

УДК 621.791.011

Матвиенко М. В., Квасницкий В. В., Голуб Д. М.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРОСЛОЙКИ ПРИ TLP-СОЕДИНЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ В ПРОЦЕССЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Наиболее универсальным способом соединения современных жаропрочных сплавов газовых турбин является процесс пайки, получивший в иностранной литературе название TLP-соединение (Transient Liquid Phase Bonding) с применением жидкой фазы (припоев) различных систем и составов, в том числе композиционных, обеспечивающих заполнение зазоров различной величины, использование процессов растворения основного металла и диффузии, что позволяет достичь длительной высокотемпературной прочности соединений до 80 % прочности основного металла [1]. Паяный шов является промежуточной прослойкой с отличающимися от основного металла физико-механическими свойствами (ФМС). Это приводит к формированию сложного напряженного состояния в зоне стыка, влияющего на работоспособность соединений [2, 3]. Чем больше отличия ФМС, тем сложнее проблемы соединения [4]. Формирование НДС узлов зависит от многих факторов, которые можно учесть только при компьютерном моделировании [5]. В деталях, работающих при высоких температурах, факторов влияния на НДС соединений намного больше. Поэтому компьютерное моделирование НДС с учетом влияния деформаций ползучести является актуальным.

Применительно к соединениям жаропрочных сплавов в последнее время опубликовано несколько работ, в частности [6]. Формирование НДС в узлах из жаропрочных сплавов рассмотрено в работах [7, 8]. Это тезисы докладов во Львове и Киеве.

Моделирование НДС в условиях упругости было рассмотрено в работе [9], но известно [3], что наиболее точные результаты дает моделирование с учетом деформаций ползучести, если узел работает при высоких температурах.

Цель настоящей работы – исследование влияния пластических деформаций ползучести прослойки на НДС узлов жаропрочных сплавов при TLP-соединении в процессе охлаждения ступенчатым способом.

Исследование влияния сочетания свойств прослойки и основного металла проводилось на цилиндрических моделях (рис. 1) с одинаковыми высотой и диаметром  $h = d = 20$  мм, при толщине прослойки  $s = 0,08$  мм.

Свойства основного металла, кроме предела текучести, во всех вариантах принимались одинаковыми, постоянными в интервале температур охлаждения: модуль упругости  $E_{\text{ом}} = 0,5 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,4$ , коэффициент упрочнения при пластическом деформировании материала  $\kappa_{\text{пл}} = 0,5 \cdot 10^2$  МПа, коэффициент линейного термического расширения КЛТР  $= 21 \cdot 10^{-6}$  1/град. При этом предел текучести (условный)  $\sigma_{p0.2}$  принят линейно уменьшающимся от 150 МПа при 1100 °С до 0 при температуре 1270 °С.

Скорость ползучести рассчитывалась по уравнению Нортона:

$$\dot{\epsilon}_{\text{cr}} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T}$$

где  $\sigma$  – напряжения, Па;

$T$  – температура, К.

Коэффициенты ползучести  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  для основного металла получены на основании обработки кривых ползучести:  $C_1 = 4,524 \cdot 10^{-29}$ ,  $C_2 = 6,51$ ,  $C_3 = 92840,8$ .

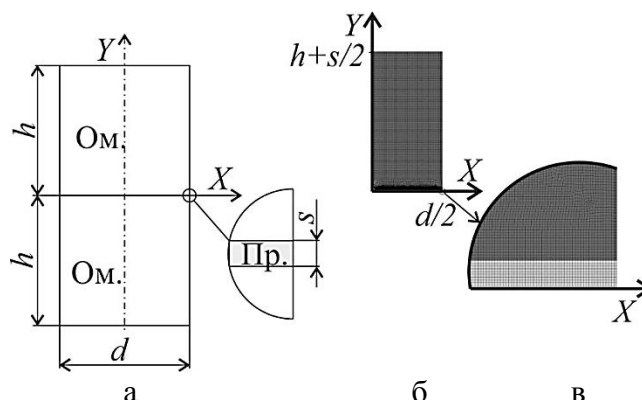


Рис. 1. Общий вид образца с прослойкой (а), сечение конечно-элементной модели (б) и зона сопряжения прослойки с соединяемым металлом (в)

Рассматривались варианты узлов с прослойками, имеющими физико-механические свойства, иные, чем у основного металла: КЛТР меньше в 2 раза ( $10,5 \cdot 10^{-6}$  1/град) и больше в 2 раза ( $42 \cdot 10^{-6}$  1/град), чем у основного металла; с меньшим пределом текучести (0,85 от предела текучести основного металла), с меньшим, чем у основного металла, на 15 и 30 % сопротивлением ползучести.

Скорость ползучести материала прослойки рассчитывалась по тому же уравнению, что и в основном металле, при этом коэффициенты  $C_1$  увеличивались с учетом снижения сопротивления ползучести и принимались соответственно равными  $5,203 \cdot 10^{-29}$  и  $5,881 \cdot 10^{-29}$ . Модуль упругости материала прослойки и коэффициент Пуассона во всех вариантах принимались одинаковыми с основным металлом:  $E_{пр} = 0,5 \cdot 10^5$  МПа и  $\mu = 0,4$ .

Исследованные варианты узлов с различными свойствами (КЛТР и сопротивление ползучести) прослойки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты свойств материала прослойки исследуемых узлов

Вариант	КЛТР, $10^{-6}$ 1/°C	Сопротивление ползучести по отношению к основному металлу	Время охлаждения, с
1	10,5	-	0
2	10,5	0,85	60+540
3	10,5	0,7	60+540
4	42	-	0
5	42	0,85	60+540
6	42	0,7	60+540

Исследовалось НДС узлов при термическом нагружении снижением температуры от 1270 до 1100 °C в течение 60 с с последующей выдержкой при 1100 °C в течение 540 с. Результаты сравнивались с вариантами быстрого охлаждения без учета ползучести (варианты 1 и 4). При этом учитывалась возможность пластического деформирования как прослойки, так и основного металла.

Анализ полей всех составляющих и эквивалентных напряжений показал, что характер их во всех вариантах сохраняется, несколько изменяется только их величина. Так же, как и при быстром охлаждении (варианты 1 и 4), на большей части узла напряжения невелики, и только в небольшой зоне, расположенной вблизи прослойки у кромки стыка (у внешней поверхности цилиндра), и в самой прослойке создается сложное НДС, обусловленное разностью КЛТР соединяемого металла и прослойки. При этом уровень напряжений в вариантах с ускоренным охлаждением с последующей выдержкой несколько ниже, чем при быстром охлаждении.

Ускоренное охлаждение в течение 60 с с последующей выдержкой при 1100 °С в течение 540 с снижает напряжения в прослойке и в небольшой зоне основного металла вблизи ее кромки за счет деформаций ползучести в прослойке. При этом изменение степени сопротивления ползучести прослойки по сравнению с основным металлом в принятых пределах (0,85 или 0,7) практически не играет роли. Возникающие деформации ползучести мало влияют на характер поля напряжений. Варианты 1...3 (с прослойкой с малым КЛТР) отличаются от вариантов 4...6 (с прослойкой с большим КЛТР) только уровнем и обратным знаком напряжений.

Несколько иная закономерность изменения полей пластических деформаций, кратковременных и ползучести.

В вариантах 1, 2 и 3 с меньшей разностью КЛТР прослойки и основного металла ( $10,5 \cdot 10^{-5}$  1/град) и, соответственно, с меньшим уровнем напряжений, кратковременные пластические деформации невелики, возникают они только на небольшом участке у кромки стыка. При этом они заметно уменьшаются в вариантах 2 и 3 в результате снижения напряжений за счет ползучести.

В вариантах 4, 5 и 6 за счет вдвое большей разности КЛТР прослойки и основного металла ( $21 \cdot 10^{-5}$  1/град) и, соответственно, большего уровня напряжений кратковременные пластические деформации заметно увеличиваются и распределены по всей длине прослойки. В вариантах с ускоренным охлаждением и последующей выдержкой (вар. 5 и 6) они также уменьшаются вследствие ползучести.

Поля пластических деформаций ползучести показывают некоторое увеличение их уровня в вар. 3 и 6 по сравнению с вар. 2 и 5 при снижении сопротивления ползучести материала прослойки (около 10 %), и при увеличении уровня напряжений в узлах вар. 5 и 6 за счет большей разности КЛТР прослойки и основного металла.

Наглядное представление о характере распределения и уровне всех составляющих и эквивалентных напряжений в основном металле и прослойке дают эпюры (рис. 2...4).

Анализ распределения напряжений вдоль стыка по эпюрам показывает, что все составляющие и эквивалентные напряжения в основном металле практически отсутствуют на большей части стыка.

Только в небольшой зоне вблизи наружной поверхности, протяженностью около 10 толщин прослойки они появляются и возрастают: радиальные до 67 и -102 МПа при быстром охлаждении (вар. 1 и 4) и до 50 МПа (вар 2 и 3), -58 МПа (вар. 5 и 6) при ускоренном с последующей выдержкой (рис. 2,а). Соответственно осевые возрастают до 68, 39,5 и 39 МПа в вариантах 1, 2 и 3 и -69, -46 и -45 МПа в вариантах 4, 5 и 6 (рис. 3, а), окружные до 54, 36 и 35,5 МПа (вар. 1, 2 и 3) и -69, -45 и -44 МПа (вар. 4, 5 и 6), касательные до -44, -30 и -33 МПа в вариантах 1, 2 и 3 и 51, 32 и 31,5 МПа в вариантах 4, 5 и 6 (рис. 3, б), эквивалентные до 76, 54 и 54 МПа в вариантах 1, 2 и 3 и 87, 58,5 и 58 МПа в вариантах 4, 5 и 6 (рис. 4, а).

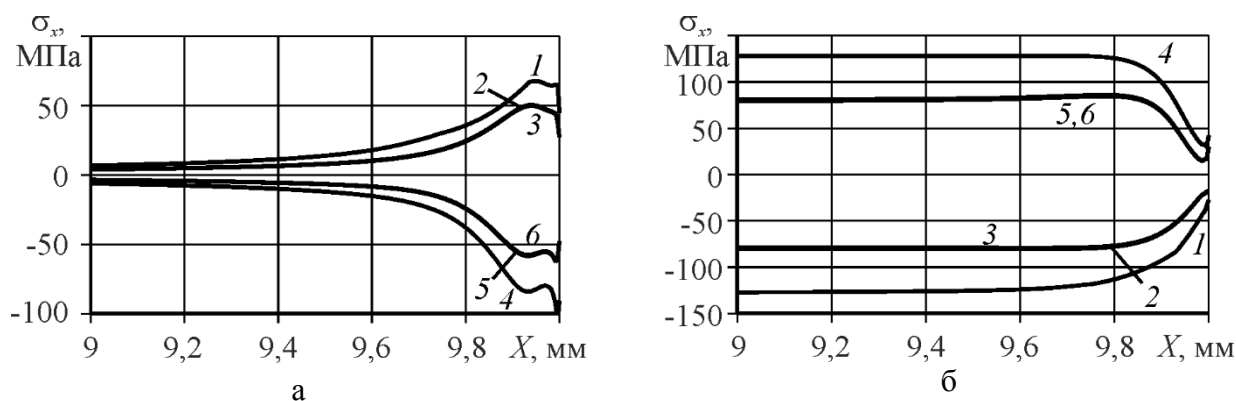


Рис. 2. Эпюры радиальных напряжений,  $\sigma_x$  по стыку в основном металле (а) и прослойке (б) вблизи ее наружной кромки, варианты 1...6

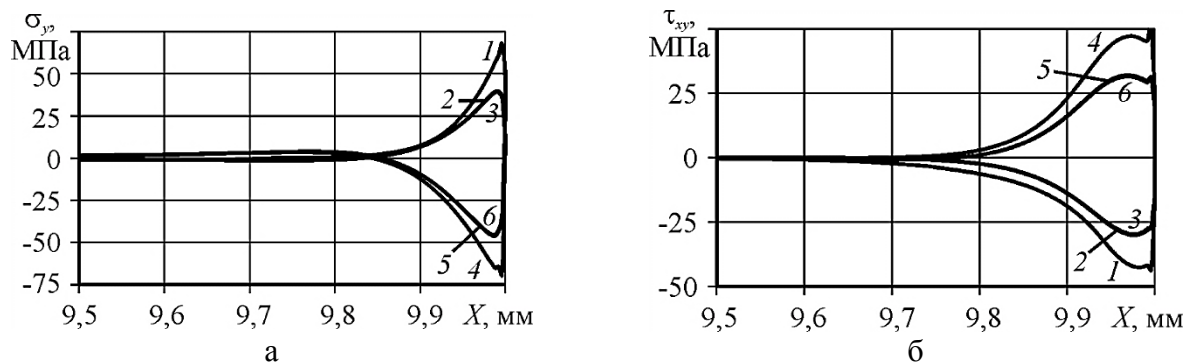


Рис. 3. Эпюры осевых  $\sigma_y$  (а) и касательных  $\tau_{xy}$  (б) напряжений по стыку основного металла и прослойки вблизи ее наружной кромки, варианты 1... 6

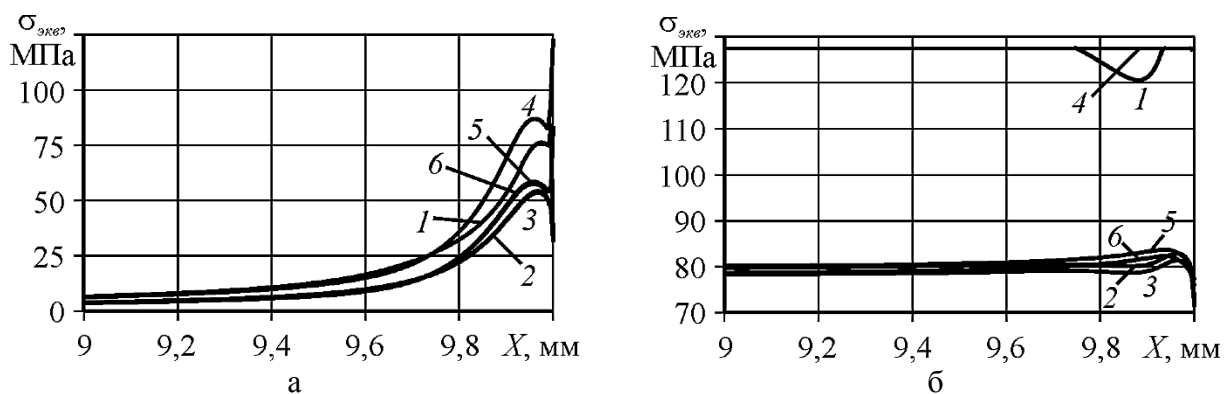


Рис. 4. Эпюры эквивалентных напряжений  $\sigma_{экв}$  по стыку в основном металле (а) и прослойке (б) узлов, варианты 1... 6

Как видно из сравнения эпюр, знаки составляющих напряжений остаются неизменными, они противоположны в узлах с прослойкой с меньшим (вар. 1...3) и большим (вар. 4...6) КЛТР, чем у основного металла. При этом за счет ползучести они снижаются.

В прослойке осевые и касательные напряжения также отсутствуют на большей части длины стыка (рис. 3, а и б) и только вблизи кромки появляются и резко возрастают: осевые напряжения до 68, 39,5 и 39 МПа в вариантах 1, 2 и 3 и -69, -46 и -45 МПа в вариантах 4, 5 и 6, а касательные до -44, -30 и -30 МПа и 51, 32 и 31,5 МПа соответственно.

Радиальные напряжения на большей части длины стыка в прослойке, напротив, достаточно велики, распределены равномерно на уровне -128, -80 и -78 МПа (варианты 1, 2 и 3) и 128, 80 и 78,5 МПа (варианты 4, 5 и 6), то есть равны пределу текучести (128 МПа) материала прослойки при 1100 °С только при быстром охлаждении (рис. 2, б). Окружные напряжения распределены аналогично радиальным.

Таким образом, сравнение разных вариантов показывает, что деформации ползучести снижают уровень составляющих напряжений, как в основном металле, так и прослойке. При этом изменение сопротивления ползучести материала прослойки в принятых пределах (0,8 и 0,75 от основного металла) практически не влияет на степень снижения.

Анализ эпюр эквивалентных напряжений (рис. 4) также показывает, что как в соединяемых материалах, так и в прослойке, во всех вариантах на большей части ширины узла сохраняется постоянный уровень напряжений. При этом в основном металле они практически равны нулю с изменением только в небольшой зоне у кромки стыка. Здесь они резко возрастают, достигая 76, 54 и 54 МПа (варианты 1, 2 и 3) и 87, 58,5 и 58 МПа (варианты 4, 5 и 6) и оставаясь значительно ниже его предела текучести 150 МПа. Для сравнения, при упругом деформировании (без учета пластических деформаций прослойки) аналогичных узлов они составляли 100 и 200 МПа в узлах с прослойками с малым и большим КЛТР соответственно.

То есть, пластические деформации материала прослойки снижают эквивалентные напряжения в наиболее загруженной зоне основного металла, разгружая и предотвращая пластические деформации в нем.

В прослойке эквивалентные напряжения на большей части длины стыка снижаются за счет ползучести материала прослойки и остаются постоянными практически на всей длине стыка (рис. 2, б): в вариантах 1, 2 и 3 на уровне 128, 79 и 78 МПа, а в вариантах 4, 5 и 6 на уровне 128, 80 и 78 МПа.

В соответствии с эквивалентными напряжениями распределены и пластические деформации в прослойке (рис. 5 и 6).

Эквивалентные кратковременные пластические деформации на большей части длины стыка постоянны, близки к 0 (0,047...0,018%) в вариантах 1...3 и составляют 0,404, 0,358 и 0,352 % в вариантах 4, 5 и 6. То есть они существенно увеличиваются при увеличении разности КЛТР прослойки и основного металла и уменьшаются при появлении деформаций ползучести и снижении сопротивления ползучести материала прослойки (рис. 5,а). Вблизи наружной кромки стыка они сначала несколько уменьшаются, а затем снова увеличиваются до 0,11, 0,054 и 0,051 % (вар. 1, 2 и 3) и 0,57, 0,530 и 0,522 % (вар. 4, 5 и 6).

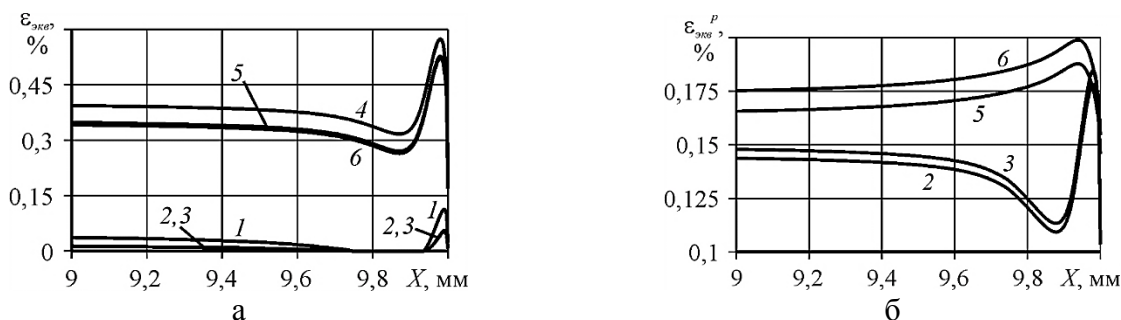


Рис. 5. Эпюры эквивалентных кратковременных пластических  $\epsilon_{экв}$  (а) и деформаций ползучести  $\epsilon_{экв}^p$  (б) по стыку в материале прослойки вблизи ее наружной кромки, варианты 1... 6

Аналогично распределены и деформации ползучести (рис. 5, б). При быстром охлаждении (вар. 1 и 4) они естественно отсутствуют, в остальных вариантах оставаясь на постоянном уровне на большей части стыка (от 0,146 и 0,164 % в вар. 2 и 5 до 0,150 и 0,172 % в вар. 3 и 6), они вблизи кромки сначала незначительно уменьшаются, а затем увеличиваются до 0,178 и 0,185% в вар. 2 и 3 и до 0,188 и 0,199 % в вар. 5 и 6.

Наглядное представление об изменении уровня деформаций в зоне соединения при изменении свойств прослойки (ее предела текучести, сопротивления ползучести и КЛТР) дает диаграмма (рис. 6).

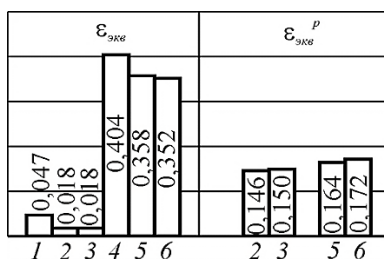


Рис. 6. Эквивалентные кратковременные пластические деформации  $\epsilon_{экв}$  и деформации ползучести  $\epsilon_{экв}^p$  в прослойке (%) в средней части стыка, варианты 1...6

Кратковременные пластические деформации на большей части длины прослойки за счет ползучести уменьшаются с 0,047% в вар.1 до 0,018 % в вар. 2 и 3 и с 0,404 в вар. 4 до 0,358 и 0,352 % в вар. 5 и 6 соответственно. Деформации ползучести при этом увеличиваются

от 0 в вар. 1 и 4 до 0,146 и 0,150 % в вар. 2 и 3, заметно превышая уровень кратковременных деформаций, и до 0,164 и 0,172 % в вар. 5 и 6, в вариантах 2 и 3, оставаясь меньше кратковременных (рис. 6).

Как известно [10], важной особенностью объемного напряженного состояния по сравнению с линейным является изменение характеристик прочности (предела текучести) и пластичности (относительного удлинения) металла, которые определяются экспериментально именно при одноосном растяжении. В условиях объемного напряженного состояния происходит упрочнение (повышение прочности и снижение пластичности) или разупрочнение (снижение прочности и увеличение пластичности) металла. В качестве количественной характеристики этого изменения используется коэффициент жесткости напряженного состояния  $K_{ж}$ , равный отношению максимальных (по модулю) главных напряжений ( $\sigma_1$  или  $\sigma_3$ ) к эквивалентным  $\sigma_{экв}$ .

Анализ результатов моделирования НДС при данном варианте температурного нагружения показал, что появление пластических деформаций в прослойке, также как и в предыдущих вариантах, мало влияет на коэффициент жесткости и степень упрочнения или разупрочнения, как основного металла, так и материала прослойки (рис. 7).

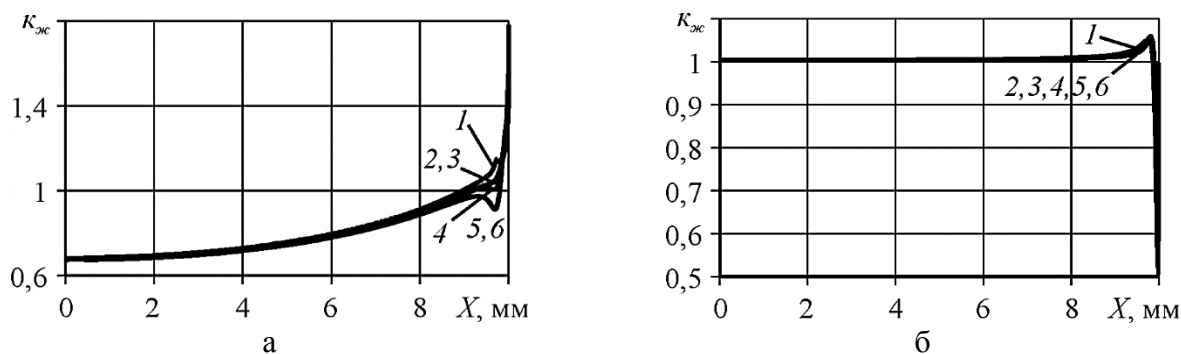


Рис. 7. Распределение коэффициента жесткости по стыку в основном металле (а) и прослойке (б), варианты 1... 6

В основном металле вблизи оси узла он равен 0,68 постепенно увеличиваясь по мере приближения к внешней поверхности до 1 на расстоянии около 1 мм от нее и до 1,5 у самой поверхности. В прослойке он остается равным 1 на большей части длины стыка (90 %) и только у самой поверхности сначала несколько увеличивается (до 1,05), а затем резко снижается до 0,5...0,55.

Из сравнения эпюр (рис. 7) с аналогичными в упругой задаче [11] видно, что их характер и уровень как в основном металле, так и в прослойке, изменяются незначительно, в основном на небольших участках вблизи кромки стыка. Здесь коэффициент жесткости  $K_{ж}$  в основном металле увеличивается (металл упрочняется) до 1,5, то есть несколько больше, чем в упругой задаче (1,35).

## ВЫВОДЫ

При термическом нагружении ускоренным охлаждением от 1270 до 1100 °С в течение 60 с с последующей выдержкой при 1100 °С в течение 540 с узлов с мягкой прослойкой в небольшой зоне, расположенной вблизи прослойки у кромки стыка (у внешней поверхности цилиндра), и в самой прослойке создается сложное НДС, обусловленное разностью КЛТР соединяемого металла и прослойки. При этом уровень напряжений несколько ниже, чем при быстром охлаждении.

Ускоренное охлаждение с последующей выдержкой в течение 540 с снижает напряжения в прослойке и в небольшой зоне основного металла вблизи ее кромки за счет деформаций кратковременных и ползучести в прослойке. При этом степень сопротивления

ползучести прослойки по сравнению с основным металлом в принятых пределах (0,85 или 0,7) практически не играет роли. Возникающие деформации ползучести мало влияют на характер поля напряжений.

Кратковременные пластические деформации в вариантах с меньшей разностью КЛТР прослойки и основного металла и, соответственно, с меньшим уровнем напряжений, невелики, возникают они только на небольшом участке прослойки у кромки стыка. При этом они заметно уменьшаются по сравнению с быстрым охлаждением в результате снижения напряжений за счет ползучести. В вариантах с большей разностью КЛТР и, соответственно, большим уровнем напряжений, кратковременные пластические деформации заметно увеличиваются и распределены по всей длине прослойки. По сравнению с быстрым охлаждением они снижаются незначительно.

Деформации ползучести при замедленном охлаждении с последующей выдержкой появляются и заметно превышают уровень кратковременных деформаций в вариантах с малой разностью КЛТР прослойки и основного металла и остаются меньше кратковременных в вариантах с большой разностью. Они мало изменяются при изменении сопротивления ползучести прослойки в принятых пределах.

Коэффициенты жесткости напряженного состояния, а соответственно, и степень упрочнения и разупрочнения металла в зоне стыка, при медленном охлаждении как в основном металле, так и в прослойке, изменяются незначительно, в основном на небольших участках вблизи кромки стыка.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паяння матеріалів: підручник / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. В. Чигарьов; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв: НУК, 2015. – 340 с.
2. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.
3. Махненко В. И. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой / В. И. Махненко, В. В. Квасницький // Автоматическая сварка. – 2009. – № 8. – С. 11–16.
4. Effect of the Rigid interlayer Thickness on the stress-strain of metal-Graphite Assemblies Under Thermal Loading / G. V. Ermolaev, V. A. Martynenko, A. V. Labartkava, M. V. Matvienko // Strength of Materials. – may, 2017, Vol. 49, issue 3. – P. 422–428.
5. Басов К. А. ANSYS: Справочник пользователя / К. А. Басов. – И.: ДМК пресс, 2005. – 640 с.
6. Напряженное состояние сварных и паяных узлов из разнородных материалов с мягкой прослойкой при осевой нагрузке / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, Dong Chunlin, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев // Автоматическая сварка. – 2018. – № 4. – С. 7–13.
7. Влияние физико-механических свойств прослойки на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке и пайке жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ni3Al / В. В. Квасницький, М. В. Матвиенко, В. Ф. Квасницький, Е. А. Бутурля // Матер. Міжнар. конф. «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні», 23–24 травня 2019 р. – Україна, Київ: «КІП імені Ігоря Сікорського». 2019. – С. 45–46.
8. Вплив товщини проміжного прошарку на напружено-деформований стан спаяних з'єднань жароміцних нікелевих сплавів / Квасницький В. Ф., Матвиенко М. В., Квасницький В. В., Бутурля Є. А. // Матер. симпоз. «14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові». Львів: КІМ ПАТРИ ЛТД. – 2019. – С. 30–31.
9. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в условиях упругости при пайке и диффузионной сварке с прослойками в зависимости от их жесткости / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев, Д. М. Голуб // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – № 1 (45). – С. 43–49.
10. Копельман Л. А. Основы теории прочности сварных конструкций: учебное пособие 2-е изд. / Л. А. Копельман. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 464 с.
11. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния в условиях упругости при пайке и диффузионной сварке с прослойками в зависимости от их жесткости / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев, Д. М. Голуб // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – № 1 (45). – С. 43–49.