



УДК 621.721.052:539.4.014

*Прохоренко В. М., Прохоренко Д. В., Зворыкин К. О.*

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».  
Украина, Киев

**ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНЫХ СВАРОЧНЫХ НАГРЕВОВ НА ОСТАТОЧНОЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ПРИ СВАРКЕ СИММЕТРИЧНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

*Анотація*

*Розглянуто розв'язок методом скінчених елементів задачі механіки про напружено-деформований стан при зварюванні стикових симетричних з'єднань з повторними нагріваннями на зварювальному режимі.*

*Результати розв'язку проаналізовані з позиції впливу повторних зварювальних нагрівань на залишковий напружено-деформований стан у зварному з'єднанні, який утворюється після виконання першого проходу. До теперішнього часу*

*обґрунтований розв'язок даного питання не був запропонований.*

*Abstract*

*The solution of the finite element method problems in the mechanics of deflected mode at welding butt symmetric joints with iterative welding heating is considered.*

*The results of the solutions are analyzed in superposition of assessing the iterative welding heating effect on residual deflected mode in the*

*welded joint that occurs after welding the first pass. So far, for various reasons, grounded decision of the issue has not been found.*

### Введение

При изготовлении многих сварных конструкций нередко приходится иметь дело с одним или несколькими повторными сварочными нагревами одной и той же области металла в месте расположения сварного шва. В качестве широко распространенного примера такого случая можно привести последовательное выполнение с двух сторон угловых швов при приварке стенок к полкам сварных балок в предположении, что точка ввода теплового потока от источника нагрева в металл при сварке швов с обеих сторон стенки находится в одной и той же точке на оси стенки балки. Другим подобным примером является двухсторонняя сварка стыковых швов листовых полотнищ. Можно также указать на случай двух- или трехпроходной сварки кольцевых швов труб и т. д.

Во всех этих случаях возникает вопрос относительно степени изменения напряженно-деформированного состояния в сварном соединении или конструкции, обусловленного первым швом или проходом, при выполнении последующих швов. Данный вопрос можно сформулировать и в несколько иной постановке, а именно, необходимо выяснить в какой мере изменяется усадочная сила от усадки металла высоконагретой зоны сварного соединения в процессе охлаждения при повторных сварочных нагревах.

Несмотря на значительные успехи в изучении напряженно-деформированного состояния при сварке, достигнутые на сегодняшний день усилиями многих известных специалистов в этой области [1–5], сформулированная в данной работе научно-техническая задача не имеет аргументированного научного решения. Такое состояние вопроса объясняется несколькими причинами. С одной стороны это связано с невозможностью получения аналитического решения в силу возникающих при этом непреодолимых математических трудностей. С другой стороны существующие приближенные инженерные методы расчета остаточного напряженно-деформированного состояния при сварке [1, 3–5] имеют много различных упрощающих допущений, многие из которых существенные. Поэтому их применение не позволяет решить на должном уровне сложную термоупруго-пластическую задачу с повторными сварочными нагревами и учетом температурной зависимости свойств материала, наличия упрочнения за пределом текучести и др. Наконец, третьих, экспериментальным путем получить ответы на поставленные вопросы практически также невозможно из-за большой трудоемкостью и стои-

мостью работ, значительными затратами материала, отсутствием надежной измерительной техники [1].

В то же время сейчас активно разрабатываются различные инженерно-научные вычислительные комплексы на основе использования метода конечных элементов для решения задач механики твердого деформируемого тела, к числу которых относятся и задачи о напряженно-деформированном состоянии при сварке. Использование таких подходов открывает перспективы и возможности решения затронутых вопросов.

### Постановка задачи

Цель работы заключается в поисках ответа на вопрос о влиянии повторных сварочных нагревов на остаточное напряженно-деформированное состояние в симметричном стыковом соединении, в установлении принципиальных отличий остаточного напряженного состояния после выполнения нескольких проходов от такового после сварки первого прохода. Важно также выяснить зависимость усадочной силы, обусловленной остаточной продольной пластической деформацией укорочения при первом проходе, от последующих проходов и сдвига по времени начала их выполнения после сварки предыдущего прохода.

### Основная часть

Задача решалась для симметричного сварного стыкового соединения размерами  $0,6 \times 0,2 \times 0,1$  м (рис. 1). Средствами комплекса ABAQUS создавалась геометрическая модель стыкового сварного соединения. Далее разрабатывалась физическая модель процесса сварки соединения подвижным источником нагрева на основе использования теплового потока, вводимого в небольшие объемы выбранной формы, расположенные вдоль линии шва. Значение магнитуды теплового потока выбирали соответствующим реальному режиму сварки соединения заданной толщины. Свойства материала соединения:

*механические* — предел текучести  $\sigma_T = f(T, \sigma)$  представлен ниже в таблице, предел прочности  $\sigma_b = 420 \times 10^6$  Па, относительное остаточное удлинение  $\delta = 0,25$ , модуль Юнга  $E = 2 \times 10^{11}$  Па, плотность стали  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ;

*теплофизические* — коэффициент температурного расширения  $\alpha = 1,2 \times 10^{-5}$  1/°С, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 42$  Дж/(сек · м · °С), удельная теплоёмкость  $c = 587,7$  Дж/(м<sup>3</sup> · °С).

В данной работе моделирование тепловых процессов и напряженно-деформированного состояния при сварке выполнялось с применением вычислительного комплекса Abaqus Student Edition [6]. Из двух основных решателей программного комплекса использовался решатель ABAQUS/Standard, базиру-

ющийся на неявной формулировке метода конечных элементов и позволяющий моделировать стационарные и переходные тепловые процессы.

Зависимость предела текучести от температуры

T, °C	0...500	600	700	800	1000	1200	1400
$\sigma_T$ , МПа	230	50	40	30	20	10	5

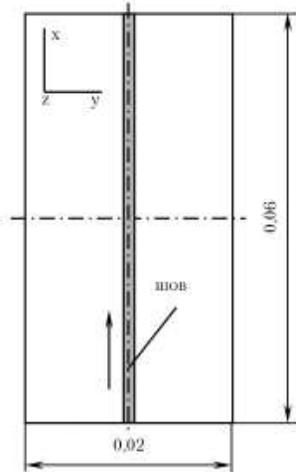


Рис. 1. Симметричное сварное стыковое соединение

Распределение остаточных продольных пластических деформаций укорочения PE11 (в направлении оси  $x$ , см. рис.1) в среднем поперечном сечении для правой половины сварного соединения показано на рис. 2. В подрисуночной легенде указано соответствие каждой кривой номеру прохода (шва) и условию охлаждения соединения после выполнения данного прохода. Верхние три кривые, относящиеся к сварке трех проходов с охлаждением после каждого прохода до 1200 сек. (20 мин.) от момента начала сварки. Наблюдается незначительное различие между кривыми только лишь на начальном участке (ближе к оси шва). На всех остальных участках кривые совпадают. Из этого вытекает важнейший вывод, что при таких условиях сварки (большой временной интервал между окончанием предыдущего и началом последующего прохода) ширина и площадь эпюры остаточных продольных пластических деформаций укорочения, а следовательно и продольной усадочной силы, при повторных нагревах вдоль оси сварного шва практически не изменяются.

Самая крайняя на рис. 2 правая кривая относится к выполнению все трех проходов друг за другом без перерыва и последующим охлаждением сварного соединения от начала сварки первого прохода до 1200 сек. Сравнение данной кривой с упомянутыми выше совпадающими друг с другом тремя кривыми явно свидетельствует о значительном увеличении площади эпюры рассматриваемых деформаций и со-

ответственно усадочной силы, ими созданной. На рис. 2 приведены еще две кривые, соответствующие промежуточным условиям сварки и охлаждения. Кривая, ближайшая к крайней правой кривой, получена при охлаждении после первого и второго проходов от момента начала сварки каждого из них до 60 сек., т. е. когда интервал охлаждения был незначительным и условия формирования напряженно-деформированного состояния в этом случае мало отличались от та-

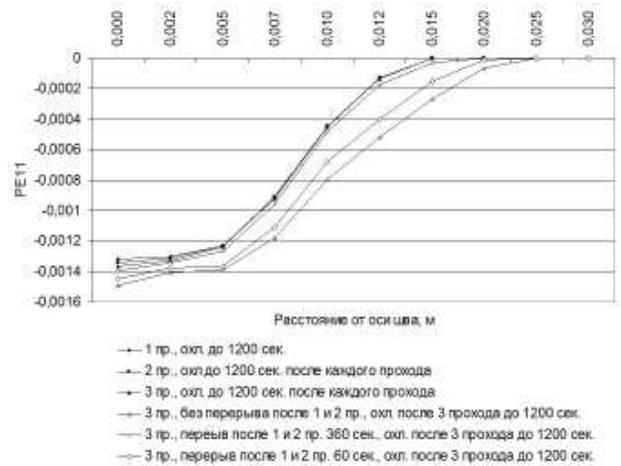


Рис. 2. Остаточная продольная пластическая деформация укорочения PE11 для правой половины среднего поперечного сечения сварного соединения

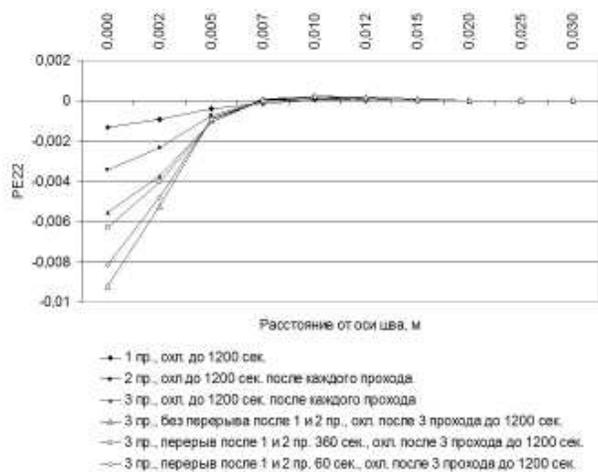
ковых условий при выполнении проходов без охлаждения между ними. Наконец, последняя кривая почти вплотную расположена возле упоминавшейся выше группы из трех совпадающих кривых. Условиям сварки этого случая соответствуют интервалы охлаждения после первого и второго проходов продолжительностью 360 сек. (6 мин.). Очевидно, что такой технологический вариант сварки трех проходов близок первым трем вариантам с охлаждением до 1200 сек. после сварки каждого прохода.

Остаточная пластическая деформация укорочения поперечного направления PE22 (в направлении оси  $y$ , см. рис. 1) в том же поперечном сечении для рассматриваемых здесь вариантов сварки показана на рис. 3. Из рисунка видно, что данная деформация сосредоточена в более узкой области возле шва, составляющей примерно треть часть от ширины зоны пластических деформаций укорочения продольного (вдоль шва) направления. Кроме того, формируется она с каждым проходом иным образом, чем это имело место для аналогичной продольной деформации. Увеличение поперечной пластической деформации наблюдается как при уменьшении интервала охлаждения между проходами, так и при увеличении количества проходов. Следует отметить, что поперечная пластическая деформация имеет большие значения, чем продольная.

Сдвиговая пластическая деформация PE12 показана на рис. 4. Видно, что после сварки второго и

третьего проходов с длительным охлаждением перед началом их сварки сдвиговая деформация имеет две зоны с разными направлениями сдвига (к оси и от оси шва). При небольшом перерыве между проходами или его отсутствии сдвиговая деформация является однозначной и имеет большую величину.

На рис. 5 для того же поперечного сечения показаны кривые распределения остаточных продольных напряжений S11.



**Рис. 3.** Остаточная поперечная пластическая деформация укорочения PE22 для правой половины среднего поперечного сечения сварного соединения

Особенности распределения кривых продольных напряжений по поперечному сечению в связи с указанными выше различиями в технологии сварки проходов полностью совпадают с аналогичными особенностями формирования и распределения по сечению остаточных продольных пластических деформаций укорочения (рис. 2).

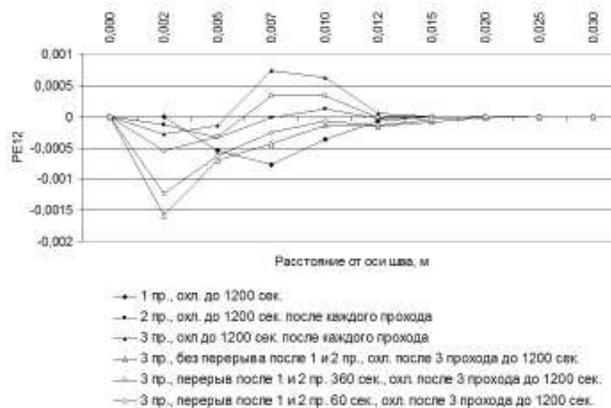
### Выводы

1. Остаточные продольные пластические деформации укорочения, остаточные продольные напряжения и усадочная сила от продольной усадки металла в зоне пластических деформаций укорочения в плоских симметричных стыковых соединениях при сварке повторных проходов (швов) практически не изменяется, если повторные проходы выполняются после сварки предыдущих с последующим охлаждением не менее 10 мин.

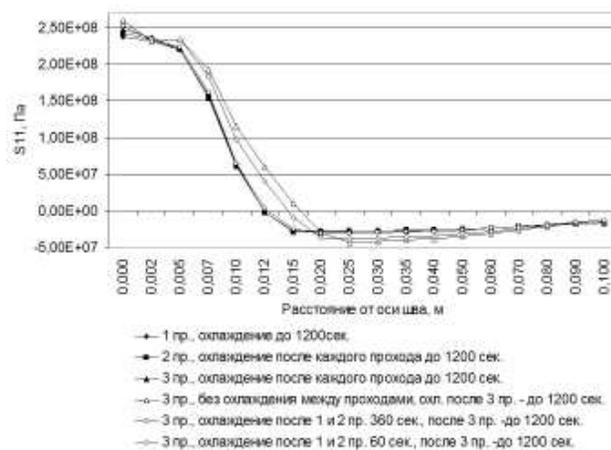
2. Выполнение повторных проходов (швов) без перерывов для охлаждения после сварки предыдущих проходов приводит к заметному увеличению, как самих остаточных пластических деформаций укорочения, так и ширины их эпюры в поперечном сечении соединения. При этом величина усадочной силы от продольного укорочения металла в области шва увеличивается ориентировочно на 15...20 % по сравнению со сваркой только одного шва.

3. Остаточные поперечные пластические деформации укорочения при повторных проходах возрастают как при уменьшении интервала охлаждения между проходами, так и при увеличении количества проходов. Поперечная пластическая деформация укорочения значительно больше аналогичной деформации продольного направления.

4. Некоторое увеличение вблизи шва продольных пластических деформаций укорочения и остаточных



**Рис. 4.** Остаточная сдвиговая пластическая деформация укорочения PE12 для правой половины среднего поперечного сечения сварного соединения



**Рис. 5.** Остаточные продольные напряжения S11 для правой половины среднего поперечного сечения сварного соединения

продольных напряжений, повидимому, связано с линейным упрочнением материала сварного соединения в этой области в процессе сварки.

### Литература

1. Прохоренко В. М. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб. / В. М. Прохоренко, О. В. Прохоренко. — К:



НТУУ «КПІ», 2009. — 268 с. — Бібліогр.: с. 267. — 400 пр. ISBN 978-966-622-331-2.

2. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных деформаций и напряжений [Текст]: / В. И. Махненко. — К.: Наук. Думка, 1976. — 320 с.

3. *Винокуров В. А.* Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст] / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.

4. *Гатовский К. М.* Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст]: учеб. пособие / К. М. Гатов-

ский, В. А. Кархин. — Л.: Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1980. — 331 с.

5. *Прохоренко О. В.* Розробка та застосування методу складних перерізів для розрахунку залишкових деформацій від зварювання поздовжніх швів одномірних конструкцій [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06: захищена 23.04.07: затв. 20.09.07 / Прохоренко Одарка Володимирівна. — К., 2007. — 249 с. — Бібліогр.: с. 215–224.

6. *Getting Started with ABAQUS.* — USA, Abaqus inc., 2003 — 497 p.