

УДК 621.791.011

**Квасницкий В. В., Квасницкий В. Ф., Матвиенко М. В., Бутурля Е. А.,
Ермолаев Г. В., Голуб Д. М.**

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В УСЛОВИЯХ УПРУГОСТИ ПРИ ПАЙКЕ И ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ С ПРОСЛОЙКАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ЖЕСТКОСТИ

Для повышения эффективности газовых турбин необходимо повышать рабочую температуру газа, для чего обеспечить жаропрочность и жаростойкость материалов сопловых и рабочих лопаток. Для этого используют жаропрочные дисперсионнотвердеющие с γ' -фазой $Ni_3(Al, Ti)$ литейные никелевые сплавы, которые сварить плавлением без дефектов не удастся из-за резкого падения пластичности и образования трещин при подсолидусных температурах, повторном нагреве или термической обработке. Для повышения жаропрочности используют также направленную или монокристаллическую кристаллизацию, а в последние годы все шире применяются наиболее жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al [1]. При расплавлении такие сплавы теряют свою структуру и свойства. Для соединения указанных материалов наиболее перспективны способы сварки давлением (диффузионная сварка, сварка трением) или пайка. Пайка является более универсальным способом. Так как припой имеет более низкую температуру плавления, чем основной металл, другой состав и свойства, то в соединении он является прослойкой и в зависимости от его состава и толщины может оказывать различное влияние на работу соединения [1]. При диффузионной сварке также часто используют прослойки для активации соединяемых поверхностей, однако их влияние не изучено. Поэтому данная работа является актуальной.

Первые публикации О. А. Бакши о работе неоднородных сварных соединений были в 1962 г., а общая теория прочности сварных соединений, в которой рассматривается работа разных участков сварного соединения, изложена в работе [2]. Особенностью ранних работ является аналитический анализ влияния неоднородности соединений на формирование напряженного состояния, который имеет ограниченные возможности. Первые исследования с использованием компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) при диффузионной сварке разнородных материалов выполнены под руководством акад. НАН Украины, д-ра техн. наук, проф. Махненко В. И. [3].

В последних работах рассмотрены соединения металл-графит и способ снижения собственных напряжений [4] и соединения типа сталь-медный сплав, в которой рассмотрели условия упрочнения и разупрочнения прослойки на основе меди [5].

Моделирование НДС при пайке и диффузионной сварке жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ni_3Al и влияния толщины прослойки TLP-соединения при термическом нагружении рассматриваются впервые.

Цель работы – изучить влияние прослоек различной жесткости толщиной от 0,01 до 0,08 мм на формирование напряжений в зоне соединения при охлаждении, которые могут накладываться на напряжения от внешней нагрузки и существенно влиять на работоспособность соединений.

Объект исследования – формирование НДС в соединениях с прослойками.

Предмет исследования – напряжения осевые, радиальные, окружные, касательные, эквивалентные.

Материалы и методика исследований. Исследование выполнялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS для моделей из жаропрочного материала на основе интерметаллида Ni_3Al .

Для моделирования НДС в упругой стадии при диффузионной сварке с активацией поверхностей жидкой фазой в условиях термического нагружения в диапазоне $1100...1270\text{ }^{\circ}\text{C}$ во всех вариантах для основного металла принято среднее значение модуля упругости $E_{ом} = 0,5 \cdot 10^5$ МПа (после термообработки: $1180\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2$ часа + $1265\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2$ часа / охлаждение на воздухе + $1050\text{ }^{\circ}\text{C} \times 4$ часа / охлаждение на воздухе) от 20 до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приближения модуля упругости к нулю при температуре начала плавления сплава. При этом «мягкие» прослойки имели модуль упругости $0,25 \cdot 10^5$ МПа, т. е. меньший в 2 раза, чем основной металл, «нейтральные» – модуль, одинаковый с основным металлом, и «жесткие» – с модулем упругости $1 \cdot 10^5$ МПа, то есть с большим в 2 раза модулем, чем у основного металла. Коэффициент Пуассона как основного материала, так и прослойки принят по литературным данным равным 0,41.

Коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) также принят на основании линейной экстраполяции имеющихся данных в диапазоне от 20 до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ равным $20,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Учитывая, что упругие деформации при температурах сварки невелики, некоторой погрешностью исходных данных можно пренебречь. Для прослойки принималось меньшее значение КЛТР – $15 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Узел нагружался термической нагрузкой снижением температуры с 1270 до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Интервал температур принят с учетом того, что максимальная допустимая температура нагрева сплава составляет $1270\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассматривались четыре варианта толщины: $0,01$ мм (вариант 1), $0,03$ мм (вариант 2), $0,05$ мм (вариант 3) и $0,08$ мм (вариант 4) со степенью вытянутости (s/d): $0,0005$, $0,0015$, $0,0025$ и $0,004$ соответственно, и три варианта жесткости материала прослойки: «мягкой», «нейтральной» и «жесткой».

Общий вид исследуемых цилиндрических образцов и их конечно-элементных моделей показан на рис. 1.

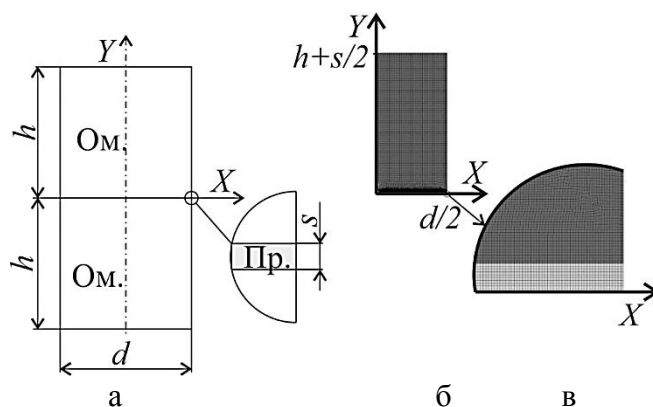


Рис. 1. Общий вид образца с прослойкой (а), сечение конечно-элементной модели (б) и зона сопряжения прослойки с соединяемым металлом (в)

Анализ полей всех составляющих и эквивалентных напряжений, полученных в результате моделирования, показал, что во всех вариантах толщин и жесткостей прослоек на большей части узла напряжения отсутствуют, и только в небольшой зоне, расположенной вблизи прослойки у кромки стыка (у внешней поверхности цилиндра) и в самой прослойке создается сложное НДС, обусловленное разностью свойств соединяемого металла и прослойки.

Сравнение полей напряжений зоны объемного НДС, расположенной у кромки стыка, показывает, что толщина прослойки практически не влияет ни на характер НДС, ни на величину напряжений. При изменении толщины прослойки прямо пропорционально изменяются только размеры этой зоны. Ширина зоны объемного НДС в основном материале так же, как и во всех предыдущих исследованных вариантах, соизмерима с толщиной прослойки.

Протяженность от внешней поверхности узла в основном материале при всех толщинах составляет около 5 толщин прослойки. За пределами этой зоны радиальные, осевые, окружные и касательные напряжения в основном металле становятся пренебрежимо малыми. Материал прослойки на всем ее протяжении находится в объемном напряженном состоянии.

Более наглядными являются эпюры напряжений. Анализ эпюр отдельных составляющих и эквивалентных напряжений подтвердил, что как в соединяемых материалах, так и в прослойке, во всех вариантах толщин на большей части ширины узла (более 90 %) сохраняется практически постоянный уровень напряжений, с изменением только в небольшой зоне у кромки стыка.

Радиальные напряжения в основном металле показаны на рис. 2. Они являются растягивающими и растут с увеличением радиуса и толщины прослойки. Оставаясь близкими к нулю на большей части стыка, у кромки они достигают величин 32, 43 и 60 МПа в узлах с «нейтральной», «мягкой», и «жесткой» прослойками соответственно во всех вариантах толщин. Уровень максимальных напряжений растет практически пропорционально увеличению жесткости прослойки и не зависит от ее толщины. Минимальный уровень максимальных напряжений дает «мягкая» прослойка, максимальный – «жесткая».

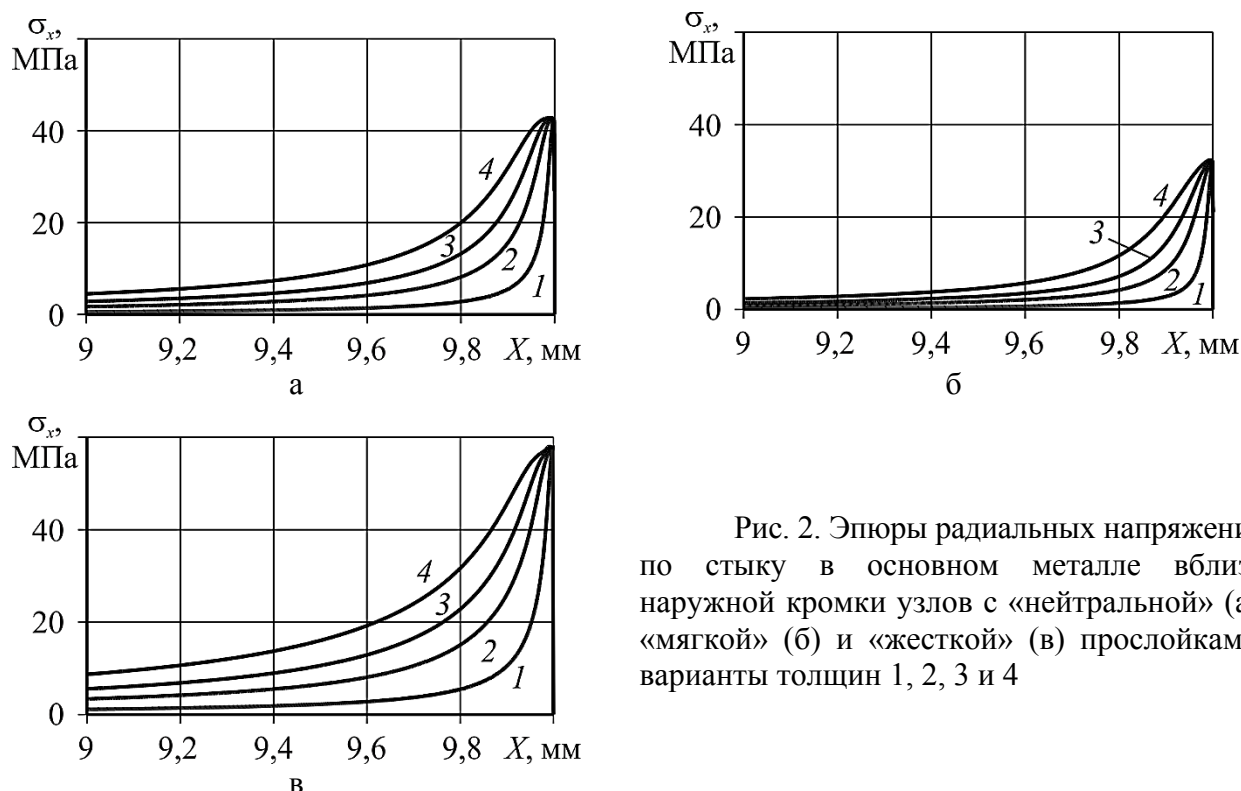


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений по стыку в основном металле вблизи наружной кромки узлов с «нейтральной» (а), «мягкой» (б) и «жесткой» (в) прослойками, варианты толщин 1, 2, 3 и 4

Радиальные напряжения в прослойке показаны на рис. 3. Как в основном металле, так и в прослойке все компоненты напряжений имеют минимальный уровень при «мягкой» прослойке и максимальный – при «жесткой», промежуточный – при «нейтральной». Поэтому ниже приведены эпюры только для «мягкой» и «жесткой» прослоек.

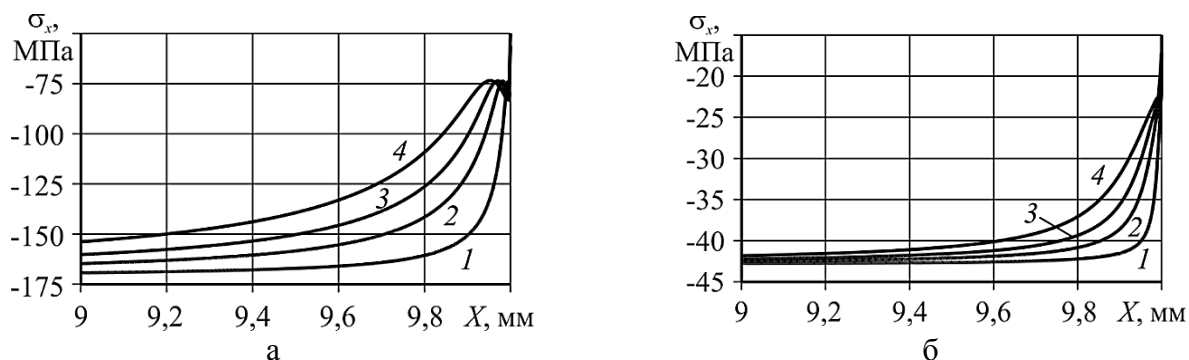


Рис. 3. Эпюры радиальных напряжений по стыку в «жесткой» (а) и «мягкой» (б) прослойках вблизи ее наружной кромки, варианты толщин 1, 2, 3 и 4

Радиальные напряжения у кромки стыка в основном металле и прослойке близки по величине, но противоположны по знаку. По мере удаления от кромки стыка они уменьшаются почти до нуля в основном металле и увеличиваются более чем в 2 раза в материале прослойки. На большей части длины стыка они сохраняют постоянную величину, мало зависящую от толщины прослойки. При этом, чем меньше толщина, тем больше зона нулевых напряжений и меньше зона возрастания, которая от 4 мм при толщине 0,08 мм уменьшается до 0,5 мм, то есть пропорционально толщине, при 0,01 мм. Уровень напряжений как в основном металле, так и прослойке растет с увеличением жесткости прослойки и уменьшается при ее уменьшении по отношению к основному металлу.

Осевые напряжения вдоль большей части стыка как в основном материале, так и прослойке остаются на уровне нуля, появляются и возрастают растягивающие до уровня 18, 42 и 109 МПа в узлах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками только у самой кромки стыка во всех вариантах толщин (рис. 4).

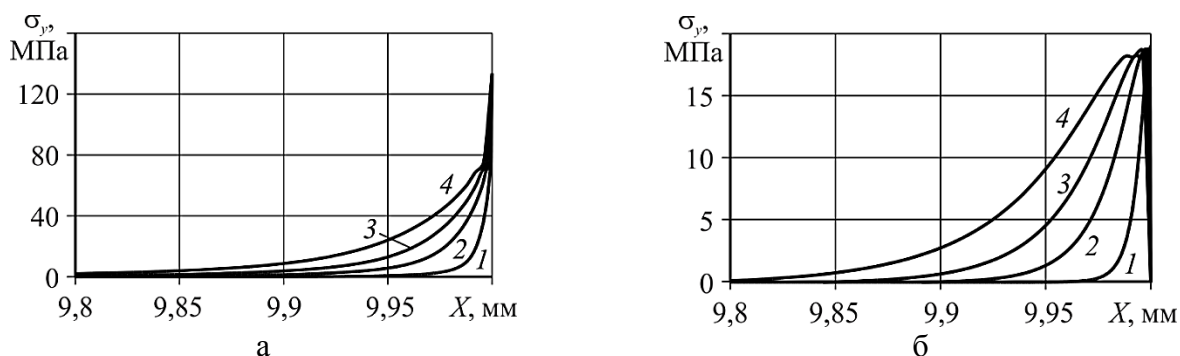


Рис. 4. Эпюры осевых напряжений по стыку основного металла с «жесткой» (а) и «мягкой» (б) прослойках вблизи ее наружной кромки, варианты толщин 1, 2, 3 и 4

Окружные напряжения как в основном материале, так и прослойке вдоль стыка распределены аналогично радиальным. В основном металле они на большей части стыка равны нулю и появляются только у его наружной кромки. Здесь они, как и радиальные, – растягивающие, но уровень их 16, 27 и 48 МПа в узлах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками, то есть ниже радиальных во всех вариантах.

В материале прослойки окружные напряжения – сжимающие, на большей части стыка они остаются на уровне радиальных (–43, –85 и –170 МПа) и уменьшаются у наружной кромки до –31, –56 и –110 МПа, то есть, уровень их несколько выше радиальных во всех вариантах толщин.

Касательные напряжения отсутствуют на большей части длины стыка (около 95 %), и появляются и возрастают только у самой его кромки до 20, 32 и 51 МПа в узлах

с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками во всех вариантах толщин (рис. 5). То есть максимальные касательные напряжения при термическом нагружении увеличиваются с увеличением жесткости прослойки.

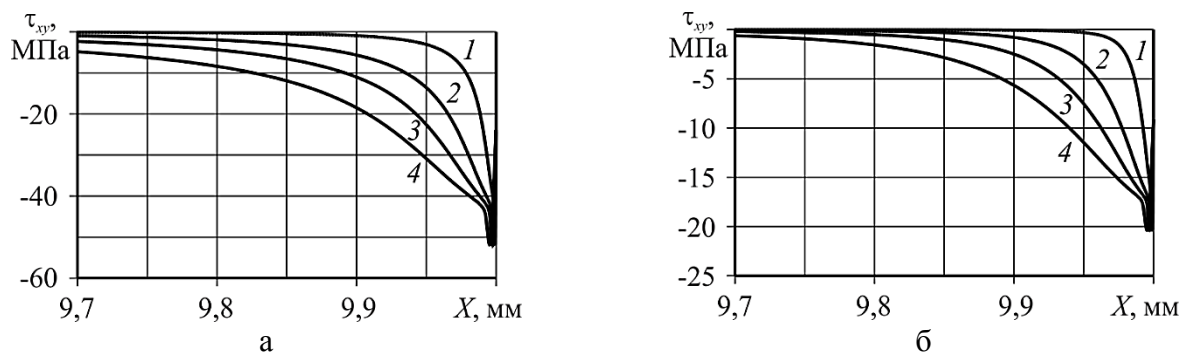


Рис. 5. Эпюры касательных напряжений по стыку основного металла с «жесткой» (а) и «мягкой» (б) прослойках вблизи ее наружной кромки, варианты толщин 1, 2, 3 и 4

В соответствии с отдельными составляющими распределены и эквивалентные напряжения (рис. 6 и 7). Вдоль большей части стыка они постоянны, в основном материале на уровне, близком к нулю во всех вариантах. В прослойке уровень напряжений в этой зоне в узлах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками составляет около 43, 85 и 170 МПа во всех вариантах толщин.

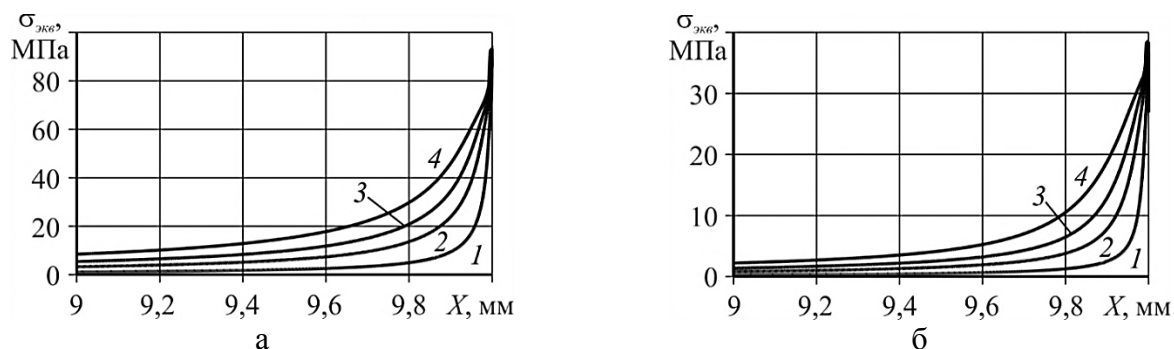


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений по стыку в основном металле вблизи наружной кромки узлов с «жесткой» (а) и «мягкой» (б) прослойками, варианты толщин 1, 2, 3, 4

Только в непосредственной близости от кромки стыка, на расстоянии около 50 толщин прослойки, эквивалентные напряжения в основном металле начинают постепенно возрастать, достигая максимума около 38, 57 92 МПа в узлах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками у самой кромки стыка (рис. 6). В прослойке они, напротив, начинают снижаться до минимума 39, 72 и 132 МПа на расстоянии около 5-ти ее толщин от внешней поверхности узла, но на самой кромке стыка они вновь возрастают, достигая 54, 103 и 200 МПа (рис. 7).

Для оценки влияния объемного НДС на механические свойства (прочность и пластичность) материалов узла использовали коэффициент жесткости напряженного состояния, равный отношению максимальных (по модулю) главных напряжений (при растяжении материала σ_1 , а при сжатии $-\sigma_3$) к эквивалентным $\kappa_{жс} = \sigma_{1(3)}/\sigma_{экв.}$ [3]. При линейном напряженном состоянии (одноосном растяжении-сжатии однородного материала), в условиях которого проводят механические испытания и определяются характеристики прочности и пластичности материалов, коэффициент жесткости $\kappa_{жс} = 1$. В условиях плоского или объемного напряженного состояния, когда коэффициент жесткости становится меньше 1 ($\kappa_{жс} < 1$), уменьшается предел

текучести и увеличивается пластичность, то есть металл разупрочняется. При увеличении коэффициента жесткости ($\kappa_{жс} > 1$) напротив, увеличивается предел текучести и уменьшается пластичность, металл упрочняется.

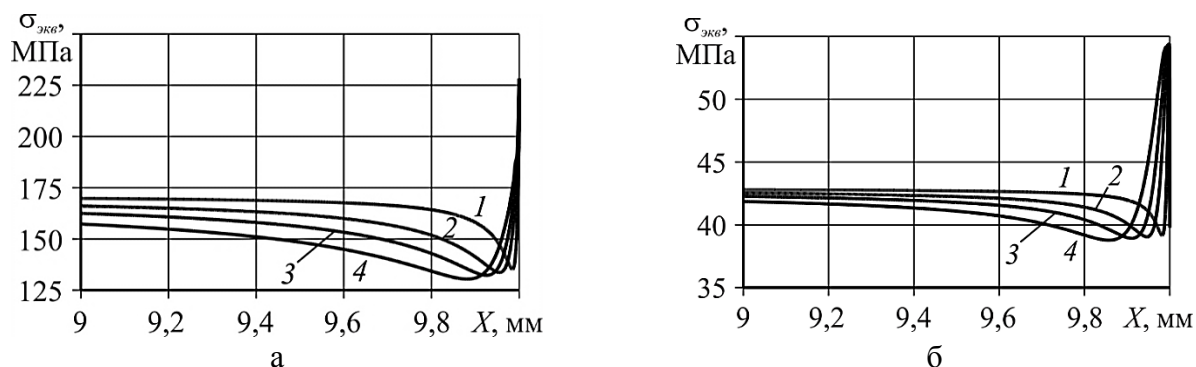


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений по стыку в «жесткой» (а) и «мягкой» (б) прослойках вблизи ее наружной кромки, варианты толщин 1, 2, 3 и 4

На рис. 8, а, б приведены графики изменения коэффициента жесткости в зоне стыка в основном материале и прослойке вдоль стыка. Анализ кривых показывает, что во всех вариантах узлов как в основном материале, так и в прослойках, характер распределения и величина коэффициентов жесткости $\kappa_{жс} = \sigma_3 / \sigma_{экв}$ практически одинаковы во всех вариантах толщин, то есть не зависят от толщины прослойки.

При этом в основном металле на большей части длины стыка в его внутренней части этот коэффициент меньше 1, постепенно увеличиваясь от 0,68 на оси узла до 1 на расстоянии около 1 мм от кромки. У самой кромки стыка он возрастает до 1,35...1,38, то есть, возникающее при термическом нагружении в зоне соединения НДС снижает прочность и повышает пластичность основного металла на большей части длины стыка и приводит к его упрочнению только вблизи наружной поверхности (рис. 8, а).

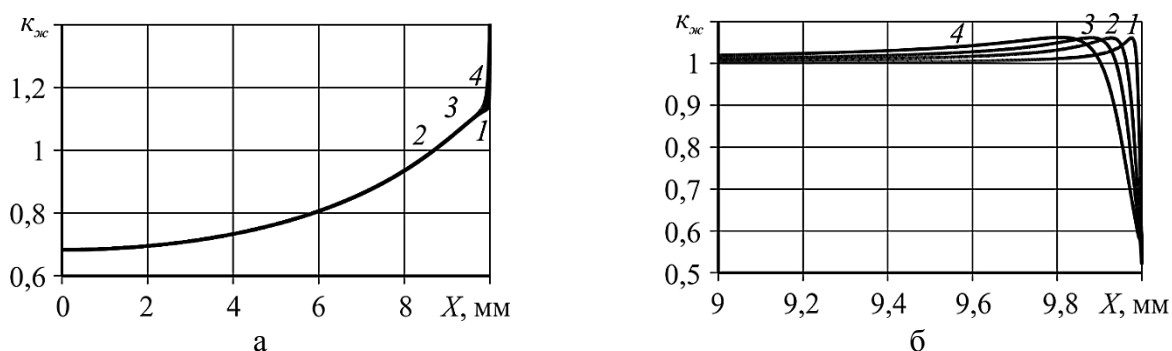


Рис. 8. Изменение коэффициентов жесткости напряженного состояния $\kappa_{жс} = \sigma_1 / \sigma_{экв}$ по стыку в основном металле (а) и «нейтральной» прослойке вблизи кромки стыка (б)

В прослойке на большей части длины стыка коэффициент жесткости остается на уровне 1, и только вблизи кромки стыка он несколько повышается до 1,04...1,08 (рис. 8, б) и резко снижается до 0,55...0,6 только на боковой поверхности узла. При этом жесткость материала прослойки мало влияет на ее коэффициент жесткости. При «нейтральной», «мягкой» и «жесткой» прослойках графики изменения коэффициентов жесткости напряженного состояния совпадают и поэтому приведены только для «нейтральных» прослоек.

В основном металле и в прослойке степень изменения их прочности и пластичности при температурном нагружении практически не зависит от соотношения их жесткостей и толщины прослойки.

ВЫВОДЫ

При термическом нагружении в узлах с прослойкой толщиной 10...80 мкм, с отличающейся от основного металла модулем упругости и КЛТР, вблизи прослойки и внутри нее создается объемное НДС, при котором пропорционально толщине прослойки изменяются только размеры зоны объемного НДС у кромки стыка в основном металле (протяженность от наружной кромки стыка около 5 толщин). Уровень напряжений зависит от соотношения модулей упругости основного металла и прослойки, разности их КЛТР и величины изменения температуры. С уменьшением жесткости материала прослойки по сравнению с основным металлом уровень напряжений и размеры зоны уменьшаются, при увеличении жесткости – увеличиваются. Уровень максимальных напряжений не зависит от толщины прослойки.

Эквивалентные напряжения, определяющие появление пластических деформаций при снижении температуры с 1270 до 1100 °С, вдоль большей части стыка в основном материале близкие к нулю в узлах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками. В прослойке уровень напряжений в этой зоне составляет в узлах с прослойками с малым КЛТР 43, 85 и 170 МПа в вариантах с «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» прослойками соответственно, т. е. растет линейно с увеличением жесткости прослойки ($\sigma_{экс} = 170 \cdot 10^{-5} \cdot E_{пр}$), что свидетельствует о вероятности появления пластических деформаций в прослойке. Уровень напряжения растет пропорционально увеличению разности КЛТР прослойки и основного металла и модуля упругости прослойки по отношению к основному металлу.

При термическом нагружении характер изменения коэффициента жесткости как в основном металле, так и прослойке вдоль стыка практически не зависит от жесткости прослойки. При этом в основном металле на большей части длины стыка в его внутренней части этот коэффициент увеличивается от 0,68 на оси узла до 1,35 ... 1,38 у самой кромки стыка независимо от жесткости прослойки, т. е. НДС узла с отличающимся КЛТР от основного металла снижает прочность и повышает пластичность основного металла на большей части длины стыка и приводит к его упрочнению только вблизи наружной поверхности. В прослойке на большей части длины стыка (до 90 %) коэффициент жесткости напряженного состояния также не зависит от жесткости и толщины прослойки (близок к 1) и резко снижается до 0,55...0,6 на боковой поверхности узла. Таким образом, при термическом нагружении узлов с прослойкой толщина и степень жесткости прослойки по отношению к основному металлу в большую или меньшую сторону не влияют на коэффициент жесткости, а соответственно, и на прочность и пластичность как основного металла, так и прослойки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паяння матеріалів: підручник / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький та ін. ; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НК, 2015. – 240 с.
2. Копельман Л. А. Основы теории прочности сварных конструкций: учебное пособие 2-е издание / Л. А. Копельман. – Санкт-Петербург : Изд. «Лань», 2010. – 464 с.
3. Махненко В. И. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке материалов с разными физико-механическими свойствами / В. И. Махненко, В. В. Квасницький, Г. В. Ермолаев // Сб. тр. четвертой Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 27–30 мая, 2008 г., пос. Кацивели, Украина / Под ред. В. И. Махненко. – Киев : ИЖЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2009. – С. 95–102.
4. Ermolaev G. V. Effect of the Rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under Thermal Loading / G. V. Ermolajev, V. A. Martynenko, S. V. Olekseenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // Strength of Materials. – 2017. – № 49, 3. – P. 422–428.
5. Квасницький В. В. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из однородных материалов с «мягкой» прослойкой при осевой нагрузке / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, Dong Chunlin, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев // Автоматическа сварка. – 2018. – № 4. – С. 7–14.

Статья поступила в редакцию 12.03.2019 г.