

В.Д.Кузнецов¹ д-р техн.наук, В.В.Квасницкий¹ канд.техн.наук, М.В.Матвиенко² асп.
1-НТУ Украины “Киевский политехнический институт” г.Киев, Украина
2-“Национальный университет кораблестроения”, г.Киев, Украина

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В УЗЛАХ “ВТУЛКА - ФЛАНЕЦ”

Установлено закономірності формування напружено-деформованого стану при дифузійному зварюванні деталей з різномірних матеріалів у вигляді втулки та фланцю в умовах зміни температури.

It has determined regularities of stress-deformed mode formation at diffusion welding of details from dissimilar metals such as bush and flange during termocycle.

Постановка проблеми. Для изготовления цилиндрических деталей из разнородных металлов часто используется диффузионная сварка в вакууме [1]. При определении давления сжатия – одного из основных параметров режима сварки – исходят из равномерного распределения давления по всей площади стыка. В работах [2, 3] показано, что при диффузионной сварке в вакууме (ДСВ) разнородных металлов обычно формируется сложное напряженное состояние, которое позволяет локализовать пластическую деформацию в зоне стыка путём термоциклирования, положенного в основу нового способа ДСВ [4]. Поскольку в цилиндрических деталях широко применяются узлы “втулка – фланец”, то исследование напряжённо – деформированного состояния (НДС) этих узлов является актуальным.

Цель работы – установление закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке узлов из разнородных материалов цилиндрической формы типа “втулка – фланец”.

Изложение основного материала. Исследования проводили с помощью конечно – элементного программного комплекса ANSYS на узлах, симметричных относительно осевой линии. Решалась осесимметричная задача с кольцевыми конечными элементами. Общий вид и сечение модели узла показаны на рис.1.

Для установления закономерностей формирования НДС анализировали поля и распределение осевых σ_y , радиальных σ_x , окружных σ_z , касательных τ_{xy} , эквивалентных $\sigma_{экв}$ и главных $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ напряжений, а также векторные диаграммы главных напряжений. Эпюры напряжений определяли вблизи стыка в сечениях (1–1, 2–2) и перпендикулярно стыку (3–3), показанных на рис. 1. Начало координат x помещали на внутренней поверхности втулки и фланца, а оси y – на нижней поверхности фланца.

Исследовали влияние свойств соединяемых материалов и условий нагружения на возникновение, величину и распределение напряжений при диффузионной сварке в вакууме (ДСВ). В расчетах предполагалось, что после сжатия деталей в вакууме механическое взаимодействие контактируемых поверхностей определяется механикой деформирования упругопластической непрерывной среды, т.е. полностью отсутствует проскальзывание между соединяемыми поверхностями [5]. Рассматривалась стадия

силового и температурного нагружения соединения после схватывания поверхностей. Эквивалентные напряжения определяли по Мизесу.

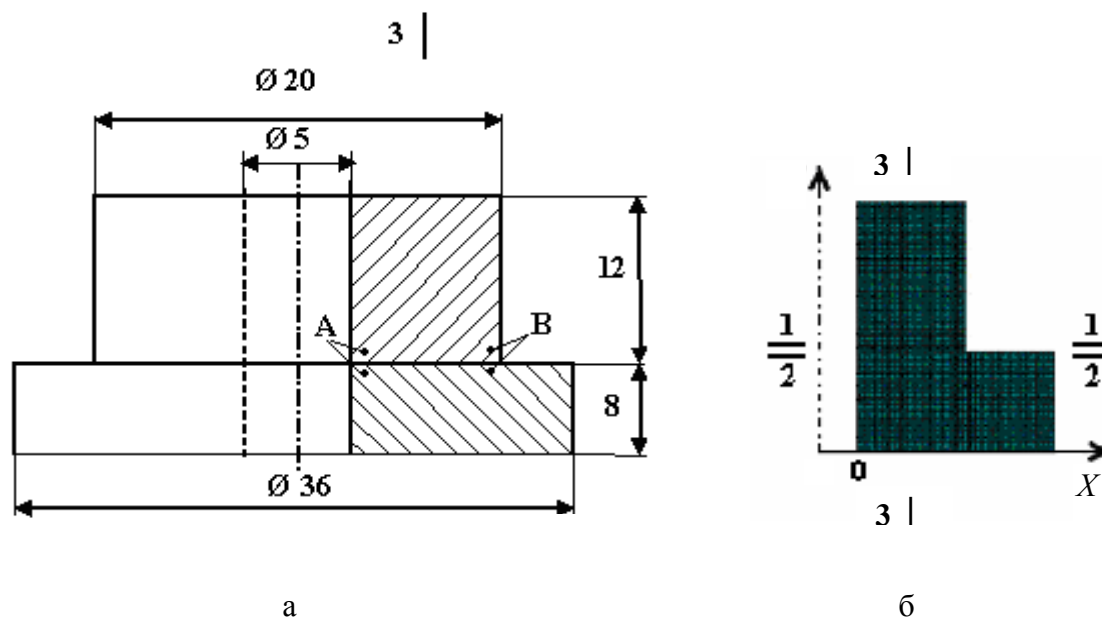


Рис.1. Общий вид узла соединения втулка – фланец (а) и сечение конечно – элементной модели (б)

Моделирование напряженного состояния в узлах втулка – фланец выполняли для моделей с одинаковыми ($E_1=E_2=1 \cdot 10^5$ МПа) и отличающимися в 2 раза модулями упругости. Коэффициенты линейного термического расширения (КЛТР) соединяемых материалов принимали одинаковыми в моделях с нагружением при постоянной температуре и различающимися в 2 раза в моделях с термоциклированием. Рассматривали варианты при сжатии узла в направлении оси симметрии равномерно распределенным давлением 20 и 40 МПа, а также и при отсутствии сжатия. При термоциклировании рассматривали изменение температуры на 100°C для случаев нагрева и охлаждения.

Варианты расчетных моделей приведены в табл. 1.

Модель 1 (мод. 1) соответствует сварке втулки и фланца из одного материала при постоянной температуре. В мод. 2 и 3 втулка и фланец имеют одинаковые жёсткости, но отличающиеся в 2 раза КЛТР, а сварка выполняется при изменяющейся температуре. В мод. 6–11 рассматривается напряжённое состояние при термоциклировании, но в мод. 6 и 7 жёсткость втулки выше, чем фланца при разных соотношениях КЛТР. В мод. 8–11 жёсткости обеих деталей одинаковы при разных соотношениях КЛТР. При этом, в мод. 6 и 7 соединение находится при внешнем давлении 40 МПа, мод. 10 и 11 – при 20 МПа и мод. 8 и 9 – без внешнего давления. Анализ результатов моделирования ДСВ как однородных, так и разнородных металлов при постоянной температуре (мод. 1, 4, 5) показал, что в зоне стыка существуют главным образом осевые напряжения. Небольшие радиальные, окружные и касательные напряжения появляются при сварке деталей разной жёсткости. Напряжённое состояние близко к одноосному. Например, на рис. 2 показаны эпюры напряжений в мод. 5.

Таблица 1.

Варианты* сочетания свойств соединяемых материалов втулки (1) и фланца (2)
и условий сварки

№ мод.	E_1 , МПа втулка	E_2 , МПа фланец	α_1 , 1/°C втулка	α_2 , 1/°C фланец	$p=40$ МПа	$\Delta T=+100$ °C
1	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	+	–
2	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	+	+
3	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	+	+
4	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	+	–
5	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	+	–
6	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	+	+
7	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	+	+
8	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	–	+
9	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	–	+
10	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	20	+
11	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^{-6}$ ($10 \cdot 10^{-6}$)	$10 \cdot 10^{-6}$ ($20 \cdot 10^{-6}$)	20	+

* в скобках указаны равноценные по напряженно-деформированному состоянию варианты

В мод. 1,4,5 уровень осевых и эквивалентных напряжений на большей части стыка остаётся одинаковым (≈ 40 МПа) во втулке и фланце. Только вблизи внешней точки стыка напряжения возрастают на 10–20 % в мод. 4 и на 20–30 % в мод. 5 по сравнению с мод. 1. В т.В перехода от втулки к фланцу в мод. 1,4,5 наблюдается рост всех напряжений. В продольном сечении 3–3 на эпюрах окружных, радиальных и эквивалентных напряжений имеются небольшие скачки на границе раздела материалов в сторону уменьшения напряжений в материале меньшей жёсткости. В результате осевые и эквивалентные напряжения во фланце снижаются до 30 МПа.

Для ДСВ с термоциклированием в табл.2 приведены значения напряжений σ_x , σ_y , σ_z , σ_1 , σ_2 , σ_3 в зоне стыка на середине толщины втулки, минимальные касательные напряжения τ_{xy} вблизи внутренней (т.А) и внешней (т.В) поверхностей втулки, а также минимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв. min}}$.

Из табл. 2 видно, что в условиях нагрева (охлаждения) при ДСВ с одинаковыми или разными жёсткостями и разными КЛТР в зоне стыка формируется сложное напряжённое состояние, в результате которого распределение напряжений существенно изменяется – появляются радиальные σ_x , окружные σ_y и касательные напряжения. Например, на рис. 3 приведены эпюры распределения напряжений в мод. 2 и 3.

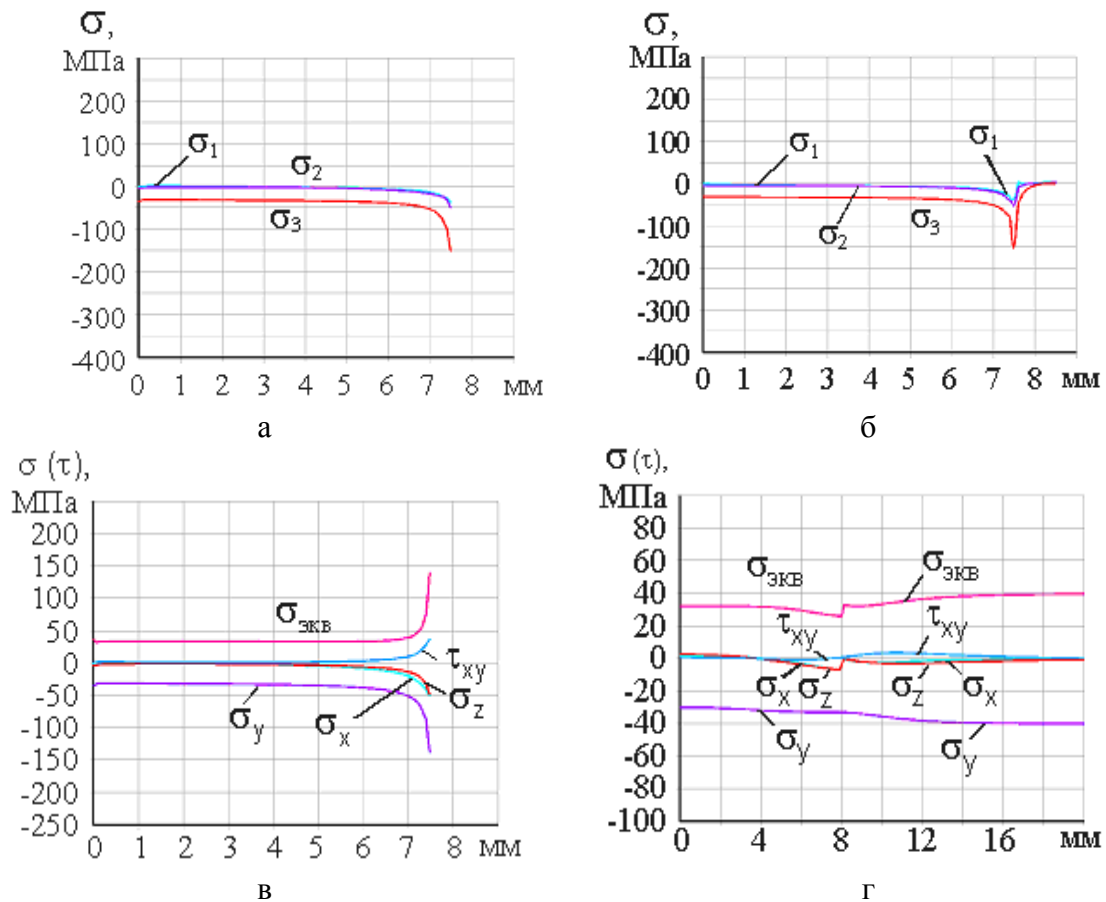


Рис. 2. Эпюры главных напряжений в сечениях 1–1 (а), 2–2 (б), а также напряжений σ_y , σ_x , σ_z , τ_{xy} , $\sigma_{экв}$ в сечениях 1–1 (в) и 3–3 (г) мод. 5 при нагреве

Таблица 2.

Значения напряжений (МПа) σ_x , σ_y , σ_z , σ_1 , σ_2 , σ_3 , $\sigma_{экв.min}$, а также τ_{xy} вблизи внутренней (т.А) и внешней (т.В) поверхностей втулки в сечениях 1–1 (В) и 2–2 (Ф) при ДСВ с термоциклированием (при нагреве)

№ мод.	σ_y		σ_x, σ_z		τ_{xy}		$\sigma_{экв.min}$		σ_1		σ_2		σ_3	
	В,Ф	В	Ф	т.А	т.В	В	Ф	В	Ф	В	Ф	В	Ф	
2	-50	45	-30	30	-80	125	20	50	-15	50	-25	-50	-55	
6	-50	75	-35	50	-140	165	45	80	-10	75	-30	-50	-64	
8	-15	50	-20	30	-120	90	50	55	5	50	-20	-20	-40	
10	-35	45	-30	35	-100	110	35	50	-5	50	-25	-35	-50	
3	-25	-50	20	-30	150	70	75	-10	30	-50	25	-60	-40	
7	-25	-80	20	-40	200	100	100	-10	40	-35	25	-80	-40	
9	10	-50	20	-30	120	95	50	20	40	-50	25	-55	-5	
11	-5	-50	20	-30	130	80	60	0	35	-50	25	-55	-20	

Как видно из рис. 3, при изменении температуры за счёт разницы КЛТР материалов втулки и фланца возникают значительные радиальные, окружные, касательные и эквивалентные напряжения. Вдоль стыка почти все напряжения распределены равномерно, возрастая вблизи внутренней и особенно внешней поверхностей втулки. При этом все они локализованы в непосредственной близости от стыка.

В мод. 2 на большей части стыка радиальные σ_x и окружные σ_z напряжения совпадают и находятся на уровне 45 МПа во втулке и –30 МПа во фланце, т.е. в материале с меньшим КЛТР при нагреве они растягивающие, с большим КЛТР – сжимающие, а при охлаждении – наоборот. Осевые напряжения во втулке и фланце на 25% больше сжимающего давления. Касательные напряжения распределены вдоль стыка неравномерно, возрастая к краям стыка до 30 и –85 МПа вблизи внутренней и внешней поверхностей соответственно. Точка с нулевыми касательными напряжениями при рассматриваемых геометрических размерах модели отстоит от внутренней поверхности на расстоянии 1,75 мм, т.е. около $\frac{1}{4}$ толщины втулки. Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ во втулке (сеч. 1–1) по большей части стыка изменяются в пределах 125–130 МПа, т.е. превышают внешнее сжимающее давление более чем в три раза.

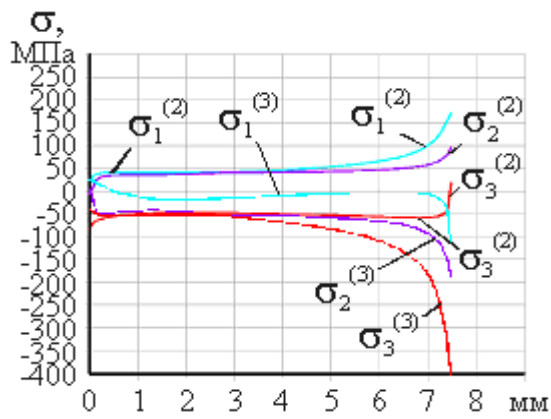
Во фланце (сеч. 2–2) $\sigma_{\text{экв}}$ на большей части стыка в 2,5–5 раз меньше, чем во втулке и от минимальных 20 МПа в зоне, где касательные напряжения равны нулю, повышаются к внутренней и наружной поверхностям стыка до 50 и 120 МПа соответственно. На эпюре напряжений по сечению 3–3 (рис. 3, ж) хорошо видно, что эти напряжения резко возрастают в зоне стыка только во втулке, оставаясь низкими во фланце.

Главные максимальные напряжения σ_1 на большей части стыка во втулке являются растягивающими и равняются 50–70 МПа. Они направлены по окружности в части стыка со стороны внутренней поверхности и по радиусу – со стороны внешней поверхности. По мере удаления от стыка направление напряжений становится радиальным, а их величина резко убывает. Напряжения σ_2 близки к σ_1 (рис. 3, а). Во фланце напряжения σ_1 во внутренней части стыка являются сжимающими с максимальной величиной $\sigma_1 = -30$ МПа, а ближе к внешней кромке стыка переходят в растягивающие. Напряжения σ_2 во фланце на большей части стыка постоянны и являются сжимающими (около –30 МПа).

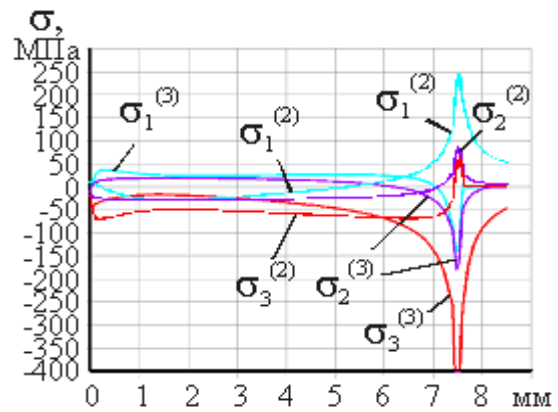
Главные минимальные напряжения σ_3 во втулке и фланце (кроме зон концентрации) являются сжимающими на уровне –50 МПа или немного выше (рис. 3, а, б). В небольшой зоне (вблизи точки нулевых касательных напряжений) напряжения σ_3 направлены перпендикулярно стыку, а на остальной части стыка угол наклона направления действия σ_3 к плоскости стыка приближается к 45° (направление определяли по векторным диаграммам).

Анализ эпюр главных напряжений показывает, что характер напряжённого состояния в зоне стыка со стороны втулки – растяжение по двум осям и сжатие вдоль третьей, что способствует развитию пластических деформаций. Со стороны фланца напряжённое состояние близко к всестороннему сжатию в небольшой зоне вблизи точки нулевых касательных напряжений, дальше переходит в плоское сжатие и вблизи зоны концентрации напряжений – сжатие по двум осям и растяжение по третьей.

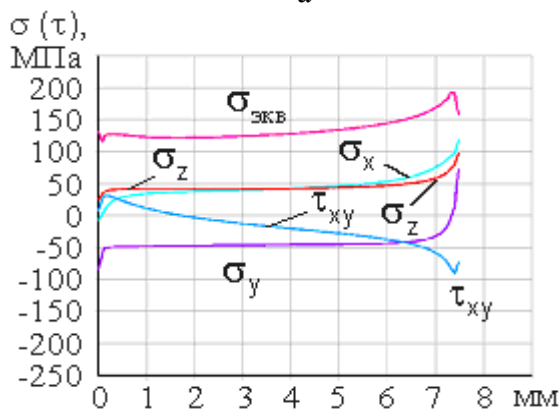
Уровень эквивалентных напряжений в зоне стыка в материале втулки значительно превышает внешнее давление. Полученные результаты относятся и к модели, сочетающей сжатие с охлаждением при КЛТР втулки большим, чем фланца (мод. 3).



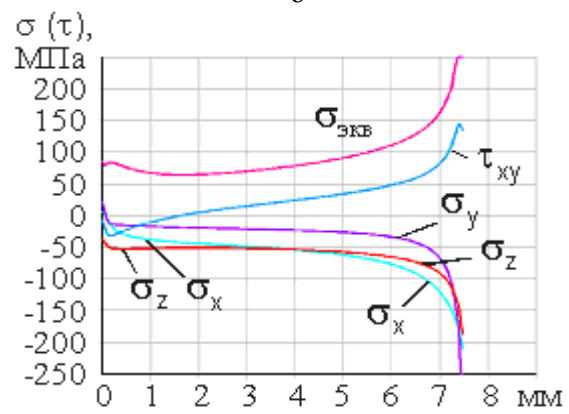
а



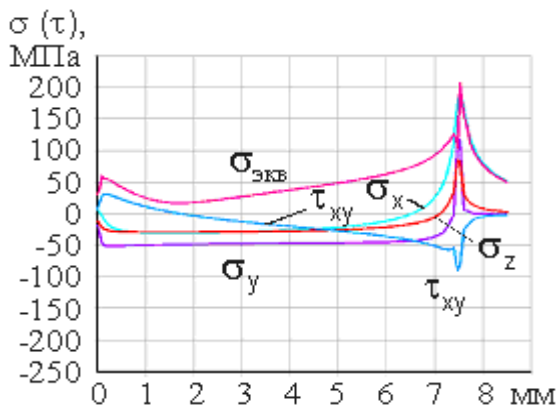
б



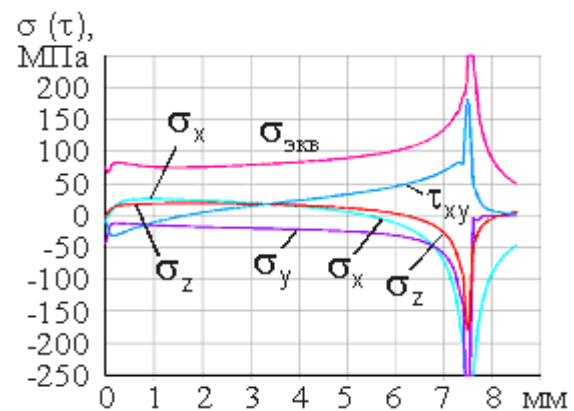
в



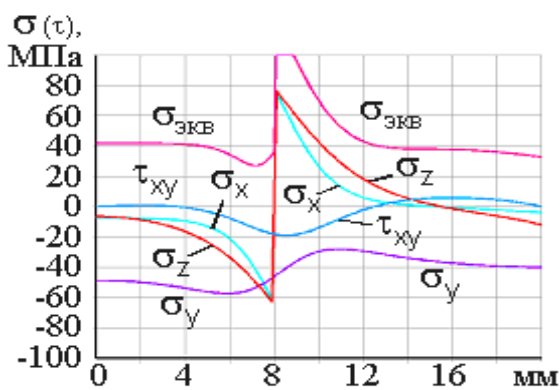
г



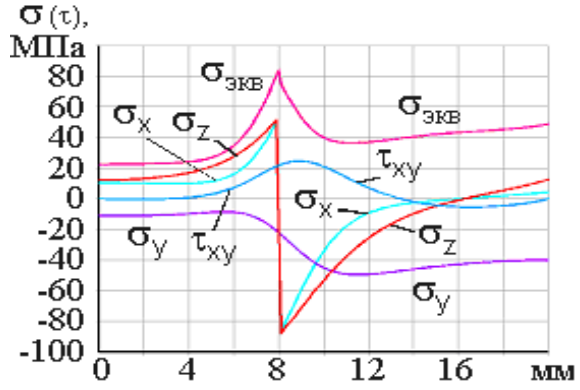
д



е



ж



з

Рис.3. Эпюры главных напряжений в сечениях 1–1(а) и 2–2(б) мод. 2($\sigma^{(2)}$) и мод. 3($\sigma^{(3)}$), σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , $\sigma_{ЭКВ}$ в сечениях 1–1(в, г), 2–2(д, е), 3–3(ж, з) мод. 2 (в, д, ж) и мод. 3 (г, е, з) при нагреве

Эпюры и поля напряжений мод. 3 при нагреве заметно изменяются (рис. 3, г, е, з) по сравнению с мод. 2, хотя характер распределения напряжений вдоль стыка Одинаковый. В мод. 3 повышаются все напряжения вблизи внешней поверхности втулки, снижаются средние сжимающие осевые напряжения σ_y (от -50 до -25 МПа) на большей части стыка, меняют знак окружные и радиальные напряжения, достигая до -50 МПа во втулке и 20 во фланце на большей части стыка. Характер распределения касательных напряжений не изменяется, но их знаки меняются на противоположные. Место расположения точки стыка с нулевыми касательными напряжениями не изменяется. В обработке металлов давлением зону, в которой касательные напряжения падают и изменяют свой знак, называют зоной (областью) застоя или прилипания. В работе [6] такая зона показана на контактной поверхности в центре цилиндра при его осадке между параллельными пластинами. Моделирование показывает наличие зоны застоя при диффузионной сварке не только цилиндров, но и втулок или втулок с фланцами.

Эквивалентные напряжения во втулке уменьшаются на большей части стыка, но существенно возрастают у внешней поверхности, а во фланце увеличиваются по всему стыку по сравнению с мод. 2. На большей части стыка эквивалентные напряжения во втулке и фланце остаются на уровне 80 МПа, т.е. в два раза превышают внешнее сжимающее давление.

Поля и эпюры главных напряжений в мод. 3 существенно отличаются от мод. 2. Максимальные напряжения σ_1 в мод. 3 (рис. 3, б) являются сжимающими (до -20 МПа) во втулке, во фланце – растягивающие, меняющие знак только у внешней поверхности. Направления действия σ_1 в мод. 2 и 3 противоположны. Главные напряжения σ_2 близки к напряжениям σ_1 .

Главные минимальные напряжения σ_3 во втулке и фланце мод. 3 являются сжимающими. Уровень этих напряжений во фланце ниже, чем во втулке (на большей части стыка – $(25-35)$ и $-(50-75)$ МПа соответственно). Во втулке на части стыка ($\approx 0,33$ её толщины), прилегающей к внутренней поверхности, они направлены по окружности, на остальной части – по радиусу под углом к стыку, изменяющимся от 0 до 45° . Во фланце эти напряжения перпендикулярны стыку на большей его части и по мере приближения к внешней поверхности угол наклона уменьшается до 45° .

Анализ эпюр главных напряжений показывает, что на большей части стыка напряжённое состояние в зоне стыка со стороны фланца – растяжение по двум осям и сжатие вдоль третьей. Со стороны втулки напряжённое состояние близко к всестороннему сжатию в зоне прилипания и по мере приближения к внешней поверхности переходит в плоское сжатие.

Полученные результаты относятся и к модели, сочетающей сжатие с охлаждением при КЛТР фланца большим, чем втулки. Таким образом, мод. 2 и 3 взаимно дополняют одна другую при охлаждении.

По сочетанию КЛТР втулки и фланца мод. 6 соответствует мод. 2, а мод. 7 – мод. 3, но жёсткость втулки в мод. 6 и 7 больше, чем фланца. По характеру распределения всех напряжений мод. 2 не отличается от мод. 6, а мод. 3 – от мод. 4. Однако, в моделях 6 и 7 увеличиваются средние эквивалентные напряжения до 180 МПа, радиальные и

окружные – до 75 – 80 МПа, касательные вблизи внешней точки стыка – до 200 МПа. Растут минимальные эквивалентные напряжения во втулках и фланцах мод. 6 и 7. При КЛТР втулки больше, чем фланца (мод. 3 и 7) распределения $\sigma_{\text{экв}}$ во втулках и фланцах практически одинаковы. Закономерности распределения касательных напряжений в мод. 6 и 7 сохраняются такими же, как в мод. 2 и 3 соответственно.

Увеличение жёсткости деталей мало влияет на осевые напряжения, но увеличивает уровень касательных, радиальных и окружных напряжений, особенно у внешней боковой поверхности втулки.

В мод. 8, 10 и 2 при КЛТР фланца больше, чем втулки, и в мод. 9, 11 и 3 при КЛТР фланца меньше, чем втулки, при равных жесткостях исследовали влияние величины внешнего давления сжатия, выбрав его 0, 20 и 40 МПа. Анализ эпюр и полей напряжений показал, что закономерности их распределения, установленные для мод. 2 и 3 сохраняются для их аналогов независимо от величины внешнего давления. Изменяются только величины напряжений. Увеличение внешнего давления на 20 МПа повышает осевые напряжения на 10-15 МПа. Например, в мод. 9 при $p=0$ в зоне стыка создаются растягивающие осевые напряжения $\sigma_y = 10$ МПа, при $p=20$ МПа сжимающие напряжения $\sigma_y = -5$ МПа, при $p=40$ МПа $\sigma_y = -25$ МПа. В мод.8 при $p=0$ $\sigma_y = -15$ МПа, при $p=20$ МПа $\sigma_y = -35$ МПа, при $p=40$ МПа $\sigma_y = -50$ МПа. Радиальные и окружные напряжения на большей части стыка изменяются мало. В моделях с разными КЛТР и одинаковыми жёсткостями втулки и фланца повышение внешнего давления сжатия увеличивает средние и минимальные эквивалентные напряжения в детали, имеющей меньший КЛТР, и уменьшает их в детали с большим КЛТР. На касательные напряжения величина внешнего давления сжатия влияет мало. Характер эпюр их распределения такой же, как в мод. 2 и 3. Увеличение внешнего давления несколько снижает отрицательные (мод. 8, 10, 2) касательные напряжения и увеличивает положительные (мод. 9, 11, 3) у внешней боковой поверхности втулки, что обусловлено суммированием или вычитанием эффектов внешнего сжатия и разности КЛТР. Уровень касательных напряжений вблизи внутренней боковой поверхности, практически не изменяется.

При КЛТР фланца больших, чем втулки, касательные напряжения положительные вблизи внутренней поверхности и отрицательные вблизи внешней поверхности. При КЛТР фланца меньших, чем втулки, знаки напряжений меняются на противоположные.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показывают, что сочетание давления сжатия с термоциклированием создаёт благоприятные условия для локализации и развития пластических деформаций в зоне стыка при ДСВ материалов с разными физико-механическими свойствами. Закономерности формирования напряжённого состояния при ДСВ получены в пределах упругости. Дальнейшее развитие теории связано с учётом пластических деформаций.

Выводы

1. Принятый в классической схеме ДСВ вариант сжатия соединяемых материалов при постоянной температуре не является оптимальным для формирования напряжённого состояния, определяющего пластические деформации в зоне стыка и всей детали.

2. При ДСВ втулок с фланцами из металлов с разными физико-механическими свойствами в условиях сжатия с термоциклированием появляются радиальные, окружные и касательные напряжения, существенно повышающие уровень осевых и эквивалентных напряжений и их локализацию в зоне стыка.

3. Объёмное напряжённое состояние и локализация напряжений, а следовательно и пластических деформаций обусловлены различием КЛТР и в меньшей мере жёсткостей соединяемых материалов.

Список литературы

1. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. – Москва: Машиностроение, 1976. – 312 с.
2. Матвиенко М.В. Моделирование полей главных напряжений при диффузионной сварке разнородных материалов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, №4, 2007. – С.45–50.
3. Квасницький В.В., Ермолаєв Г.В., Матвиєнко М.В. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам “цилиндр – цилиндр” и “втулка – втулка” // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, №5, 2007. – С.57–65.
4. Патент на корисну модель № 23414 Спосіб дифузійного зварювання матеріалів// В.В. Квасницький, М.В. Матвиєнко, Г.В. Ермолаєв та ін. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. UA. В23К 20/14. Заявл. 25.12.2006. Опубл. 25.05.2007. Бюл. №7.
5. Квасницький В.В. О кинетике образования соединения при диффузионной сварке в вакууме нержавеющей стали с армо – железом //Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, №4, 2007. – С.51–57.
6. Унксов Е.П. Инженерные методы расчёта усилий при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1955. – 280 с.

УДК 625.5

**А.О.Семинский канд.техн.наук, Н.В.Семинская ас.
НТУ Украины “Киевский политехнический институт” г.Киев, Украина**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЕФОРМИРУЮЩЕЙ НАСАДКИ

В работе представлен анализ исследований факторов, влияющих на формирование компактной струй высокого давления, а так же программное обеспечение, позволяющие моделировать рациональный профиль насадки.

In paper the analysis of the research of the parameters which exert influence on high pressure compact jet forming and the software for modeling of rational profile of nozzle are presented.

Введение

В настоящее время одним из основных приоритетов развития промышленных технологий обработки материалов является ресурсо- и энергосбережение. Проблема экономии носителей особенно остро стоит в горной промышленности. С этой целью ведутся работы по изучению и внедрению гидроструйных технологий с использованием струй высокого давления (до 250 МПа) для разрушения горных пород. Кроме того, что использование гидроструйных рабочих органов добывающего оборудования менее затратно, по сравнению с использованием механических рабочих