

УДК 539.388.2:621.79.44

**СНИЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
В ПРОЦЕССЕ СТЫКОВОЙ СВАРКИ**

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО,  
АФШИН ХЕЙДАРИ МОНФАРЕД  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Поверхностные деформации, вызванные процессом стыковой сварки, представляют проблему, которая возникает по причине несоответствия тепловых расширений в сварном шве и окружающем материале. Остаточные напряжения наряду со сварочными деформациями в значительной степени оказывают негативное воздействие на получение точных размеров конструкции, её пригодность к применению и себестоимость. Эти факторы отражают в полной мере необходимость использования различных технологий, направленных на минимизацию вредных явлений в сварочных процессах. Данные технологии применяются для того, чтобы обеспечить величины сварочных остаточных напряжений и деформаций ниже нормативных. Величина деформации может быть минимизирована в результате правильно выбранных методологий подготовки сварочных работ, ведения сварочных работ и послеоперационного контроля качества проведенных работ. В данной работе термообработка используется для устранения деформаций, вызванных процессом сварки. Необходимые соответствующие параметры охлаждения определены с помощью тепловой базы данных, созданной в процессе моделирования с применением метода конечных элементов.*

**Введение.** Деформации, вызываемые в процессе сварки, являются обычной проблемой в промышленности. Основная причина сварочных деформаций – неравномерный нагрев материала в ходе сварочного процесса, который в свою очередь создаёт остаточное удлинение и остаточное сужение в силу несоответствия тепловых расширений в сварном шве и окружающем материале. В процессе работы были обнаружены четыре вида сварочных деформаций. Первым двум свойственны такие явления, как продольная усадка шва и усадка шва по ширине, которые происходят в плоскости. Другие же два вида деформаций характеризуются угловой и продольной деформацией, которые наблюдаются вне плоскости. Основной причиной угловой деформации является неравномерное расширение и сжатие по толщине сварочной поверхности из-за влияния температурного градиента. Продольная деформация (или же продольный изгиб) вызывается продольными растягивающими остаточными напряжениями. Данный вид деформации приводит к ухудшению эксплуатации производимой продукции и увеличению себестоимости, что особенно проявляется при сборке сварных конструкций.

Таким образом, вышеназванные дефекты должны устраняться или же минимизироваться до уровня ниже критического. Качественный контроль за переменными параметрами режима сварки способствует устранению условий, которые предопределяют появление деформаций. Данный контроль подразумевает уменьшение размера и длины углового сварного шва, включая и прихваточный сварной шов, и использование высокоскоростной сварки, сварки с низким уровнем подводимой теплоты, прерывистых швов, обратноступенчатый способ сварки, термообработку.

**Основная часть.** На протяжении последних десятилетий было предложено большое количество методов, направленных на уменьшение сварочных деформаций в крупных конструкциях. Все эти методы можно подразделить на три группы: 1) методы, направленные на подготовку к сварочным работам; 2) методы, предназначенные для ведения сварочных работ; 3) методы послеоперационной обработки.

*Первая группа методов* предназначена для получения баланса остаточных напряжений, что достигается в результате оптимизации условий сварочного процесса (напряжение дуги, сила тока, скорость сварки, материал из которого изготовлен электрод и т.д.), проектирования и крепления производимых конструкций, а также последовательности проведения сварочных операций. Методология первой группы направлена на уменьшение сварочных деформаций только до определенного уровня, который ограничивается типом оригинальной производимой конструкции и выбранным методом сварки. Методы *второй группы*, которые применяются непосредственно во время сварочного процесса, нацелены на минимизирование остаточных напряжений. В работе [1] предложен переходный метод термического натяжения, при котором на протяжении всей длины сварки используются две нагревательные горелки. В работе [2] предложен метод *предварительного напряжения* для контроля сварочных деформаций. Большинство этих методов обеспечивает предварительное натяжение с помощью механических и термических средств с целью компенсации несоответствия теплового расширения, вызванного сварочным процессом.

Данная работа в первую очередь отражает характеристики деформаций и остаточных напряжений после процесса сварки. Для устранения угловой деформации со стороны нижней поверхности на протяжении всей длины шва применяется охлаждение. Необходимые параметры охлаждения могут быть получены из базы данных нагревания, которая создается посредством моделирования с применением мето-

да конечных элементов. Предлагаемая методология апробировалась при проведении сварки с наплавлением валиков на пластины нержавеющей стали.

В судостроении применяется широко известная низкотемпературная технология снятия напряжений с нагревом пламенем и комбинированным водяным охлаждением для изготовления сварных конструкций, имеющих толстое сечение свариваемых пластин. Данная технология позволяет уменьшить продольные остаточные напряжения после процесса сварки. В её основе лежит эффект расширения температурного градиента, вызываемый локальным линейным нагревом и охлаждением, которое происходит параллельно линии сплавления пластин толщиной 20...40 мм. Однако эта технология не обеспечивает снятие напряжения и устранение изгибов после сварки тонкостенных элементов, поскольку металлические листы недостаточно жесткие для того, чтобы исключить переходные смещения, происходящие вне плоскости во время локального нагрева и принудительного охлаждения.

Эффект расширения температурного градиента практически осуществим для предотвращения изгибов пластин и корпусов во время сварки, в то время как переходные смещения вне плоскости устраняются благодаря качественно выполненному жесткому крепежу или же применению соответствующих систем зажимных приспособлений. Проблемы изгиба поверхности, вызванные сваркой плавлением, становятся более значимыми для тонкостенных элементов, имеющих толщину менее 4 мм, которые широко применяются в аэрокосмических конструкциях. В 80-е годы прошлого столетия, используя тепловой эффект натяжения с целью предотвращения изгибов в аэрокосмических конструкциях толщиной менее 4 мм, был проведен ряд экспериментальных исследований Guan [3; 4].

В ходе неоднократных экспериментов было доказано, что алгоритм, предложенный Burak [5] для пластины толщиной 4 мм, неприменим для устранения изгибов в элементах толщиной менее 4 мм. Причиной этого является то, что вследствие предрасположенности к потере состояния устойчивого равновесия в тонких элементах толщиной менее 4 мм переходные смещения вне плоскости происходят на участках, расположенных далеко от зоны сварки. Используя программное обеспечение, с помощью компьютерного моделирования были получены оптимальные параметры контроля за процессами деформаций, позволяющие уменьшить стоимость сварочной операции, а также улучшить качество и надёжность сварных конструкций. Значительный прогресс был достигнут в решении вышеупомянутой проблемы с целью улучшения термической технологии натяжения и её применения для предотвращения изгибов в элементах толщиной менее 4 мм, особенно при изготовлении аэрокосмических конструкций. На основе обозначенных в данной статье исследований были разработаны экспериментальный метод и математическая модель метода конечных элементов, программное обеспечение LS-DYNA для контроля и минимизации деформаций в тонких пластинах.

### 1. Эксперименты и моделирование

В начале исследований проведена валиковая проба. Для исследования сварных деформаций был взят один образец, полученный в результате наплавки валика на пластину с помощью вольфрамовой сварки. Исследуемый материал представлял собой аустенитную нержавеющую сталь 304 размером 150×170×1 мм. Используемый защитный газ – 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>. Электродная проволока – ER308L; характеристики для проведения сварки приведены в таблице. Длина линии сварки – 170 мм. После сварки было измерено отклонение в центре сварной линии (рис. 1).

Характеристики процесса сварки

Характеристики	Сила сварочного тока (А)	Напряжение дуги (В)	Скорость сварки (мм/с)	Диаметр проволоки (мм)
Значения	29	10	1,5	0,8

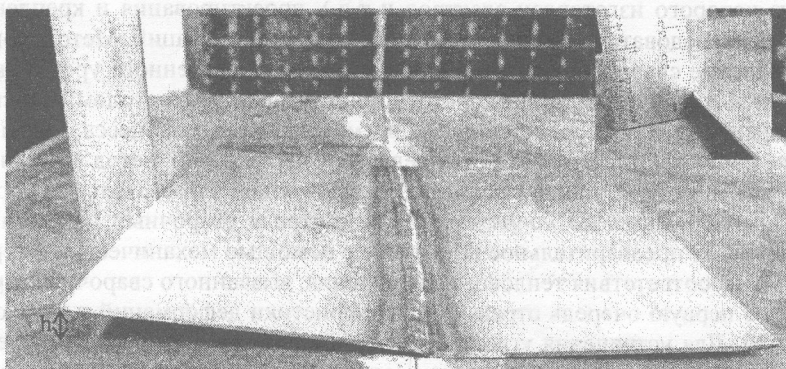


Рис. 1. Результат проведения экспериментальной валиковой пробы

При проведении экспериментов для выполнения необходимых измерений использовалась линейка (см. рис. 1). Замеренное значение  $h$  (деформация пластины в направлении  $Y$ ) перед началом сварки составило 0 мм, в конце эксперимента, после сварки, – 7,5 мм.

На втором этапе для контроля деформаций в тонких пластинах в ходе процесса сварки применялись как нагревание, так и охлаждение. Размеры свариваемой конструкции, температура и время нагревания являются основными характеристиками для осуществления минимизации деформаций. На рисунке 2 показано схематическое изображение этой технологии. Как можно видеть, была применена двухточечная зажимная система. Желаемый термический эффект натяжения может быть достигнут без переходных поперечных смещений вне плоскости.

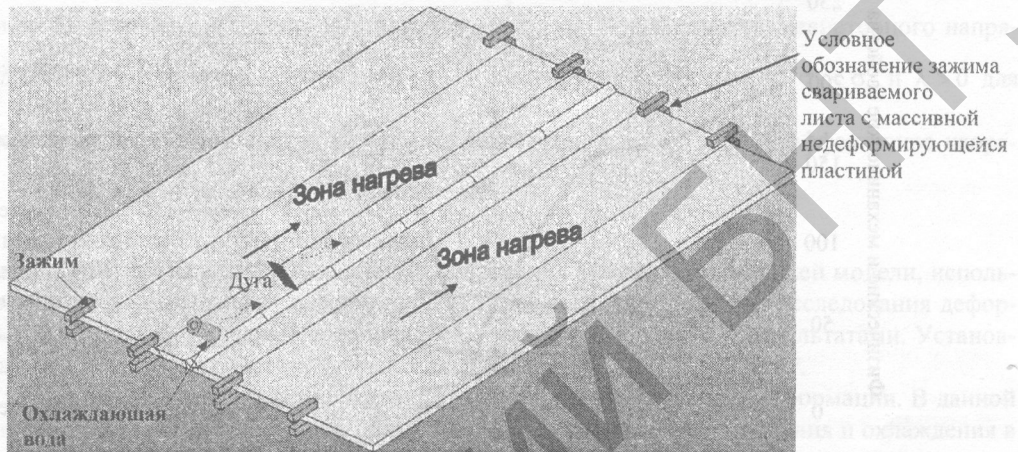


Рис. 2. Схема изображения эксперимента, используемого для контроля деформационного процесса

## 2. Моделирование конечных элементов

Анализ конечных элементов был выполнен с применением LS-DYNA [6]; сетка конечных элементов была получена с помощью программы ANSYS. Сетка, показанная на рисунке 3, является трехмерной. Следует обратить внимание на то, что сумма высоты валика и пластины составляет приблизительно 2 мм. Для моделирования использовались трехмерный, 8-узловой модуль и элементы SOLID 164. Данная сеть включает в себя 11520 элементов и 14637 узлов.

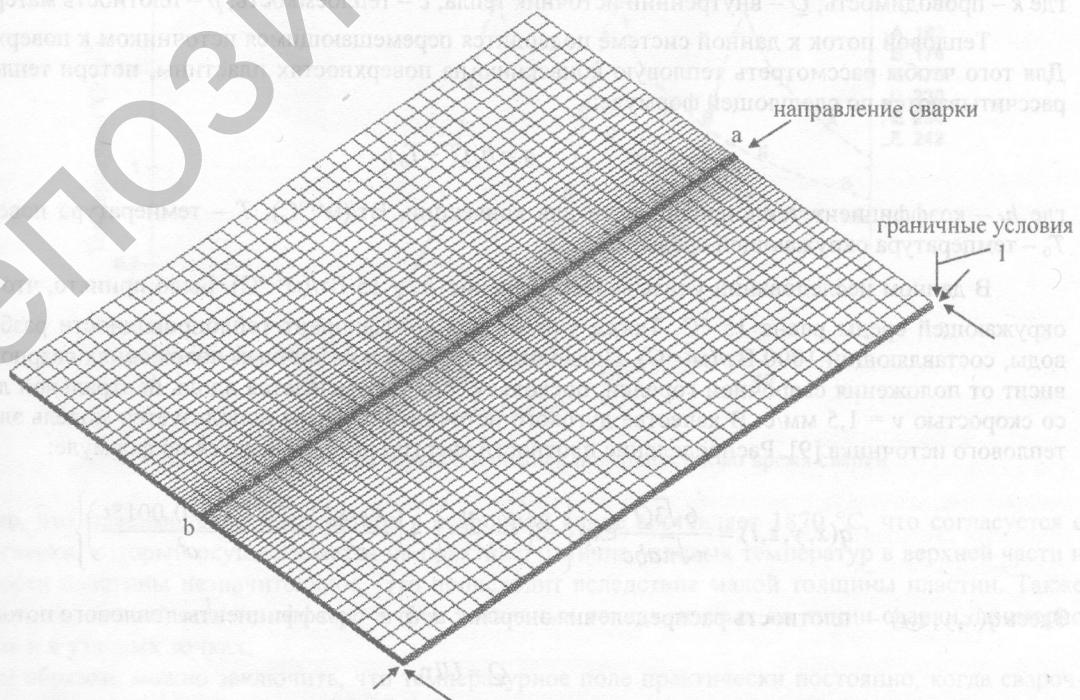


Рис. 3. Модель конечных элементов (стрелка 1 показывает механические граничные условия)

В нашем исследовании для рассмотрения потока жидкости использовалась искусственно увеличиваемая в сварочной ванне теплопроводность. Предполагается, что теплопроводность в два раза больше для температуры выше точки плавления, чем при комнатной температуре. Тепловые эффекты, вызываемые затвердеванием сварочной ванны, моделируются с учетом скрытой теплоты, необходимой для плавления. Значение скрытой теплоты составляют 270 Дж/г [7]. При проведении экспериментов полагаем, что температура ликвидуса (ТЛ) и температура солидуса (ТС) равняются 1500 и 1450 °С соответственно.

Температурные зависимые физических свойств нержавеющей стали, как показано на рисунке 4, используются при проведении анализа теплопередачи.

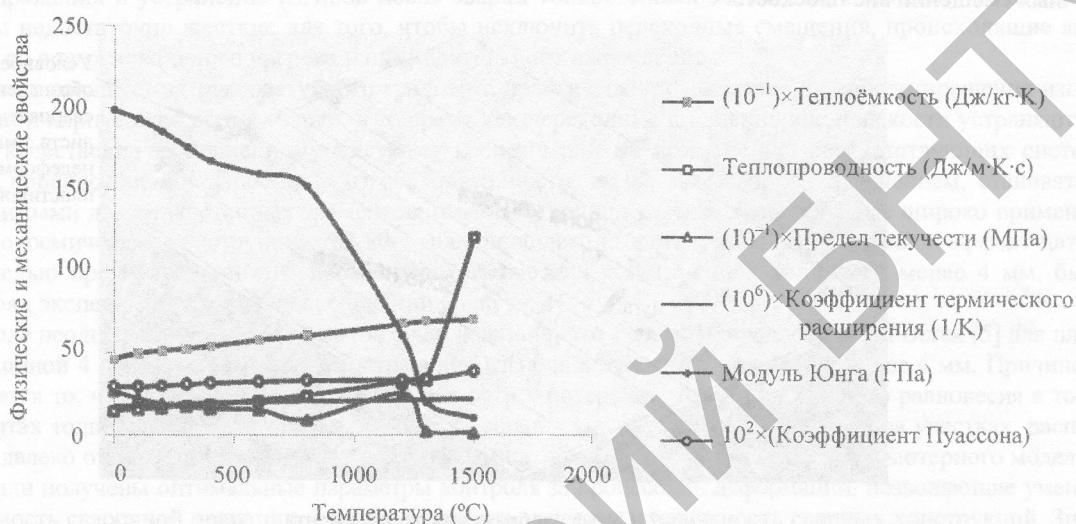


Рис. 4. Теплофизические и механические свойства стали SUS304 [8]

Основное уравнение теплового процесса в зоне сварки представляет собой характеристическое уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z) = \nabla(k \nabla T) + Q(x, y, z, t),$$

где  $k$  – проводимость;  $Q$  – внутренний источник тепла;  $c$  – теплоёмкость;  $\rho$  – плотность материалов.

Тепловой поток к данной системе подводится перемещающимся источником к поверхности листа. Для того чтобы рассмотреть тепловую конвекцию на поверхностях пластины, потери теплового потока рассчитываются по следующей формуле:

$$q = h_f (T - T_0),$$

где  $h_f$  – коэффициент теплопроводности для конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $T$  – температура поверхности, °С;  $T_0$  – температура окружающей среды, °С.

В данном исследовании учитывалось значение  $h_f = 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Было принято, что температура окружающей среды равна 15 °С. Также учитывался коэффициент теплопроводности разбрызгиваемой воды, составляющий 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Подводимая теплота в различных положениях сварного валика зависит от положения сварочной горелки, поскольку она перемещается вдоль центральной линии (ось Z) со скоростью  $v = 1,5$  мм/с. В качестве дугового источника теплоты используется модель эллипсоидного теплового источника [9]. Распределение плотности энергии рассчитывается по формуле:

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi\sqrt{\pi abc}} \exp \left\{ -3 \left( \frac{y - y_0}{b^2} \right)^2 + \left( \frac{x - x_0}{c^2} \right) + \left( \frac{z - z_0 - 0,0015t}{a^2} \right) \right\}.$$

Здесь  $q(x, y, z, t)$  – плотность распределения энергии;  $a, b, c$  – коэффициенты теплового потока;

$$Q = UI\eta,$$

где  $U$  – напряжение;  $I$  – сила тока;  $\eta$  – мощностной коэффициент.

Для представленных уравнений взяты следующие константы:  $b = 1$ ,  $c = 2$ ,  $a = 1,5$  мм;  $\eta = 0,75$ , выбор которых основан на экспериментальных результатах. Во время анализа не принимаются во внимание эффекты газового потока и субъективная ошибка в отношении стабильности горения дуги.

В данном исследовании принимаем, что пластическая деформация материалов удовлетворяет критерию текучести Мизеса и классическому закону текучести. Степень взаимосвязи между термическим напряжением  $\sigma_{ij}$  и перемещением  $\varepsilon_{ij}$  выражена следующим образом:

$$\varepsilon_{ij}^* = \frac{1+\nu}{E} \sigma^* - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \lambda s_{ij} + \left[ \alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial T} (T - T_s) \right] T^*,$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга;  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}$  – компоненты девиаторного напряжения;  $\lambda$  – коэффициент пластической деформации ( $\lambda = 0$  для упругой деформации;  $\sigma_e < \sigma_s$  и  $\lambda > 0$  для пластической деформации;  $\sigma_e \geq \sigma_s$ , при этом  $\sigma_s$  – предел текучести,  $\sigma_e = \left( \frac{2}{3} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2}$  – эффективное напряжение Мизеса;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения.

### 3. Расчетные результаты трехмерной модели

При проведении данного исследования с целью повышения достоверности нашей модели, используемой для прогнозирования возможных деформаций, на первом этапе результаты исследования деформаций, полученных в ходе простой сварки, сравнивались с экспериментальными результатами. Установлено, что результат деформации на пластине близок к экспериментальному результату.

На втором этапе числовая модель позволяет прогнозировать минимизацию деформации. В данной модели технология обратноступенчатой сварки применяется во время сварки, нагревания и охлаждения в соответствующих зонах. Из-за недостаточной жесткости пластины во время сварочного процесса использовался крепеж (см. рис. 2). После сварки, когда температура пластины достигала комнатной, крепежные элементы убирались.

**3.1. Моделируемые результаты температурных полей для простой сварки.** На рисунке 3 стрелкой показано направление сварки. Сварка начинается в точке (а) и завершается в точке (б).

Изменение температур для узла F на верхней и нижней поверхностях пластины было зарегистрировано и отображено на рисунке 5.

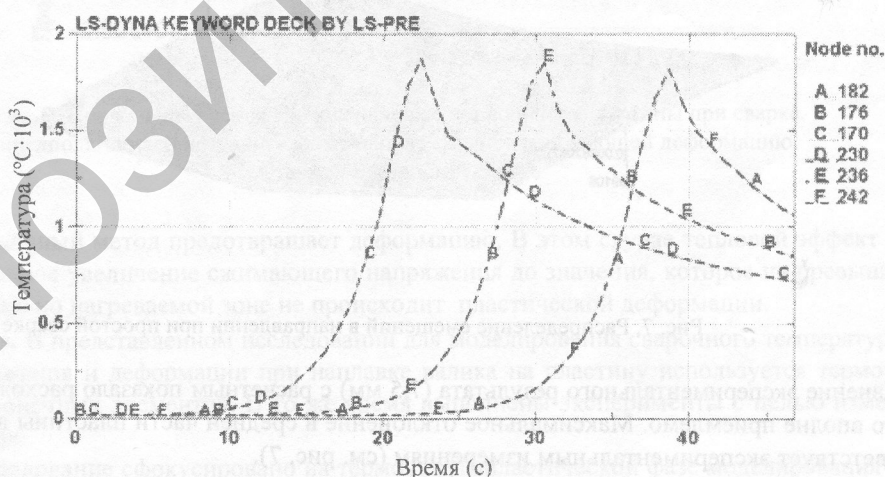


Рис. 5. Термоциклы на верхней и нижней поверхностях во время сварки

Видно, что максимальная температура в сварочной ванне составляет  $1870$  °C, что согласуется с процессом сварки, который осуществляется на практике; отличие узловых температур в верхней части и на поверхности пластины незначительное. Это происходит вследствие малой толщины пластин. Также следует отметить, что отличие температур в трех локальных точках, взятых на линии сварки, примерно такое же, как и в узловых точках.

Таким образом, можно заключить, что температурное поле практически постоянно, когда сварочная горелка перемещается по пластине. Необходимо учитывать, что относительно скорости сварки из-за относительно малой проводимости коэффициент теплопроводности имеет небольшую величину.

### 3.2. Моделируемые результаты сварочных остаточных напряжений для простой сварки.

На рисунке 6 показано распределение продольных остаточных напряжений на пластине, которые можно рассчитать.

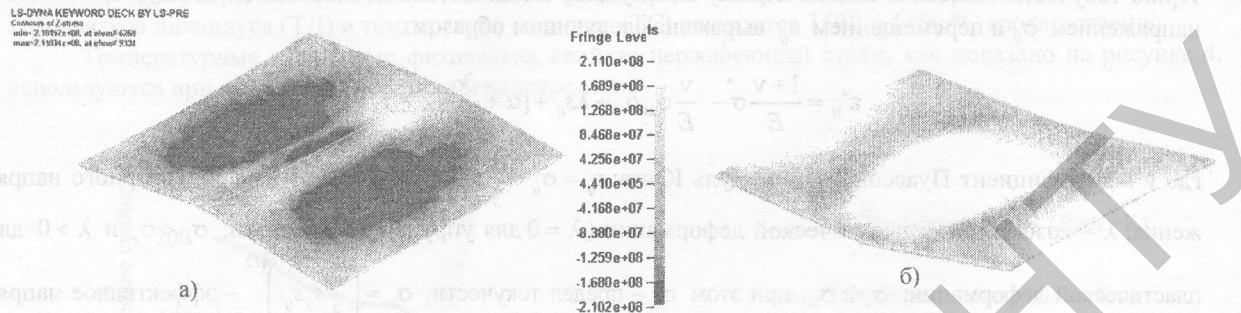


Рис. 6. Продольные остаточные напряжения:

а – нижняя поверхность; б – верхняя поверхность

Вследствие того, что после сварки генерируется относительная деформация, существует разница между продольным напряжением верхней и нижней поверхности.

Из-за формы деформации в нижней поверхности пластины создаются сжимающие напряжения, в то время как на верхней поверхности плиты появляются остаточные напряжения растяжения.

**3.3. Сварочные деформации для простой сварки.** На рисунке 7 показан характер распределения отклонений в направлении  $Y$ , которые можно рассчитать. Видим, что после сварки происходят наибольшие продольные и поперечные изгибы. На этом рисунке также отражено, что и продольные, и поперечные изгибы образуются в стыковом сварном соединении. Показано распределение смещений узлов 3533 и 39106 в направлении  $Y$ ; максимальное отклонение составило приблизительно 8,6 мм.

LS-DYNA keyword deck by LS-Prepost



Рис. 7. Распределение смещений в направлении при простой сварке

Сравнение экспериментального результата (7,5 мм) с расчетным показало расхождение между ними 12,7 %, что вполне приемлемо. Максимальное отклонение в средней части пластины в значительной степени соответствует экспериментальным измерениям (см. рис. 7).

**3.4. Выполнение сварки, уменьшающей напряжения и деформации.** Особенной и существенной характеристикой сварки, предполагающей незначительные напряжения и деформации, является обеспечение желаемого теплового эффекта натяжения во время сварки и одновременно предотвращение переходных смещений обрабатываемых изделий, которые происходят вне плоскости, в результате наложения температурных полей сварки и предварительного нагрева.

На рисунке 8 схематично показан основной принцип практического применения этого метода.

Тепловой эффект натяжения, который используется в данном случае и вызывает максимальные напряжения растяжения в зоне сварки, достигается благодаря сокращению зоны сварки, что обеспечивается посредством водного охлаждения сварочной зоны, расположенной за дугой, и расширением зоны теплового воздействия по обеим сторонам, которые равноудалены по отношению к зоне сварки, с помощью линейных нагревателей.

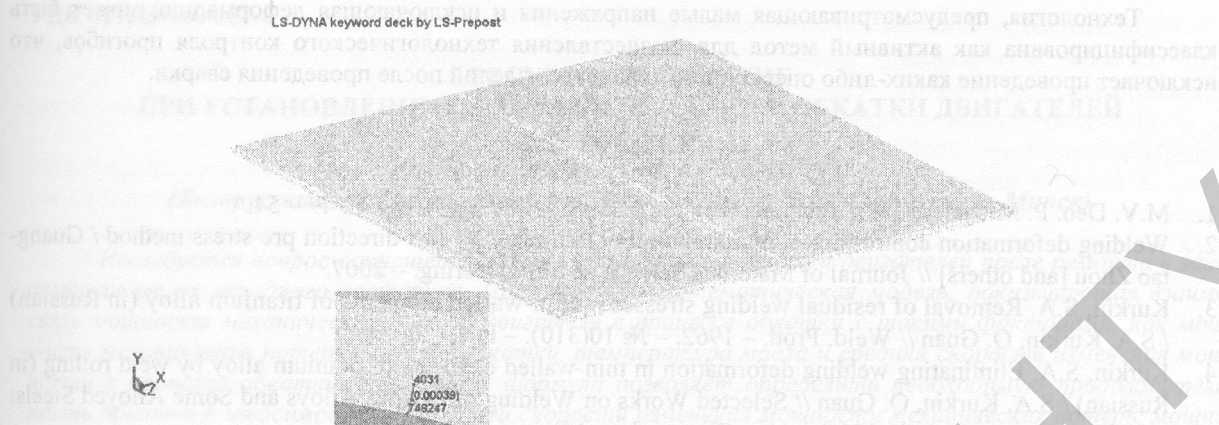


Рис. 8. Распределение смещений в направлении Y при сварке, предполагающей незначительные напряжения и исключающей деформацию

На рисунке 9 показано распределение двух продольных напряжений при нормальной сварке и сварке, предполагающей незначительные напряжения и исключающей деформацию.



Рис. 9. Продольное распределение напряжения по длине пластины при сварке, предполагающей незначительные напряжения и исключающей деформацию, а также при простой сварке

Видно, что данный метод предотвращает деформацию. В этом случае тепловой эффект натяжения вызывает минимальное увеличение сжимающего напряжения до значения, которое не превышает предел текучести, и в локально нагреваемой зоне не происходит пластической деформации.

**Заключение.** В представленном исследовании для моделирования сварочного температурного поля, остаточного напряжения и деформации при наплавке валика на пластину используется термоупругопластический метод конечных элементов. В то же время выполнены эксперименты с целью измерения сварочной деформации.

Данное исследование сфокусировано на термоупругопластической фазе моделирования сварочной деформации с целью определения простых подходов при моделировании конечных элементов, которые должны соответствовать экспериментальным данным.

Расчетное значение продольного изгиба превышает данные, полученные в ходе экспериментов. Расхождение составило 12,7 %.

Отклонение расчетных данных в центре сварной линии близко к экспериментальному измерению.

Напряжения растяжения формируются на верхней поверхности и постепенно трансформируются в сжимающие напряжения на нижней поверхности.

Результаты, показывающие малые напряжения и исключающие деформацию, могут быть достигнуты при сварочном процессе, основанном на тепловом эффекте натяжения, который обеспечивается созданием требуемого определенного заданного температурного градиента. Данный термический градиент обеспечивает предотвращение деформации.

Технология, предусматривающая малые напряжения и исключая деформацию, может быть классифицирована как активный метод для осуществления технологического контроля прогибов, что исключает проведение каких-либо операций по доработке изделий после проведения сварки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.V. Deo, P. Michaleris, Sci. Technol. Welding Joining. – 2003. – № 8. – P. 49 – 54.
2. Welding deformation controlling of aluminum-alloy thin plate by two-direction pre-stress method / Guangtao Zhou [and others] // Journal of Materials Science and Engineering. – 2007.
3. Kurkin, S.A. Removal of residual welding stresses in thin-walled elements of titanium alloy (in Russian) / S.A. Kurkin, Q. Guan // Weld. Prod. – 1962. – № 10(310). – P. 1 – 5.
4. Kurkin, S.A. Eliminating welding deformation in thin-walled elements of titanium alloy by weld rolling (in Russian) / S.A. Kurkin, Q. Guan // Selected Works on Welding of Ferrous Alloys and Some Alloyed Steels: Moscow Bauman Technical University, Oborongiz. – Moscow, 1962.
5. Controlling the longitudinal plastic shrinkage of metal during welding / Ya.L. Burak [and others] // Avtom. Svarka. – 1977. – № 288(3). – P. 27 – 29.
6. Ueda, Y. Simplifying methods for analysis of transient and residual stresses and deformations due to multi-pass welding / Y. Ueda, K. Nakacho // Trans. JWRI (Osaka, Japan). – 1982. – № 11(1). – P. 95 – 103.
7. W. Zhang, J.W. Elmer, T. Deb Roy // Materials Science and Engineering A 333. – 2002. – P. 320 – 325.
8. Deng, D. Numerical simulation of temperature and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurement / D. Deng, H. Murakawa // Journal of computational material science. – 2006. – № 37. – P. 269 – 277.
9. Goldak, J. A new finite element model for welding heat sources / J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby // Metall. Trans. – 1984. – № B 15B. – P. 299 – 305.

Поступила 02.02.2011

### SURFACE DEFORMATIONS REDUCTION BY MEANS OF HEAT TREATMENT IN THE COURSE OF BUTT-SEAM WELDING

**F. PANTELEENKO, AFSYIN HEIDARI MONFARED**

*Surface deformations, caused by the process of butt-seam welding, appear to be an issue, which emerges due to the discrepancy of thermal expansions in the weld seam and surrounding material. Unrelieved stresses along with welding deformations to a wide extent exert deleterious effect on obtaining of precise measurements of the construction, its availability to application and prime cost. These factors to the full extent reflect the necessity of the employment of different technologies, focused on the minimization of deleterious effects in the welding processes. The given technologies are applied to secure values of welding unrelieved stresses and deformations to be below standard ones. The size of deformation can be minimized as a result of tailor-made methodology of welding preparation; welding maintenance and post-process quality control of the carried out work. In this paper we present the high-temperature processing is used for elimination of deformations caused by welding process. Essential corresponding parameters of cooling are determined by means of thermal database, created in the course of modelling with application of methods of finite elements.*