостатком твердой является недостаточная локализация деформаций в зоне стыка, приводящая к повышенным общим деформациям узла.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, разнородные материалы, прослойка, напряжения, деформация, моделирование.

Одной из основных проблем соединения разнородных материалов диффузионной сваркой (ДС) и пайкой является пластическая деформация и активация поверхностей соединяемых материалов, которые определяются напряженно-деформированным состоянием (НДС) в зоне соединения. НДС представляет интерес также и с точки зрения прочности готовых узлов после остывания. Поэтому исследование НДС таких узлов актуально.

Цель настоящей работы – установление влияния прочности (предела текучести) материала промежуточных прослоек по сравнению с соединяемыми материалами (мягкие и твердые прослойки) на формирование НДС при ДС и пайке.

Исследования проводили методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Решали осесимметричные задачи для узлов типа цилиндр-цилиндр (Ц-Ц) и втулка-втулка (В-В) из материалов одинаковой прочности (рис. 1), но отличающихся температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР = $20 \cdot 10^{-6}$ и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град), с мягкой (с меньшим пределом текучести) и твердой (с большим, чем у основного металла, пределом текучести) прослойками и средним ТКЛР ($15 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Модули упругости и коэффициенты Пуассона принимались одинаковыми и равными $2 \cdot 10^5$ МПа и 0,3 соответственно, что позволяет выделить влияние именно пластической составляющей деформаций на НДС узла. Нагружение выполнялось совместным сжатием усилием 40 МПа и снижением температуры узла (после образования соединения) на 100 град. Полученные при таком нагружении результаты сохраняют свою силу и при смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием), но материалы 1 и 2, имеющие разные ТКЛР, при этом меняются местами. Результаты моделирования сравнивались с аналогичными узлами при разных видах нагружения (только силовом и только температурном) и между собой. Анализировались поля и эпюры всех составляющих напряжений и пластических деформаций узлов.

Как показал анализ результатов моделирования в обоих типах узлов, характер НДС в целом соответствует общим принципам механики и закономерностям, установленным в ранее выполненных нами исследованиях [1, 2, 3]. Поля всех напряжений подобны полям при чисто температурном нагружении, но их уровень заметно изменяется.

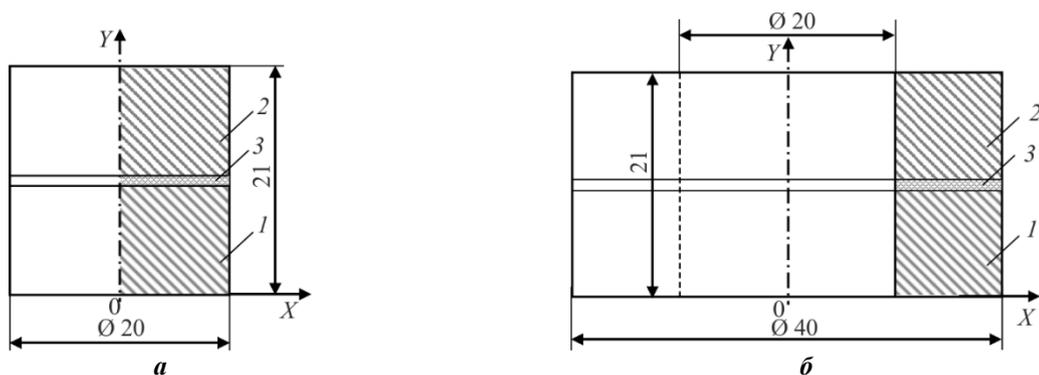


Рис.1. Физические модели узлов типа Ц-Ц (а) и В-В (б) с прослойками

Осевые напряжения растяжения в хрупких материалах с низким ТКЛР (керамика, графит и т.п.) на внешней поверхности узлов, ответственные за их разрушение при остывании после сварки (пайки), в узлах с твердой, так же как и с мягкой прослойкой, уменьшаются на величину сжимающей нагрузки при совместном нагружении сжатием и охлаждением (охлаждение под давлением). То есть совместное нагружение уменьшает риск разрушения хрупких материалов на стадии остывания после пайки.

Касательные и эквивалентные напряжения в зоне стыка (на поверхности раздела), определяющие образование металлического контакта и активацию процесса образования соединения при диффузионной сварке, при охлаждении под давлением узлов с твердой прослойкой в материале с меньшим ТКЛР увеличиваются. В материале с большим ТКЛР то же происходит при нагреве. В отличие от узлов с мягкой прослойкой, где картина обратная, напряжения заметно увеличиваются в материале с большим ТКЛР при охлаждении и материале с меньшим ТКЛР при нагреве [4]. То есть, термоциклирование под давлением должно способствовать образованию физического контакта и активации процессов формирования соединения в узлах с как с мягкой, так и твердой прослойкой.

Для удобства сравнения, максимальные значения всех составляющих и эквивалентных напряжений в материалах 1, 2 и прослойки для 2-х вариантов узлов приведены на рисунке 2, а пластических деформаций на рисунке 3.

Анализ диаграмм показывает, что уровень максимальных значений практически всех составляющих напряжений в обоих соединяемых материалах заметно выше в узлах с мягкой прослойкой, чем в узлах с твердой. При этом в материале 1 (с большим ТКЛР) различие более существенно (5...10 раз), чем в материале 2 (от 2 до 5 раз). При смене охлаждения нагревом (при сварке с термоциклированием) материалы поменяются местами.

В материале мягкой прослойки радиальные, окружные и эквивалентные напряжения ниже, а осевые и касательные выше, чем в материале твердой прослойки. Но отличие здесь меньше, чем в соединяемых материалах (20...50 %).

Максимальные значения пластических деформаций в соединяемых материалах (узлы с твердой прослойкой) отличаются более, чем в 2 раза. В материале 1 (с большим ТКЛР) они приближаются к 0,2 %, тогда как в материале 2 (с меньшим ТКЛР) они приближаются к 1 %. В материале мягкой прослойки максимальные значения пластических деформаций значительно больше максимальных в основных материалах.

Отличительной особенностью узлов с твердой прослойкой как при чисто силовом, так и совместном нагружении, является недостаточная локализация деформаций в зоне стыка и, как следствие, большие общие деформации после сварки.

Таким образом, наличие прослойки, как мягкой, так и твердой, благоприятно влияет на образование соединения при ДС, но недостатком твердой является недостаточная локализация деформаций в зоне стыка, приводящая к повышенным общим деформациям узла.

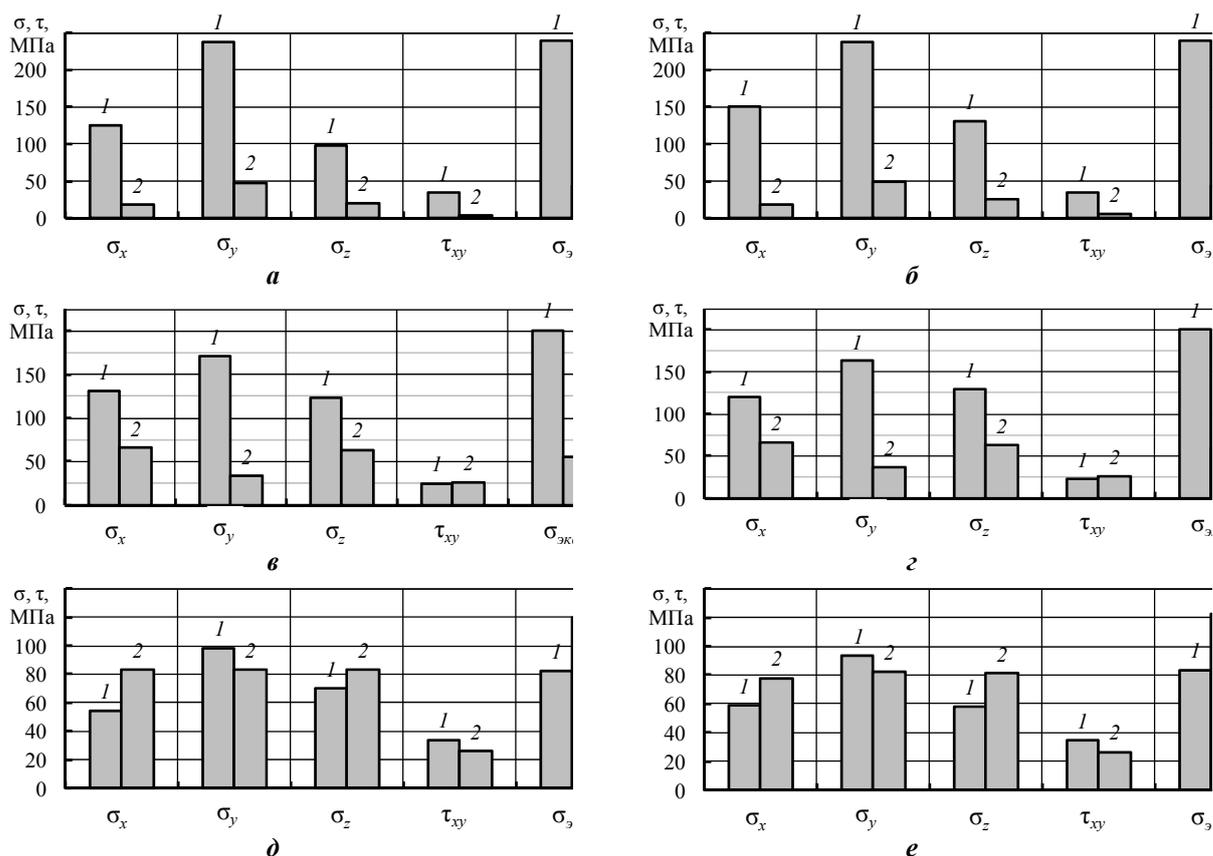


Рис. 2. Сравнение максимальных напряжений в материале 1 (а,б), 2 (в,г) и прослойке (д,е) в узлах Ц-Ц (а,в,д) и В-В (б,г,е) с мягкой (1) и твердой (2) прослойками при температурно-силовом нагружении

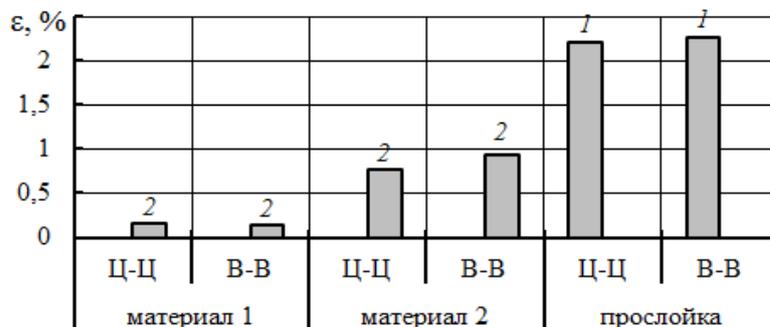


Рис. 3. Сравнение максимальных пластических деформаций в материалах 1, 2 и прослойке в узлах Ц-Ц и В-В с мягкой (1) и твердой (2) прослойками при температурно-силовом нагружении

Список литературы:

1. Квасницкий, В.В. Механика соединений при диффузионной сварке, пайке и напылении разнородных материалов в условиях упругости: монография / В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев, М.В. Матвиенко; под общ. ред. Г.В. Ермолаева. Николаев: НУК, 2017. – 176 с.
2. Махненко В.И. Напряжён-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке материалов с различными физико-механическими свойствами/ В.И. Махненко, В.В. Квасницкий, Г.В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2008. – № 8. – С. 5 – 10.
3. Махненко В.И. Особенности формирования напряжён-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой / В.И. Махненко, В.В. Квасницкий // Автоматическая сварка. – 2009, № 8. – С. 11 – 16.
4. Колесар И.А. Напряжён-деформированное состояние при силовом и температурном нагружении узлов из разнородных сталей с мягкой прослойкой / И.А.Колесар, Г.В.Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2014, №8. – С. 23 – 27.