



УДК 621.791.4:539.378.3

## ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЕДИНЯЕМЫХ МЕТАЛЛОВ И ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ В ВАКУУМЕ

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»),  
**Г. В. ЕРМОЛАЕВ**, канд. техн. наук (Нац. ун-т кораблестроения им. Адм. С. О. Макарова, г. Николаев)

Методом компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при диффузионной сварке. Показано, что при сварке даже простых деталей из разнородных материалов создается сложное напряженное состояние с неравномерным распределением напряжений по поверхности стыка. Установлено, что в соединениях материалов с различными значениями коэффициента линейного температурного расширения для локализации пластических деформаций в зоне стыка целесообразно использовать термоциклирование.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, однородные и разнородные материалы, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование

Диффузионная сварка в вакууме, являющаяся одним из способов сварки давлением, открыла широкие возможности для создания уникальных узлов и деталей в самых различных отраслях промышленности [1]. Основным фактором обеспечения физического контакта и активации соединяемых поверхностей, а соответственно и качества сварки деталей является пластическая деформация металла, зависящая от давления сжатия, температуры сварки, скорости нагружения [2–4].

Согласно классической схеме диффузионной сварки, пуансон сжимает соединяемые детали с определенным усилием, распределение которого по свариваемым поверхностям принимается равномерным, а напряженно-деформированное состояние считается линейным. Оно не является благоприятным для взаимодействия соединяемых поверхностей и не соответствует действительности. Как следует из литературных данных [1, 3, 5, 6], для одних и тех же материалов рекомендуются разные режимы сварки, которые для реальных изделий и экспериментальных образцов не совпадают. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния в процессе диффузионной сварки в литературе не освещались, хотя и отмечалось, что качество сварки определяется процессами, происходящими в зоне стыка, где локализуется пластическая деформация [2, 4]. В связи с этим изучение напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке является весьма актуальной задачей.

© В. И. Махненко, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, 2008

Цель настоящей работы — исследование возможностей регулирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей из разнородных материалов для получения качественного соединения без значительных общих деформаций узла.

В качестве критериев оценки напряженного состояния приняты характер распределения нормальных (осевых и радиальных), касательных и эквивалентных напряжений по всей плоскости стыка, локализация максимальных эквивалентных напряжений в зоне стыка и размер зоны, в которой эквивалентные напряжения превышают предел текучести. Первый критерий определяет однородность соединения по всей поверхности стыка, второй и третий — общие деформации деталей при сварке. При этом предполагалось, что нормальные осевые напряжения обеспечивают сближение соединяемых поверхностей, а касательные и эквивалентные напряжения являются определяющими для активации процессов взаимодействия этих поверхностей и обеспечения физического контакта за счет пластической деформации [3, 7, 8].

При изготовлении узлов машиностроительных деталей и энергетических установок часто приходится решать задачу соединения разнородных материалов, имеющих различные модули упругости и коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР). Вследствие этой разницы в зоне соединения изменяется напряженно-деформированное состояние, что может существенно повлиять на качество сварного соединения, поскольку обеспечить одинаковые условия деформирования по всей площади соединения сложно.

Исследования образцов цилиндрических Ц–Ц (рис. 1, а, б) и втулка–втулка В–В (рис. 1, в, г)

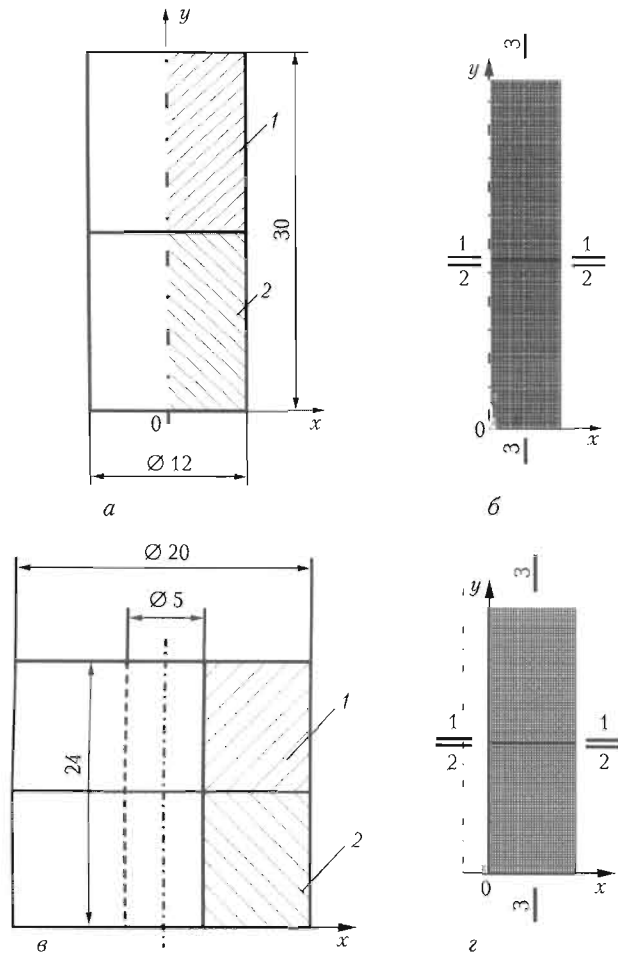


Рис. 1. Схемы образцов сварных соединений типа Ц-Ц (а) и В-В (в) и их модели (б, г)

выполняли с помощью компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов. Поскольку узлы в образцах расположены симметрично относительно осевой линии, решалась осесимметричная задача с кольцевыми конечными элементами (рис. 1).

Исследовали напряженно-деформированное состояние моделей с различными вариантами сочетания физико-механических свойств и видов нагружения. При этом варьировали жесткость (модуль упругости  $E$ ) и значения КЛТР соединяемых материалов. Значения жесткости соеди-

няемых деталей из материалов (1 и 2, рис. 1) принимали одинаковыми ( $E_1 = E_2$ ) и отличающимися в 2 раза ( $E_2 = 2E_1$ ) соответственно при одинаковых ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) и отличающихся в 2 раза ( $\alpha_2 = 2\alpha_1$ ) значениях КЛТР.

При расчетах предполагалось, что механическое взаимодействие контактируемых поверхностей определяется механикой деформирования упругопластической непрерывной среды, т. е. проскальзывание между соединяемыми поверхностями полностью отсутствует. Рассматривалась стадия силового и температурного нагружения соединения после первоначального сжатия нагретых деталей и образования физического контакта. Исследовали поля напряжений при сжатии давлением  $P = 40$  МПа, нагреве и охлаждении на  $100^\circ\text{C}$  без нагрузки, а также при совместном воздействии усилия сжатия и изменения температуры (таблица). В результате расчетов получены поля и эпюры распределения осевых, радиальных, окружных, касательных, главных и эквивалентных напряжений (рис. 2-6, таблица).

Результаты исследований показали, что при сжатии без изменения температуры даже простейших образцов (цилиндров или втулок) из материалов разной жесткости (варианты № 1, таблица) равномерность распределения напряжений по сечению образцов нарушается (рис. 2-5, варианты № 1). Вблизи стыка к осевым напряжениям добавляются радиальные, окружные и касательные; напряженное состояние в этой зоне приобретает объемный характер. Эти напряжения невелики, их значения на большей части стыка не превышают 10...15 % расчетных осевых (рис. 4, 5). Характер и значения окружных напряжений практически совпадают с радиальными, поэтому на рисунках они не показаны. Характер и значения касательных напряжений в зоне стыка в обоих материалах (сечения моделей 1-1 и 2-2) примерно одинаковы. В образцах типа Ц-Ц они возрастают от нулевых в центре стыка до максимальных на его периферии, а в образцах типа В-В точка с нулевыми касательными напряжениями располагается ближе ко внутренней поверхности на расстоянии, равном приблизительно 1/4 толщины втулки (рис. 5, а).

Осевые и эквивалентные напряжения вдоль большей части стыка распределены равномерно (рис. 3, а, б и 6, а, б). Со стороны более жесткого материала радиальные и окружные напряжения являются растягивающими (рис. 4, б, в), что в сочетании со сжимающими

**Варианты исследуемых моделей**

Тип соединений	№ варианта	$E_1 = E_2$	$E_2 = 2E_1$	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\alpha_2 = 2\alpha_1$	$P = 40$ МПа	$T = \pm 100^\circ\text{C}$
Ц-Ц	1	-	+	+	-	+	-
	2	+	-	-	+	-	+
	3	+	-	-	+	+	+
	4	-	+	-	+	+	+
В-В	1	-	+	+	-	+	-
	2	+	-	-	+	-	+
	3	+	-	-	+	+	+
	4	-	+	-	+	+	+

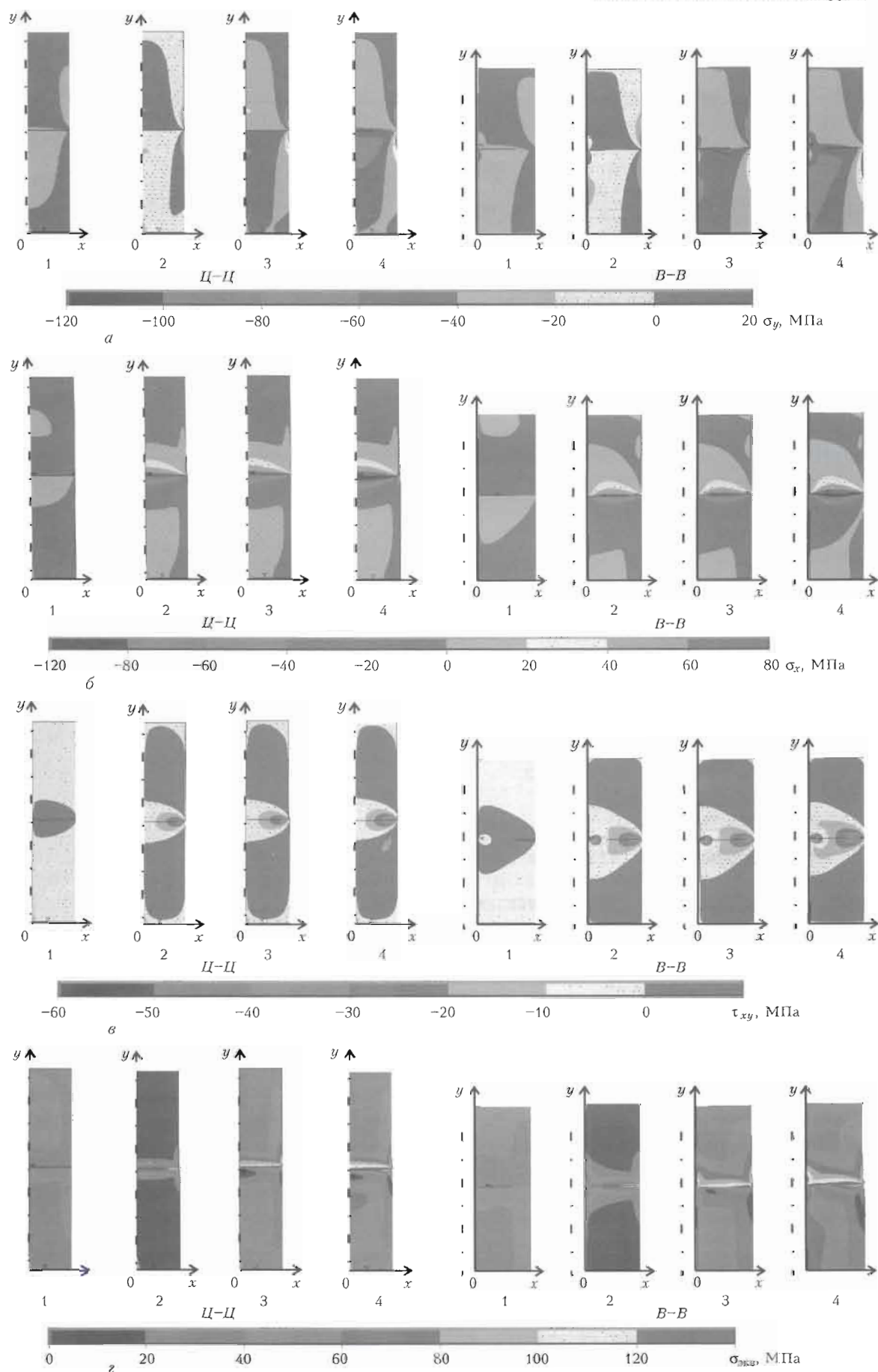


Рис. 2. Поля осевых (а), радиальных (б), касательных (в) и эквивалентных (г) напряжений в образцах сварных соединений типа Ц-Ц и В-В: 1-4 — номера вариантов моделей

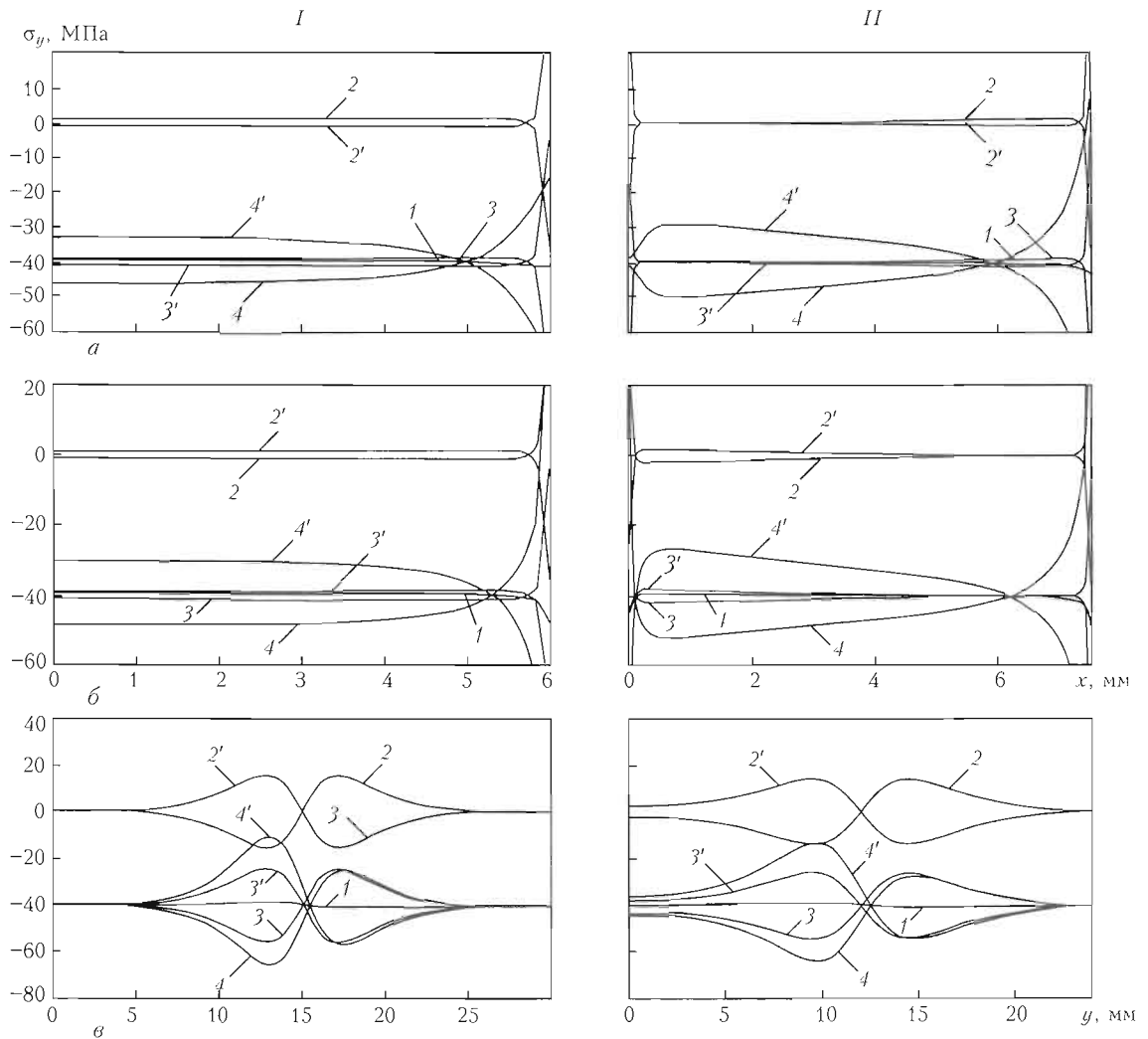


Рис. 3. Эпюры осевых напряжений  $\sigma_y$  в сечениях 1-1 (а), 2-2 (б) и 3-3 (в) образцов сварных соединений типа Ц-Ц (I) и В-В (II), здесь и на рис. 4-6: 1 — сжатие при постоянной температуре; 2-4 — сжатие при нагреве; 2' — охлаждение без сжатия; 3', 4' — сжатие при охлаждении

осевыми несколько увеличивает эквивалентные напряжения (рис. 6, б, в). Со стороны менее жесткого материала появляющиеся радиальные и окружные напряжения являются сжимающими (рис. 4, а, в), поэтому эквивалентные напряжения незначительно уменьшаются (рис. 6, а, в).

Главные минимальные напряжения  $\sigma_3$  вдоль стыка распределены почти равномерно, они несколько увеличиваются на периферии и направлены перпендикулярно стыку.

Таким образом, при сжатии образцов из более жесткого материала за счет некоторого увеличения эквивалентных напряжений создаются более благоприятные условия для пластических деформаций. Однако в материале, имеющем меньшую жесткость в зоне стыка, эквивалентные напряжения уменьшаются, образование пластических деформаций будет происходить вдали от стыка, что является нежелательным, поскольку увеличиваются общие деформации при сварке. Касательные напряжения невелики, что мало способствует активации поверхности в зоне стыка.

Изменение температуры на  $100\text{ }^\circ\text{C}$  без сжатия в соединении образцов из материалов с разными КЛТР (варианты № 2, таблица) создает в зоне стыка более сложное объемное напряженное состояние (рис. 2, варианты № 2). При этом радиальные и окружные напряжения достигают значений  $60\text{...}70\text{ МПа}$ , что составляет  $150\text{...}175\%$  номинальных (рис. 4). При повышении температуры они являются растягивающими в материале с меньшим КЛТР, а при ее понижении — снижающими. Значение осевых напряжений на большей части стыка близко к нулю и только на внешней поверхности образца вне стыка оно увеличивается до  $70\text{ МПа}$ . По мере удаления от стыка осевые напряжения возрастают, на расстоянии около  $2\text{...}3\text{ мм}$  их значения достигают  $15\text{...}20\text{ МПа}$  (рис. 3, в). Их знаки внутри образца совпадают, а на поверхности они обратны радиальным и окружным напряжениям. Значения касательных напряжений изменяются почти линейно — от нуля на оси цилиндрического образца до  $40\text{ МПа}$  вблизи его наружной кромки (рис. 5, а).

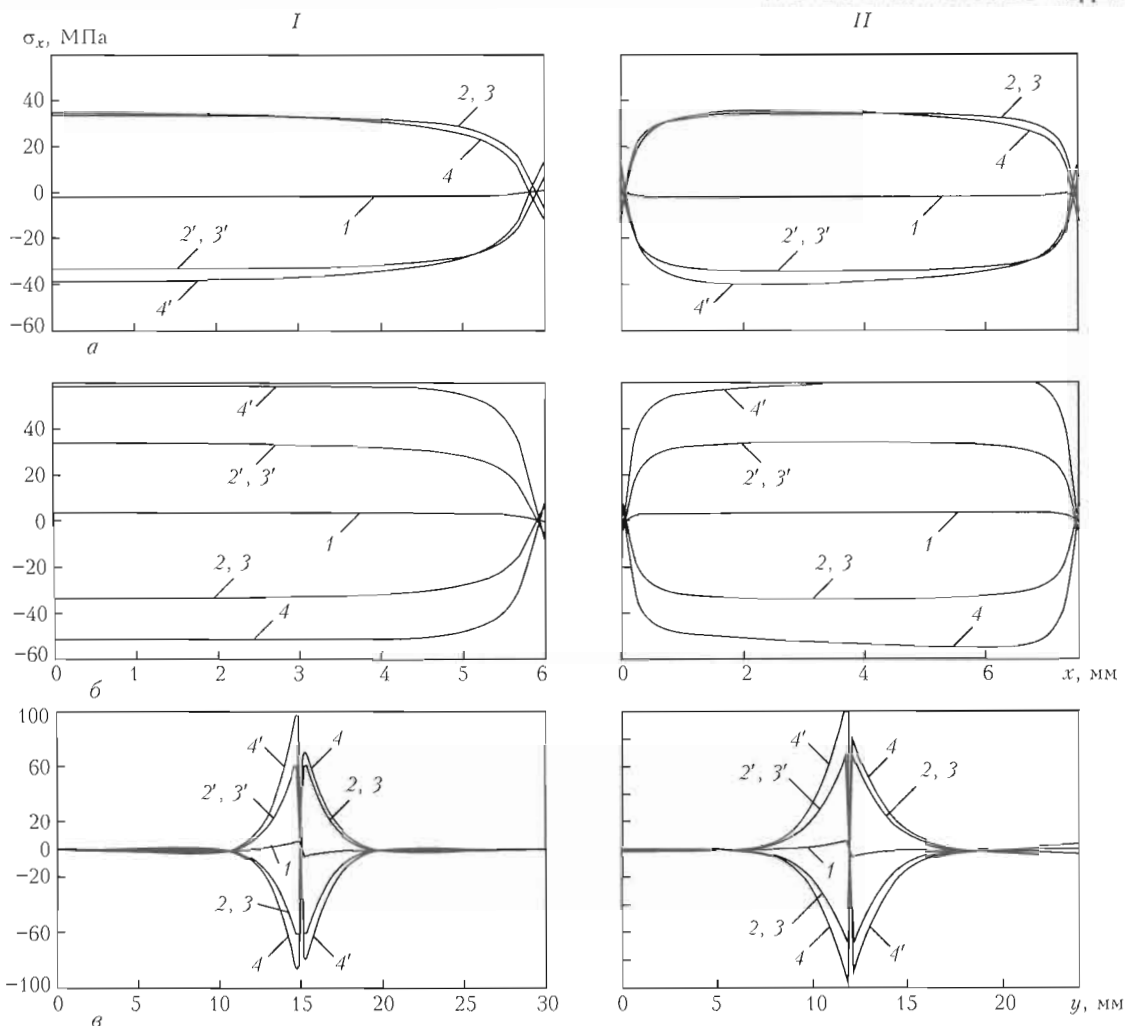


Рис. 4. Эпюры радиальных напряжений  $\sigma_x$  в сечениях 1-1 (а), 2-2 (б) и 3-3 (в) образцов сварных соединений типа Ц-Ц (I) и В-В (II)

В соединении типа В-В касательные напряжения уменьшаются от +40 (вблизи наружной поверхности) до -30 МПа (вблизи внутренней), точка с нулевыми касательными напряжениями расположена на расстоянии, равном приблизительно 1/4 толщины втулки от внутренней поверхности. Такое сложное напряженное состояние, возникающее за счет достаточно больших эквивалентных напряжений и достижения ими значений предела текучести, создает благоприятные условия для пластических деформаций именно в районе стыка. Значения последних увеличиваются от 70 (внутри стыка) до 90...95 МПа (вблизи наружной его кромки) (рис. 6, а, б, кривые 2). При этом в цилиндрических деталях уровень эквивалентных напряжений незначительно ниже, чем во втулках. При снижении температуры на 100 °С знаки всех напряжений меняются на обратные, при этом эпюры эквивалентных напряжений не изменяются.

Главные сжимающие напряжения  $\sigma_3$  распределены почти равномерно по стыку (при нагреве в материале с большим КЛТР их значения составляют 70...80 МПа, увеличиваясь у края до 95 МПа). При этом угол наклона этих напряжений

меняется от нуля (параллельны стыку) в средней части стыка до 45° у его края. В материале с меньшим КЛТР эти напряжения значительно уменьшаются от нуля (в средней части стыка) до 30 МПа (у его края), угол наклона меняется от 90 (в средней части стыка) до 45° (у его края). При охлаждении картины распределения полей меняются местами.

При совместном действии осевого усилия сжатия и повышении температуры на 100 °С в материалах стыка с одинаковой жесткостью, но разными КЛТР (варианты № 3, таблица) напряженное состояние в зоне стыка становится еще более сложным. При этом значения и характер распределения радиальных, окружных и касательных напряжений сохраняются (рис. 3-5). Значения осевых напряжений изменяются в сторону увеличения сжимающих напряжений. В результате заметно меняется характер поля эквивалентных напряжений (рис. 2, г, варианты № 3), нарушается его симметрия вдоль и поперек стыка (рис. 6, кривые 3). В материале с меньшим КЛТР эквивалентные напряжения в районе стыка существенно возрастают, а при большем КЛТР — умень-

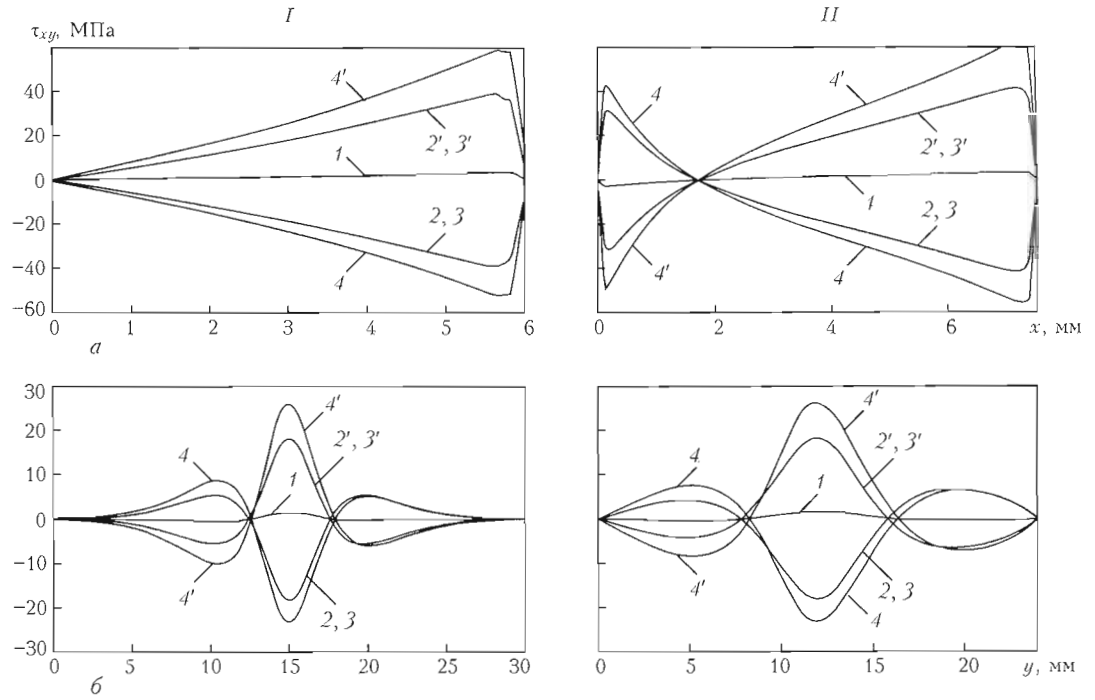


Рис. 5. Эпюры касательных напряжений в сечениях 1-1, 2-2 (а) и 3-3 (б) образцов сварных соединений типа Ц-Ц (I) и В-В (II)

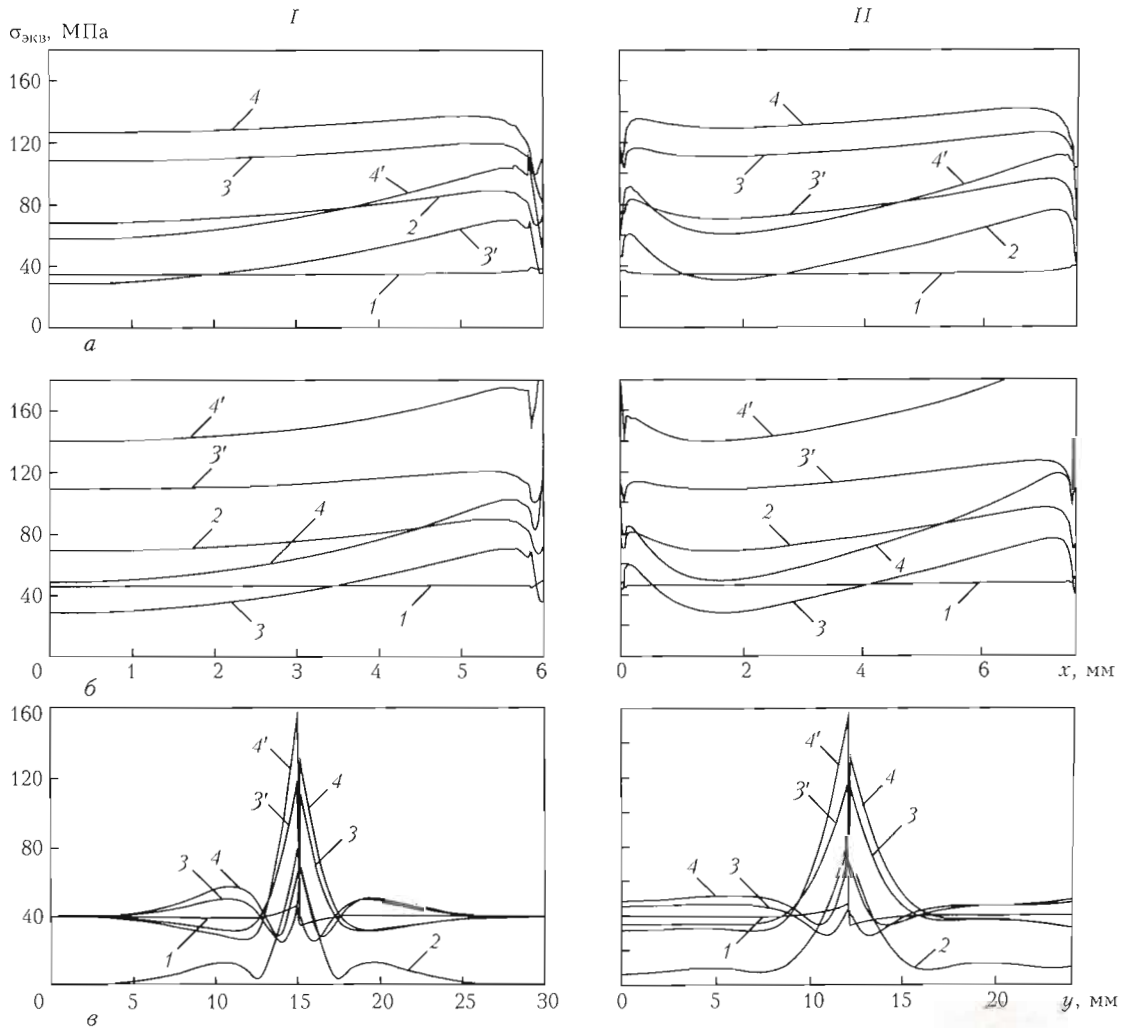


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  в сечениях 1-1 (а), 2-2 (б) и 3-3 (в) образцов сварных соединений типа Ц-Ц (I) и В-В (II)



шаются и на значительной части стыка становятся меньше номинальных. При уменьшении температуры картина распределения напряжений меняется на обратную (см. рис. 6, кривые 3').

Характер кривых  $\sigma_3$  меняется мало, но несколько увеличиваются уровень их значений и угол наклона по отношению к стыку.

Таким образом, наиболее благоприятные условия для пластических деформаций в обоих материалах создаются при термоциклировании в сжатом состоянии. Учитывая неравномерное распределение касательных и эквивалентных напряжений вдоль стыка (см. рис. 5, а и 6, а, б), можно сделать вывод, что более благоприятные условия для активации соединяемых поверхностей создаются на периферийных участках стыка, пластические деформации в большей степени должны образовываться ближе к краям и в меньшей степени — во внутренней его части.

При сварке материалов, имеющих разную жесткость (варианты № 4, таблица), картина напряженного состояния и основные его закономерности сохраняются, однако несколько увеличивается уровень напряжений (см. рис. 2, а, варианты № 4).

Таким образом, выполненные расчеты показали, что при диффузионной сварке даже простых образцов из разнородных металлов формируется сложное напряженное состояние, а не одноосное, как предполагалось при разработке режимов.

## Выводы

1. Применение метода конечных элементов дает возможность определять напряженно-деформированное состояние деталей при диффузионной сварке, которое необходимо учитывать при назначении параметров режима сварки сложных узлов из разнородных материалов.

2. Создание сложного напряженного состояния при диффузионной сварке деталей позволяет локализовать пластическую деформацию в зоне стыка.

3. Наиболее эффективным (оптимальным) способом локализации пластических деформаций в зоне стыка при сварке материалов с различными значениями КЛТР является сочетание сжатия с термоциклированием.

1. Диффузионная сварка материалов: Справ. / Под ред. Н. Ф. Казакова. — М.: Машиностроение, 1981. — 352 с.
2. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
3. Каракозов Э. С. Соединения металлов в твердой фазе. — М.: Металлургия, 1976. — 264 с.
4. Маркашова Л. И., Арсенюк В. В., Григоренко Г. М. Особенности пластической деформации разнородных материалов при сварке давлением // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 12–16.
5. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. — М.: Металлургия, 1981. — 116 с.
6. Капралов Б. П., Сигачев А. П., Козловский В. И. Технологический процесс диффузионной сварки в вакууме корпусов электропневмоклапанов // Свароч. пр-во. — 1985. — № 10. — С. 49–50.
7. Красумин Ю. Л., Назаров Г. В. Микросварка давлением. — М.: Металлургия, 1976. — 176 с.
8. Качанов Л. М. Теория ползучести. — М.: Физматгиз, 1960. — 455 с.

The method of computer simulation based on FEM was used to study the stress-strain state of cylindrical parts in diffusion bonding. It is shown that in welding of even the simplest parts from dissimilar materials a complex stressed state is induced with a non-uniform distribution of stresses in the butt surface. It is established that it is rational to use thermal cycling in joints of materials with different values of the coefficient of linear thermal expansion for localization of plastic deformations.

Поступила в редакцию 25.07.2007