

УДК 621.791.42; 621.791.18; 004.942

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-10-37-46

# Напряженно-деформированное состояние в зоне соединения при клинопрессовой сварке разнородных материалов\*

Р.Г. Хазгалиев<sup>1</sup>, М.Ф. Имаев<sup>1</sup>, Р.Р. Мулюков<sup>1</sup>, Ф.Ф. Сафин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. Степана Халтурина, д. 39

<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, 450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 12

## Stress-Strain State in the Joint Zone During Wedge-Press Welding of Dissimilar Materials

R.G. Khazgaliev<sup>1</sup>, M.F. Imayev<sup>1</sup>, R.R. Mulyukov<sup>1</sup>, F.F. Safin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, 450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, Stepan Khalturin St., Bldg. 39

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University, 450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 12



e-mail: sloth.usatu@gmail.com, marcel@imsp.ru, radik@imsp.ru, 7545704@mail.ru



Проведено компьютерное моделирование процесса клинопрессовой сварки разнородных материалов на примере титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку. Исходная модель внедряемой детали представляла собой цилиндр с вершиной в форме конуса, а модель ее ответной части — коническое глухое отверстие в цилиндре. Исходная модель прослойки никеля, расположенная между соединяемыми деталями, имела форму полого конуса толщиной 0,2 мм. Показаны различия между клинопрессовыми сварками с постоянной скоростью деформирования и при постоянном давлении. При сварке с постоянной скоростью деформирования происходит сильная локализация деформации, что повышает вероятность образования непроваров. В случае клинопрессовой сварки при постоянном давлении интенсивности деформаций и напряжений в прослойке распределены более равномерно и вероятность образования непроваров значительно меньше. Оптимальной из двух исследованныхборок для клинопрессовой сварки под постоянным давлением является сборка II с внедряемой деталью из титанового сплава, у которой угол при вершине конуса  $\alpha = 90^\circ$ .

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, клинопрессовая сварка, разнородные материалы, распределение деформаций, распределение напряжений



A computer simulation of the process of wedge-press welding of dissimilar materials is performed using titanium alloy and stainless steel with a nickel interlayer as an example. The initial model of the embedded part is a cylinder with a conical top, and the model of the corresponding part is a conical blind hole in the cylinder. The initial model of the nickel interlayer has the shape of a hollow cone 0.2 mm thick and is located between the parts to be joined. The differences between wedge-press welding at a constant deformation rate and at

\* Работа выполнена в рамках государственных заданий ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310221-5 и АААА-А17-117041310216-1.

constant pressure are shown. When wedge-press welding at a constant deformation rate, the deformation is highly localized, which increases the probability of faulty fusion. In the case of wedge-press welding at constant pressure, the intensities of deformations and stresses in the interlayer are distributed more evenly, and the probability of formation of faulty fusion is considerably lower. The assembly II (embedded part made of titanium alloy) with an apex angle of the cone  $\alpha = 90^\circ$  is the most optimal assembly for wedge-press welding at constant pressure.

**Keywords:** computer simulation, wedge-press welding, dissimilar materials, strain distribution, stress distribution

Во многих отраслях промышленности широко применяют сварные соединения материалов, физические и химические свойства которых сильно различаются. Используют соединения алюминиевых сплавов со сталями и титановыми сплавами, титановых сплавов со сталями и медными сплавами, молибдена с ниобием, различных металлов с керамиками и др. [1–7]. Для соединения узлов из разнородных металлов (в том числе трубопроводов между собой и с различного рода емкостями, сильфонами, клапанами и другими элементами арматуры) применяют трубчатые биметаллические переходники. Такие переходники изготавливают, в частности, методом клинопрессовой сварки (КПрС) [8].

Сущность КПрС разнородных материалов заключается в нагреве соединяемых деталей и последующем впрессовывании детали из более твердого материала в менее твердый с последующей термической обработкой. Продольное сечение детали из более твердого материала имеет вид трапеции или треугольника. При этом рабочую часть детали из более твердого материала затачивают на некоторый угол  $\alpha$ . Наибольшее значение прочности соединений обычно наблюдается при малых значениях  $\alpha$  (вплоть до 0 рад).

При КПрС отношение сдвиговой компоненты напряжений к компоненте нормальных напряжений максимально. При такой схеме нагружения интенсифицируется пластическое течение в тонких приповерхностных слоях материалов, а также облегчаются разрушение и вынос за пределы контакта окисных пленок и загрязнений [8]. В отличие от плоского стыка, получаемого при сварке металлов трением или при диффузионной сварке, соединение по поверхности конического стыка, создаваемого при КПрС материалов, в значительной степени уменьшает негативное воздействие разницы в значениях коэффициента термического расширения соединяемых материалов. Указанное

преимущество КПрС позволяет сохранить работоспособность биметаллических соединений в широком интервале температур.

КПрС применяют для соединения не только разнородных материалов, сильно различающихся по твердости (медные и алюминиевые сплавы + стали, титановые сплавы, композиционные материалы, ниобий, молибден и др.), но и материалов с близкой твердостью (сталь + сталь, сталь + титановые сплавы и др.). В последнем случае между двух заготовок помещают более пластичный металл, а во внешней детали предварительно растачивают конусное отверстие.

Титановые сплавы и нержавеющие стали обычно соединяют с помощью КПрС через алюминиевую прослойку [8]. При температуре примерно до 300 °С твердости титановых сплавов и сталей близки, поэтому материалом детали внедрения может служить как сталь, так и титановый сплав. Однако такое соединение нельзя использовать при рабочих температурах выше 300 °С.

Для эксплуатации сварных соединений при повышенных температурах необходимо использовать более жаропрочные прослойки. Например, титановые сплавы и нержавеющие стали можно соединять методом диффузионной сварки через никелевую прослойку в интервале температур 800...950 °С [9–12]. При диффузионной сварке титанового сплава с нержавеющей сталью через никель происходит схватывание всех свариваемых поверхностей менее чем через 20 мин при температуре 650...800 °С и давлении 4 МПа [13, 14]. Вследствие схватывания напряжения и деформации в зоне соединения распределены неравномерно. В центральной части сварного соединения образуются застойные зоны [15].

Известно, что при КПрС в зоне соединения возникают большие сдвиговые напряжения. В связи с этим представляется важным изучить влияние угла заточки внедряемого материала

на распределение напряжений и деформаций в зоне контакта в условиях полного схватывания. Кроме того, интересно исследовать и следующую проблему. При КПрС обычно более твердый материал внедряют в менее твердый. В интервале температур диффузионной сварки 800...950 °С твердость титанового сплава заметно ниже, чем у нержавеющей стали. Однако при схватывании может заметно деформироваться более твердый материал, поэтому необходимо исследовать внедрение менее твердого материала в более твердый.

Так как проведение натурального эксперимента является трудоемким, на первом этапе было проведено компьютерное моделирование процесса КПрС разнородных материалов на примере нержавеющей стали с титановым сплавом через прослойку никеля.

Цель работы — исследовать распределение интенсивностей напряжений и деформаций в зоне соединения: при типичных режимах КПрС (высокая постоянная скорость деформирования и малый угол при вершине конуса внедряемой детали); в случае изменения угла при вершине конуса и взаимного расположения деталей в условиях схватывания поверхностей соединения при КПрС под постоянным давлением.

**Методика исследования.** Компьютерное моделирование процесса КПрС проводили в двумерной постановке (плоская деформация) на базе универсального комплекса DEFORM-3D. Соединяли детали из титанового сплава VT6 (Ti-alloy) и нержавеющей стали IS1321 (SS), являющейся аналогом 12X18H10T, через никелевую прослойку (Ni-interlayer) при температуре 750 °С. Моделировали два варианта КПрС: 1) с постоянной скоростью деформирования 1 мм/с в интервале времени  $t = 1...6$  с (коэффициент трения  $\mu = 0,3$ ); 2) при постоянном давлении 4 МПа в течение 20 мин в условиях схватывания пар поверхностей соединяемых деталей. Условие схватывания задавали опцией sticking condition. Кривые упрочнения материалов выбирали из базы данных DEFORM-3D.

Исходная модель внедряемой детали представляла собой цилиндр 1 с вершиной в форме конуса (рис. 1), а модель ее ответной части — цилиндр 3 с коническим глухим отверстием. Исходная модель прослойки никеля, расположенная между соединяемыми деталями, имела форму полого конуса 2 толщиной 0,2 мм.

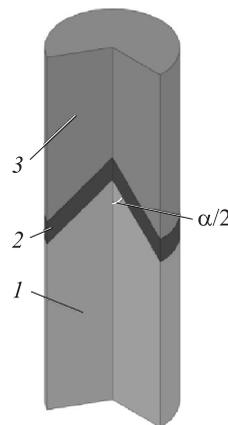


Рис. 1. Схема расположения деталей при КПрС

Углы  $\alpha$  при вершинах конусов соединяемых деталей задавали одинаковыми и равными 180, 170, 150, 120, 90 и 20°. В интервале угла  $\alpha = 180...90^\circ$  диаметры основания конусов и цилиндров совпадали и составляли 10 мм, а для  $\alpha = 20^\circ$  — 5 мм. Рассматривали два варианта сборки деталей. В сборке I деталь внедрения изготовили из нержавеющей стали; в сборке II — из титанового сплава. Результаты моделирования представлены в виде распределения интенсивности напряжений (далее напряжения)  $\sigma_n$  и интенсивности деформаций (далее деформации)  $\epsilon_n$  в свариваемых деталях.

Натурный эксперимент твердофазной сварки титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12X18H10T через никелевую прослойку проводили с выдержкой 20 мин под давлением 4 МПа в интервале температур 650...850 °С. Образцы представляли собой параллелепипеды размером 5×05×16 мм<sup>3</sup> с плоской свариваемой поверхностью. Толщина никелевой прослойки составляла 0,2 мм. Оснастку с образцами и системой подачи давления помещали в вакуумную печь, в которой остаточное давление не превышало  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Па.

**Результаты моделирования. КПрС с постоянной скоростью деформирования.** На рис. 2 показано распределение деформаций и напряжений при КПрС со скоростью деформирования 1 мм/с в течение 1 с для сборок I и II с углом  $\alpha = 20^\circ$ . В обеих сборках деформации в прослойке примерно одинаковы, но распределены неравномерно: от 0 в вершине конуса до 0,15 в его основании конуса (рис. 2 а, в). Напряжения в прослойке распределены равномерно и составляют около 125 МПа (рис. 2, б, г). Сама прослойка выдавливается из зоны соединения.

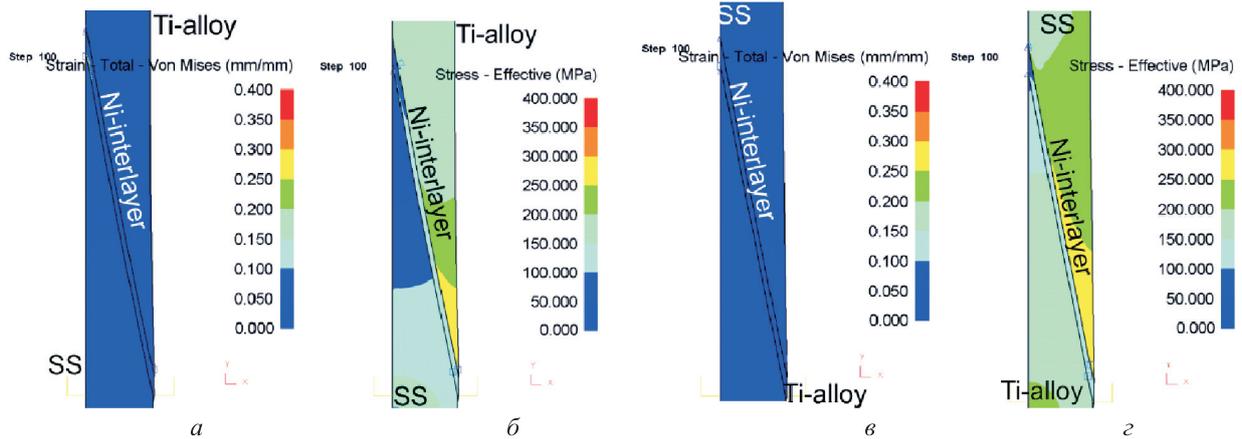


Рис. 2. Распределение деформаций (а, в) и напряжений (б, з) при КПрС с постоянной скоростью деформирования 1 мм/с в течение 1 с для сборок I (а, б) и II (в, з) с углом  $\alpha = 20^\circ$

В обеих сборках титановая деталь деформируется больше, чем стальная, а напряжения в первой ниже, чем во второй. Напряжения в обеих деталях локализуются преимущественно в основании конуса.

На рис. 3 показано распределение деформаций и напряжений при КПрС со скоростью деформирования 1 мм/с в течение 6 с для сборок I и II с углом  $\alpha = 20^\circ$ . В обеих сборках деформации в прослойке при  $t = 6$  с более неравномерны, чем при  $t = 1$  с (см. рис. 2, а, в). В сборке I деформации  $\epsilon_{ii}$  в прослойке изменяются от 0 в вершине конуса до 0,5 в его основании (рис. 3 а, б). В сборке II максимальное значение  $\epsilon_{ii} = 2$  локализуется в вершине конуса прослойки, при этом в основании  $\epsilon_{ii} = 0,3$  (рис. 3 в, з). В сборке II прослойка сильно утоняется в вершине конуса, что может сопровождаться ее разрушением. Факт разрушения установить невозможно из-за программного ограничения.

Как и при  $t = 1$  с, напряжения в прослойке при  $t = 6$  с являются равномерными и составляют около 130 МПа (рис. 3, б, з).

Увеличение времени КПрС с 1 до 6 с не изменило картины распределения напряжений в обеих сборках:  $\sigma_{ii}$  в детали внедрения ниже, чем в ее ответной части. Общий уровень напряжений в деталях в сборке I ниже, чем в сборке II. В сборке I конусные поверхности соединяемых деталей искажаются, в то время как в сборке II они сохраняют форму конуса.

**КПрС при постоянном давлении.** На рис. 4 показано распределение деформаций и напряжений для сборки I при угле  $\alpha = 180^\circ$ . Вследствие схватывания поверхностей соединения титановая деталь (как менее твердая) становится шире, чем стальная, и приобретает форму бочки. Ширина стальной детали увеличивается только в зоне соединения. Прослойка приобретает форму линзы с утонением к краю зоны

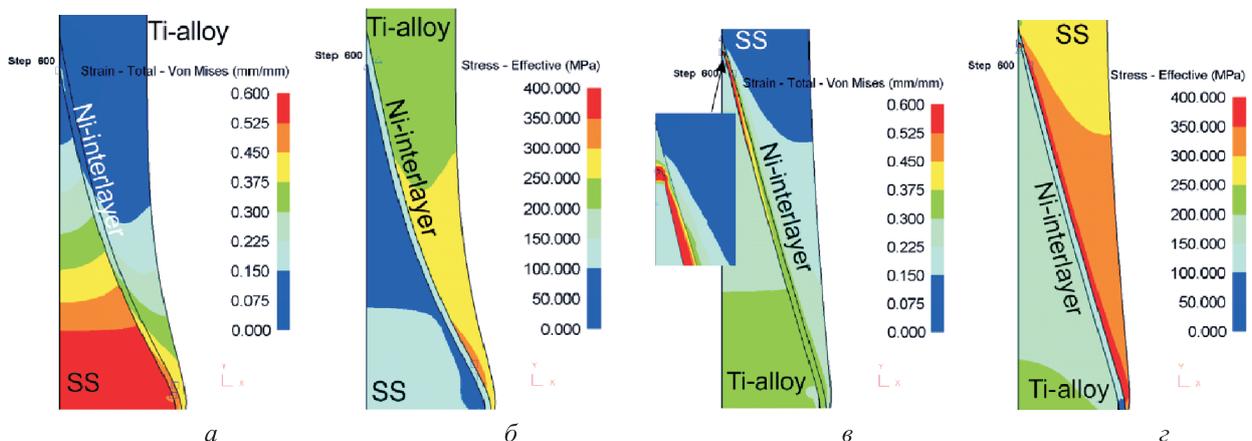


Рис. 3. Распределение деформаций (а, в) и напряжений (б, з) при КПрС с постоянной скоростью деформирования 1 мм/с в течение 6 с для сборок I (а, б) и II (в, з) с углом  $\alpha = 20^\circ$

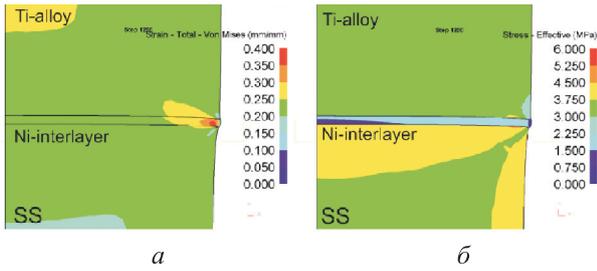


Рис. 4. Распределение деформаций (а) и напряжений (б) при КПрС под постоянным давлением для сборки I с углом  $\alpha = 180^\circ$

соединения. В условиях схватывания напряжения распределены неравномерно, что проявляется в следующем: в стальной детали они больше, чем в титановой, а в центральной части прослойки — меньше, чем на краях. Смена местами деталей не привела к изменению напряженно-деформированного состояния.

Уменьшение угла  $\alpha$  со  $180$  до  $170^\circ$  в обеих сборках деталей привело к возрастанию деформаций и напряжений в прослойке. В сборке I прослойка деформируется в большей степени (рис. 5, а), чем в сборке II (рис. 5, в). В обеих сборках напряжения в стальной детали больше, чем в титановой, причем они распределены неравномерно. В сборке I область наибольших напряжений находится в основании конуса детали из нержавеющей стали (рис. 5, б). В сборке II эта область расположена в стальной детали

и распределена равномерно вдоль зоны соединения (рис. 5, г).

Уменьшение угла  $\alpha$  до  $90^\circ$  привело к увеличению деформаций и напряжений в прослойке (рис. 6, а, в). В сборке II деформации распределены более равномерно по длине прослойки и их значения ниже, чем в сборке I. Напряжения в области соединения деталей выровнялись. В обеих сборках напряжения в детали из нержавеющей стали при  $\alpha = 90^\circ$  меньше, чем при  $\alpha = 170$  и  $180^\circ$ . В обеих сборках в прослойке распределение напряжений неоднородное с минимумом в центральной части (рис. 6, б, г). При уменьшении угла  $\alpha$  от  $180$  до  $90^\circ$  напряжения в прослойке повышаются, а в деталях из нержавеющей стали и титанового сплава понижаются, концентрируясь в вершине или основании конуса. При этом значения напряжений в трех деталях выравниваются.

При угле  $\alpha = 20^\circ$  в обеих сборках прослойка деформируется меньше (рис. 7, а, в), чем при  $\alpha = 90...170^\circ$ , но больше, чем при  $\alpha = 180^\circ$ . Распределение деформаций в прослойке неоднородно при обеих сборках. В сборке I наибольшей деформации подвержена вершина конуса прослойки (см. рис. 7, а), в сборке II — основание конуса прослойки (см. рис. 7, в).

Уменьшение угла  $\alpha$  со  $90$  до  $20^\circ$  привело к существенному изменению распределения напряжений в области соединения деталей.

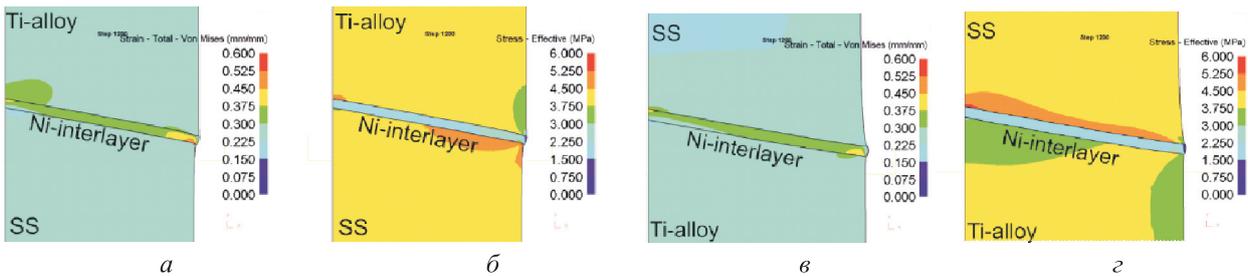


Рис. 5. Распределение деформаций (а, в) и напряжений (б, г) при КПрС с постоянным давлением для сборок I (а, б) и II (в, г) с углом  $\alpha = 170^\circ$

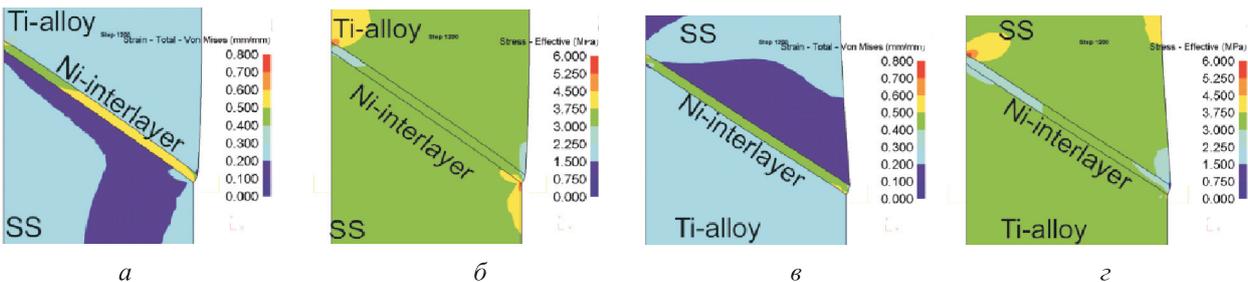


Рис. 6. Распределение деформаций (а, в) и напряжений (б, г) при КПрС под постоянным давлением для сборок I (а, б) и II (в, г) с углом  $\alpha = 90^\circ$

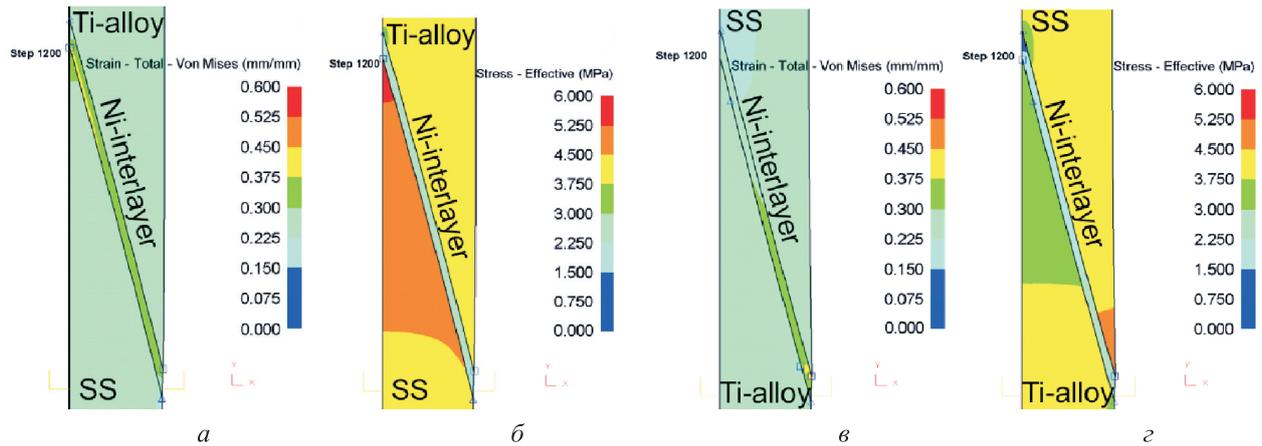


Рис. 7. Распределение деформаций (а, в) и напряжений (б, г) при КПрС под постоянным давлением для сборок I (а, б) и II (в, г) с углом  $\alpha = 20^\circ$

В сборке II напряжения в прослойке при  $\alpha = 20^\circ$  стали меньше (рис. 7, б, г), чем при  $\alpha = 90...170^\circ$ . Распределения напряжений в детали из нержавеющей стали сильно различаются в сборках I и II. Если в сборке I напряжения мак-

симальны в вершине конуса (см. рис. 7, б), то в сборке II — в основании конуса (см. рис. 7, г).

На рис. 8 приведены зависимости средних значений напряжений и деформаций в прослойке от угла  $\alpha$ . В обеих сборках максимум деформаций в прослойке наблюдается при  $\alpha = 90^\circ$ , причем в сборке I он выше, чем в сборке II. В сборке I наибольшие средние значения напряжений в прослойке соответствуют углу  $\alpha = 20^\circ$ , а в сборке II —  $\alpha = 120^\circ$ .

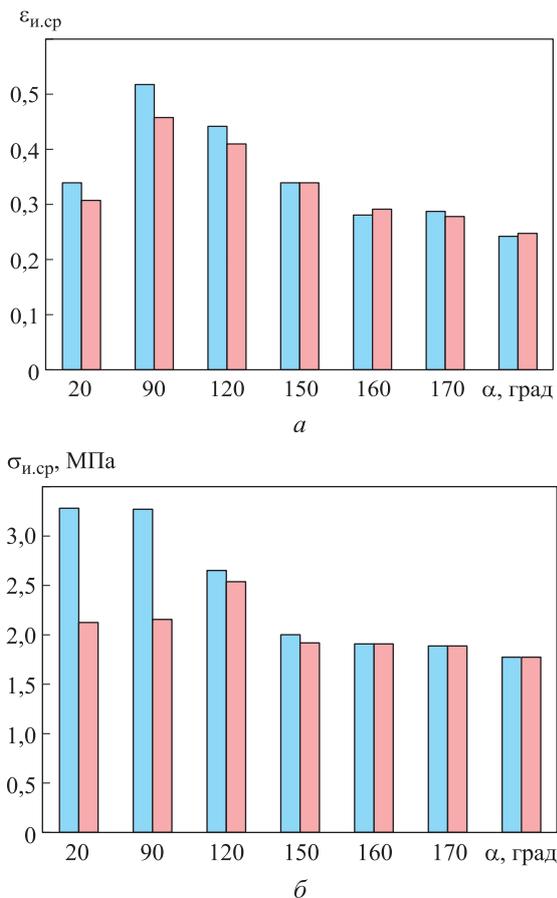


Рис. 8. Зависимости средних значений деформаций  $\epsilon_{н.ср}$  (а) и напряжений  $\sigma_{н.ср}$  (б) в прослойке от угла  $\alpha$  при КПрС под постоянным давлением для сборок I (■) и II (■)

**Результаты эксперимента.** В ходе натурального эксперимента установлено, что формирование твердофазного соединения сопровождается неравномерной деформацией прослойки. Центр прослойки деформируется слабее, и там образуется застойная зона. На периферии благодаря более высокой степени деформации схватывание происходит быстрее, в следствие чего формируется более качественное соединение.

На рис. 9 показан микрошлиф периферийной области соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля после сварки в течение 20 мин при давлении 4 МПа и температуре  $650^\circ\text{C}$ . На линии соединения никеля со сталью имеются непровары и поры, что свидетельствует о наличии застойной зоны. При повышении температуры толщина слоев интерметаллидов  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ ,  $\text{TiNi}$  и  $\text{TiNi}_3$  увеличивается. Более подробно закономерности формирования интерметаллидов изложены в работах [9–15].

**Обсуждение результатов.** Как показали результаты компьютерного моделирования, основным недостатком КПрС с постоянной ско-

ростью деформирования изучаемых материалов является неоднородное распределение деформаций в прослойке. В зависимости от вида сборки деформации сильно локализованы либо в вершине, либо в основании конуса. В областях с меньшей деформацией возможны непровары. Увеличение времени деформирования не приводит к более однородному распределению деформаций в прослойке. Кроме того, в сборке I происходит искажение конусных поверхностей соединяемых деталей, а в сборке II вершина конуса прослойки сильно утоняется, что может привести к разрушению.

Следует отметить, что независимо от сборки в детали внедрения напряжения всегда меньше, чем в ее ответной части. По-видимому, неоднородность деформаций в прослойке можно уменьшить путем увеличения угла при вершине конуса. Однако это приведет к значительному повышению усилия деформирования, а также к уменьшению степени пластической деформации контактной поверхности детали из менее твердого металла [8].

Важным обстоятельством является то, что при КПрС с постоянным давлением общий уровень деформаций в прослойке соответствует таковому при КПрС с постоянной скоростью деформирования. Наибольшие деформации в прослойке достигаются при  $\alpha = 90^\circ$ . Вместе с тем есть некоторые различия в уровне и распределении деформаций в сборках I и II: в сборке I их уровень выше, но

в сборке II они распределены более равномерно.

При КПрС с постоянным давлением в отличие от КПрС с постоянной скоростью деформирования, значения напряжений в свариваемых деталях значительно меньше и в прослойке распределены более равномерно. Независимо от сборки в детали из нержавеющей стали напряжения всегда выше, чем в детали из титанового сплава, так как при температуре  $750^\circ\text{C}$  твердость стали больше, чем у титанового сплава. При этом в детали из нержавеющей стали в сборке I напряжения максимальны в вершине конуса, в сборке II — в его основании.

Сопоставление результатов натурального эксперимента и компьютерного моделирования показало, что область непроваров в зоне соединения появляется при минимальной деформации  $\epsilon_{и} = 0,25$  (см. рис. 4 и 9). Это позволяет проанализировать результаты моделирования влияния угла наклона при КПрС на качество соединения.

Если рассматривать распределение только средних значений деформаций  $\epsilon_{и,ср}$  (см. рис. 8), то все полученные соединения должны быть качественными, поскольку в прослойке  $\epsilon_{и,ср} > 0,25$ . Однако анализ локальных значений  $\epsilon_{и}$  свидетельствует о том, что существуют области, в которых  $\epsilon_{и} < 0,25$ , что чревато образованием непроваров. Например, при КПрС с постоянной скоростью деформирования при  $\alpha = 20^\circ$  в сборке I образование протяженных непроваров возможно в области вершины конуса прослойки. При сборке II непровары могут возникать только в основании конуса прослойки.

При КПрС с постоянным давлением наблюдается следующая картина. При  $\alpha = 20^\circ$  в сборке I непровары возможны в основании конуса прослойки, при сборке II — в вершине конуса прослойки со стороны нержавеющей стали. При угле  $\alpha = 90^\circ$  в прослойке  $\epsilon_{и} > 0,25$ , так что непровары маловероятны. При  $\alpha = 170^\circ$  непровары могут появляться в вершине конуса прослойки со стороны внедряемой детали.

## Выводы

1. При КПрС с постоянной скоростью деформирования титанового сплава с нержавеющей сталью через прослойку из никеля происходит сильная локализация деформации, что повышает вероятность образования непроваров.

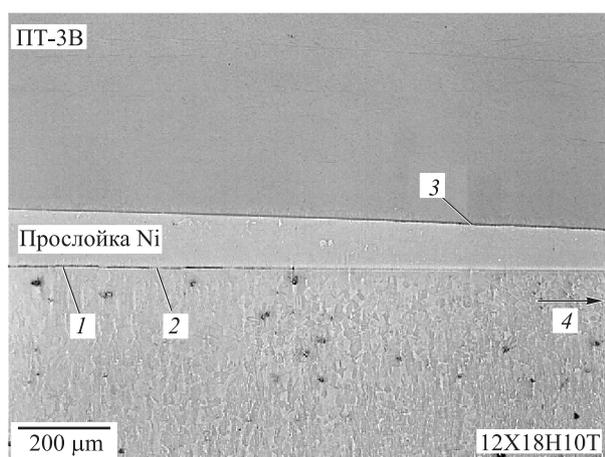


Рис. 9. Микршлиф периферийной области соединения титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12X18H10Т через прослойку никеля после сварки в течение 20 мин при давлении 4 МПа и температуре  $650^\circ\text{C}$ :

1 — поры; 2 — непровар; 3 — интерметаллиды; 4 — край образца

2. КПрС при постоянном давлении обеспечивает более равномерное распределение деформаций и напряжений в прослойке, и вероятность образования непроваров при этом значительно меньше. Оптимальной является КПрС сборки II с углом при вершине конуса  $\alpha = 90^\circ$  под давлением 4 МПа в течение 20 мин.

## Литература

- [1] Zhou Y. *Microjoining and Nanojoining*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, CRC Press, 2008. 832 p.
- [2] Шоршоров М.Х. *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. Москва, Наука, 1965. 336 с.
- [3] Рябов В.Р., Рабкин Д.М., Курочко Р.С., Стрижевская Л.Г. *Сварка разнородных металлов и сплавов*. Москва, Машиностроение, 1984. 239 с.
- [4] Каракозов Э.С. *Сварка металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1986. 280 с.
- [5] Mamalis A.G., Szalay A., Pantelis D.I., Pantazopoulos G., Kotsis I., Enisz M. Fabrication of multi-layered steel/superconductive ceramic (Y-Ba-K-Cu-O)/silver rods by explosive powder compaction and extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 57, pp. 155–163.
- [6] Lorenz A., Bochenek E., Fischer R., Schneider R. A non-vacuum, room-temperature process for the application of solderable contacts to ceramic high- $T_c$  superconductors. *Journal of the Less-Common Metals*, 1989, vol. 55, pp. 1912–1914.
- [7] Валитова Э.В., Ахунова А.Х., Валитов В.А., Лутфуллин Р.Я., Дмитриев С.В., Мухаметрахимов М.Х. Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки. *Письма о материалах*, 2014, vol. 4(3), с. 190–194.
- [8] Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П. *Клинопрессовая сварка давлением разнородных материалов*. Москва, Металлургия, 1982. 112 с.
- [9] Kundu S., Chatterjee S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer. *Materials Characterization*, 2008, vol. 59, pp. 631–637.
- [10] Kundu S., Chatterjee S. Structure and properties of diffusion bonded transition joints between commercially pure titanium and type 304 stainless steel using a nickel interlayer. *Journal of Materials Science*, 2007, vol. 42, pp. 7906–7912.
- [11] Хазгалиев Р.Г., Мухаметрахимов М.Х., Мулюков Р.Р., Лутфуллин Р.Я. Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава. *Перспективные материалы*, 2011, № 12, с. 529–534.
- [12] Thirunavukarasu G., Kundu S., Mishra B., Chatterjee S. Effect of Bonding Temperature on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Joint Between Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Nickel as an Intermediate Material. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45(4), pp. 2067–2077.
- [13] Khazgaliev R.G., Mukhametrahimov M.H., Imayev M.F., Shayakhmetov R.U., Mulyukov R.R. Special Features of Fracture of a Solid-State Titanium Alloy–Nickel–Stainless Steel Joint. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, is. 6, pp. 822–827.
- [14] Хазгалиев Р.Г., Имаев М.Ф., Мулюков Р.Р. Исследование возможности упрочнения соединения титанового сплава с коррозионностойкой сталью, полученного диффузионной сваркой через промежуточную прослойку. *Деформация и Разрушение Материалов*, 2017, № 5, с. 18–24.
- [15] Хазгалиев Р.Г., Имаев М.Ф., Мулюков Р.Р., Сафин Ф.Ф. Модифицирование поверхности прослойки никеля для делокализации деформации при сварке давлением образцов титанового сплава и нержавеющей стали. *Письма о материалах*, 2015, vol. 5(2), с. 133–137.

## References

- [1] Zhou Y. *Microjoining and Nanojoining*. Cambridge, England, Woodhead Publishing Ltd., CRC Press, 2008. 832 p.
- [2] Shorshorov M.H. *Metallovedenie svarki stali i splavov titana* [Welding metallurgy of titanium steel and alloys]. Moscow, Nauka publ., 1965. 336 p.
- [3] Ryabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding of dissimilar metals and alloys]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984. 239 p.
- [4] Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Metal pressure welding]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 280 p.
- [5] Mamalis A.G., Szalay A., Pantelis D.I., Pantazopoulos G., Kotsis I., Enisz M. Fabrication of multi-layered steel/superconductive ceramic (Y-Ba-K-Cu-O)/silver rods by explosive powder compaction and extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 57, pp. 155–163.
- [6] Lorenz A., Bochenek E., Fischer R., Schneider R. A non-vacuum, room-temperature process for the application of solderable contacts to ceramic high- $T_c$  superconductors. *Journal of the Less-Common Metals*, 1989, vol. 55, pp. 1912–1914.
- [7] Valitova E.V., Ahunova A.H., Valitov V.A., Lutfullin R.Ya., Dmitriev S.V., Muhametrahimov M.H. Modelirovanie protsessa svarki davleniem zharoprochnogo nikelovogo splava s ispol'zovaniem ul'tramelkozernistoy prokladki [Modeling of heat-resistant nickel alloy pressure welding using ultrafine grained gasket]. *Pis'ma o materialah* [Letters on Materials]. 2014, vol. 4(3), pp. 190–194.
- [8] Shorshorov M.H., Kolesnichenko V.A., Alekhin V.P. *Klinopressovaya svarka davleniem raznorodnykh materialov* [Pressure wedge welding of dissimilar materials]. Moscow, Metallurgiya publ., 1982. 112 p.
- [9] Kundu S., Chatterjee S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer. *Materials Characterization*, 2008, vol. 59, pp. 631–637.
- [10] Kundu S., Chatterjee S. Structure and properties of diffusion bonded transition joints between commercially pure titanium and type 304 stainless steel using a nickel interlayer. *Journal of Materials Science*, 2007, vol. 42, pp. 7906–7912.
- [11] Khazgaliev R.G., Muhametrahimov M.H., Mulyukov R.R., Lutfullin R.Ya. Tverdogaznoe soedinenie titanovogo splava s nerzhavayushchey stal'yu cherez nanostrukturirovannuyu prosloyku iz nikelovogo splava [Solid-phase connection of titanium alloy with stainless steel through a nanostructured layer of Nickel alloy]. *Perspektivnye materialy* [Journal of Advanced Materials]. 2011, no. 12, pp. 529–534.
- [12] Thirunavukarasu G., Kundu S., Mishra B., Chatterjee S. Effect of Bonding Temperature on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Joint Between Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Nickel as an Intermediate Material. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2014, vol. 45(4), pp. 2067–2077.
- [13] Khazgaliev R.G., Mukhametrahimov M.H., Imayev M.F., Shayakhmetov R.U., Mulyukov R.R. Special Features of Fracture of a Solid-State Titanium Alloy–Nickel–Stainless Steel Joint. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, is. 6, pp. 822–827.
- [14] Khazgaliev R.G., Imayev M.F., Mulyukov R.R. Issledovanie vozmozhnosti uprochneniya soedineniya titanovogo splava s korrozionnostoykoy stal'yu, poluchennogo diffuzionnoy svarkoy cherez promezhutochnuyu prosloyku [Strengthening possibility investigation of joint of titanium alloy and stainless steel made by diffusion welding through interlayer]. *Deformatsiya i Razrushenie Materialov* [Russian metallurgy (Metally)]. 2017, no. 5, pp. 18–24.
- [15] Khazgaliev R.G., Imayev M.F., Mulyukov R.R., Safin F.F. Modifitsirovanie poverhnosti prosloyki nikelya dlya delokalizatsii deformatsii pri svarke davleniem obraztsov titanovogo splava i nerzhavayushchey stali [The effect of modification of nickel interlayer surface on the uniformity of deformation at pressure welding of titanium alloy and stainless steel]. *Pis'ma o materialah* [Letters on Materials]. 2015, vol. 5(2), pp. 133–137.

## Информация об авторах

**ХАЗГАЛИЕВ Руслан Галиевич** (Уфа) — младший научный сотрудник. Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. Степана Халтурина, д. 39, e-mail: sloth.usatu@gmail.com).

**ИМАЕВ Марсель Фаниревич** (Уфа) — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. Степана Халтурина, д. 39, e-mail: marcel@imsp.ru).

**МУЛЮКОВ Радик Рафикович** (Уфа) — доктор физико-математических наук, профессор. Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. Степана Халтурина, д. 39, e-mail: radik@imsp.ru).

**САФИН Фидус Файзханович** (Уфа) — старший преподаватель. Уфимский государственный авиационный технический университет (450001, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: 7545704@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хазгалиев Р.Г., Имаев М.Ф., Мулюков Р.Р., Сафин Ф.Ф. Напряженно-деформированное состояние в зоне соединения при клинопрессовой сварке разнородных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 10, с. 37–46, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-37-46.

### Please cite this article in English as:

Khazgaliev R.G., Imayev M.F., Mulyukov R.R., Safin F.F. Stress-Strain State in the Joint Zone During Wedge-Press Welding of Dissimilar Materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 10, pp. 37–46, doi: 10.18698/0536-1044-2018-10-37-46.

## Information about the authors

**KHAZGALIEV Ruslan Galievich** (Ufa) — Junior Researcher. Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences (450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, Stepan Khalturin St., Bldg. 39, e-mail: sloth.usatu@gmail.com).

**IMAYEV Marcel Fanirevich** (Ufa) — Doctor of Sciences (Physics and Maths), Lead Researcher. Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences (450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, Stepan Khalturin St., Bldg. 39, e-mail: marcel@imsp.ru).

**MULYUKOV Radik Rafikovich** (Ufa) — Doctor of Sciences (Physics and Maths), Professor. Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences (450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, Stepan Khalturin St., Bldg. 39, e-mail: radik@imsp.ru).

**SAFIN Fidus Faizkhanovich** (Ufa) — Senior Lecturer. Ufa State Aviation Technical University (450001, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 12, e-mail: 7545704@mail.ru).