



НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. В. КВАСНИЦКИЙ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),

Г. В. ЕРМОЛАЕВ, канд. техн. наук (Нац. ун-т кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев)

Установлены закономерности влияния пластических деформаций на формирование напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке деталей из разнородных материалов в виде цилиндров и втулок в условиях сжатия и изменения температуры. Показано, что самый низкий уровень пластических деформаций и неблагоприятные распределения их вдоль оси цилиндров и втулок формируются при сварке материалов разной прочности в условиях сжатия при постоянной температуре.

Ключевые слова: диффузионная сварка, разнородные материалы, напряженно-деформированное состояние, пластические деформации, сжатие, температура

Ранее выполненные нами исследования полей напряжений в пределах упругости при диффузионной сварке в вакууме (ДСВ) показали, что распределение напряжений и деформаций, особенно в узлах из разнородных материалов, далеко от равномерного [1]. При этом в зоне стыка создается объемное напряженное состояние, обусловленное различием жесткостей и коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) соединяемых материалов. Характер распределения эквивалентных напряжений по высоте образца при термоциклировании способствует локализации пластических деформаций именно в зоне стыка, а наибольшие эквивалентные напряжения и ожидаемые пластические деформации наблюдаются на периферии стыка.

В реальных материалах при ДСВ возникают и неупругие деформации, которые делятся на пластические, не зависящие от времени (мгновенной пластичности ϵ_{ij}^p) и зависящие от времени диффузионной пластичности (ползучести ϵ_{ij}^c). Тензор деформаций представляет собой сумму $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^p$, где ϵ_{ij}^e — упругие деформации [2]. Появление пластических деформаций связано с определенным уровнем напряженного состояния, характеризуемым инвариантой σ_i (эквивалентные напряжения или интенсивность напряжений). При $\sigma_i < \sigma_T$, где σ_T — предел текучести материала, пластические деформации мгновенной пластичности ϵ_{ij}^p не развиваются.

Возникающие при сварке пластические деформации могут отразиться на характере полей нап-

ряжений и деформаций. Поэтому изучение влияния пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние (НДС) при ДСВ является актуальным.

Целью настоящей работы является установление закономерностей формирования НДС при ДСВ узлов из разнородных материалов цилиндрической формы типа цилиндр–цилиндр (Ц–Ц) и втулка–втулка (В–В) с учетом пластических деформаций, возникающих в узле.

На данном этапе работы рассматривались только деформации мгновенной пластичности. Исследования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS на узлах типа Ц–Ц и В–В. Теплофизические свойства соединяемых материалов принимали такими же, как и в упругих задачах [1], кроме предела текучести, который во всех случаях принимался больше минимальных и меньше максимальных эквивалентных напряжений, полученных в упругом решении ($\sigma_{\min} < \sigma_T < \sigma_{\max}$). В качестве условия появления пластических деформаций принято условие Мизеса $\sigma'_{\text{экр}} = \sigma_T$, где $\sigma'_{\text{экр}}$ — эквивалентные (приведенные) напряжения.

Для осесимметричной задачи (цилиндрические конструкции) касательные напряжения $\tau_{yz} = 0$ и $\tau_{xz} = 0$, поэтому

$$\sigma'_{\text{экр}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3\tau_{xy}^2},$$

где σ_x — радиальные; σ_y — осевые; σ_z — окружные (тангенциальные); τ_{xy} — касательные напряжения.

Исследовали НДС узлов Ц–Ц и В–В, которые по форме и размерам аналогичны использованным в упругой задаче (рис. 1). Конечно-элементные модели узлов приведены в работе [1]. Мо-

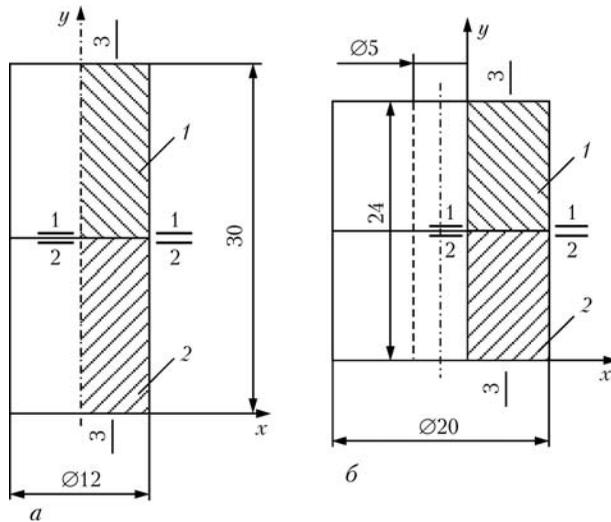


Рис. 1. Схема образцов сварных соединений типа Ц-Ц (а) и В-В (б)

дули упругости соединяемых материалов 1 и 2 принимали одинаковыми ($E_1 = E_2 = 1 \cdot 10^5$ МПа).

КЛТР соединяемых материалов во всех вариантах, кроме расчетной модели 1, приняты отличающимися в 2 раза ($\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/град, $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ 1/град). В модели 1 рассматривали нагружение только внешним усилием при постоянной температуре, поэтому КЛТР соединяемых материалов приняты одинаковыми ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/град). Исследованные варианты сочетания свойств материалов приведены в таблице.

Нагружение варьировалось следующим образом: только усилие сжатия (вариант 1), только нагрев или охлаждение (модели 2 и 3) и сочетание сжатия с нагревом или охлаждением (модели 4

Исследуемые варианты сочетания свойств соединяемых материалов 1 и 2 в узлах Ц-Ц и В-В (расчетные модели 1-5)

№ варианта	КЛТР- 10^6 материала, 1/град		Нагружение p , МПа	T , °C	σ_T материала, МПа	
	1	2			1	2
1 _п	10	10	40	0	39	80
2 _н	10	20	0	+100	60	60
2 _о	10	20	0	-100	60	60
3 _н	10	20	0	+100	60	120
3 _о	10	20	0	-100	60	120
4 _н	10	20	40	+100	80	80
4 _о	10	20	40	-100	80	80
5 _н	10	20	40	+100	80	160
5 _о	10	20	40	-100	80	160

Примечание. Индексами «н» и «о» соответственно обозначены нагрев и охлаждение, а индексом «п» — пластическое решение.

и 5). Предел текучести соединяемых материалов выбирался на таком уровне, чтобы пластические деформации происходили в обеих соединяемых деталях, т. е. одинаковые пределы текучести (модели 2 и 4), либо только в одной верхней детали, т. е. $\sigma_{T,1} = 0,5\sigma_{T,2} < \sigma_{ЭКВ}^{max}$ (модели 1, 3 и 5). Модуль упрочнения при пластическом деформировании для всех материалов принят равным нулю, кроме варианта 1, где с целью обеспечения устойчивости решения модуль упрочнения принят $1 \cdot 10^3$ МПа.

В варианте 1 рассматривали НДС при ДСВ материалов с разными пределами текучести, что характерно для соединения разнородных материалов, в том числе хрупких (керамика, графит) с пластичными (металлы). Результаты пластического решения сравнивали с аналогичной упругой задачей, когда эквивалентные напряжения в обоих материалах не достигают предела текучести. Эпюры распределения осевых напряжений, обеспечивающих сближение соединяемых поверхностей, в сечении 1-1 по стыку и сечении 3-3, расположенном поперек стыка на расстоянии, равном половине радиуса цилиндра в модели 1 при ДСВ цилиндров, показаны на рис. 2. Распределение осевых напряжений в зоне стыка узлов В-В аналогично.

Анализ полей напряжений показал, что при сжатии материалов с одинаковыми модулями упругости E в узлах обоих типов равномерное линейное напряженное состояние сохраняется до тех пор, пока оба материала работают упруго. При появлении пластических деформаций в менее прочном материале однородность полей напряжений и их симметрия относительно стыка на-

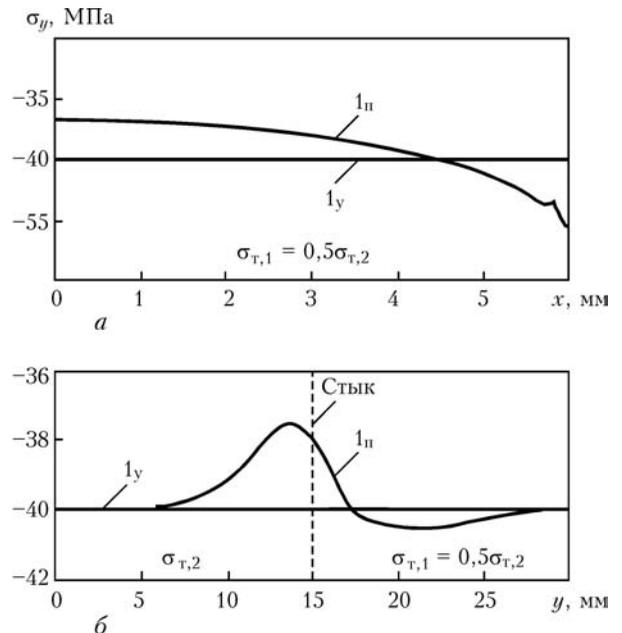


Рис. 2. Эпюры осевых напряжений в сечениях 1-1 (а) и 3-3 (б) узлов Ц-Ц, полученные при упругом решении (1_y) и с учетом пластичности ($1_п$)



рушаются. При этом в более прочном материале вблизи стыка эквивалентные напряжения несколько возрастают по сравнению с номинальными (приложенными к образцу). В образце из менее прочного материала аналогичная зона повышенных напряжений расположена вдали от стыка. Характер полей эквивалентных напряжений в этом варианте показывает, что различие прочности соединяемых материалов при пластическом решении проявляется аналогично различию жесткостей в упругом решении.

Поля пластических деформаций при ДСВ материалов с разными пределами текучести в цилиндрах и втулках свидетельствуют о том, что в материале с меньшим пределом текучести в момент появления в нем пластических деформаций в зоне стыка эквивалентные напряжения уменьшаются. Аналогично изменяются и осевые сжимающие напряжения (рис. 2, б). В результате этого при дальнейшем нагружении пластически деформируется часть детали, удаленная от стыка.

Пластические деформации возникают в менее прочном металле, но вблизи стыка они малы, осевое укорочение не превышает 0,005 %, а пластическое удлинение в радиальном и окружном направлении еще меньше.

Для всех моделей и вариантов изучали поля осевых, радиальных, окружных, касательных, главных и эквивалентных напряжений, а также поля пластических деформаций.

Эпюры пластических деформаций (рис. 3) подтверждают, что при сжатии и постоянной температуре материалов разной прочности пластические деформации развиваются в менее прочном материале главным образом за пределами стыка, что приводит к повышению общих деформаций при негарантированном качестве соединения.

В модели 2 рассматривается НДС при нагружении нагревом и охлаждении материалов одинаковой прочности с разными КЛТР без сжатия. Как показал анализ полей напряжений, в этом случае в районе стыка создается сложное поле напряжений, симметричное относительно стыка. При этом характер этого поля остается практически одинаковым как в области упругого деформирования, так и при появлении пластических деформаций. Отличие заметно только в очень узкой (около 1 мм) зоне, расположенной вблизи стыка.

Анализ полей пластических деформаций при нагреве или охлаждении материалов с разными КЛТР, но одинаковыми пределами текучести показал, что в этом варианте обеспечивается идеальная локализация пластических деформаций именно в зоне стыка с захватом обоих соединяемых материалов. Пластические деформации приводят к уменьшению и выравниванию эквивалентных напряжений вдоль стыка в обоих материалах

как при нагреве, так и охлаждении. Уровень напряжений при этом снижается. Вдоль оси образца распределение эквивалентных напряжений сохраняет свой идеальный, с точки зрения локализации пластических деформаций, характер, но пик в зоне стыка несколько притупляется.

Распределение осевых и главных напряжений вдоль стыка аналогично чисто упругому нагружению. При этом на большей части стыка значения осевых напряжений близки к нулю и резко увеличиваются только в узкой зоне у кромки стыка. Вдоль оси образца характер их изменяется, он близок к синусоиде с максимумами на расстоянии около 0,2...2,5 мм от стыка.

Как видно из рис. 3, пластические деформации возникают в обоих материалах в непосредственной близости от стыка, но вдоль стыка они распределяются неравномерно. В его средней части они невелики (около 0,01 %) и постепенно увеличиваются (до 0,16 %) по мере приближения к наружной поверхности образца (рис. 3, а-г). Точка минимума на эпюре пластических деформаций располагается в цилиндре на его оси, а во втулке — на расстоянии 0,23 ее толщины от внутренней поверхности, т. е. в точке с нулевыми касательными и минимальными эквивалентными напряжениями в упругом решении. В теории обработки металлов давлением зону, в которой значения касательных напряжений падают и меняют свой знак, называют зоной (областью) застоя или прилипания. В работе [3] такая зона представлена на контактной поверхности в центре цилиндра при его осадке. Моделирование показывает наличие зоны застоя при ДСВ не только цилиндров, но и втулок.

По мере удаления от стыка значения пластических деформаций резко уменьшаются (рис. 3, д, е). В направлении оси образца при нагреве значения пластических деформаций (укорочения в материале с меньшим КЛТР и удлинения в материале с большим КЛТР) заметно превышают значения деформаций в радиальном и окружном направлениях, имеющих обратные знаки. При остывании характер пластических деформаций сохраняется, но деформации укорочения меняются на деформации удлинения, и наоборот.

Таким образом, подтверждается вывод, полученный при упругом решении задачи, о том, что термодублирование при соединении материалов с разными КЛТР создает идеальные условия для локализации пластических деформаций именно в зоне стыка. При этом пластические деформации развиваются преимущественно по оси образца, т. е. перпендикулярно стыку, что должно способствовать физическому контакту материалов в стыке и повышению качества соединения. Однако неравномерность распределения пластических деформаций по стыку сохраняется.



$\epsilon^p \cdot 10^2, \%$

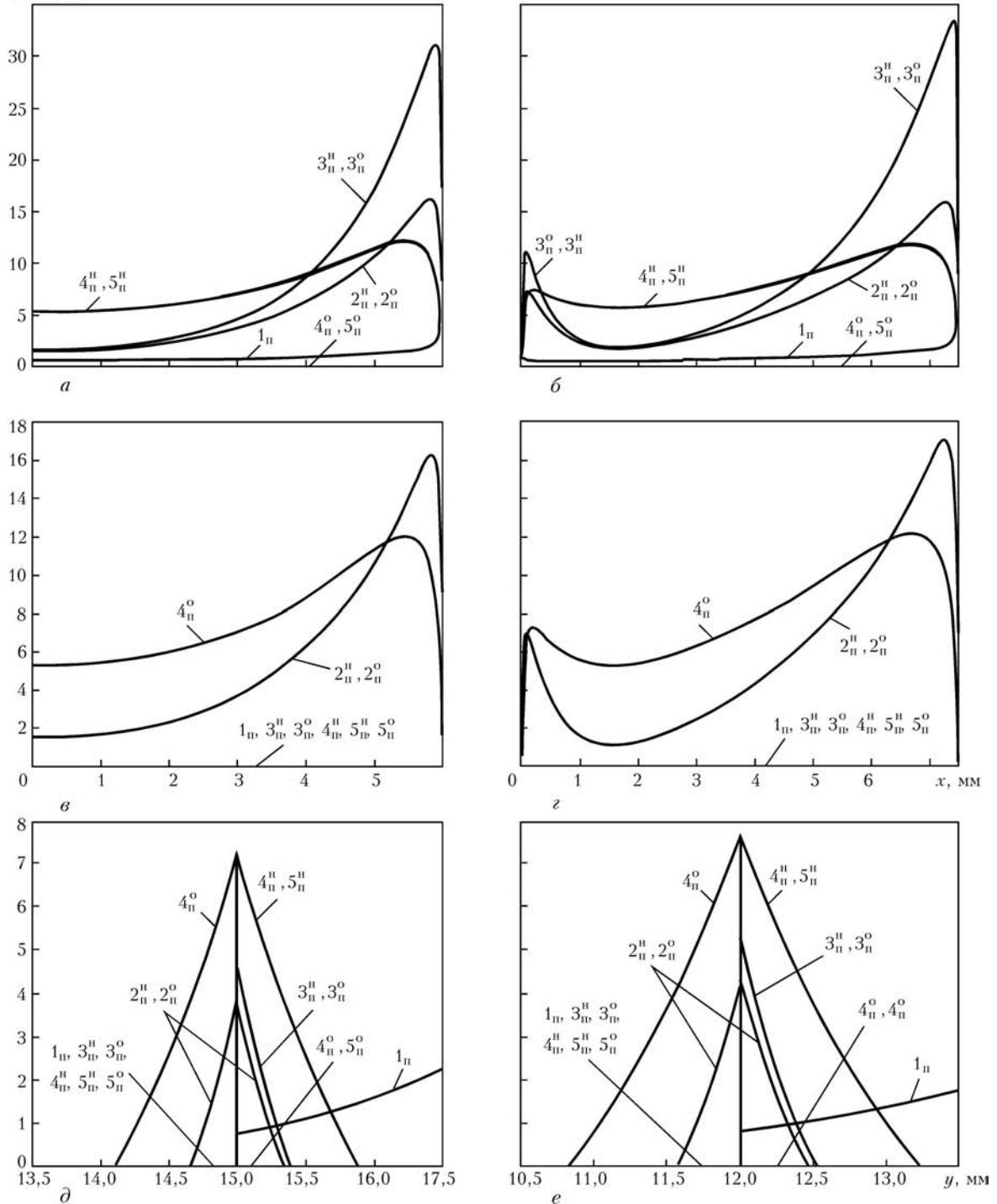


Рис. 3. Эпюры пластических деформаций (по Мизесу) в сечениях 1–1 (а, б), 2–2 (в, з) и 3–3 (д, е) в узлах Ц–Ц (а, в, д) и В–В (б, з, е) моделей 1–5

В модели 3 соединяемые материалы отличаются не только КЛТР, но и пределом текучести, т. е. пластические деформации развиваются преимущественно в одном из материалов. В районе стыка этой модели сохраняется сложное поле эквивалентных напряжений. При этом его характер остается практически одинаковым как в области упругого деформирования, так и при появлении пластических деформаций в соединении матери-

алов одинаковой и разной прочности, отличие заметно только в очень узкой (около 1 мм) зоне вблизи стыка, в частности, нарушается симметрия относительно стыка. Распределение осевых и главных напряжений вдоль стыка и характер напряженного состояния аналогичны чисто упругому нагружению и пластическому деформированию обоих материалов (модель 2). Анализ полей пластических деформаций в модели 3 также по-



казал их локализацию в зоне стыка, но только со стороны материала меньшей прочности. Пластические деформации приводят к уменьшению и выравниванию эквивалентных напряжений вдоль стыка прежде всего именно в менее прочном материале как при нагреве, так и охлаждении. Уровень напряжений при этом снижается, а их распределение становится более равномерным по сравнению с результатами, полученными при решении в пределах упругости. Распределение эквивалентных напряжений вдоль оси образца сохраняет свой идеальный, с точки зрения локализации пластических деформаций, характер, но пик в зоне появления пластических деформаций несколько притупляется.

Пластические деформации неравномерно распределены вдоль стыка и сосредоточены в материале меньшей прочности (см. рис. 3). В средней части стыка (в точке застоя) они невелики (около 0,01 %), однако постепенно увеличиваются до 0,32...0,34 % по мере приближения к наружной поверхности образца (см. рис. 3, а, б). При удалении от стыка значения пластических деформаций быстро уменьшаются (см. рис. 3, д, е). В более прочном материале пластические деформации отсутствуют (см. рис. 3, в, з).

Основные закономерности, установленные для нагружения термоциклированием в соединении материалов с различными КЛТР, сохраняются и при соединении материалов разной прочности.

В модели 4 рассматривается НДС при совместном нагружении сжатием и нагревом–охлаждением материалов с разными КЛТР и одинаковыми пределами текучести.

Поля эквивалентных напряжений в районе стыка становятся еще более сложными с явно выраженной асимметрией. Наличие пластических деформаций изменяет характер поля напряжений только в непосредственной близости от стыка (в зоне шириной около 1 мм). При замене нагрева охлаждением поля в материалах 1 и 2 меняются местами как при отсутствии пластических деформаций, так и при пластическом деформировании обоих материалов.

Отмеченные в упругом решении особенности и характер полей осевых и главных напряжений сохраняются, однако их значения несколько изменяются.

Появление пластических деформаций наблюдается поочередно в материале с меньшим КЛТР при нагреве и с большим при охлаждении, что приводит к уменьшению и выравниванию эквивалентных напряжений вдоль стыка в пластически деформирующемся материале. При этом уровень напряжений несколько снижается. В материале, где пластические деформации не происходят (с большим КЛТР при нагреве и с меньшим при

охлаждении), неравномерность распределения напряжений сохраняется, но их уровень также снижается. Вдоль оси образца распределение эквивалентных напряжений сохраняет близкий к идеальному, с точки зрения локализации пластических деформаций, характер, но пик в зоне стыка несколько притупляется, кроме того, он поочередно охватывает один или второй материал при замене нагрева охлаждением.

В распределении осевых напряжений сохраняются закономерности, установленные для нагрева–охлаждения без сжатия. При этом средний уровень осевых напряжений смещается от нуля до уровня приложенного осевого сжатия (40 МПа). Характер распределения главных напряжений вдоль стыка при появлении пластических деформаций меняется мало, незначительно изменяется и их уровень.

Пластические деформации неравномерно распределены как вдоль стыка, так и между материалами с разными КЛТР. В материале с меньшим КЛТР при нагреве (с большим КЛТР при остывании) в зоне застоя они находятся на уровне 0,055 %, по мере приближения к наружной поверхности образца постепенно увеличиваются до 0,12 % (см. рис. 3, а, б). В материале с большим КЛТР при нагреве (с меньшим КЛТР при остывании) пластические деформации отсутствуют по всей длине стыка (см. рис. 3, в, з). Общий уровень пластических деформаций при совместном нагружении сжатием и изменении температуры в целом выше, чем при изменении температуры без сжатия (модели 2 и 3). По мере удаления от стыка значения пластических деформаций быстро уменьшаются (см. рис. 3, д, е).

При нагреве по оси образца возникают пластические деформации укорочения как в материале с меньшим, так и с большим КЛТР, их значения заметно превышают значения деформации в радиальном и окружном направлениях, имеющие обратные знаки. При остывании характер распределения деформаций сохраняется.

Таким образом, подтверждается вывод, полученный при упругом решении задачи, о том, что термоциклирование при соединении материалов с различающимися КЛТР создает идеальные условия для локализации пластических деформаций именно в зоне стыка, а также в случае совместного нагружения сжатием и нагревом–охлаждением. При этом неравномерность распределения пластических деформаций по стыку уменьшается.

В модели 5 изучалось НДС при сжатии и нагревом–охлаждении материалов разной прочности с разными КЛТР. Установлено, что в районе стыка поля эквивалентных напряжений сохраняют достаточно сложный характер. Наличие пластических деформаций изменяет характер поля напряжений в непосредственной близости от стыка.



При нагреве пластически деформируется только материал, имеющий меньшее значение предела текучести, и только в том случае, если у него меньший КЛТР. При охлаждении происходит только упругая деформация обоих материалов.

В случае сжатия с нагревом в материале меньшей прочности и с меньшим КЛТР вследствие пластического деформирования эквивалентные напряжения уменьшаются и равномерно распределяются по всему стыку. При этом в более прочном материале эквивалентные напряжения также несколько снижаются, но неравномерность их распределения вдоль стыка сохраняется.

Вдоль оси образца распределение эквивалентных напряжений имеет близкий к идеальному, с точки зрения локализации пластических деформаций, характер, но пик в зоне стыка несколько притупляется при нагреве со стороны менее прочного материала.

При нагреве по оси образца возникают пластические деформации укорочения, их значения заметно превышают значения деформаций в радиальном и окружном направлениях, имеющие обратные знаки.

При сжатии с охлаждением пластические деформации отсутствуют в материалах, имеющих как большую, так и меньшую прочность. Для пластического деформирования необходимо увеличение давления сжатия или интервала изменения температур.

Таким образом, анализ полей и эпюр пластических деформаций показал, что при ДСВ материалов с разными физико-механическими свойствами в условиях сжатия и термоциклирования формируется сложное напряженное состояние, которое локализует пластические деформации в зоне стыка, интенсифицируя процесс сварки, что и было положено в основу нового способа ДСВ [4].

Наибольших значений пластические деформации (0,055 % в точке застоя и 0,120 % на периферии) достигают в модели 4 (совместное сжатие и термоциклирование при одинаковых пределах текучести и разных КЛТР), при этом обеспечивается также наиболее равномерное распределение пластических деформаций вдоль стыка.

Выводы

1. Анализ имеющихся данных показал, что закономерности, установленные ранее в пределах упругости в целом сохраняются, но результаты решения, полученные с учетом пластичности, дают более полную и объективную картину НДС при ДСВ разнородных материалов. В частности, только решение, полученное с учетом пластичности, позволяет оценить степень равномерности распределения пластических деформаций вдоль стыка.

2. Наиболее равномерное распределение пластических деформаций в стыке обеспечивается при сжатии с термоциклированием материалов с близкими пределами текучести. Появление пластических деформаций происходит поочередно в материале с меньшим КЛТР при нагреве и с большим при охлаждении.

3. Наиболее неравномерное распределение пластических деформаций в стыке наблюдается при термоциклировании материалов разной прочности без их сжатия.

4. В условиях сжатия с термоциклированием материалов разной прочности пластическое деформирование происходит только на стадии нагрева, на стадии охлаждения деформации отсутствуют.

5. Самый низкий уровень пластических деформаций и неблагоприятное распределение их вдоль оси цилиндров и втулок имеют место при ДСВ материалов разной прочности в условиях сжатия при постоянной температуре.

1. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В. Влияние физико-механических свойств соединяемых материалов 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. Унксов Е. П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. — М.: Машгиз, 1955. — 280 с.
4. Пат. 23414 Україна, UA B 23 K 12/14. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В. В. Квасницький, М. В. Матвієнко, Г. В. Ермолаєв та ін. — Опубл. 25.05.2007.

Regularities were established of the influence of plastic deformations on formation of the stress-strain state in diffusion welding of parts from dissimilar materials in the form of cylinders and bushings under the conditions of compression and temperature change. It is shown that the lowest level of plastic deformations and their unfavourable distributions along the axis of cylinders and bushings form in welding of materials of different strength under the conditions of compression at constant temperature.

Поступила в редакцию 14.03.2008