

impact on several of the ten roller disks, formulas were obtained for determination of reactive impulses arising in the supports. For the practical use of the received results, the coefficients of the uneven distribution of pressure on the bearings are introduced: μ_1 is equal to the ratio of the larger reactive impulse to the smaller one; μ_2 is equal to the ratio of the larger impulse to impulse with an asymmetrical, relative to the supports, impact. The numerical analyzes of the problem in the case of a three-dimensional slab shear applied on the rolling mill 3000 to the right are carried out. The coefficients are equal: in the case of a wide slab $\mu_1 = 1,8$, $\mu_2 = 1,28$; in the case of the mean $\mu_1 = 2,24$, $\mu_2 = 1,38$; in the case of narrow $\mu_1 = 2,83$, $\mu_2 = 1,47$. These coefficients can be used to formulate reasonable safety margins in the design of bearing assemblies of other rotating bodies with asymmetrical arrangement of the impact forces. The technique used in the article for determining reactive impulses in bearing supports can be applied to a rotating solid body under the action of several impact forces on it, which are located asymmetrically relative to the supports.

Keywords: shock impulse, theorem of impulse, bearing support, roller of live roll.

Рекомендована к публикации: проф., д-р техн. наук Ищенко А. А.

Статья поступила 18.01.2019 г.

УДК 621.791

doi.org/10.31498/2522-9990202019183598

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

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРОСЛОЙКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Методом компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) в пределах упругости под действием осевой нагрузки цилиндрических образцов с «мягкой» и «жесткой» прослойками. «Мягкой» называют прослойку, имеющую меньший модуль упругости, а жесткой – больший по сравнению с модулем основного металла. Установлено, что в небольшой зоне основного металла вблизи внешней поверхности у стыка с прослойкой и в самой прослойке возникает сложное НДС с радиальными, осевыми, окружными и касательными напряжениями. В зависимости от свойств прослойки уровень эквивалентных напряжений изменяется. Показано, что изменение толщины как «мягкой», так и «жесткой» прослоек исследуемых толщин 0,050...0,200 мм не влияет на характер и величину напряжений в зоне объемного НДС, изменяется только протяженность этой зоны, которая составляет около 5 толщин прослойки. Во всех вариантах толщины прослойки в основном материале и в прослойках, характер распределения и величина коэффициентов жесткости напряженного состояния практически одинаковы. Возникающее в зоне соединения НДС практически не влияет на прочность основного металла на большей части длины стыка и приводит к некоторому его разупрочнению («мягкая» прослойка) или упрочнению («жесткая» прослойка) только вблизи наружной поверхности. В «мягкой» прослойке на всей длине стыка металл упрочняется, а в «жесткой» разупрочняется. Увеличение жесткости материала прослойки, по сравнению с основным металлом, способствует появлению и развитию пластических деформаций в ней за счет увеличения эквивалентных напряжений и ее разупрочнения, уменьшение же

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

жесткости материала прослойки, напротив, уменьшает возникающие в ней эквивалентные напряжения и увеличивает ее прочность. Это необходимо учитывать при выборе типа прослойки или припоя для улучшения формирования соединения при диффузионной сварке (пайке) и повышения работоспособности узла.

Ключевые слова: *сварные и паяные узлы, мягкая и жесткая прослойка, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, силовое нагружение, толщина прослойки.*

Постановка проблемы.

Жаропрочные никелевые сплавы являются основным конструкционным материалом, как в авиационном, так и в судовом газотурбиностроении. Для повышения эффективности турбин необходимо повысить рабочую температуру газа, для чего обеспечить жаропрочность и жаростойкость материалов сопловых и рабочих лопаток. Для этого используют механизмы твердорастворного и дисперсионного упрочнения γ' фазой $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. С повышением количества γ' фазы свариваемость сплавов ухудшается, а литейные сплавы сварить плавлением без дефектов не удастся из-за резкого падения пластичности и образования трещин при подсолидных температурах, повторном нагреве или термической обработки. Для повышения жаропрочности используют также направленную или монокристаллическую кристаллизацию, а в последние годы все шире используют 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. Поэтому разработаны ряд новых способов, в частности, пайка с давлением, композиционным припоем, которые в зарубежной литературе получили название TLP-Bonding (transliquidphase) соединения [2].

Так как припой имеет более низкую температуру плавления, чем основной металл, и другой состав, то в соединении он является прослойкой и в зависимости от его состава и толщины может иметь различное влияние на работу соединения. При диффузионной сварке также часто используют прослойки для активации соединяемых поверхностей, однако их влияние не изучено. Поэтому данная работа является актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций.

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 [3]. Особенностью ранних работ является аналитический анализ влияния неоднородности соединений на формирование напряженного состояния, который имеет ограниченные возможности. Первые исследования компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) при диффузионной сварке разнородных материалов выполнены под руководством акад. НАН Украины, д-р техн. наук, проф. Махненко В. И. [4].

В последних работах рассмотрены соединения металл-графит и способ снижения собственных напряжений [5] и соединения типа сталь-медный сплав, в которой рассмотрели условия упрочнения и разупрочнения прослойки на основе меди [6].

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

Цель работы – изучить влияние мягких и жестких прослоек толщиной 0,050...0,200 мм на формирования НДС, которое влияет на образование соединения и его работоспособность при диффузионной сварке жаропрочных сплавов.

Основной материал исследования.

Исследование выполнялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

Исследовалось напряженно-деформированное состояние (НДС) при нагружении сжатием цилиндрических узлов из жаропрочного сплава на основе Ni_3Al через промежуточную прослойку. При этом предполагалось, что все свойства соединяемых материалов одинаковы, а прослойка, отличается от основного металла модулем упругости.

Вследствие симметрии образца относительно середины толщины прослойки модель строилась для верхней половины образца (верхний цилиндр и половина толщины прослойки) с соответствующим закреплением узлов на нижней кромке модели. Размеры модели: цилиндр диаметром $d=20$ мм и высотой $h=20$ мм, половина толщины прослойки $s/2$. Общий вид образца и схема разбивки на конечные элементы (КЭ) модели в целом и области, прилегающей к прослойке, приведена на рис. 1.

Расчет выполнялся для трех вариантов толщин, как с «мягкой», (варианты 1...3), так и «жесткой», (варианты 4...6), прослойками (табл. 1). Во всех вариантах модули упругости основного металла принимались одинаковыми $E_{\text{ом}} = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона, как основного материала, так и прослойки принимался равным 0,3. При этом «мягкие» прослойки имели модуль упругости, меньший, чем у основного металла, а «жесткие» соответственно больший.

Узел нагружался осевой сжимающей нагрузкой 10 МПа. Исходя из общих законов механики, и как это было подтверждено результатами компьютерного моделирования, при изменении (уменьшении или увеличении) нагрузки в упругой стадии прямо пропорционально изменяется и величина всех составляющих напряжений. При смене сжатия растяжением изменяется только знак составляющих напряжений на обратный.

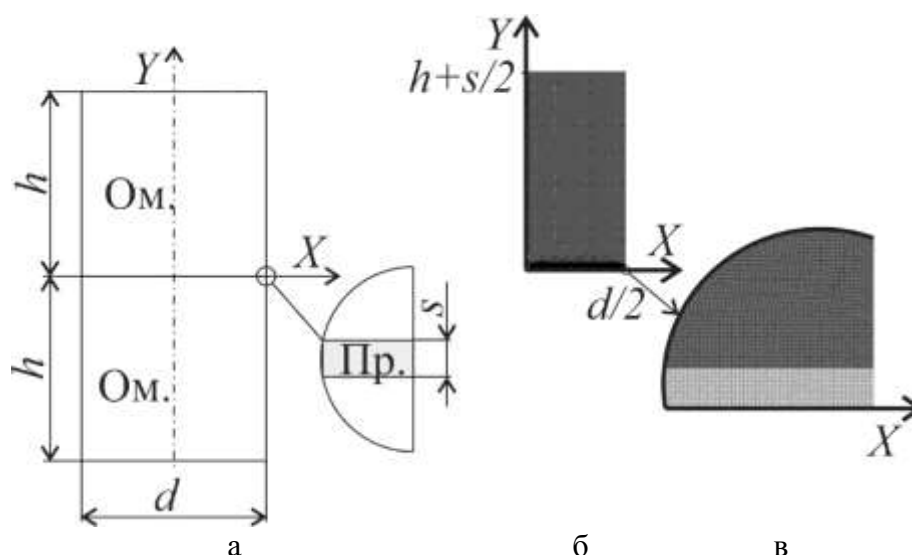


Рисунок 1 – Общий вид образца с прослойкой (а),
сечение конечно-элементной модели (б)
и зона сопряжения прослойки с соединяемым металлом (в)

Таблица 1 – Варианты прослоек исследованных моделей

№ вар	Модуль упругости, Епр, 10 ⁵ МПа	Толщина прослойки, s, мм	Относительная толщина прослойки (степень вытянутости), s/d
1	1,5	0,050	0,0025
2	1,5	0,125	0,00625
3	1,5	0,200	0,010
4	2,5	0,050	0,0025
5	2,5	0,125	0,00625
6	2,5	0,200	0,010

Как показал анализ полей напряжений, на большей части узла в основном материале сохраняется линейный характер НДС, когда существуют только осевые напряжения равные внешнему давлению. Все остальные составляющие равны нулю. Только на небольших участках вблизи прослойки и наружной кромки узла НДС становится объемным.

Сравнение полей всех составляющих и эквивалентных 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 зоны объемного НДС. Ширина зоны объемного НДС в основном материале соизмерима с толщиной прослойки. Ее протяженность от внешней поверхности узла в основном материале при всех толщинах составляет около 5 толщин прослойки.

Анализ эпюр отдельных составляющих и эквивалентных напряжений (рис. 2-5) подтвердил, что как в соединяемых материалах, так и в прослойке, во всех вариантах толщин на большей части длины стыка сохраняется практически постоянный уровень напряжений, с изменением только в небольшой зоне у кромки стыка.

Радиальные напряжения в основном металле – растягивающие в узлах с «мягкой» (рис. 2, а) и сжимающие в узлах с «жесткой» (рис. 2, б) прослойками. Оставаясь близкими к нулю на большей части стыка, они достигают у кромки стыка величины около 0,5...0,6 МПа во всех вариантах, что составляет 5...6 % от приложенных осевых.

В материале прослойки радиальные напряжения, напротив, сжимающие в узлах с «мягкой» и растягивающие в узлах с «жесткой» прослойками. На большей части стыка они на уровне около $\pm 1,1$ МПа во всех вариантах толщин и уменьшаются до $\pm 0,5$ МПа, то есть практически в 2 раза, у кромки стыка (рис. 2, в, г).

Таким образом, при принятом сочетании свойств основного металла и прослойки (разность модулей упругости $E_{ом} - E_{пр} = 0,5 \cdot 10^5$ МПа) максимальные радиальные напряжения составляют около 6 % от приложенной нагрузки в основном металле, 11 % – на большей части прослойки и 5 % у наружной ее кромки.

Окружные напряжения, как в основном материале, так и прослойке вдоль стыка распределены аналогично радиальным. В основном металле они на большей части стыка близки к нулю и появляются только у его наружной кромки. Здесь они, как и радиальные – растягивающие в узлах с «мягкой» и сжимающие в узлах с «жесткой» прослойками, но уровень их несколько ниже. В материале прослойки окружные напряжения соответственно – сжимающие в узлах с «мягкой» и растягивающие в узлах с «жесткой» прослойкой.

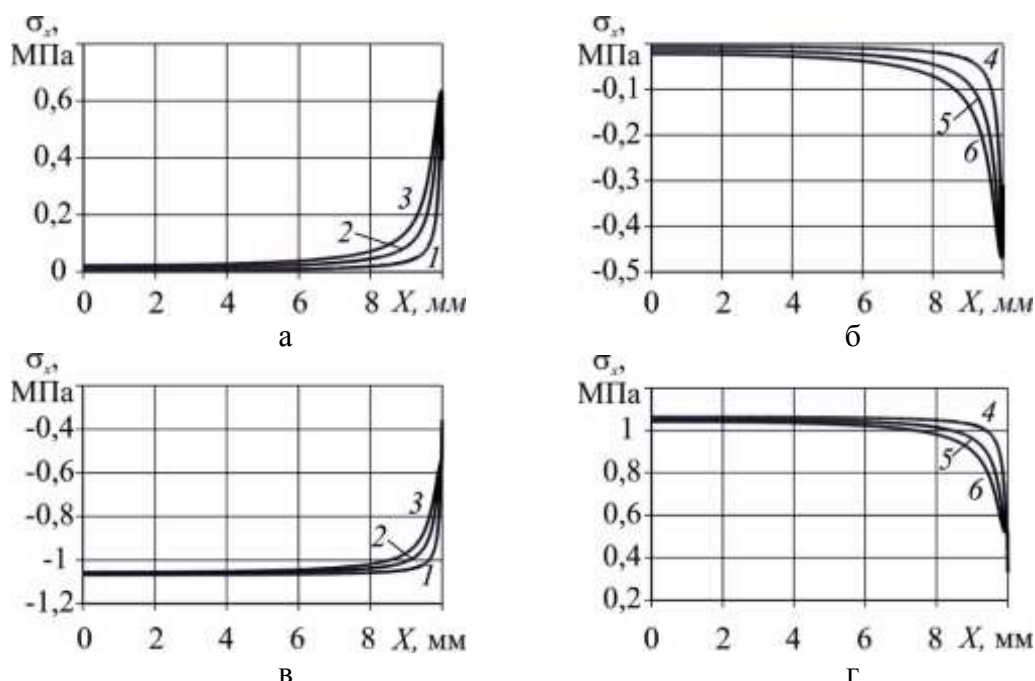


Рисунок 2 – Эпюры радиальных напряжений по стыку в основном металле (а, б) и прослойке (в, г) в узлах с «мягкой» (а, в) и «жесткой» (б, г) прослойками

Таким образом, при принятом сочетании свойств основного металла и прослойки (разность модулей упругости $E_{ом} - E_{пр} = 0,5 \cdot 10^5$ МПа) максимальные радиальные напряжения составляют около 6 % от приложенной нагрузки в основном металле, 11 % – на большей части прослойки и 5 % у наружной ее кромки.

Окружные напряжения, как в основном материале, так и прослойке вдоль стыка распределены аналогично радиальным. В основном металле они на большей части стыка близки к нулю и появляются только у его наружной кромки. Здесь они, как и радиальные – растягивающие в узлах с «мягкой» и сжимающие в узлах с «жесткой» прослойками, но уровень их несколько ниже. В материале прослойки окружные напряжения соответственно – сжимающие в узлах с «мягкой» и растягивающие в узлах с «жесткой» прослойкой.

Осевые сжимающие напряжения вдоль большей части стыка, как в основном материале, так и в прослойке, остаются на уровне приложенного давления, то есть –10 МПа и уменьшаются у кромки стыка до –9,5 МПа в узлах с «мягкой» прослойкой и увеличиваются до –10,6 МПа в узлах с «жесткой» (рис. 3, а, б).

Касательные напряжения также отсутствуют на большей части длины стыка (около 90 %), и появляются и возрастают только у самой его кромки до 0,4...0,45 МПа во всех вариантах (рис. 4). То есть максимальные касательные напряжения составляют около 5 % приложенных осевых.

В соответствии с отдельными составляющими распределены и эквивалентные напряжения. Вдоль средней части стыка они постоянны, в основном материале на уровне, близком к приложенной нагрузке 10 МПа во всех вариантах (рис. 4, а, б). В прослойке уровень напряжений в этой зоне в узлах с «мягкой» прослойкой около 8,95 МПа, то есть меньше, чем в основном металле, на 10 %, и около 11 МПа в узлах с «жесткой» прослойкой, то есть больше, чем в основном металле, на 10 % (рис. 4, в, г).

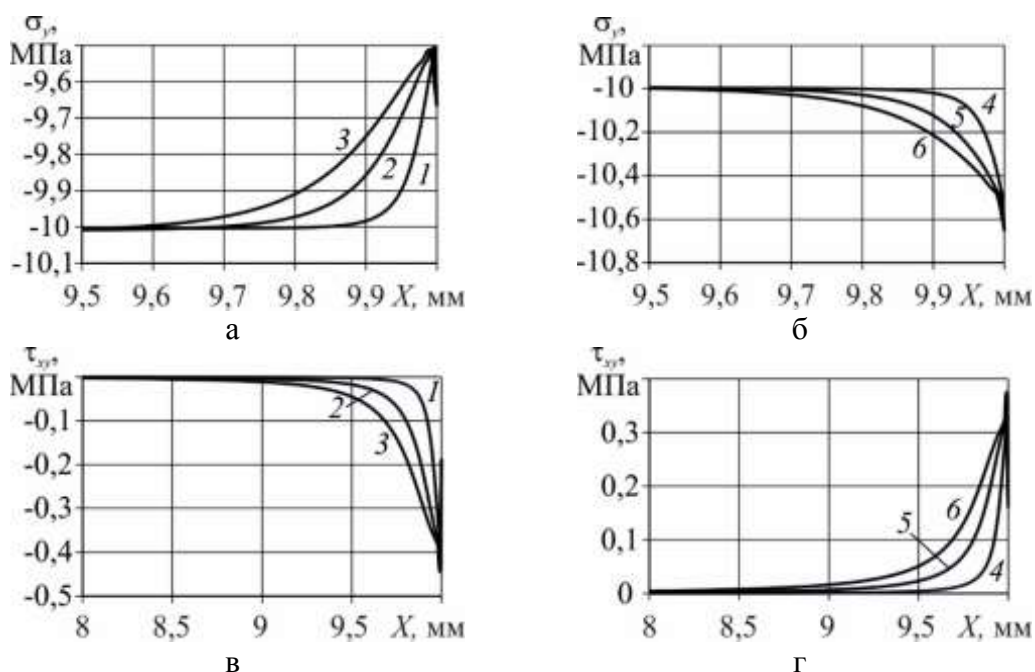


Рисунок 3 – Эпюры осевых (а, б) и касательных (в, г) напряжений по стыку основного металла и прослойки вблизи его кромки в узлах с «мягкой» (а, в) и «жесткой» (б, г) прослойками

По мере приближения к кромке стыка, на расстоянии около 10 толщин прослойки, эквивалентные напряжения несколько возрастают, в узлах с «мягкой» прослойкой достигая 10,25...10,28 МПа в основном металле (рис. 4, а) и 9,11...9,13 МПа в прослойке (рис. 4, в), и в узлах с «жесткой» прослойкой соответственно несколько уменьшаются до 9,8 МПа в основном металле и увеличиваются до 10,8 МПа в прослойке.

По эпюрам эквивалентных напряжений хорошо видно, что при изменении относительной толщины прослойки (s/d) в пределах 0,0025...0,010 уровень эквивалентных напряжений незначительно, но изменяется, как в средней части стыка, так и у его кромки: несколько увеличивается с ростом толщины прослойки в основном металле и уменьшается в металле прослойки в узлах, как с «мягкой», так и с «жесткой» прослойками.

Для оценки влияния объемного НДС на прочность материала удобно использовать коэффициент жесткости напряженного состояния, равный отношению максимальных главных напряжений (при растяжении узла σ_1 , а при сжатии – σ_3) к эквивалентным $k_j = \sigma_1(3)/\sigma_{экв}$ [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 $k_j = 1$. В условиях плоского или объемного напряженного состояния, когда коэффициент жесткости становится меньше 1 ($k_j < 1$), уменьшается предел текучести и увеличивается пластичность, то есть металл разупрочняется. При увеличении коэффициента жесткости ($k_j > 1$) напротив, увеличивается предел текучести и уменьшается пластичность, металл упрочняется.

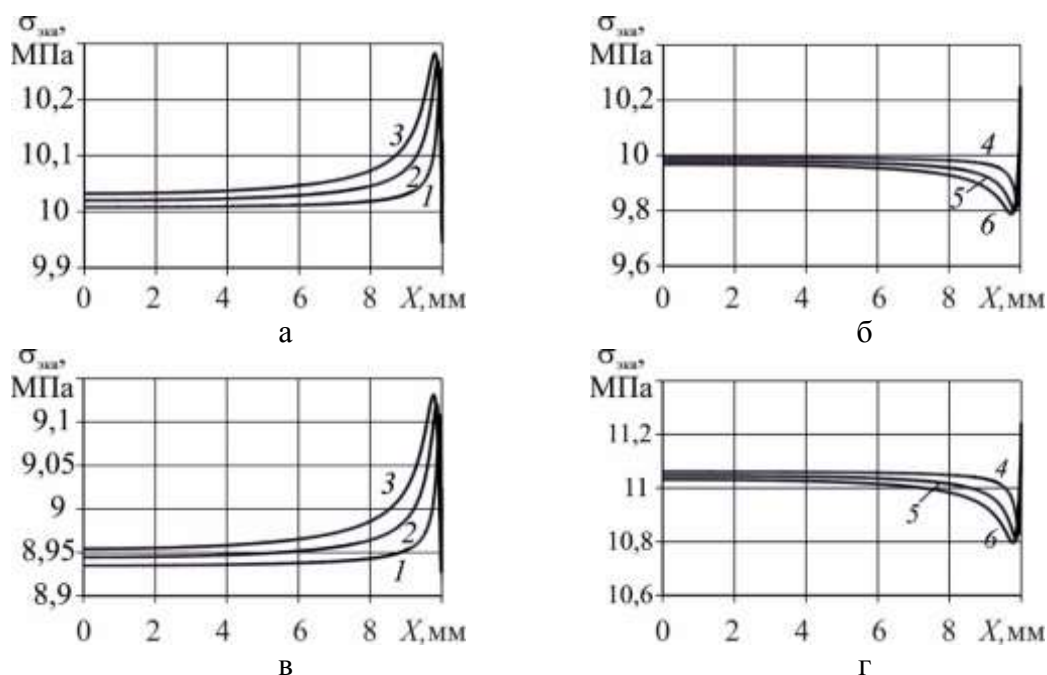


Рисунок 4 – Эпюры эквивалентных $\sigma_{экв}$ напряжений по стыку в основном металле (а, б) и прослойке (в, г) в узлах с «мягкой» (а, в) и «жесткой» (б, г) прослойками

На рис. 5 приведены графики изменения коэффициента жесткости в зоне стыка в основном материале (а, б) и прослойке (в, г) вдоль всего стыка. Анализ кривых показывает, что во всех вариантах узлов, как в основном материале, так и в прослойках, характер распределения коэффициентов жесткости $k_{ж} = \sigma_3 / \sigma_{экв}$ практически одинаков. При этом в основном металле на большей части длины стыка (до 80 %) этот коэффициент близок к 1 (рис. 5, а, б).

Возникающее в зоне соединения НДС мало влияет на прочность основного металла на большей части длины стыка и приводит к его некоторому разупрочнению в узлах с «мягкой» прослойкой и упрочнению в узлах с «жесткой» только вблизи наружной поверхности, где коэффициент жесткости снижается соответственно до 0,95 или увеличивается до 1,04 (рис. 5, а, б). Это объясняет экспериментально установленный факт, что при сжатии в процессе диффузионной сварки наиболее благоприятные условия для образования соединения создаются на периферии стыка в узлах с «мягкой» прослойкой.

В прослойке картина иная, в узлах с «мягкой» прослойкой на всей длине стыка ее металл упрочняется, коэффициент жесткости здесь повышается до 1,12 (рис. 5, в). И только на кромке стыка он несколько ниже: 1,06. Такое НДС также не способствует образованию соединения при ДС по традиционной технологии. В узлах с «жесткой» прослойкой напротив, на всей длине стыка металл прослойки разупрочняется, коэффициент прочности остается на уровне 0,905, несколько увеличиваясь только у кромки до 0,95 (рис. 5, г).

Таким образом, с точки зрения образования соединения оптимальным можно считать вариант прослойки из материала, имеющего жесткость (модуль упругости) больше, чем основной металл, а прочность (предел текучести) меньше. С целью повышения работоспособности узла, механических свойств прослойки (припоя) и приближением этих свойств к характеристикам основного металла необходимо использовать прослойку с меньшей жесткостью (модулем упругости) и большей прочностью (пределом текучести), чем у основного металла.

Машинобудування і зварювальне виробництво

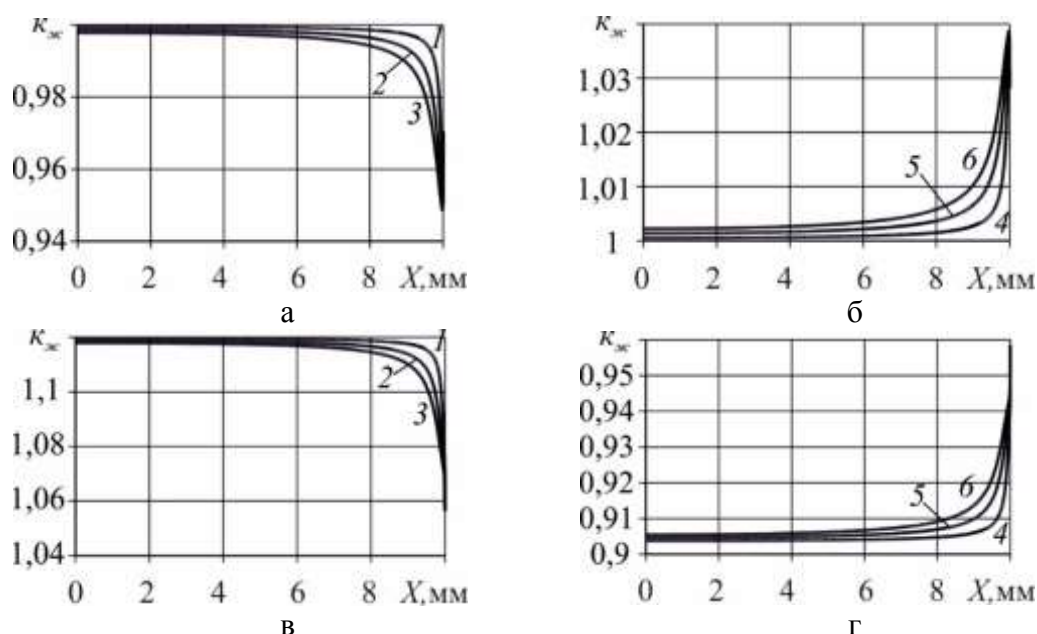


Рисунок 5 – Изменение коэффициентов жесткости напряженного состояния $k_{ж} = \sigma_3 / \sigma_{экв}$ по стыку в основном металле (а, б) и прослойке (в, г) в узлах с «мягкой» (а, в) и «жесткой» (б, г) прослойками

ВЫВОДЫ

1. Сравнение полей всех составляющих и эквивалентных напряжений зоны объемного НДС, расположенной у кромки стыка, показывает, что толщина «мягкой» и «жесткой» прослоек практически не влияет на характер НДС и величину напряжений, изменяются только размер этой зоны. Ее протяженность от внешней поверхности узла в основном материале и в прослойке, при всех толщинах и обеих жесткостях, составляет около 5 толщин прослойки. За пределами этой зоны радиальные, окружные и касательные напряжения пренебрежимо малы, НДС остается практически линейным, с осевыми, максимальными главными и эквивалентными напряжениями, равными приложенному осевому давлению.

2. Уровень максимальных радиальных и окружных напряжений в зоне объемного НДС в основном металле составляет около 5...6 % от приложенной нагрузки. На большей части прослойки их уровень около 11 % от приложенной осевой нагрузки. Осевые напряжения вдоль большей части стыка в основном материале и прослойке остаются на уровне приложенного давления и уменьшаются или увеличиваются около 5 % в узлах с «мягкой» и «жесткой» прослойкой только у кромки стыка. Касательные напряжения отсутствуют на большей части длины стыка (около 95 %) и появляются только у самой его кромки (4 % от приложенного осевого давления). Эквивалентные напряжения вдоль большей части стыка постоянны, в основном материале на уровне, близком к 10 МПа во всех вариантах. В прослойке уровень напряжений в этой зоне ниже или выше, чем в основном металле, более чем на 10 % в узлах с «мягкой» и «жесткой» прослойками соответственно. Только в непосредственной близости от кромки стыка, на расстоянии около 10 толщин прослойки, эквивалентные напряжения несколько возрастают в основном металле и уменьшаются в прослойке на 2...3 %.

3. Во всех вариантах толщины прослойки, в основном материале и в прослойках, характер распределения и величина коэффициентов жесткости напряженного состояния

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

$k_j = \sigma_3 / \epsilon_{kv}$ практично однакови. В основному металі на більшій частині довжини стыка цей коефіцієнт близький до 1, знижуючись до 0,95 в узлах з «м'яккою» і збільшуючись до 1,04 в узлах з «жесткою» прослойкою тільки у самій кромки стыка. Тобто, виникаюче в зоні з'єднання НДС практично не впливає на міцність основного металу на більшій частині довжини стыка і призводить до деякого його розупрочнення або упрочнення, в залежності від прослойки, тільки поблизу зовнішньої поверхності, де коефіцієнт жорсткості знижується або підвищується. В прослойці на всій довжині стыка метал «м'яккою» прослойки упрочнюється, коефіцієнт жорсткості тут підвищується до 1,12, а «жесткою» розупрочнюється, коефіцієнт жорсткості знижується до 0,905. І тільки на кромці стыка він декілька нижче (1,06) в узлах з «м'яккою» прослойкою і вище (0,95) в узлах з «жесткою».

4. Збільшення жорсткості матеріалу прослойки, по порівнянню з основним металом, сприяє виникненню і розвитку пластичних деформацій за рахунок збільшення еквівалентних напружень в ній і її розупрочнення. Зменшення жорсткості матеріалу прослойки зменшує еквівалентні напруження в ній і збільшує межу текучості, що підвищує механічні властивості прослойки (припою) і наближає ці властивості до характеристик основного металу. Це необхідно враховувати при виборі типу прослойки для покращення формування з'єднання при дифузійній зварці (пайці) і підвищення робочості вузла.

Список використаних джерел:

1. Каблов, Е. Н. Стратегічні напрями розвитку матеріалів і технологій їх переробки на період до 2030 року / Е. Н. Каблов // Авіаційні матеріали і технології. – 2012. – № 8. – С. 7–17.
2. Паяння матеріалів : підручник / Г. В. Єрмолаєв [та ін.]; за заг. ред. В. Ф. Хорунова, В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НУК, 2015 – 240 с.
3. Копельман, Л. А. Основи теорії міцності зварних конструкцій : учеб. посібник / Л. А. Копельман. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2010. – 464 с.
4. Махненко, В. І. Напружено-деформоване стан при дифузійній зварці матеріалів з різними фізико-механічними властивостями / В. І. Махненко, В. В. Квасницький, Г. В. Єрмолаєв // Математичне моделювання і інформаційні технології в зварці і родственных процесах : сб. тр. четвертой междунар. конф. (Кацивели, 27–30 мая 2008 г.). – Киев, 2009. – С. 95–102.
5. Effect of the Rigid interlayer thickness on the stress-strain of metal-graphite assemblies under Thermal Loading / G. V. Ermolaev, V. A. Martynenko, S. V. Olekseenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // Strength of Materials. – 2017. – Vol. 49, N 3. – P. 422–428.
6. Напружене стан зварних і паяних вузлів з однорідних матеріалів з м'якою прослойкою при осевій навантаженні / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, Dong Chunlin, М. В. Матвієнко, Г. В. Єрмолаєв // Автоматична зварка. – 2018. – № 4. – С. 7–14.

**Квасницький В. В., Матвієнко М. В., Бутурля Є. О.,
Квасницький В. Ф., Єрмолаєв Г. В.**

ВПЛИВ ТОВЩИНИ ПРОШАРКУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЗВАРНИХ І ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Методом комп'ютерного моделювання досліджено напружено-деформований стан (НДС) в межах пружності під дією осевого навантаження циліндричних зразків з «м'яким»

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

Машинобудування і зварювальне виробництво

і «жорстким» прошарками. «М'яким» називають прошарок що має менший модуль пружності, а жорстким - більший у порівнянні з модулем основного металу. Встановлено, що в невеликій зоні основного металу поблизу зовнішньої поверхні у стику з прошарком і в самому прошарку виникає складне НДС з радіальними, осьовими, окружними та дотичними напруженнями. Залежно від властивостей прошарку рівень еквівалентних напружень змінюється. Показано, що зміна товщини як «м'якого», так і «жорсткого» прошарків досліджуваних товщин 0,050...0,0200 мм не впливає на характер і величину напружень в зоні об'ємного НДС, змінюється тільки протяжність цієї зони, яка становить близько 5 товщин прошарку. У всіх варіантах товщини прошарку в основному матеріалі і в прошарках, характер розподілу і величина коефіцієнтів жорсткості напруженого стану практично однакові. Виникаюче в зоні з'єднання НДС практично не впливає на міцність основного металу на більшій частині довжини стику і призводить до деякого його знеміцнення («м'який» прошарок) або зміцнення («жорсткий» прошарок) тільки поблизу зовнішньої поверхні. У прошарку на всій довжині стику метал «м'якого» прошарку зміцнюється, а «жорсткого» знеміцнюється. Збільшення жорсткості матеріалу прошарку, в порівнянні з основним металом, сприяє появі та розвитку пластичних деформацій в ньому за рахунок збільшення еквівалентних напружень і його знеміцнення, зменшення ж жорсткості матеріалу прошарку, навпаки, зменшує виникаючі в ньому еквівалентні напруження і збільшує його міцність. Це необхідно враховувати при виборі типу прошарку або припою для поліпшення формування з'єднання при дифузійному зварюванні (паяні) і підвищення працездатності вузла.

Ключові слова: зварні і паяні вузли, м'який і жорсткий прошарок, комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан, силове навантаження, товщина прошарку.

Kvasnitsky V.V., Matvienko M.V., Buturlya E.A., Kvasnitsky V.F., Ermolaev G.V.

**THE INFLUENCE OF THE INTERLAYER THICKNESS INTO THE
STRESS-STRAIN STATE OF THE WELDED AND SOLDERED JOINTS
OF THE HEAT-RESISTANT ALLOYS**

The stress-strain state (SSS) has been researched by the method of the computer modeling in the limits of the elasticity under the influence of the axis load of the cylinder samples with «soft» and «hard» interlayer. «Soft» is the interlayer with less module of elasticity, and «hard» is the interlayer with bigger modulus of elasticity that the module of the base metal. It was established that the complex SSS with radial, axis and tangential tension has been received in the small zone of the base metal near the external surface of the joint with the interlayer and in the interlayer too. The level of the equivalent tension is changed depending on the interlayer characteristics. It was showed that the thickness change of the «soft» and «hard» inter-layers of the researched thickness 0,050...0,200 mm does not impact into the character and the value of tension of the volume SSS. It is changed only the duration of this zone which is about 5 thicknesses of the interlayer. In all cases the interlayer thickness in the base material and in the interlayers, the character of the distribution and the value of SSS coefficients of hard-ness are equal practically. The appeared in the zone of the connection SSS practically does not influence into strength of the base metal on the biggest part of the joint length. It leads to the softening of the metal («soft» inter-layer) or the hardening («hard» interlayer) near the external surface. In the interlayer on the joint length, the metal of the «soft» interlayer is hardening, and the metal of «hard» interlayer is softening. The increase of the interlayer material stiffness, comparing with the base metal, contributes the appearance and the development of the plastic deformation due to the increase of the equivalent tension its softening,

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

the decrease of the interlayer material stiffness, decreases the appeared in it the equivalent tension and increases its strength. It is necessary to take into account during the choice of the inter-layer type or the solder for the improvement of the joint formation at the diffuse welding and soldering.

Keywords: *the welded and soldered joints, the soft and hard interlayer, the computer modeling, the stress-strain state, the force loading, the interlayer thickness.*

Рекомендовано до публікації: д-р техн. наук Коростильов Леонтій Іванович
Стаття надійшла 14.02.2019 р.

УДК 621.833

doi.org/10.31498/2522-9990202019183628

Ключко О. О., Рассохін Д. О., Пермінов Є. В.,
Хорошайло В. В., Кравченко Д. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОВЩИНИ МАСТИЛЬНОГО ШАРУ ДЛЯ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ З НЕНЬЮТОНІВСЬКОЮ РОБОЧОЮ РІДИНОЮ ПРИ КОНТАКТУВАННІ КОЖНОГО ЗУБА ВЕДУЧОЇ ШЕСТЕРНІ З КОЖНИМ ЗУБОМ ВЕДЕНОГО КОЛЕСА В ПЕВНІЙ ПОСЛІДОВНОСТІ

У статті проведені дослідження мастил для порівняння теоретичних і експериментальних результатів при неньютонівському стані робочої рідини і визначені їх реологічні характеристики, способи вимірів товщини мастильного шару для зубчастих передач з неньютонівською робочою рідиною при контактуванні кожного зуба ведучої шестерні з кожним зубом веденого колеса в певній послідовності. Розроблено непрямий метод виміру товщини масляного шару в залежності від ємності конденсатора у вигляді циліндричних зубчастих коліс, що зачіпляються, при наявності гарантованого зазору, який утворюється при переході масла з неньютонівського в неньютонівський стан і виконує роль електроліту конденсатора.

Встановлена наявність постійної товщини масляного шару і передача крутного моменту циліндричних зубчастих коліс, що зачіпляються, без безпосереднього контакту евольвентних поверхонь дозволяє гарантувати формування евольвенти, що апроксимують методом адаптації, що дає можливість використовувати швидкісні зубчасті передачі з заміною високого ступеня точності (5, 6, 7 ГОСТ 1643-81) на ступені точності 8, 9, 10 ГОСТ 1643-81 без застосування зубошліфування. Для зубчастих коліс 8, 9, 10 ГОСТ 1643-81 ступеня точності зубошліфування можливо замінити на лезову обробку.

Ключові слова: мастила, неньютонівський стан, робоча рідина, реологічні характеристики, товщина мастильного шару, зубчасті передачі, евольвента, яку апроксимують.

Вступ. Для зубчатих коліс з гідрокишеннями з неньютонівською робочою рідиною отримані теоретичні та практичні результати, що призводять до таких конфігурацій мастильних шарів [1, 2, 3, 4], у яких у багато разів більше несуча здатність, ніж в разі недеформованих поверхонь при контактуванні кожного зуба ведучої шестерні з кожним зубом веденого колеса в певній послідовності. Тому потрібна досвідчена перевірка теорії з безпосереднім виміром не тільки товщини мастильного шару в одній будь-якій точці зони контакту, але і всієї форми зазору між поверхнями, що труться під час роботи.

Форма зазору в результаті деформації має складний вид, в зв'язку з чим доцільно вимірювати товщину шару не дискретно, а безперервно по всій зоні області тертя.

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>