



УДК 621.791.4: 539.378.3

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. В. КВАСНИЦКИЙ, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Путем компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние узлов типа втулка–фланец из разнородных материалов при диффузионной сварке с учетом влияния пластических деформаций и установлены закономерности его формирования.

Ключевые слова: диффузионная сварка, узел втулка–фланец, разнородные материалы, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, пластические деформации

В машиностроении часто используются детали цилиндрической формы, изготовленные диффузионной сваркой из разнородных материалов. В работе [1] рассмотрено напряженно-деформированное состояние (НДС) при диффузионной сварке узлов соединения типа цилиндр–цилиндр и втулка–втулка. Показано, что при силовом и термическом нагружениях уровень напряжений в зоне стыка резко изменяется даже при одинаковых диаметрах соединяемых деталей. При соединении цилиндрических деталей разного диаметра типа втулка–фланец в месте перехода от втулки к фланцу имеется концентратор напряжений, который может существенно влиять на НДС в стыке и формирование соединений.

Целью настоящей работы является исследование НДС узла соединения типа втулка–фланец в зоне стыка при диффузионной сварке.

Моделирование НДС проводили с учетом влияния пластических деформаций. Известно [2], что пластические деформации делятся на независимые от времени (мгновенная пластичность) и зависящие от него (ползучесть). В данной работе исследованы деформации мгновенной пластичности. Моделирование НДС в пределах упругости рассмотрено в работе [3].

Исследования выполняли методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. В качестве критерия появления пластических деформаций принято условие Мизеса $\sigma_{\text{экр}} = \sigma_T$, где $\sigma_{\text{экр}}$ — эквивалентные (приведенные) напряжения; σ_T — предел текучести. Результаты настоящей работы сопоставляли с полученными в работе [4], в которой моделировали НДС при диффузионной сварке ци-

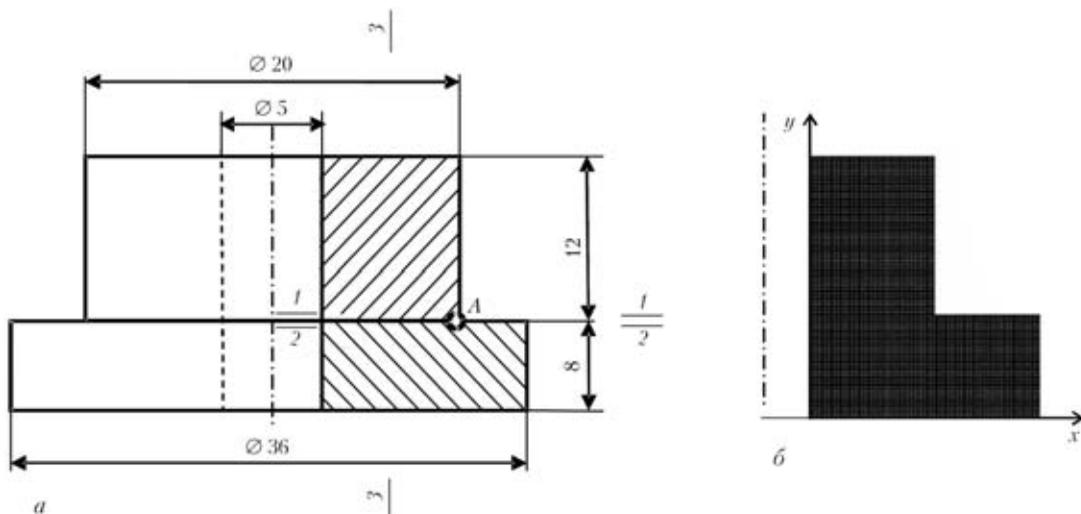


Рис. 1. Схема узла соединения втулка–фланец (а) и сечения конечно-элементной модели (б)

© В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, 2009



линдрических деталей без конструктивного концентратора напряжений.

Исследовали образцы сварных соединений втулка–фланец и расчетную модель (рис. 1). Варианты сочетания свойств материалов приведены в таблице. Модуль упругости при пластическом деформировании для всех материалов принят равным нулю, кроме модели 1, где с целью обеспечения устойчивости решения модуль упругости принят $1 \cdot 10^3$ МПа.

Результаты решения пластических задач сравнивали с результатами упругих решений.

В модели 1 осуществляли нагружение по классической схеме диффузионной сварки — равномерное сжатие осевой силой при неизменной тем-

пературе. Сравнение полей напряжений с соответствующими полями в упругом решении показало, что при возникновении пластических деформаций характер напряженного состояния в целом меняется мало, высокий уровень концентрации напряжений в точке перехода от втулки к фланцу на внешней поверхности узла соединения остается (точка *A* на рис. 1), однако уровень напряжений в этой области и ее размеры изменяются. Варианты одинаковой (малой) прочности обоих материалов $1_{п}$ и меньшей прочности материала втулки $1_{п.в}$ имеют практически одинаковые поля напряжений. Напряженное состояние в варианте с меньшей прочностью материала фланца $1_{п.ф}$ мало отличается от упругого решения. Таким об-

Исследуемые варианты нагружения и сочетания свойств соединяемых материалов в изделии (расчетные модели 1–5)

№ варианта	КЛТР·10 ⁶ , 1/град		Нагружение <i>p</i> , МПа	<i>T</i> , °C	σ _T , МПа	
	втулки	фланца			втулки	фланца
1 _п	10	10	40	0	39	39
1 _{п.в}	10	10	40	0	39	80
1 _{п.ф}	10	10	40	0	80	39
2 ^н _п	10	20	0	+100	60	60
	20	10	0	-100		
2 ^о _п	10	20	0	-100	60	60
	20	10	0	+100		
3 ^н _{п.в}	10	20	0	+100	60	120
	20	10	0	-100		
3 ^о _{п.в}	10	20	0	-100	60	120
	20	10	0	+100		
3 ^н _{п.ф}	10	20	0	+100	120	60
	20	10	0	-100		
3 ^о _{п.ф}	10	20	0	-100	120	60
	20	10	0	+100		
4 ^н _п	10	20	40	+100	80	80
	20	10	40	-100		
4 ^о _п	10	20	40	-100	80	80
	20	10	40	+100		
5 ^н _{п.в}	10	20	40	+100	80	160
	20	10	40	-100		
5 ^о _{п.в}	10	20	40	-100	80	160
	20	10	40	+100		
5 ^н _{п.ф}	10	20	40	+100	160	80
	20	10	40	-100		
5 ^о _{п.ф}	10	20	40	-100	160	80
	20	10	40	+100		

Примечание. Индексами «н» и «о» обозначены соответственно нагрев и охлаждение, а индексом «п» — пластическое решение; в нижнем индексе добавляются символы для обозначения соединяемых материалов разной прочности, т. е. менее прочного (с меньшим пределом текучести) материала втулки «в» или фланца «ф»; КЛТР — коэффициент линейного температурного расширения.



разом, на поля напряжений в узле в большей степени влияют пластические деформации во втулке. Это можно объяснить тем, что область пластических деформаций в ней превышает аналогичную область во фланце (рис. 2).

Пластические деформации в вариантах $1_{п}$ и $1_{п.в}$ сосредоточены во втулке вдали от стыка и вблизи точки концентрации напряжений, значения их во втулке вдали от точки концентрации возрастают по мере удаления от стыка (рис. 2, а, б). В варианте $1_{п.ф}$ пластические деформации развиваются только во фланце в очень узкой зоне вблизи точки концентрации (рис. 2, в). Эпюры пластических деформаций подтверждают отсутствие последних на большей части стыка как со стороны втулки (рис. 3, а), так и со стороны фланца (рис. 3, б) во всех вариантах сочетания прочности материалов. Максимального значения пластические деформации достигают в точке концентрации.

Пластические деформации на верхней (противоположной стыку) кромке втулки доходят до 0,1 % в вариантах $1_{п}$ и $1_{п.в}$. Вдали от стыка они отсутствуют только в варианте с меньшей прочностью материала фланца.

Таким образом, анализ результатов пластического решения показывает, что варианты приложения постоянной сжимающей нагрузки не обеспечивают развитие пластических деформаций в зоне стыка, а следовательно, и не создают условий для образования качественного соединения. Вместе с тем, в случаях, когда материал втулки имеет

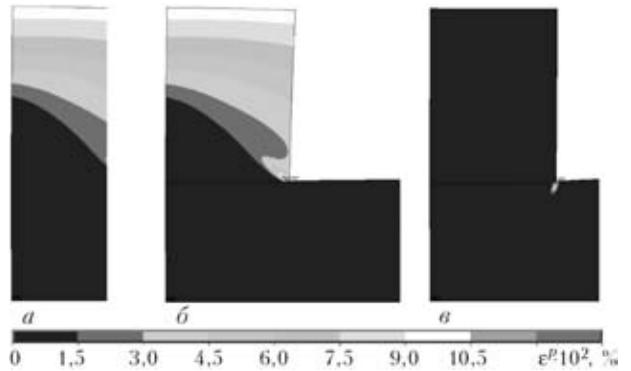


Рис. 2. Поля пластических деформаций ϵ^p модели 1, варианты $1_{п}$ (а), $1_{п.в}$ (б) и $1_{п.ф}$ (в)

меньшую прочность, чем материал фланца, и при одинаковой прочности материалов втулки и фланца создаются условия для пластических деформаций во втулке вдали от стыка, что приводит к повышению общих деформаций в сварном узле.

В моделях 2 и 3 осуществляли нагружение по схеме диффузионной сварки с изменением температуры без сжатия осевой силой после схватывания поверхностей. Анализ полей напряжений и деформаций в этих вариантах нагружения показал, что при нагреве и охлаждении поля эквивалентных напряжений и пластических деформаций совпадают полностью (рис. 4, а, б), а поля осевых напряжений отличаются только знаками. Характер напряженного состояния при возникновении пластических деформаций изменяется мало по сравнению с упругим вариантом, отличие заметно только в непосредственной близости от

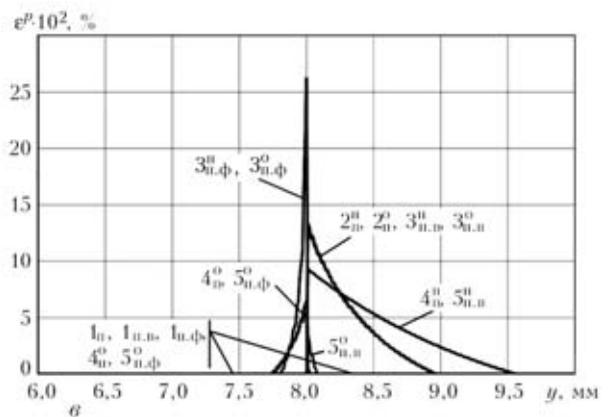
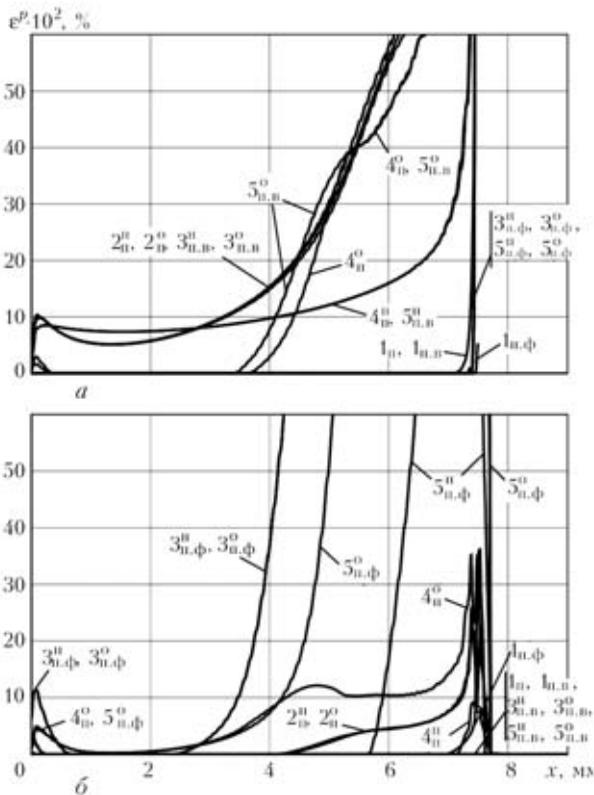


Рис. 3. Эпюры пластических деформаций ϵ^p в зоне стыка во втулке (а), фланце (б) и поперек средней части стыка (в) при различных вариантах нагружения в моделях 1–5

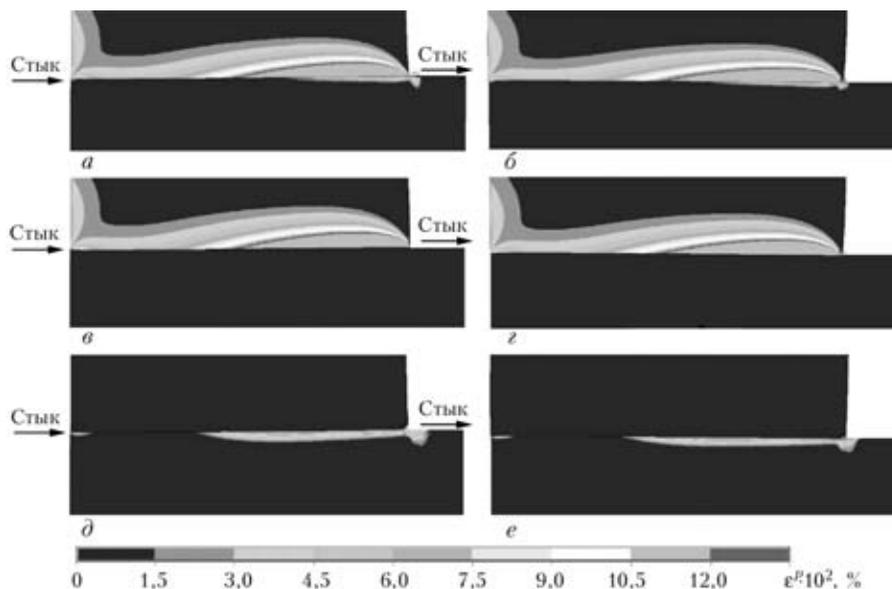


Рис. 4. Поля пластических деформаций в зоне стыка в сечениях узла соединения втулка–фланец, варианты $2_{п}^H$ (а), $2_{п}^O$ (б), $3_{п.в}^H$ (в), $3_{п.в}^O$ (г), $3_{п.ф}^H$ (д), $3_{п.ф}^O$ (е)

стыка и в зоне концентрации напряжений. Характер распределения напряжений вдоль стыка как во втулке, так и во фланце при появлении пластических деформаций становится более равномерным, наличие пластических деформаций уменьшает пики всех напряжений в точке концентрации.

Все пластические деформации как при нагреве, так и охлаждении сосредоточены в очень малой области, расположенной вблизи поверхности стыка, в вариантах $2_{п}^H$, $2_{п}^O$ в большей степени со стороны втулки, в $3_{п.в}^H$ и $3_{п.в}^O$ — полностью со стороны втулки, а в $3_{п.ф}^H$ и $3_{п.ф}^O$ — со стороны фланца. Зона пластических деформаций со стороны фланца значительно уже и занимает только часть стыка вблизи внешней его поверхности (рис. 4). Эпюры пластических деформаций показывают наличие последних во всем стыке, но распределены они неравномерно как вдоль стыка, так и между втулкой и фланцем (рис. 3, а, б).

В модели 2 максимального значения пластические деформации достигают со стороны втулки на кромке стыка вблизи точки концентрации. Здесь их значение равно 8 %, во фланце оно значительно меньше. Во внутренней части стыка во втулке они постепенно уменьшаются, доходя до минимума (0,05 %) на расстоянии около 1,5 мм (0,2 ее толщины) от внутренней поверхности втулки. По направлению к внутренней поверхности втулки они снова несколько возрастают (до 0,1 %). Во фланце пластические деформации в основном сосредоточены на внешней половине стыка, в остальной его части они отсутствуют и только на небольшом участке, расположенном вблизи внутренней поверхности образца, появляются небольшие деформации (около 0,03 %).

На большей части стыка, кроме точки концентрации напряжений, в направлении оси образца (поперек стыка) эти деформации во втулке действуют как укорочение при нагреве и удлинение при остывании, а в радиальном и окружном направлениях, наоборот. При удалении от стыка пластические деформации очень быстро уменьшаются и на расстоянии около 1 мм их значение равно нулю (рис. 3, в).

В вариантах $3_{п.в}^H$ и $3_{п.в}^O$ со стороны втулки значения и распределение пластических деформаций как при нагреве, так и охлаждении не изменяются (см. рис. 3, а). При меньшей прочности материала фланца пластические деформации во втулке отсутствуют на протяжении всего стыка и появляются только в очень узкой зоне в точке концентрации напряжений.

Со стороны фланца эпюры пластических деформаций изменяются при уменьшении прочности как втулки, так и фланца (рис. 3, б). При уменьшении прочности только материала втулки пластические деформации во фланце отсутствуют. В вариантах $3_{п.ф}^H$ и $3_{п.ф}^O$ пластические деформации возрастают, увеличивается также неравномерность их распределения вдоль стыка. Максимального значения (более 7 %) они достигают в точке концентрации. Во внутренней части стыка пластические деформации постепенно уменьшаются до нуля, в результате в зоне с касательными напряжениями, близкими к нулю (на расстоянии от 0,5 до 2,5 мм от внутренней поверхности втулки), они отсутствуют. По направлению ко внутренней поверхности втулки они снова несколько возрастают.

При удалении от стыка значения пластических деформаций очень быстро уменьшаются и ста-



новятся равными нулю уже на расстоянии 0,2 мм от стыка (см. рис. 3, в).

Таким образом, анализ пластического решения для соединений материалов с разным КЛТР и имеющих одинаковую либо различную прочность, подтверждает вывод, полученный при упругом решении, о том, что изменение температуры (при нагреве или охлаждении) создает благоприятные условия для локализации пластических деформаций именно в зоне стыка, при этом пластические деформации распределяются неравномерно как по длине стыка, так и между деталями. Минимальное значение пластических деформаций зафиксировано в точке, расположенной на расстоянии, равном 0,2 толщины втулки от ее внутренней поверхности, максимальное — у внешней поверхности втулки.

В моделях 4 и 5 нагружение осуществляли путем сжатия осевой силой и изменения температуры. Рассматривали следующие варианты: одинаковую прочность материалов втулки и фланца ($4_{п}^H, 4_{п}^O$); меньшую прочность материала втулки ($5_{п.в}^H, 5_{п.в}^O$); меньшую прочность материала фланца ($5_{п.ф}^H, 5_{п.ф}^O$). Как показало сравнение результатов с упругим решением, характер напряженного состояния при возникновении пластических деформаций меняется мало, однако уровень напряжений вблизи стыка и в точке концентрации снижается.

Пластические деформации сосредоточены вблизи стыка преимущественно по одну сторону от стыка, в вариантах $4_{п}^H, 4_{п}^O, 5_{п.в}^H$ и $5_{п.в}^O$ — главным образом во втулке, а в вариантах $5_{п.ф}^H$ и $5_{п.ф}^O$ — во фланце, при этом их значения быстро убывают

по мере удаления от стыка (рис. 5). При замене нагрева охлаждением область пластических деформаций во втулке существенно уменьшается, а во фланце увеличивается.

В вариантах $4_{п}^H$ и $5_{п.в}^H$ распределение пластических деформаций вдоль стыка во втулке более равномерное, чем при нагреве без сжатия (см. рис. 3, а). Максимальные значения пластических деформаций достигаются в точке концентрации, где их значения составляют до 4 %, в основной части стыка они находятся на уровне 0,07...0,20 %. При остывании (варианты $4_{п}^O, 5_{п.в}^O$) имеет место противоположная картина: равномерность уменьшается, практически на половине стыка (в его внутренней части) пластические деформации отсутствуют.

Во фланце, наоборот, при нагреве пластические деформации отсутствуют практически по всему стыку, за исключением точки концентрации, при охлаждении их значения приближаются к нулю в точке с нулевыми касательными напряжениями (на расстоянии 0,2 толщины втулки от ее внутренней поверхности), в остальной части стыка они изменяются от 0,05 % до нескольких процентов в точке концентрации (см. рис. 3, б).

В варианте с меньшей прочностью материала фланца как при нагреве, так и при охлаждении во втулке пластические деформации отсутствуют по всей длине стыка, за исключением точки концентрации (см. рис. 3, а и 5, д, е). Во фланце пластические деформации появляются как при нагреве, так и при охлаждении. Однако при нагреве они сосредоточены только на небольшой части стыка, прилегающей к внешней поверхности (см. рис. 3,

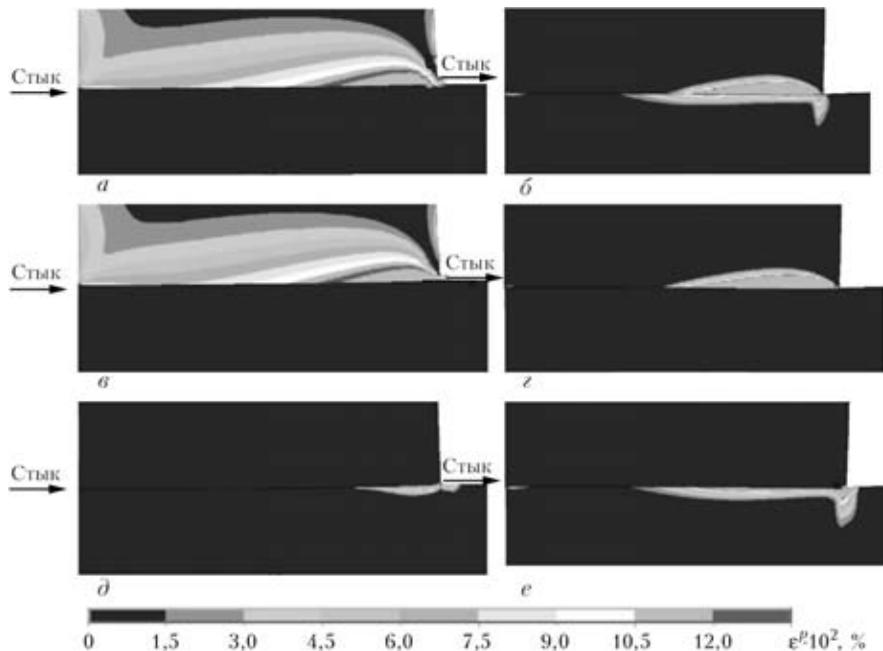


Рис. 5. Поля пластических деформаций в зоне стыка в сечениях узла соединения втулка–фланец, варианты $4_{п}^H$ (а), $4_{п}^O$ (б), $5_{п.в}^H$ (в), $5_{п.в}^O$ (г), $5_{п.ф}^H$ (д) и $5_{п.ф}^O$ (е)



б и 5, д), а при охлаждении распределены практически по всему стыку (рис. 3, б и 5, е).

Возникающие в районе стыка пластические деформации очень быстро уменьшаются по мере удаления от поверхности стыка (см. рис. 3, в).

Таким образом, анализ полученного решения показал, что сочетание сжатия с нагревом и охлаждением в сварном соединении типа втулка–фланец, когда материал втулки имеет меньший КЛТР, чем материал фланца, также создает благоприятные условия для локализации пластических деформаций именно в зоне стыка, но при этом пластические деформации распределяются по всей его длине только со стороны втулки (материала с меньшим КЛТР) при нагреве и фланца (материала с большим КЛТР) при остывании. В случае обратного сочетания КЛТР материалов втулки и фланца (большой КЛТР во втулке, меньший во фланце) относительно НДС стадии нагрева и охлаждения меняются местами.

При сочетании сжатия с нагревом, когда материал втулки имеет меньшие КЛТР и прочность, чем материал фланца, не только создаются благоприятные условия для локализации пластических деформаций в зоне стыка со стороны втулки, но и обеспечивается более равномерное распределение пластических деформаций вдоль стыка. Это относится и к случаю сжатия с охлаждением, когда материал фланца отличается меньшим КЛТР.

Сочетание сжатия с охлаждением, когда материал втулки имеет меньший КЛТР и меньшую прочность, чем материал фланца, создает благоприятные условия для локализации пластических деформаций именно в зоне стыка со стороны втулки, но не обеспечивает при этом распределения пластических деформаций вдоль всего стыка. Это же правомерно и для случая сжатия с нагревом, если материал фланца имеет меньший КЛТР.

Сочетание сжатия с нагревом в узле соединения втулка–фланец, когда материал втулки имеет меньший КЛТР, но большую прочность, чем материал фланца, не обеспечивает условий для развития пластических деформаций вдоль всего стыка как со стороны втулки, так и со стороны

фланца. Это же относится и к сжатию с охлаждением, когда материал фланца имеет меньший КЛТР.

Сочетание сжатия с охлаждением в узле соединения втулка–фланец, когда материал втулки характеризуется меньшим КЛТР, но большей прочностью, чем материал фланца, обеспечивает условия для локализации пластических деформаций в зоне стыка со стороны фланца, что правомерно и для сочетания сжатия с нагревом, если материал фланца имеет меньший КЛТР.

Выводы

1. Закономерности влияния схемы нагружения при диффузионной сварке, установленные ранее для узлов соединений типа цилиндр–цилиндр и втулка–втулка, в целом правомерны и для узлов соединений типа втулка–фланец.

2. Геометрия деталей в зоне стыка оказывает существенное влияние на характер НДС. Переход от малого диаметра (втулка) к большому (фланец) резко смещает зону действия пластических деформаций во втулку.

3. Для создания пластических деформаций в стыке со стороны фланца материал втулки должен быть значительно прочнее материала фланца. При конструировании заготовок для сварки деталей из материалов, имеющих близкую прочность, необходимо по возможности избегать изменений диаметров узлов в зоне стыка.

1. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В. Влияние физико-механических свойств соединяемых металлов и геометрии деталей на распределение напряжений при диффузионной сварке в вакууме // Автомат. сварка. — 2008. — № 1. — С. 5–11.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
3. Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы / В. Д. Кузнецов, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // 36. науч. праць Нац. ун-ту кораблебудування. — 2007. — № 6(417). — С. 62–73.
4. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В. Напряженно-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке металлов с разными физико-механическими свойствами // Автомат. сварка. — 2008. — № 8. — С. 5–10.

The device is offered, comprising cumulative capacitors of an increased capacitance, thyristor key, recharging capacitor, and two pulse transformers with their primary windings connected in series. Unlike those usually employed in practice, the device makes it possible to generate 5-6 start pulses of an increased intensity per half-period of the alternating current.

Поступила в редакцию 21.07.2008