

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ABAQUS

У статті на прикладі зварювання симетричного стикового зварного з'єднання проаналізовано виконання основних припущень, які використовуються у наближених інженерних методах розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) зварних з'єднань (лінійність напруженого стану, гіпотеза плоских перерізів, рівномірність розподілу поздовжнього скорочення по ширині з'єднання, симетричність НДС відносно середнього поперечного перерізу зварного з'єднання).

In the article on the example of welding symmetric butt joint the feasibility of basic assumptions, used in the approximate engineering methods of calculation mode of deformation of the welded joints is analysed (linearity of the stress state, hypothesis of plane sections, equitability of the longitudinal shortening on the width of the welded joints, stress state symmetry comparatively of the average cross-section of welded joints).

Введение

Существующие представления о напряженно-деформированном состоянии (НДС) при сварке в историческом плане формировались, в основном, под влиянием результатов, получаемых расчетным путем при использовании различных инженерных расчетных методов приближенного определения остаточного (возникающего после сварки и полного охлаждения) НДС в геометрически простых соединениях или одномерных сварных конструкциях. Важное значение имели также и результаты экспериментальных исследований остаточного НДС в сварных соединениях, хотя в целом они достаточно ограничены из-за большой трудоемкости, стоимости, отсутствия высокоточной и надежной измерительной техники и поэтому, зачастую, весьма приближены. К этой группе можно отнести методы Николаева [1, 2], Гатовского [3], Трочуна [4], Кузьминова [1, 2], метод сложных сечений [1, 5]. Упомянутые и другие из этой группы методы разработаны на основе принятия ряда перечисленных ниже допущений относительно механизмов и закономерностей формирования и развития термдеформационных процессов в сварных симметричных относительно оси шва стыковых соединениях при сварке:

- остаточное НДС является одноосным (вдоль сварного шва);
- остаточное НДС является симметричным относительно среднего поперечного сечения по длине соединения;
- остаточное НДС во всех поперечных сечениях соединения одинаковое;
- полные продольные деформации в расчетном сечении на стадии нагревания и охлаждения, а также в любом поперечном сечении в остаточном состоянии подчиняются гипотезе плоских сечений;
- остаточное продольное укорочение соединения одинаковое по его ширине;
- механические и теплофизические свойства металла сварного соединения не зависят от температуры;
- металл сварного соединения соответствует модели идеального упруго-пластического тела;

В последние годы появились и получают распространение конечно-элементные вычислительные комплексы ABAQUS, ANSYS, SYSWELD и другие, позволяющие моделировать различные процессы, в том числе и образование НДС при сварке, без принятия указанных выше допущений.

ABAQUS является многоцелевым конечно-элементным комплексом для выполнения углубленного инженерного анализа нелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи [6]. ABAQUS позволяет проводить комплексный анализ задач, по условиям которых конструкции подвергаются большим перемещениям и поворотам, имеют нелинейные свойства материалов или свойства, зависящие от истории нагружения, а также анализ контактного взаимодействия конструкций. Применение численных методов обеспечивает надежность проектов и сокращает объем физического экспериментирования. В данной работе моделирование тепловых процессов при сварке выполнялось с помощью ABAQUS/Standard - одного из двух основных решателей программного комплекса Abaqus Student Edition, использующего неявную формулировку метода конечных элементов и позволяющего моделировать стационарные и переходные тепловые процессы.

Цели настоящей работы:

- средствами комплекса ABAQUS создать геометрические модели трех симметричных стыковых сварных соединений одинаковой ширины 0.2 м и длиной 0.15 м, 0.3 м и 0.6 м;
- разработать физическую модель процесса сварки стыковых соединений 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;

- выполнить расчеты сопряженной термо-упруго-пластической задачи по определению НДС в сварных соединениях, построить графики основных расчетных параметров для характерных сечений соединений, проанализировать результаты и сделать выводы при сравнении результатов, получаемых приближенными методами расчетов, упомянутыми выше.

Препроцессорная подготовка модели.

На стадии препроцессорной подготовки создается база данных, необходимых для расчета, задается система координат, формируется геометрическая модель, определяются свойства материала, тип и время анализа, нагрузки, граничные условия, создание сетки, выбор типа элемента.

Геометрическая модель: симметричное стыковое соединение заданных размеров с продольным сварным швом.

Свойства материала:

механические – предел текучести $\sigma_T=f(T^{\circ}C)$ табл.1, предел прочности $\sigma_B=420 \cdot 10^6$ Па, относительное остаточное удлинение $\delta=0.25$, модуль Юнга $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, плотность стали $\rho=7800$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\mu=0.3$;

теплофизические – коэффициент температурного расширения $\alpha=12 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, теплопроводность $\lambda=42$ Дж/сек·м·°C, удельная теплоёмкость $c=587.7$ Дж/°C·м³

Таблица 1

Зависимость предела текучести от температуры

| T ⁰ C | 0 | 500 | 600 | 700 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| σ_T , МПа | 230 | 230 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 5 | 1,5 |

Тип и время анализа: Coupled temp-displacement – сопряжённый термомеханический, transient – переходный, с учетом возможности больших перемещений (NIGeom – on) и автоматической стабилизацией рассеивания энергии, время анализа - 1200 сек.

Нагрузки: тепловой поток, распространяющийся в течение заданного времени через выделенный объём (Body heat flux) Дж/сек·м³ и действующий по заданной амплитуде.

Граничные условия: температура на свободных от нагрева краяхах 0 °C.

Тип элемента: CPS8RT – плоский 8-узловой элемент для решения сопряженной задачи термопластичности. Для материала сварного соединения принимается модель пластичности **BISO** (билинейное изотропное упрочнение, критерий текучести Мизеса, ассоциативный закон текучести).

Расчет НДС в ABAQUS автоматически определяет на всем временном интервале решения задачи для каждого узла сетки целый ряд параметров: S11, PE11, U1 – соответственно продольные (вдоль шва) напряжения, пластические деформации и перемещения; S22, PE22, U2 – соответственно поперечные (поперек оси шва) напряжения, пластические деформации и перемещения; S12, PE12 – соответственно касательные напряжения и сдвиговые деформации в поперечных сечениях соединения; S21, PE21 – соответственно касательные напряжения и сдвиговые деформации в продольных сечениях соединения; целый ряд других параметров НДС, теплового потока и другие, которые в данной работе не рассматриваются.

Таким образом, из выполненных нами расчетов для указанных выше трех типоразмеров сварных соединений выбраны и представлены на последующих рисунках расчетные данные для напряжений и пластических деформаций в среднем поперечном сечении и продольном сечении по оси шва, результаты для продольного и поперечного укорочений сварных соединений в остаточном состоянии, а также отдельно полученные на основании этих расчетов результаты для полной деформации в среднем поперечном сечении соединения:

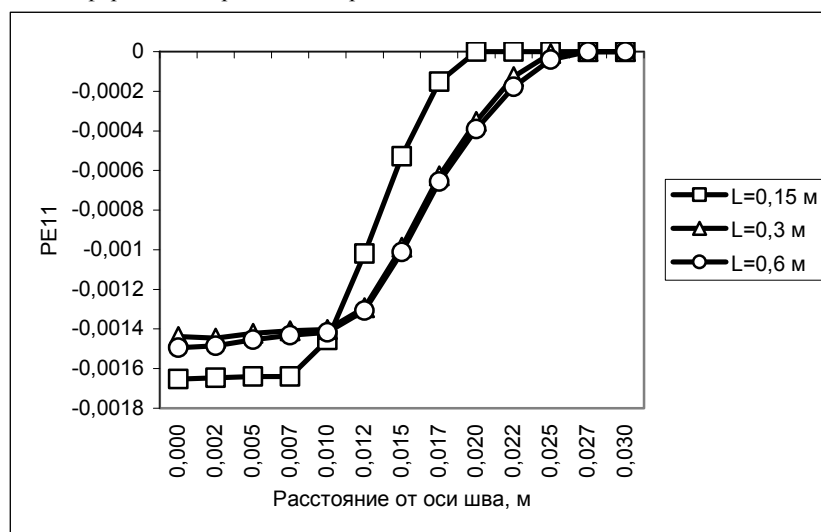


Рис. 1. Остаточные продольные пластические деформации PE11 в среднем поперечном сечении сварных соединений

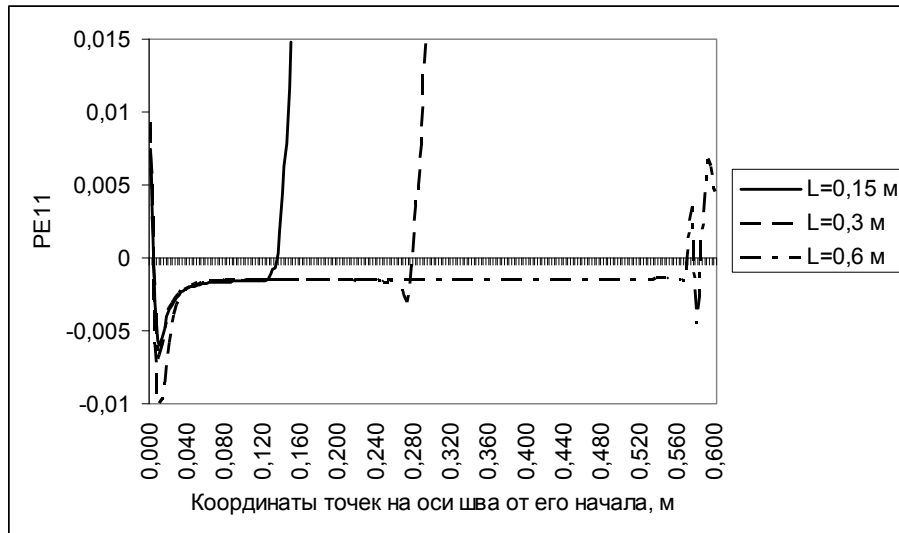


Рис. 2. Остаточные продольные пластические деформации PE11 в продольном сечении сварных соединений по оси шва

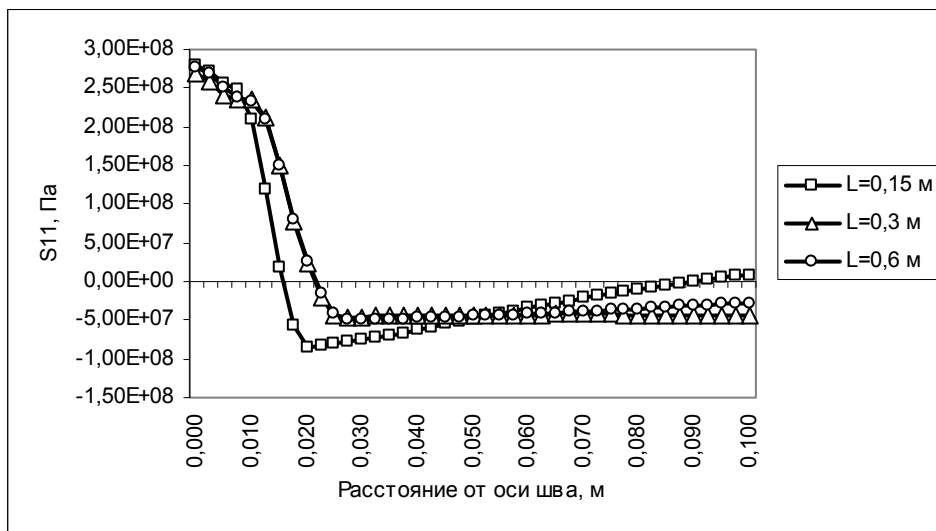


Рис. 3. Остаточные продольные напряжения S11 в среднем поперечном сечении сварных соединений

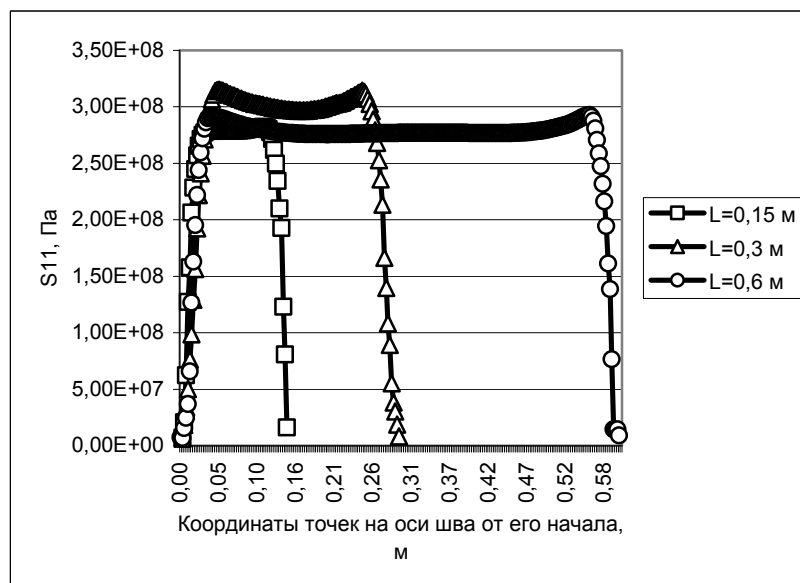


Рис. 4. Остаточные продольные напряжения S11 в продольном сечении сварных соединений по оси шва

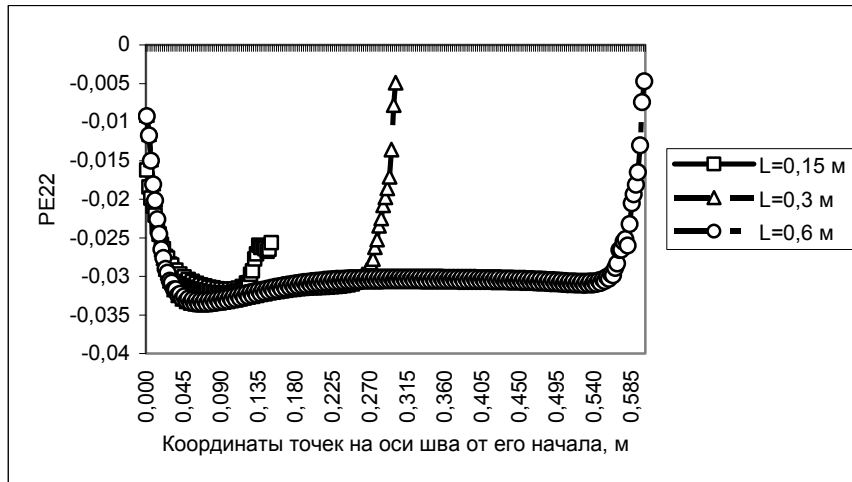


Рис. 5. Остаточные поперечные пластические деформации PE22 в продольном сечении сварных соединений по оси шва

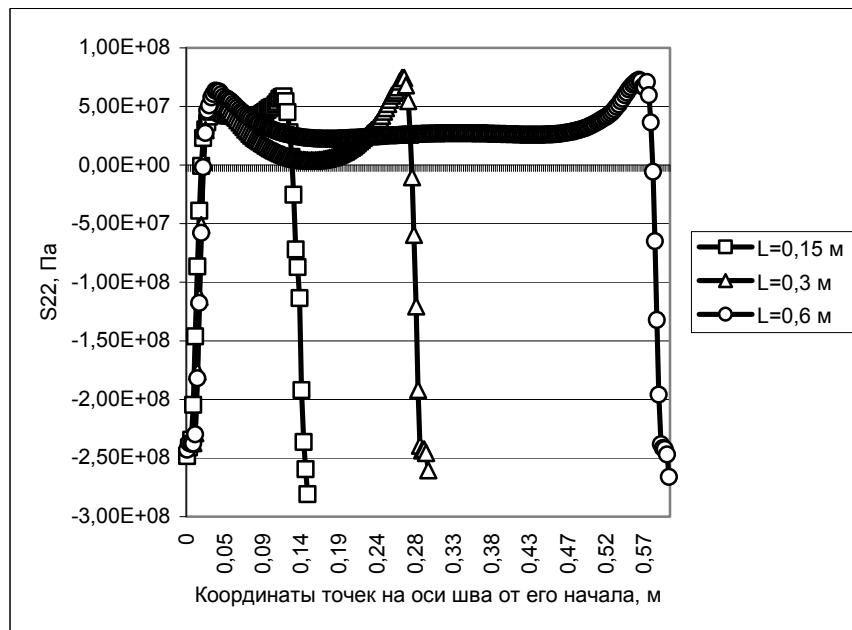


Рис. 6. Остаточные поперечные напряжения S22 в продольном сечении сварных соединений по оси шва

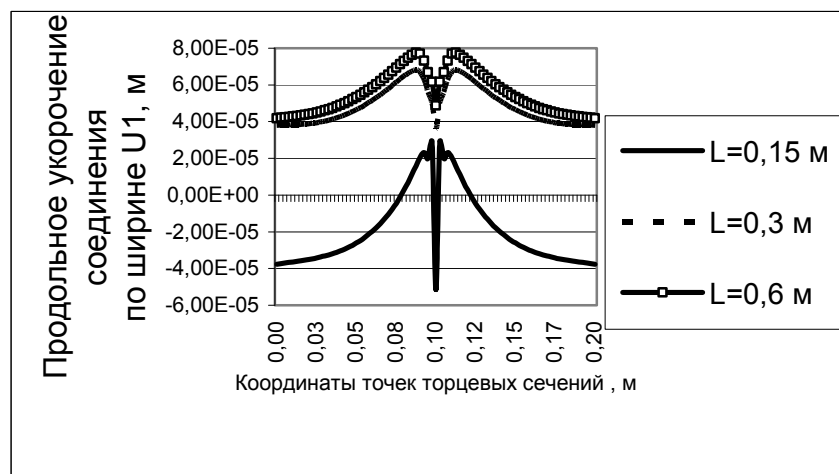


Рис. 7. Остаточные продольные укорочения U1 по ширине сварных соединений

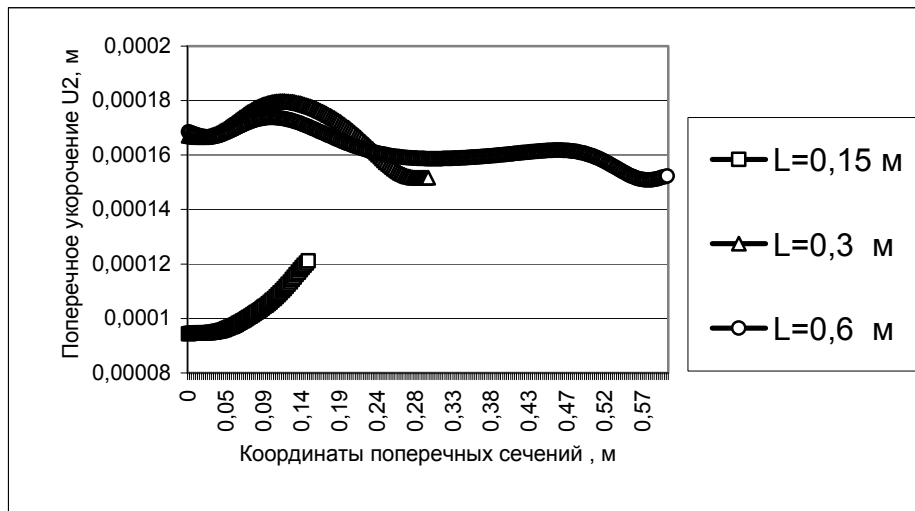


Рис. 8. Остаточные поперечные укорочения U2 по длине сварных соединений

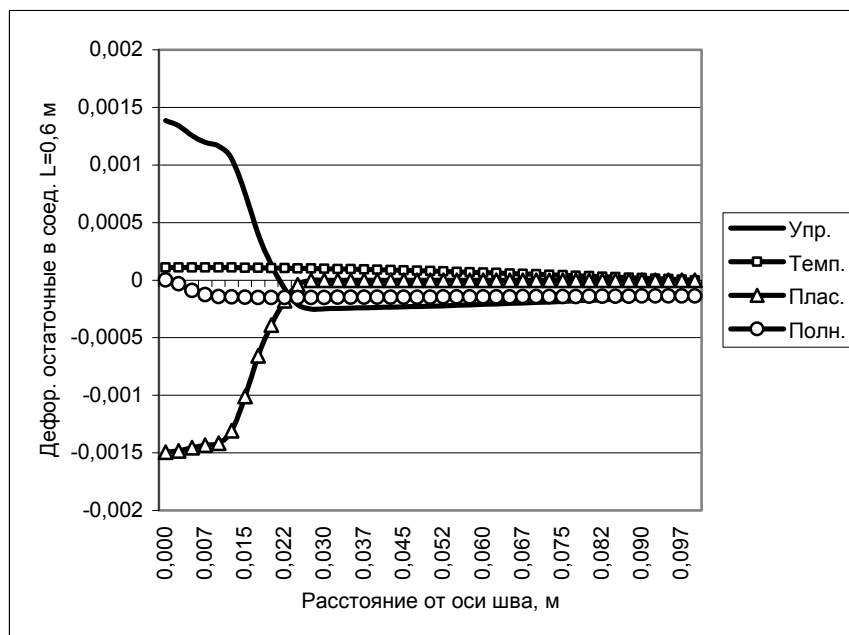


Рис. 9. Продольные упругие, температурные, пластические и полные деформации в среднем поперечном сечении сварного соединения длиной 0,6 м на момент охлаждения 1200 сек

Приведенные на рисунках результаты позволяют сделать следующие заключения:

- с увеличением длины сварного соединения распределение остаточных продольных пластических деформаций укорочения в средних по длине соединения поперечных сечениях достаточно быстро стабилизируется и при длине соединения 0,3 м и более остается неизменным для данного режима сварки (рис. 1);

- характер распределения остаточных продольных пластических деформаций укорочения по ширине соединения совпадает с результатами расчетов приближенными инженерными методами, хотя количественные значения как максимальных деформаций на оси шва, так и ширины зоны их распределения могут в небольших пределах отличаться, что объясняется принятием различных моделей пластичности для материала соединения и не учетом ряда других факторов;

- величина и распределение на оси шва в средней по длине части сварного соединения остаточных продольных пластических деформаций укорочения для данного режима сварки практически не зависит от длины сварного соединения (рис. 2);

- распределение остаточных продольных напряжений в среднем поперечном сечении также достаточно быстро стабилизируется с увеличением длины соединения

(рис. 3), начиная примерно с длины 0,3 м в средней части соединений эпюра этих напряжений подобна эпюре, получаемой приближенными инженерными расчетными методами;

- распределение остаточных продольных напряжений S11 вдоль оси шва (рис.4) подтверждает наличие в средней части соединения, за исключением концевых участков, зоны установившегося НДС, одинакового во всех поперечных сечениях этой части соединения. В приближенных инженерных методах распределение напряжений в

средних поперечных сечениях принимается таким же и для всех остальных поперечных сечений, включая и концевые участки;

- поперечная остаточная пластическая деформация укорочения PE22 в точках на оси шва (рис.5) имеет большую величину, нежели продольная (рис.1), распределена вдоль шва в средней его части относительно равномерно и не зависит от длины соединения для данного режима сварки. В приближенных инженерных методах априори она не рассматривается, поскольку принята гипотеза об одноосности НДС;

- поперечные растягивающие напряжения на оси шва S22 (рис. 6) в средней его части в зависимости от длины соединения изменяются от 0 до 50 МПа. В концевых участках соединений имеют место высокие поперечные напряжения сжатия. В приближенных инженерных методах принимается отсутствие поперечных напряжений в сварном соединении;

- продольные остаточные перемещения на всей длине соединений распределены по ширине соединений неравномерно (рис. 7) в отличие от расчетов по приближенным методам. Возможно это связано со значительной величиной и неравномерностью таких перемещений в пределах концевых участков соединений, в то время как в средней части соединений перемещения по ширине могут быть значительно более равномерными. Однако этот вопрос требует дальнейшего более подробного рассмотрения и анализа;

- поперечные остаточные перемещения на ширине соединений (рис.8) при их длине 0.3 м и более примерно одинаковые по величине на всей длине соединений и определяются интегрально поперечными деформациями в каждом поперечном сечении;

- наиболее часто встречаемые в литературе параметры остаточного НДС в рассматриваемом типе сварных соединений представляются для среднего поперечного сечения. Рассматривается распределение по сечению остаточных продольных упругих, пластических и полных деформаций. Здесь на рис. 9 такие деформации вместе с температурной деформацией показаны для среднего поперечного сечения соединения длиной 0.6 м. Видно, что по всей ширине соединения, за исключением весьма узкой (7...10 мм в обе стороны от оси шва) полоски, полная продольная деформация по ширине соединения распределена практически равномерно, что в общем совпадает и с расчетами по приближенным инженерным методам;

Выводы

1. Допущение приближенных инженерных методов расчета об одномерности в соединении напряженно-деформированного состояния можно считать достаточно обоснованным для средней части по длине сварного соединения при сварке относительно узких (длина больше ширины не менее, чем в два раза) сварных соединений.

2. Выполнимость гипотезы плоских сечений, принимаемой в приближенных методах, подтверждается для остаточного НДС в средней части по длине для относительно узких сварных соединений.

3. Допущение приближенных методов о равномерности продольного укорочения по ширине сварного соединения не выполняется. Возможно, это обусловлено особенностью продольного укорочения приконцевых областей соединения в связи с наличием краевого эффекта.

4. Допущение приближенных методов о симметричности остаточного НДС в сварном соединении можно принять для средней части по длине соединения.

Список литературы

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. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст]/В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Гатовский, К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст]: учеб.пособие / К.М. Гатовский, В.А. Кархин. – Л. : Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1980. – 331 с.
4. Трочун, И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке [Текст]/И.П. Трочун. – М. : Машгиз, 1964. – 180 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.