

# РОЛЬ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ\*

**В. Ф. КВАСНИЦКИЙ**, д-р техн. наук, **М. В. МАТВИЕНКО**, инж.,  
**Г. В. ЕРМОЛАЕВ**, **А. В. ЛАБАРТКАВА**, кандидаты техн. наук  
 (Нац. ун-т кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев),  
**В. Д. КУЗНЕЦОВ**, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

На базе метода конечных элементов путем компьютерного моделирования исследовано влияние соотношения размеров (радиусов и высоты) цилиндрических деталей типа цилиндров и втулок из разнородных материалов на напряженно-деформированное состояние в зоне стыка при диффузионной сварке с учетом пластических деформаций в условиях нагружения сжатием и термоциклированием и установлены закономерности его формирования.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, разнородные материалы, напряженно-деформированное состояние, пластическая деформация, узел цилиндр–цилиндр, узел втулка–втулка, относительный радиус, относительная высота, компьютерное моделирование, точка застоя

Основные закономерности формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) при диффузионной сварке в вакууме узлов из разнородных материалов приведены в работах [1–4]. Установлено, что при сварке заготовок с разными физико-механическими свойствами формируется объемное напряженное состояние, способствующее локализации пластических деформаций в зоне стыка. Наиболее эффективным способом локализации деформаций является термоциклирование.

Объемное напряженное состояние обусловлено различием жесткости, прочности и коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) соединяемых материалов. Напряжения и деформации по стыку распределяются неравномерно. Наиболее неблагоприятной для формирования соединения является так называемая зона застоя с нулевыми касательными напряжениями, минимальными эквивалентными напряжениями и пластическими деформациями, так как деформационная активация поверхности в ней исключается [5]. При проектировании заготовок узлов из разнородных материалов под диффузионную сварку необходимо знать положение этой зоны. В ранее проведенных исследованиях [6] изучено влияние на НДС сочетания свойств соединяемых материалов и режима нагружения на моделях типа цилиндр–цилиндр (Ц–Ц), втулка–втулка (В–В) и

втулка–фланец. Размеры моделей (радиус и высота) и положение зоны застоя при этом оставались постоянными. Очевидно, что при изменении соотношения размеров деталей величина и положение этой зоны могут меняться. Поэтому актуальными являются исследования степени влияния геометрических факторов на установленные ранее закономерности.

Целью настоящей работы является установление влияния основных размеров цилиндрических деталей типа Ц–Ц и В–В на НДС при диффузионной сварке разнородных материалов.

Исследования выполняли методом компьютерного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS. Рассматривали узлы и модели, по форме и размерам аналогичные таковым в предыдущих исследованиях [1–4]. Модули упругости и прочность материалов принимались одинаковыми ( $E_1 = E_2 = 1 \cdot 10^5$  МПа), пределы текучести выбирали на таком уровне, чтобы пластические деформации происходили в обеих деталях (на уровне ниже максимальных эквивалентных, найденных в упругом решении, т. е.  $\sigma_{T1} = \sigma_{T2} < \sigma_{ЭКВ}^{max}$ ). Модуль упрочнения при пластическом деформировании для всех материалов принят равным нулю. КЛТР соединяемых материалов во всех вариантах отличались в два раза ( $\alpha_1 = 10 \cdot 10^{-6}$ ,  $\alpha_2 = 20 \cdot 10^{-6}$  1/град).

В узлах типа Ц–Ц и В–В рассматривали термическое нагружение (нагрев на 100 °С) в незакрепленном состоянии, так как оно является главной причиной появления касательных напряжений в стыке и наличие точки и зоны застоя наиболее выражено. Для обобщения полученных закономерностей результаты сравнивали с вариан-

\* В работе принимал участие докторант, канд. техн. наук В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ», г. Киев.

том совместного нагружения сжатием (40 МПа) и термоциклированием ( $\pm 100$  °С).

Исходя из соотношения основных размеров (внутреннего радиуса, толщины и высоты втулки) цилиндрические узлы условно разбили на три группы: втулки (высота больше радиуса и толщины, т. е. преобладающим размером является высота), плоские кольца — диски (толщина значительно больше внутреннего радиуса и высоты, т. е. преобладающим размером является толщина) и тонкие кольца (внутренний радиус значительно больше высоты и толщины, т. е. преобладающий размер — внутренний радиус).

Соответственно размеры узлов Ц–Ц и В–В варьировали в следующих пределах: внутренний радиус втулки  $r$  от 0 (цилиндр) до 450 мм; высота втулки  $h$  от 1 до 20 мм, толщина втулки (разность наружного и внутреннего радиусов)  $b = R - r$  от 4,5 до 20 мм. При этом соотношение размеров изменялось в пределах:  $r/b$  от 0 до 90 (тонкое кольцо) при  $h/b$  от 0,13 (плоское кольцо) до 2,7 (0,13; 0,67; 1,6 и 2,7).

**Влияние относительного радиуса.** Соотношение внутреннего радиуса к толщине втулки  $r/b$  исследовали при постоянной толщине втулки  $b = 7,5$  мм, высоте  $h = 1, 5, 12$  и 20 мм и радиусе  $r$  от 0 (цилиндр) до 200 мм (кольцо). Изучали поля осевых, касательных, эквивалентных напряжений и пластических деформаций при нагреве.

Анализ результатов показал, что характер распределения касательных напряжений вдоль стыка при изменении внутреннего радиуса постоянный (рис. 1). Напряжения от максимума вблизи наружной поверхности почти линейно уменьшаются до нуля в точке застоя и снова увеличиваются после смены знака по мере приближения к внутренней поверхности. Максимальные напряжения при увеличении внутреннего радиуса от 0 (узел Ц–Ц) до 100 мм (узлы В–В) у внешней поверхности сохраняются, у внутренней поверхности

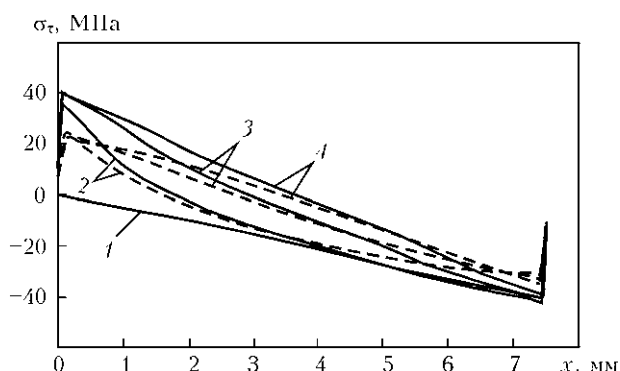


Рис. 1. Эпюры касательных напряжений в стыке при  $h = 12$  мм: 1 — сварка цилиндров  $r(r/b) = 0$  (0); 2–4 — сварка втулок соответственно при  $r(r/b) = 2,5$  мм (0,33), 15 мм (2) и 100 мм (13,3) при нагружении термоциклированием (сплошные кривые) и сжатием и термоциклированием (штриховые)

напряжения сначала растут при увеличении относительного радиуса до 2 и дальше остаются постоянными. Меняется положение точки застоя по длине стыка (толщине втулки)  $x/b$  от 0 (в цилиндре) до 0,45 (при  $r/b = 13$ ), т. е. при увеличении внутреннего радиуса точка застоя смещается от центра цилиндра при  $r(r/b) = 0$  ближе к середине толщины втулки (3,75 мм).

При нагружении сжатием с термоциклированием характер распределения касательных напряжений в стыке меняется несущественно, уменьшается их уровень, точка застоя незначительно (на доли миллиметров) смещается влево.

При изменении внутреннего радиуса характер распределения пластических деформаций вдоль стыка изменяется (рис. 2). При его увеличении деформации у внешней поверхности постепенно уменьшаются, вблизи внутренней поверхности увеличиваются. В образцах типа Ц–Ц пластические деформации отсутствуют, появляются они уже при внутреннем радиусе 1 мм ( $r/b > 0,13$ ) и заметно повышаются по мере увеличения радиуса.

По мере удаления от внутренней и внешней поверхностей пластические деформации уменьшаются до нуля. Зона застоя (нулевых пластических деформаций) меняется с увеличением радиуса незначительно, оставаясь около 4 мм ( $0,55b$ ) при всех радиусах.

При смене нагрева охлаждением поля осевых напряжений зеркально отображаются относительно линии стыка, поля касательных — меняют знаки на обратные, а эквивалентных напряжений и пластических деформаций не изменяются.

При совместном нагружении сжатием и термоциклированием пластические деформации по всему стыку увеличиваются со стороны материала с меньшим КЛТР при нагреве и с большим КЛТР при охлаждении. Со стороны второго материала пластические деформации соответственно уменьшаются до нуля при нагреве в материале с большим КЛТР и при охлаждении в материале с меньшим КЛТР.

На рис. 3 показаны графики зависимости положения точки застоя (нулевых касательных напряжений) относительно внутренней поверхности втулки по длине стыка от относительного радиуса при различной относительной высоте втулки  $h/b$  при нагружении термоциклированием. Для сравнения показано положение точек застоя при совместном нагружении сжатием и термоциклированием. Как видно из рисунка, при  $r/b = 0$  (цилиндр без внутренней поверхности) точка застоя находится точно на оси (в центре стыка), т. е. отношение  $x/b$  равно нулю. При наличии внутри цилиндра отверстия даже небольшого радиуса точка застоя удаляется от оси (от внутренней поверхности) тем быстрее, чем меньше относительная высота.

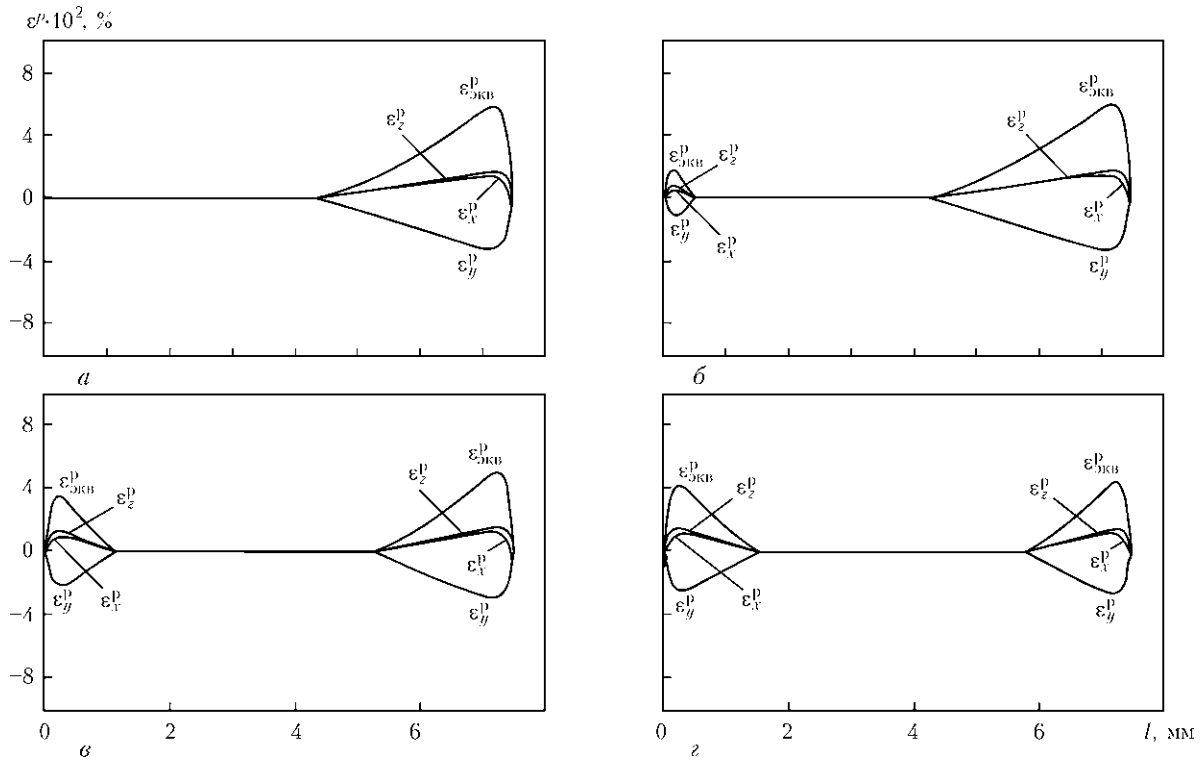


Рис. 2. Эпюры пластических деформаций в стыке при  $r/b = 0$  (а), 2,5 мм (0,33) (б), 15 мм (2) (в) и 100 мм (13,3) (г)

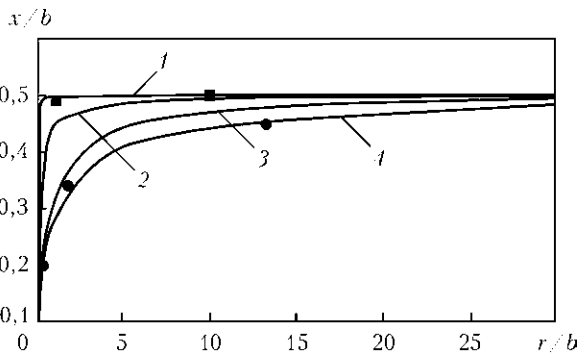


Рис. 3. Зависимость положения точки застоя от относительного радиуса  $r/b$  втулки при высоте: 1, ■ —  $h = 1$  мм; ( $h/b = 0,13$ ); 2 — 5 мм (0,67) — 2; 3, ● — 12 мм (1,6); 4 — 20 мм (2,67)

При малой относительной высоте ( $h/b = 0,13$ ), т. е. в узле типа плоский диск, даже при относительном радиусе  $r/b = 0,2$  относительное расстояние от внутренней поверхности  $x/b$  достигает 0,5, т. е. точка застоя приближается к середине толщины.

При больших относительных высотах ( $h/b$  от 0,67 до 2,67) также происходит смещение точки застоя ближе к середине толщины, но в меньшей степени. Так, при  $r/b = 1$  соотношение  $x/b$  — 0,45; 0,33 и 0,3 при соответственно относительных высотах 0,67; 1,6 и 2,67.

Дальнейшее увеличение внутреннего радиуса, т. е. переход от втулки к кольцу, продолжает постепенно смещать точку застоя от внутренней поверхности к середине толщины, при этом за-

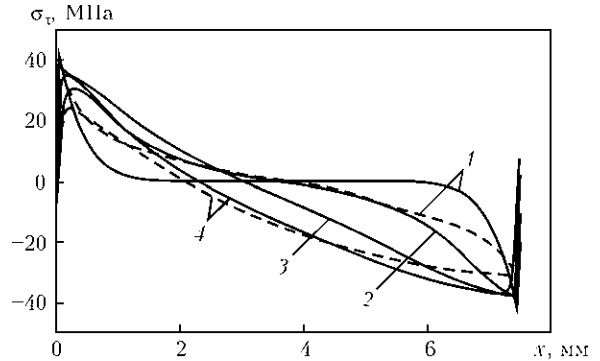


Рис. 4. Эпюры касательных напряжений в стыке при сварке втулок: 1 —  $r = 8$  мм,  $h/h_b = 1$  мм (0,13); 2 — 3 мм (0,4); 3 — 7,5 мм (1); 4 — 15 мм (2) при нагружении термоциклированием (сплошные кривые) и сжатием и термоциклированием (штриховые)

метнее, чем меньше относительная высота втулки. При относительном радиусе  $r/b > 40$  положение точки застоя  $x/b = 0,5$  практически при всех высотах.

При совместном нагружении сжатием с термоциклированием положение точек застоя практически не изменяется в плоском диске (рис. 3, кривая 1) и несколько смещается в сторону оси втулки (рис. 3, кривая 3), т. е. приложение усилия сжатия влияет аналогично увеличению высоты втулки.

**Влияние относительной высоты.** Соотношение высоты к толщине втулки  $h/b$  исследовали при постоянной толщине втулки  $b = 7,5$  мм, высоте от 1 до 20 мм и радиусах  $r = 3, 8$  и 50 мм.

Анализ эпюр касательных напряжений (рис. 4) показывает, что уровень максимальных напряжений как вблизи внутренней, так и наружной поверхностей незначительно изменяется при всех высотах. Однако характер распределения вдоль стыка изменяется от резко неравномерного с большой зоной застоя (нулевых касательных напряжений) при малой высоте ( $h/b = 0,13$ ) до близко к линейному при больших высотах ( $h/b > 1$ ). На рисунке также хорошо видно смещение точки застоя (нулевых касательных напряжений) и ее удаление от середины толщины втулки по мере увеличения относительной высоты.

Заметно изменяется с увеличением относительной высоты втулки зона пластических деформаций, меняется и их уровень. Относительная протяженность зоны застоя уменьшается от 0,9 при  $h/b = 0,13$  до 0,65 при  $h/b > 1$ .

При совместном нагружении сжатием и термоциклированием распределение касательных напряжений заметно изменяется только при малой относительной высоте (рис. 4, кривые 1). При этом зона с нулевыми касательными напряжениями исчезает, несколько уменьшаются пики напряжений вблизи поверхностей втулки, эпюра приобретает вид, характерный для втулок большой относительной высоты. Таким образом, подтверждается вывод о том, что приложение усилия сжатия равноценно увеличению относительной высоты втулки.

На рис. 5 показаны графики зависимости положения точки застоя (относительно внутренней поверхности втулки) по длине стыка от относительной высоты при различных внутренних радиусах втулки. Там же для сравнения точками указаны соответствующие значения для варианта нагружения совместно сжатием и термоциклированием. Как видно из рисунка, положение точки застоя при малой относительной высоте ( $h/b = 0,1 \dots 0,2$ ) несущественно зависит от радиуса и толщины и близко к 0,5. При средних и больших относительных высотах ( $h/b > 0,2$ ) относительное расстояние от внутренней поверхности втулки до точки застоя зависит как от относительной высоты, так и относительного радиуса, уменьшаясь с увеличением относительной высоты и возрастая с увеличением относительного радиуса. При совместном нагружении сжатием и термоциклированием точка застоя, как и в предыдущих случаях, смещается ближе к внутренней поверхности.

Таким образом, на основании анализа результатов моделирования можно сформулировать следующие основные закономерности влияния соотношения размеров (радиуса, высоты и толщины) цилиндров и втулок на НДС соединений разнородных материалов при диффузионной сварке при нагреве (охлаждении).

При увеличении внутреннего относительного радиуса втулки характер полей напряжений и

пластических деформаций изменяется. При малых радиусах пластические деформации сосредоточены вблизи стыка в его половине, прилегающей к внешней поверхности, и захватывают равномерно оба материала. Увеличение радиуса приводит к появлению второй области пластических деформаций в половине стыка, прилегающей к внутренней поверхности втулки. С возрастанием внутреннего радиуса зона пластических деформаций вблизи наружной поверхности несколько уменьшается, а вблизи внутренней увеличивается. Зона застоя меняется с увеличением относительного радиуса незначительно, оставаясь около 4 мм (0,53) при всех радиусах.

Характер распределения и уровень касательных напряжений вдоль стыка при увеличении внутреннего радиуса не изменяется, но точка застоя перемещается от центра цилиндра ближе к середине толщины втулки. При малой относительной высоте ( $h/b = 0,13$ ), т. е. в узле типа плоский диск, даже при малых относительных радиусах ( $r/b = 0,5$ ) точка застоя приближается к середине толщины. При больших относительных высотах также происходит смещение точки застоя ближе к середине толщины, но в меньшей степени. Дальнейшее увеличение внутреннего радиуса, т. е. переход от втулки к кольцу продолжает постепенно смещать точку застоя от внутренней поверхности к середине толщины, при этом тем заметнее, чем меньше относительная высота втулки.

Поля касательных напряжений сохраняют свою симметрию относительно стыка при всех высотах, однако кососимметрия относительно середины толщины сохраняется только при малой относительной высоте, с увеличением высоты она нарушается.

Поля пластических деформаций несколько изменяются, по мере роста высоты зона пластических деформаций увеличивается в большей степени вблизи наружной поверхности.

Уровень максимальных касательных напряжений как вблизи внутренней, так и наружной поверхности при всех высотах изменяется незначи-

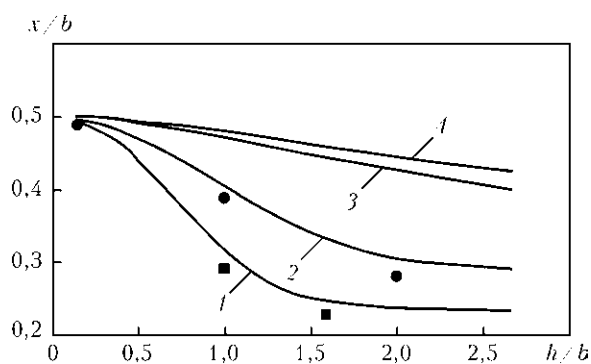


Рис. 5. Зависимость положения точки застоя от относительной высоты втулки  $h/b$ : 1,  $\blacksquare$  —  $r(r/b) = 3$  мм (0,4); 2,  $\bullet$  — 8 мм (1,07); 3 — 35 мм (4,67); 4 — 50 мм (6,67)

тельно. Характер распределения вдоль стыка изменяется от резко неравномерного с большой зоной застоя (нулевых касательных напряжений) при малой высоте ( $h/b = 0,13$ ) до близко к линейному при больших высотах ( $h/b > 1$ ). При этом происходит смещение точки застоя и ее удаление от середины толщины втулки по мере увеличения относительной высоты.

Положение точки застоя при малой относительной высоте ( $h/b = 0,1 \dots 0,2$ ) незначительно зависит от радиуса и толщины и близко к 0,5. При средних и больших относительных высотах ( $h/b > 0,2$ ) относительное расстояние от внутренней поверхности втулки до точки застоя зависит как от относительной высоты, так и относительного радиуса, уменьшаясь с увеличением относительной высоты и повышаясь с увеличением относительного радиуса.

При совместном нагружении сжатием и термоциклированием установленные закономерности сохраняются, но точка застоя несколько смещается в сторону внутренней поверхности втулки, т. е. влияние усилия сжатия аналогично увеличению относительной высоты втулки.

## Выводы

1. Положение точки застоя и величина зоны застоя зависят от соотношения размеров (внутреннего радиуса, толщины и высоты) цилиндрических узлов из разнородных материалов, что необходимо учитывать при проектировании заготовок деталей под диффузионную сварку.

2. В узлах типа диска и тонкого кольца точка застоя располагается в средней части стыка, близко к середине толщины.

3. С уменьшением относительного внутреннего радиуса и увеличения относительной высоты свариваемых втулок точка застоя смещается от середины толщины к внутренней поверхности втулки. При соединении цилиндров она располагается в центре стыка.

4. Минимальное значение зоны застоя в соединениях цилиндрических деталей обеспечивает диффузионная сварка при одновременном сжатии и термоциклировании.

1. Махненко В. И., Квасницкий В. В. Напряженно-деформированное состояние узлов цилиндрической формы при диффузионной сварке // Автомат. сварка. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
2. 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.
3. 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 // Там же. — 2008. — № 1. — С. 5–11.
4. Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр–цилиндр и втулка–втулка // Зб. наук. праць Нац. ун-ту кораблебудування. — 2008. — 1. — С. 100–107.
5. Расчет контактных напряжений при сварке давлением проволоки с пластиной / Ю. Л. Красулин, В. И. Тимофеев, З. И. Харламов, М. Ж. Шоршоров // Физ. и химия обработки материалов. — 1967. — № 5. — С. 61–66.
6. Общие закономерности формирования напряженного состояния при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы / В. Д. Кузнецов, В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // Зб. наук. праць Нац. ун-ту кораблебудування. — 2007. — № 6. — С. 62–73.

Computer simulation based on finite element method was used to study the influence of the ratio of dimensions (radius and height) of cylindrical parts of the type of cylinders and bushings from dissimilar materials on the stressed-strained state in the butt zone at diffusion welding taking into account plastic deformation under the conditions of loading by compression and thermal cycling and to establish the regularities of its formation.

Поступила в редакцию 16.04.2009