

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКОЙ

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

Путем компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) цилиндрических деталей из металлов с разными физико-механическими свойствами при диффузионной сварке с учетом пластических деформаций ползучести. Установлены закономерности ползучести сварных соединений, а также формирования в них НДС.

Ключевые слова: диффузионная сварка, разнородные материалы, напряженно-деформированное состояние, пластическая деформация, узел цилиндр–цилиндр, узел втулка–втулка, зона застоя

В машиностроении и других отраслях промышленности широко используются детали, изготавливаемые с применением диффузионной сварки в вакууме [1, 2]. Этот способ сварки позволяет получить детали и узлы, уникальные по своим конструктивным особенностям и эксплуатационным характеристикам. При подборе режимов сварки традиционно исходят из равномерного распределения усилия сжатия по всей площади стыка. В действительности, как следует из работы [3], при сварке алюминиевой ленты с кристаллом кремния схема напряженного состояния и его компоненты в различных зонах стыка неодинаковы, что влияет на условия формирования соединений. Наиболее благоприятные условия активации поверхностей деталей и их соединений имеют место в зоне действия касательных напряжений и деформаций сдвига [3]. В работах [4–7] показано, что при сварке металлов с разными физико-механическими свойствами эффективным способом создания касательных напряжений и локализации пластических деформаций в стыке является диффузионная сварка с термоциклированием [8]. В указанных работах выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) узлов цилиндр–цилиндр (Ц–Ц), втулка–втулка (В–В) и втулка–фланец (В–Ф) в условиях упругости и мгновенной пластичности, когда значения деформаций не зависят от времени [9]. В реальных условиях диффузионной сварки развиваются также деформации ползучести, которые оказывают влияние на НДС узла.

Целью настоящей работы является исследование НДС узлов типа Ц–Ц и В–В при диффузионной сварке с учетом деформаций ползучести, а также определение общих закономерностей различных видов деформаций и их влияние на формирование сварных соединений.

НДС в цилиндрических узлах анализировали по результатам компьютерного моделирования методом конечных элементов. Для моделирования НДС с учетом деформаций ползучести предварительно определяли уравнение скорости ползучести в условиях диффузионной сварки. Известен [10, 11] ряд уравнений для определения стадии ползучести.

Для установления закономерностей ползучести использовали деформационные диаграммы, приведенные в работе [10], а для определения параметров ползучести по методу малых скачков температуры проводили экспериментальные исследования в условиях одноосного нагружения [11]. Установлено, что при определенных параметрах режима диффузионной сварки ползучесть начинается практически со второй стадии и ее скорость определяется уравнением

$$\dot{\varepsilon} = Bp^m \exp\left(-\frac{\Delta H_n}{RT}\right), \quad (1)$$

где B , m — коэффициенты для данного материала; p — действующее напряжение (давление сжатия); ΔH_n — энергия активации ползучести; T — температура; R — универсальная газовая постоянная.

При постоянной температуре уравнение (1) упрощается до $\dot{\varepsilon} = C_1 p^{C_2}$, где C_1 , C_2 — коэффициенты. Экспериментально установлено, что в условиях диффузионной сварки для исследуемых металлов (армко-железа, сталей 10854, 12X18H9T, жаропрочных сплавов) $m = 3,5 \dots 4,6$, что свиде-

тельствует о дислокационной ползучести и соответствует деформационным диаграммам [10].

Как показано в работах [5–7], в зоне стыка при соединении разнородных материалов формируется сложное напряженное состояние. В этих условиях уравнение скорости ползучести выражает теорию общей деформации Мизеса–Генки, которая основывается на законе течения и эквивалентных напряжениях Мизеса, выполняемых по известному уравнению [12].

Провести испытания на ползучесть в условиях диффузионной сварки разнородных материалов не представляется возможным. Однако в работе [12] показано, что во многих случаях для определения ползучести в условиях сложного напряженного состояния и при переменных напряжениях и температуре можно использовать результаты испытаний при одноосном нагружении.

Влияние циклического нагружения зависит от соотношения времени действия максимального напряжения к периоду цикла. С уменьшением этого отношения за счет сокращения времени действия максимального напряжения или увеличения периода цикла нагружения установлено ускорение деформации ползучести при переменных напряжениях по сравнению с ползучестью при постоянном напряжении [12]. Влияние циклического нагружения на скорость ползучести оценивается коэффициентом ψ , являющимся отношением скорости ползучести относительно «чистого времени» нагружения при ползучести с периодическим нагружением к скорости ползучести при непрерывном нагружении с постоянным напряжением. Эксперименты показали, что коэффициент ψ зависит от деформации. Так, при деформации более 0,1 % за один цикл нагружения его значение близко к единице. Как следует из работы [12], при высокой температуре и коротком периоде изменения напряжения даже в том случае, когда на среднее напряжение накладывается синусоидальное циклическое напряжение (знакопостоянный цикл), кривая ползучести такая же, как и при статической ползучести. Приведенные в работе [12] результаты испытаний на ползучесть низкоуглеродистой стали, никелевого сплава Нимоник 75 и других металлов в условиях одноосного растяжения и сложного напряженного состояния, обусловленного действием растяжения и кручения, показали, что независимо от отношения напряжения растяжения и напряжения кручения получается единая кривая ползучести.

При диффузионной сварке с термоциклированием деформация ползучести происходит при переменной температуре и переменном напряжении. Влияние изменения значений этих величин на скорость ползучести характеризуется параметром внутреннего состояния, определяемым деформацией ползучести ε , и описывается механи-

ческим уравнением состояния твердого тела [12]

$\dot{\varepsilon} = f(p, T, \varepsilon)$, т. е. скорость ползучести в любой момент времени определяется напряжением, температурой и деформацией в данный момент времени.

Исходя из теории деформационного и временного упрочнения, имеется два подхода к конкретной записи механического уравнения. По характеру изменения параметров при диффузионной сварке нами выбрано уравнение для временного упрочнения, которое для первой стадии ползучести имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = C_1 p^{C_2} t^{C_3} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right), \quad (2)$$

где $C_1 > 0$, C_2 , C_3 — коэффициенты, определяемые из экспериментальных кривых ползучести материала; $C_4 = (\Delta H_n/R)$; t — время деформации.

Значение деформации на первой и второй стадиях ползучести, исходя из выражений (1) и (2), определяется из уравнения

$$\varepsilon = C_1 p^{C_2} \frac{t^{C_3+1}}{C_3+1} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right) + C_5 p^{C_6} t \exp\left(-\frac{C_7}{T}\right), \quad (3)$$

где $C_1 > 0$, C_2 , C_3 , $C_5 > 0$, C_6 — коэффициенты, определяемые из экспериментальных кривых ползучести материала; $C_4 = (\Delta H_{n(1)}/R)$; $C_7 = (\Delta H_{n(2)}/R)$.

В уравнении (3) коэффициенты $C_5 \dots C_7$ для установившейся стадии ползучести определяли по методу малых скачков температуры. Поскольку энергия активации высокотемпературной ползучести на первой и второй стадиях одинакова [13], то коэффициент C_4 принимали равным C_7 . Значения остальных коэффициентов $C_1 \dots C_3$ получали путем обработки кривых ползучести.

Расчеты НДС выполняли с использованием уравнений (1) и (3) для случаев нагружения узла В–В постоянным давлением 15 МПа, термоциклированием и давлением с термоциклированием. Сочетание соединяемых материалов было таким, чтобы процесс ползучести протекал только в верхней детали (1). Скорость ползучести в этой детали определяли по уравнению (1) при $T = 1373$ К. Значения коэффициентов приняты по экспериментальным данным: $C_1 = 2 \cdot 10^{-31}$ и $1 \cdot 10^{-31}$ (соответственно модели 1 и 2); $C_2 = 3,65$.

Для обеих моделей и всех вариантов нагрузок исследовали поля радиальных, осевых, окружных, касательных и эквивалентных напряжений, а также пластических деформаций. Установлено, что при нагружении постоянным давлением 15 МПа деформации ползучести в одном из соединяемых материалов формируют сложное напряженное состояние как в верхней, так и в нижней недеформирующейся детали. Появляются и растут

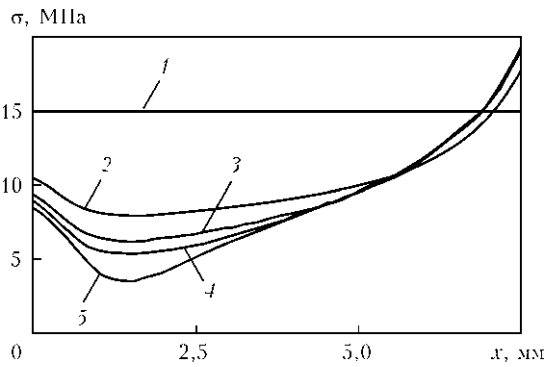


Рис. 1. Эпюры распределения эквивалентных напряжений вдоль стыка в материале 1 при нагружении сжатием 15 МПа через 0 (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4) и 300 с (5) после нагружения

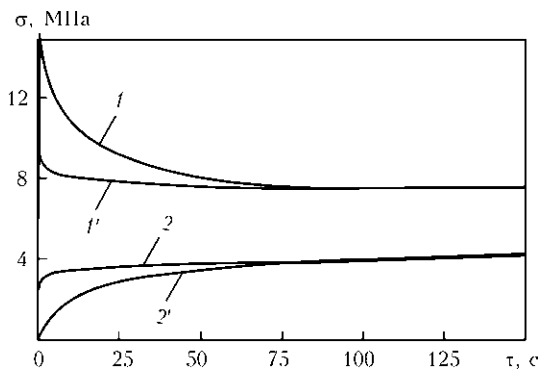


Рис. 2. Изменение во времени эквивалентных (кривые 1, 1') и касательных (кривые 2, 2') напряжений в средней части стыка по уравнениям (1) (кривые 1, 2) и (3) (кривые 1', 2')

радиальные, окружные и касательные напряжения, особенно вблизи стыка, максимальное их значение уже в течение первых минут выдержки достигает уровня приложенных осевых. Заметно нарушается и равномерность распределения осевых напряжений. Они в основном уменьшаются в обоих материалах, и лишь в небольшой зоне на внешней поверхности материала 2 [5–7], наоборот, увеличиваются в 2,0...2,5 раза. Поля всех напряжений быстро стабилизируются, и в течение последующей выдержки их характер практически не изменяется.

В соответствии с отдельными составляющими изменяется и поле эквивалентных напряжений. Как видно из эпюр распределения эквивалентных напряжений (рис. 1), в материале 1 уже в течение первой минуты выдержки эквивалентные напряжения на большей части стыка ощутимо уменьшаются, снижаясь особенно заметно во внутренней части стыка, на расстоянии около 1/4 толщины втулки от ее внутренней поверхности. В материале 2 они, наоборот, возрастают на большей части стыка до уровня, который в 2 раза и более превышает номинальные значения эквивалентных напряжений, достигая максимальных значений вблизи внутренней и наружной кромок стыка.

Для сравнения результатов моделирования НДС, а также полученных с использованием уравнений (1) и (3) на рис. 2 показано изменение во времени эквивалентных и касательных напряжений в точке, находящейся на расстоянии 5 мм от внутренней поверхности втулки и 0,2 мм от стыка в материале 1. Из рисунка видно, что значения напряжений отличаются только в течение первой минуты, в дальнейшем они полностью совпадают. Поэтому при продолжительности действия напряжения более 1,0...1,5 мин для сокращения времени расчета можно использовать более простое уравнение. В соответствии с эквивалентными напряжениями формируется сложное поле пластических деформаций ползучести (рис. 3).

В отличие от полей напряжений поле деформаций изменяется в течение всего процесса вы-

держки, но при этом сохраняется его главная особенность — пластические деформации развиваются в материале 1 в основном вдали от стыка. В процессе выдержки на внешней кромке стыка образуется точка концентрации деформаций, зона повышенных деформаций вблизи этой точки постепенно увеличивается, но на большей части стыка пластические деформации практически отсутствуют. Известно [13], что одним из способов локализации пластических деформаций в зоне стыка при сварке в твердом состоянии является повышение скорости деформирования. При диффузионной сварке с низкоинтенсивным силовым воздействием такой способ не реализуется при низкой ($1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) скорости деформирования. Анализ НДС с учетом мгновенных пластических деформаций показал, что эффективным способом локализации пластических деформаций в зоне стыка является термоциклирование [7]. Поля мгновенных пластических деформаций с учетом мгновенной пластичности узла В–В при нагружении давлением, термоциклированием и давлением с термоциклированием показаны на рис. 4.

Из рисунка видно, что термоциклирование без давления и с давлением обеспечивает распределение напряжений по высоте соединяемых деталей, близкое к идеальному. Оно также способствует более равномерному распределению пластической деформации в стыке по сравнению со

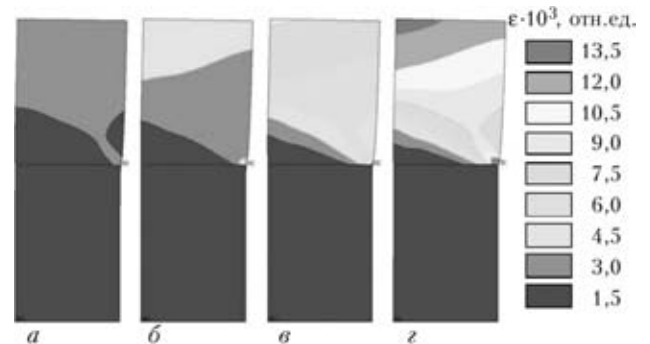


Рис. 3. Поле пластических деформаций ползучести ϵ при нагружении сжатием в различные моменты времени после нагружения: а — 60; б — 90; в — 180; г — 300 с

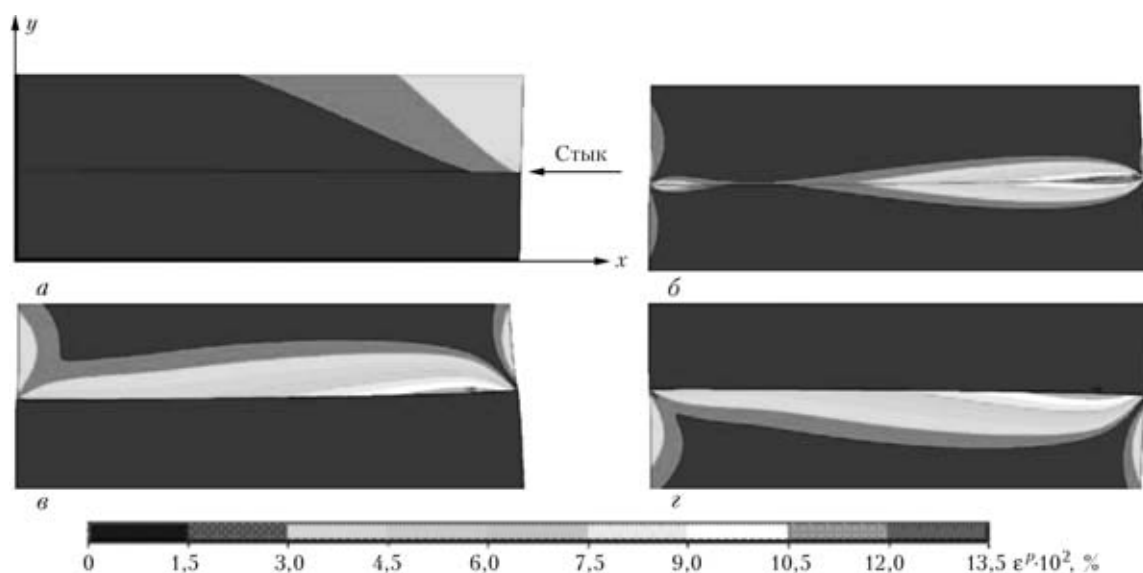


Рис. 4. Поля мгновенных пластических деформаций ε^p в образцах типа В–В при нагружении сжатием (а), нагревом с охлаждением (б), сжатием с нагревом (в) и сжатием с охлаждением (г)



Рис. 5. Характер поверхностей разрушения сварных образцов цилиндров (а) и втулок (б)

сжатием при постоянной температуре. Однако особенностью НДС для Ц–Ц узлов в условиях термоциклирования является наличие в стыке точки с нулевыми касательными напряжениями, а вблизи нее — зоны с минимальными эквивалентными напряжениями [4, 6, 7], а также с минимальными пластическими деформациями (рис. 4, б). Точку и зону вблизи нее предложено назвать точкой и зоной застоя по аналогии с терминологией, применяемой в теории горячей обработки металлов давлением [11]. В этой зоне образование пластических деформаций затрудне-

но, а отсутствие деформаций сдвига исключает деформационную активацию соединяемых поверхностей [3]. При сварке цилиндров касательные напряжения равны нулю в центре цилиндра, а при сварке втулок — вблизи внутренней поверхности. Характер поверхности разрушения при механических испытаниях сварных образцов свидетельствует о начале их разрушения именно в этих зонах. Как видно из рис. 5, а, поверхность разрушения образцов узла Ц–Ц из разнородных материалов имеет коническую форму с вершиной на оси образца, а втулок — форму дорожки у внутренней поверхности (рис. 5, б). От дорожки к внешней и внутренней поверхностям разрушение происходит с вырывом на месте менее прочного металла.

Наиболее равномерное распределение пластических деформаций в стыке обеспечивает сжатие с термоциклированием (рис. 4, в, г), способствующее получению равнопрочных соединений с разрушением при испытаниях по менее прочному металлу. Моделирование НДС с учетом мгновенной пластической деформации показало, что наибольших значений пластические деформации достигают при совместном сжатии и термоциклировании в случае близких значений предела текучести соединяемых материалов. При этом пластические деформации по стыку распределяются практически равномерно, поочередно локализуясь при нагреве и охлаждении то в одном, то в другом материале.

Моделирование НДС цилиндрических узлов с учетом деформаций ползучести подтвердило закономерности его формирования, установленные в задачах упругости и мгновенной пластичности. Вариант выдержки деталей из разнородных материалов при температуре сварки и постоянном давлении не обеспечивает образования пласти-

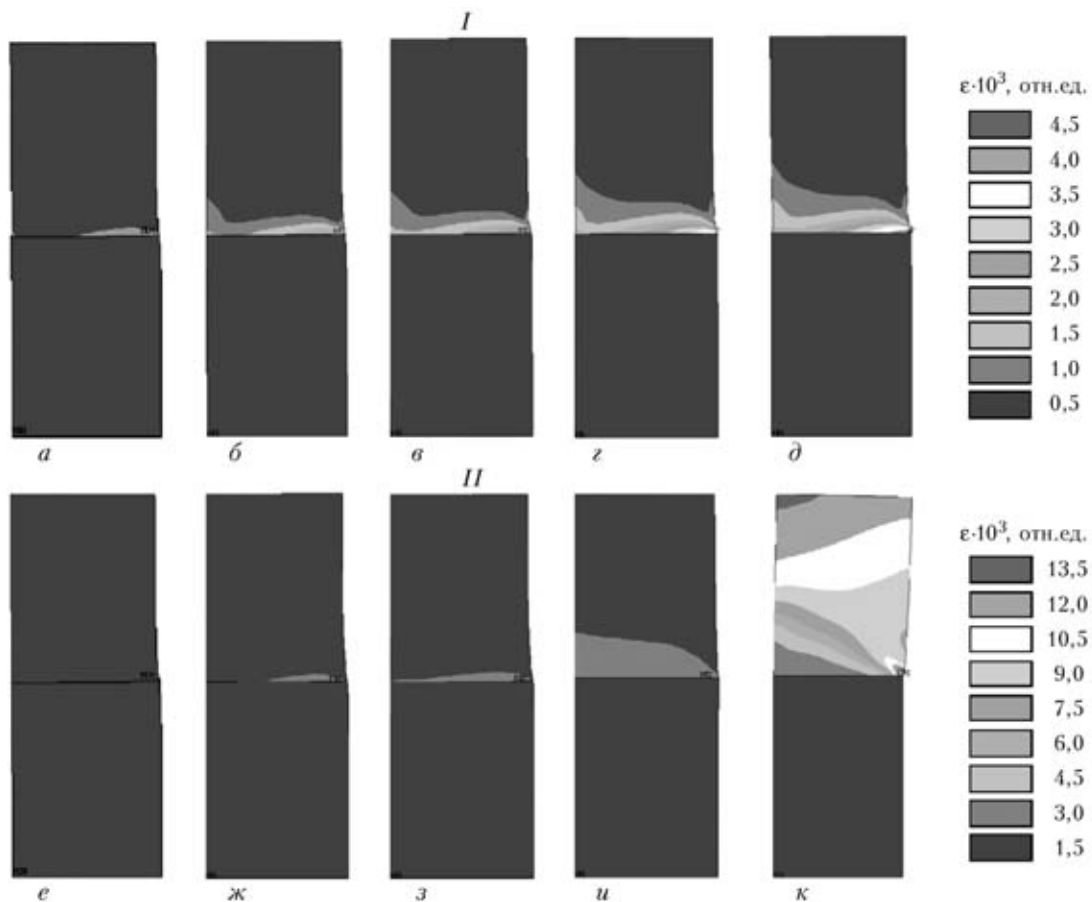


Рис. 6. Поля деформаций ползучести ϵ при термическом (I) и совместном нагружении сжатием и увеличением температуры (II) в различные моменты времени после нагружения: а, е — 0; б, ж — 1; в, з — 2; г, и — 30; д, к — 300 с

ческих деформаций по всему стыку. Кроме того, скорость ползучести материала 1 в зоне стыка значительно ниже, чем вдали от него, что приводит к повышенным общим деформациям сварного узла. Поля деформаций для вариантов термического нагружения и сжатия с термоциклированием с учетом деформаций ползучести показаны на рис. 6.

При термическом нагружении в результате ползучести материала 1 уровень эквивалентных напряжений снижается в обоих материалах. Пластические деформации ползучести сосредоточены в материале 1 вблизи стыка, а со временем они охватывают все более широкую зону (рис. 6, а).

При совместном нагружении сжатием и нагревом в первые секунды деформации также сосредоточены вблизи стыка (рис. 6, б) и в течение 1 мин достигают максимального значения, распределяясь при этом почти равномерно. При длительной выдержке (300 с) деформации ползучести распространяются по всей высоте образца, при этом их значения возрастают по мере удаления от стыка.

Результаты исследований показали, что деформации ползучести увеличивают уровень пластических деформаций как при термическом, так и совместном нагружении сжатием и нагревом. При

термоциклировании они выравнивают распределение деформаций в стыке.

Таким образом, результаты расчетов показали, что совместное нагружение сжатием и термоциклированием целесообразно только при кратковременном нагружении, когда деформации мгновенной пластичности распределены вдоль стыка почти равномерно, обеспечивая тем самым образование физического контакта между соединяемыми материалами по всему стыку. При снижении начальных напряжений вследствие ползучести материала начальные напряжения не следует восстанавливать. На стадии выдержки лучше применять чисто термическое нагружение, обеспечивающее не только локализацию пластических деформаций ползучести вблизи стыка, но и достаточно равномерное их распределение по всей его площади.

Выводы

1. Моделирование НДС с учетом деформаций ползучести при диффузионной сварке разнородных материалов показало, что основные закономерности его формирования, установленные для стадий упругого деформирования и образования деформаций кратковременной (мгновенной) пластичности, справедливы и для совместного нагружения сжатием и нагревом.

тичности, сохраняются, при этом несколько увеличивается уровень деформаций.

2. С точки зрения НДС совместное нагружение сжатием и с повышением температуры наиболее эффективно в начальный период образования соединения, когда пластические деформации распределены вдоль стыка почти равномерно.

3. На стадии выдержки лучше применять низкое давление сжатия и термическое нагружение, обеспечивающие не только локализацию пластических деформаций ползучести вблизи стыка, но и достаточно равномерное их распределение по всей его площади. Продолжительность выдержки и значения давления сжатия необходимо определять с учетом свойств соединяемых материалов (сопротивления ползучести).

1. *Люшинский А. В.* Диффузионная сварка разнородных материалов. — М.: Академия, 2006. — 208 с.
2. *Киреев Л. С., Пешков В. В., Селиванов В. Ф.* Физико-химия процесса получения пористых компактных материалов на основе титана. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. — 354 с.
3. *Красулин Ю. Л., Назаров Г. В.* Микросварка давлением. — М.: Металлургия, 1976. — 160 с.
4. *Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы / В. Д. Кузнецов, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // 36. наук. праць Нац. ун-ту кораблебудування. — 2007. — № 6. — С. 62–73.*

Computer simulation based on the finite element method was used to study the stress-strain state (SSS) of cylindrical parts from metals with different physico-mechanical properties in diffusion welding allowing for plastic creep deformations. Regularities of welded joint creep and SSS formation in them are established.

5. *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.
6. *Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В.* Напряженно-деформированное состояние соединений при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами // Там же. — 2008. — № 8. — С. 5–10.
7. *Махненко В. И., Квасницкий В. В.* Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке // Там же. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
8. *Пат. 81583 Україна, МПК В 23 К 20/14.* Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В. В. Квасницкий, М. В. Матвиенко, Г. В. Ермолаев та ін. — Опубл. 10.01.2008.
9. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
10. *Чапек Й.* Ползучесть металлических материалов. — М.: Мир, 1987. — 304 с.
11. *Гарофало Ф.* Законы ползучести и длительной прочности металлов. — М.: Металлургия, 1968. — 304 с.
12. *Тайра С., Отани Р.* Теория высокотемпературной прочности материалов. — М.: Металлургия, 1986. — 280 с.
13. *Маркашова Л. И., Арсенюк В. В., Григоренко Г. М.* Особенности пластической деформации разнородных материалов при сварке давлением // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 12–16.
14. *Унксов Е. П.* Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. — М.: Машгиз, 1955. — 280 с.

Поступила в редакцию 16.04.2009

СВАРНЫЕ МОСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Строительство железнодорожно-автомобильного мостового перехода через р. Днепр на участке Киев-Московский — г. Киев, Дарница, 2008 г. ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ осуществляет разработку технологии сварки, научно-инженерное сопровождение при монтаже металлоконструкций, выполняет входной контроль прибывающих на строительство металлоконструкций.

**ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
Киев-150, ул. Боженко, 11.
Тел.: 287-62-13;
факс: (38044) 528-04-86;
E-mail: office@paton.kiev.ua**

