

УДК 621.721.052:539.4.014

Прохоренко В. М., Перепичай А. А., Прохоренко Д. В.

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

ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ НАГРЕВЕ ПРОДОЛЬНОЙ КРОМКИ ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) в длинной, узкой и тонкой стальной полосе из стали 08кп после нагрева вольфрамовой сварочной дугой в аргоне (TIG-процесс сварки) одной из ее продольных кромок и последующего охлаждения. Моделирование НДС при сварке с использованием метода конечных элементов (МКЭ) позволило получить более полную информацию об НДС, необходимую для уточнения представлений о правомерности допущений и механизме формирования НДС при сварке.

Ключевые слова: остаточное напряженно-деформированное состояние; стальная полоса; подвижной источник нагрева J. Goldak; прогиб; укорочение.

Введение

Задача о напряженно-деформированном состоянии (НДС) при нагреве продольной кромки длинной, узкой и тонкой полосы в теории сварочных

напряжений и деформаций имеет большое значение, по крайней мере, с трех точек зрения: научной, практической и учебно-познавательной.

Учебная дисциплина «Напряжения и деформации при сварке» изучается студентами технических

вузов по специальности «Прикладная механика» со специализацией в «Технологии и инжиниринга в сварке». Многолетний преподавательский опыт авторов показывает, что овладение студентами основными базовыми положениями и представлениями о возникновении и формировании при сварке напряженно-деформированного состояния происходит достаточно трудно и занимает много времени. Познание и усвоение основных понятий, процессов и механизмов упругопластического деформирования при сварочном нагреве строится на их рассмотрении сначала на простых сварных объектах (стыковых и тавровых соединениях, полосе с нагревом продольной кромки и др.) с постепенным переходом к более сложным конструкциям. С этой точки зрения результаты данной статьи имеют большое значение, поскольку они получены расчетным путем с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и представляют на сегодняшний день наиболее объективную, точную и полную информацию об НДС в полосе с нагреваемой продольной кромкой. С этими результатами можно сравнивать другие аналогичные результаты, полученные известными инженерными методами расчета для упрощенных моделей сварных соединений, проверять достоверность принимаемых допущений, гипотез и др.

С научной точки зрения, полученные в работе результаты, значительно расширяют существующие представления об НДС в рассматриваемой задаче о полосе с нагреваемой кромкой и позволяют сделать ряд новых научных выводов, представленных в конце работы.

Практическая сторона значимости полученных результатов связана с расширением в производственных условиях технологических возможностей изменения и оптимизации в нужную сторону остаточного НДС в полосе. В частности, как вариант, этого можно достичь, например, за счет обоснованного правильного выбора мест и способов постановки закреплений нагреваемой при сварке конструкции.

Возможно, в работе обозначены не все аспекты полезности изложенных результатов конечно-элементного моделирования остаточного НДС в данной задаче. Однако, и в этом случае можно надеяться, что новые знания в данной области появятся в недалеком будущем.

Задачи исследования

В данной работе рассматривались следующие задачи исследования:

- решение МКЭ связанной температурной упругопластической задачи об остаточном НДС при TIG-нагреве движущимся сварочным источником тепла по модели J. Goldak [1] продольной кромки полосы из стали 08пс размерами 600×60×4 мм;

- получение более достоверных и качественных данных относительно характера распределения в полосе с нагреваемой продольной кромкой различных параметров остаточного НДС в характерных продольных и поперечных сечениях полосы;

- подтверждение или опровержение правомерности допущения об одноосности остаточного НДС многими авторами инженерных методов [2-7] расчета остаточного НДС в одномерных сварных конструкциях;

- анализ закономерностей распределения остаточных перемещений, деформаций и напряжений в различных продольных и поперечных сечениях полосы с целью выявления возможных их особенностей;

- разработка методики, подготовка и проведение экспериментов, анализ их результатов;

- обсуждение и анализ в целом всех полученных расчетных и экспериментальных результатов и формулирование общих выводов.

Основная часть

Принятая для расчета и анализа НДС полосы правая прямоугольная система координат XYZ показана на рис. 1. Расположение поперечных сечений полосы по ее длине определяется значением координаты x на продольной оси координат X в пределах $0 \leq x \leq 600$ мм. Продольные сечения определяются значением координаты y оси координат Y в пределах $-30 \leq y \leq 30$ мм. Вблизи нагреваемой кромки полоса разбивалась на конечные кубические элементы с размером ребра 1 мм.

По мере удаления от нагреваемой кромки размер ребра конечных элементов увеличивали до 4 мм. Общее количество конечных элементов в полосе равно 49976. Материал полосы – сталь 08пс по ГОСТ 1050-88 с пределом прочности 280 МПа и ферритной структурой металла в исходном состоянии поставки.

Нагрев кромки полосы выполняли на специальной установке (рис. 2) с числовым программным управлением перемещением сварочной горелки.

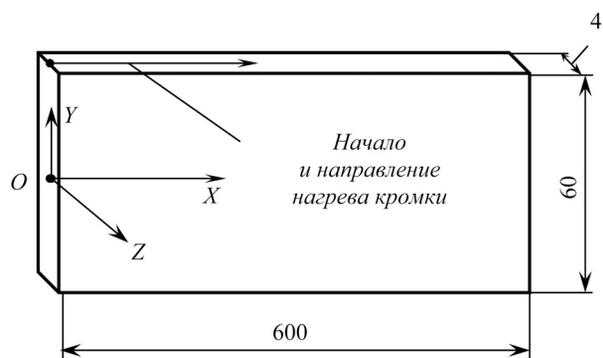


Рис. 1. Общий вид полосы с нагреваемой продольной кромкой

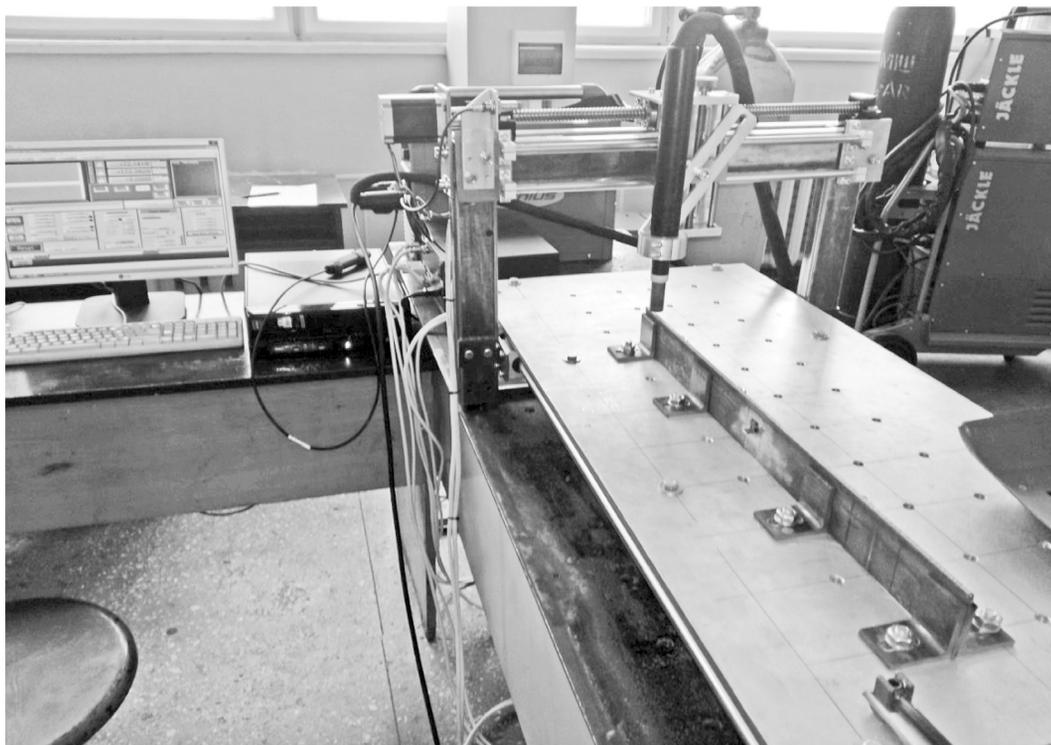


Рис. 2. Установка для автоматической сварки с числовым программным управлением

Установка разработана и изготовлена авторами на кафедре сварочного производства НТУУ «КПИ». Установка полностью размещается на двух стандартных лабораторных столах и позволяет осуществлять автоматическую сварку с использованием вольфрамового неплавящегося электрода в среде аргона (TIG – процесс) для любой траектории в плоскости свариваемых листов. Предусматривается дальнейшая модернизация установки для решения более сложных задач. На рабочем столе установки (рис. 2) показана установленная на ребро в зажимных приспособлениях исследуемая полоса для последующего нагрева верхней продольной кромки путем ее расплавления аргонодуговой горелкой, закрепленной на движущемся портале.

Установка укомплектована монитором и системным блоком для компьютерного управления траекторией движения сварочной горелки, источником питания Magic Wave 2200 для AC/DC аргонодуговой сварки и баллоном с защитным газом аргоном. Нагрев кромки полосы выполняется за один проход при таких параметрах режима сварки: скорость сварки – 4 мм/сек, сварочный ток – $I = 60$ А, напряжение на дуге – $U = 10$ В, – к.п.д. дуги $\eta = 0,8$. Данный режим нагрева для толщины полосы 4 мм обеспечивает оптимальную погонную энергию нагрева 120 Дж/мм, при которой торец кромки полностью расплавляется, но при этом расплавленный металл не стекает с кромки полосы.

Анализ по результатам расчетов общего характера остаточного НДС в изучаемой полосе можно

выполнить на примере распределения в ней изолиний (рис. 3) для какого-либо одного или нескольких выбранных параметров остаточного НДС. Под остаточным понимается такое НДС полосы, которое возникает в ней после сварки, полного охлаждения и освобождения полосы от всех ее закреплений перед сваркой.

Авторами инженерных методов расчета остаточного НДС в одномерных сварных конструкциях [2-7] априори всегда принималось основное допущение об одноосности остаточного НДС в таких конструкциях, в том числе это относится и к полосе с нагреваемой продольной кромкой. Поэтому главной задачей данной работы является подтверждение или опровержение правомерности указанного выше допущения авторов работ [2-7] на основании уточненных конечно-элементным моделированием расчетных результатов по остаточному НДС в полосе. Результаты расчетов сопоставлялись с результатами экспериментов, проведенными с полосой на указанной выше установке.

Как видно из рис. 3, по длине полосы можно выделить три области с характерным распределением в них остаточных продольных напряжений σ_x . В средней части полосы имеем однородную по длине полосы и одинаковую для любого поперечного сечения область протяженностью ~480 мм и две области со стороны двух торцов полосы протяженностью по ~60 мм каждая, в которых характер распределения продольных напряжений не является установившимся и некоторым образом изменяется от одного поперечного сечения к другому.

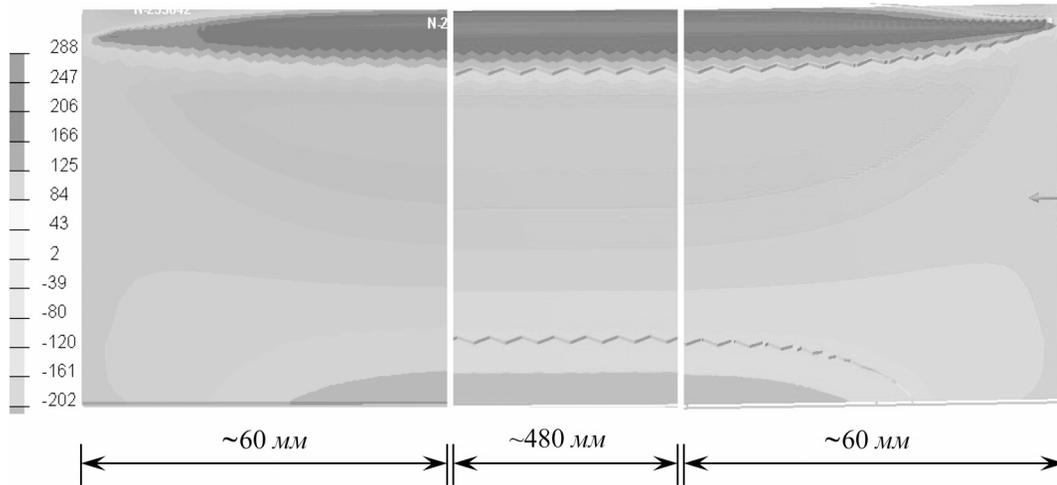


Рис. 3. Распределение в полосе с нагревавшейся верхней кромкой изолиний остаточных продольных напряжений

Длина средней части зависит от соотношения длины полосы к ее ширине и ориентировочно ее можно принимать равной длине полосы за вычетом удвоенной ее ширины. Поэтому в качестве подходящего для такого анализа параметра остаточного НДС нами были выбраны продольные остаточные напряжения в поперечных сечениях полосы.

Характер их распределения в различных по длине полосы поперечных сечениях можно проследить по картине изолиний на боковых сторонах полосы. Вид таких областей показан на рис. 3.

Со стороны одного из торцов (рис. 3, слева) расположена область начала нагрева верхней кромки, а со стороны другого торца (рис. 3, справа) – область окончания нагрева верхней кромки. В этих двух областях имеет место краевой эффект в распределении различных параметров НДС. Протяженность каждой из этих двух областей примерно равна ширине полосы.

Программой расчета НДС в подобных задачах при препроцессорной подготовке исходных данных

предусматривается закрепление специально выбранных узлов сетки конечно-элементной модели с учетом реальных возможных перемещений конструкции в процессе сварки. Закрепления конструкции не должны препятствовать ее температурным перемещениям вдоль осей координат при нагреве и охлаждении. В данной задаче полоса закреплена по торцам в трех узлах сетки, для которых назначена степень ограничения свободы перемещений полосы следующим образом. Для узла на осевой линии полосы на торце, к которому движется источник тепла при нагреве кромки, запрещены перемещения вдоль оси X . Остальные два узла выбраны на противоположном торце полосы, от которого начинается перемещение источника тепла при нагреве кромки. При этом один из узлов расположен на осевой линии полосы и запрещает ее перемещения по оси Y , а другой, соседний с ним, запрещает перемещения полосы по оси Z . При таком закреплении полосы перемещения U_x, U_y, U_z точек на осевой линии полосы соответственно вдоль осей координат X, Y, Z показаны на рис. 4.

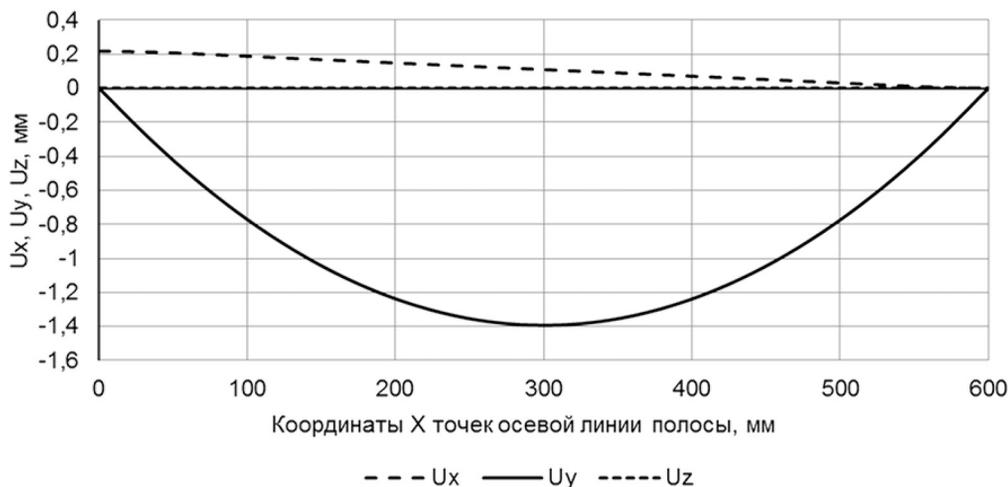


Рис. 4. Перемещения U_x, U_y, U_z точек осевой линии полосы вдоль осей координат

Из рисунка видно, что точка осевой линии на торце, от которого начинается нагрев продольной кромки, имеет наибольшее перемещение U_x (~0,2 мм), постепенно убывающее до нуля на противоположном торце полосы. Это перемещение положительное для принятой системы координат, поскольку точка передвинулась в сторону положительного направления оси координат X , хотя реально оно определяет величину остаточного продольного укорочения полосы по осевой линии. Кривая перемещения точек осевой линии по оси Y (прогиб полосы) имеет хорошо знакомый из сопротивления материалов вид при действии на балку двух моментов на опорах. Максимальное значение прогиба составляет 1,39 мм. Если подобные кривые прогибов построить для других линий, параллельных осевой, включая и расположенные на продольных кромках, то все они с несущественными отклонениями совпадут с кривой прогибов на рис. 4,

поскольку ширина полосы (60 мм) незначительная и изменение координаты осевой линии по оси Y практически не влияет на положение кривой прогибов. Перемещения U_z (по толщине) равны нулю для всех точек осевой линии полосы — осевая линия из плоскости полосы не выходит.

Положение узлов закрепления сетки полосы влияет на расположение кривых для перемещений. Например, на рис. 5 показано расположение кривых для перемещений U_x точек в продольных сечениях с координатами $y = 30, 26, 0, -12, -30$ мм если узлы закрепления выбраны так, что узел с запрещением перемещений по оси X расположен на переднем торце, а два остальных узла на заднем.

Продольные перемещения U_x различных по длине полосы поперечных сечений, попарно симметричных относительно среднего поперечного сечения с координатой $x = 300$ мм показаны на рис. 6.

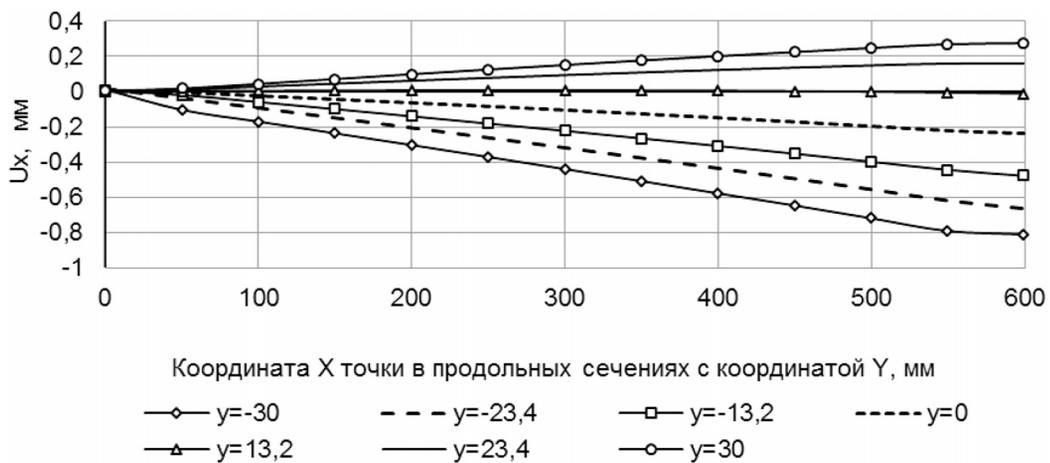


Рис. 5. Перемещения U_x точек продольных сечений полосы с различной координатой Y сечения

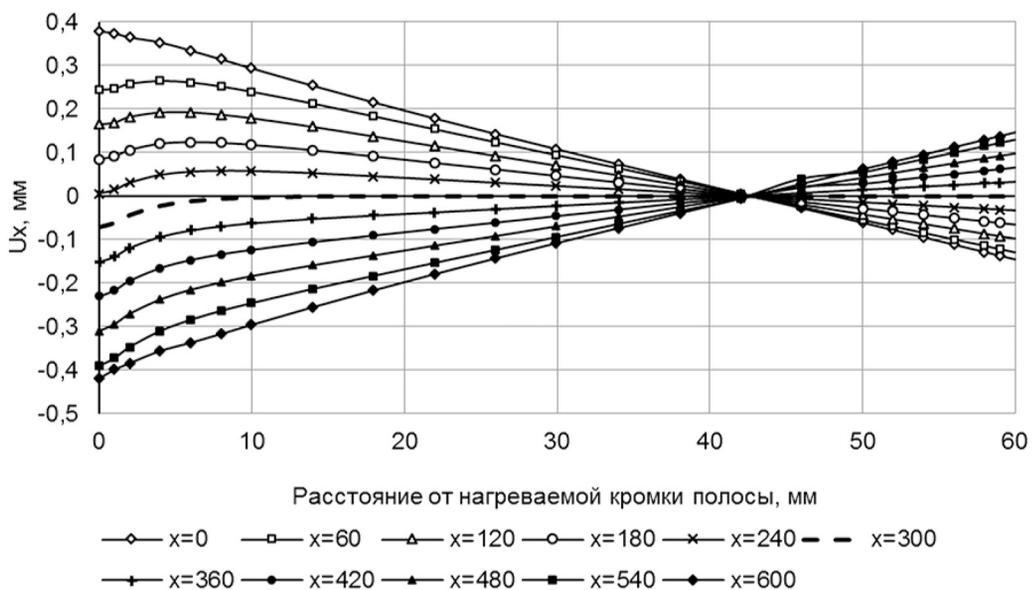


Рис. 6. Перемещения U_x попарно симметричных поперечных сечений, относительно сечения $X = 300$ мм

Видим, что на расстоянии от нагреваемой кромки ~10 мм и далее по ширине полосы перемещения U_x определяются линейными зависимостями. Точки на представленных прямых линиях выше нуля перемещаются по направлению движения источника нагрева, а ниже нуля — против движения источника нагрева. В результате таких продольных перемещений полоса в остаточном состоянии прогибается выпуклостью в сторону не нагревавшейся продольной кромки. Начало кривых на рис. 6 соответствует высоко нагреваемой области полосы вблизи нагреваемой кромки. В этой зоне все кривые продольных перемещений U_x для точек в пределах от 0 до ~10 мм от нагреваемой кромки в различных поперечных сечениях по ширине полосы загибаются вниз, что соответствует зоне интенсивного продольного пластического сдвигообразования. Вне зоны сдвиговых пластических деформаций (более 10 мм от нагреваемой кромки) перемещения U_x , как видно из рис. 6, описываются линейными зависимостями. Все линии пересекаются в одной точке $-y = -13$ мм. При нагреве металла во время движения источника нагрева, в высоконагретой зоне имеет место пластическое перемещение (выдавливание, перенос) высоко разогретого металла в сторону, противоположную движению источника нагрева. Это происходит за счет интенсивного пластического сдвигообразования в плоскости кромки полосы YX . Проекция на плоскость XU элементарных объемов металла полосы в виде

кубиков до сдвиговой пластической деформации будут в виде квадратов, а после такой пластической деформации они превратятся в ромбы. Первоначально, до сдвигообразования, прямые левый верхний и правый нижний углы квадратов на плоскости XU после сдвигообразования превратятся в острые, а квадраты — в ромбы. Именно это явление наблюдается на рис. 6 в виде загибания кривых перемещений U_x вниз на некоторую величину U_x , обусловленную пластическим сдвигообразованием в высокотемпературной области полосы. Из рис. 6 видно, что смещение U_x является практически одинаковым только для поперечных сечений в средней части полосы. Поскольку среднее поперечное сечение $x = 300$ мм полосы не перемещается вдоль оси X (закреплен от перемещения по оси X центральный узел среднего поперечного сечения $U_x = \Delta U_x$ (штриховая кривая на рис. 6) и, таким образом, это позволяет теперь получить приближенные (без учета сдвиговых пластических деформаций γ_{xy}) откорректированные продольные (близкие в высоконагретой зоне к линейным), перемещения для других поперечных сечений полосы путем вычитания ΔU_x из зависимостей U_x для всех рассмотренных поперечных сечений средней части полосы. Полученные откорректированные зависимости для перемещений U_x поперечных сечений полосы показаны на рис. 7. Такая линейаризация зависимостей для U_x в данной классической задаче теории сварочных напряжений и деформа-

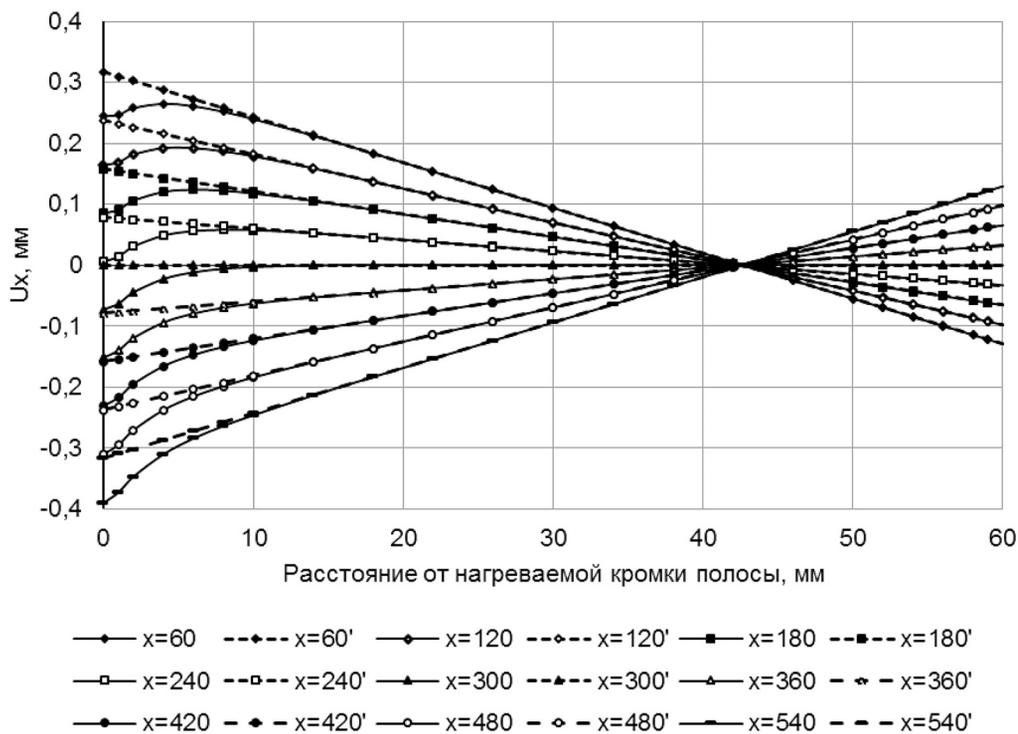


Рис. 7. Перемещения U_x попарно симметричных сечений, относительно сечения $X = 300$ мм:

- с учетом пластического сдвига от γ_{xy} (кривые без штриха);
- без учета пластического сдвига от γ_{xy} (кривые со штрихом)

ций о нагреве края полосы или при сварке продольных швов других реальных одномерных сварных конструкций (балок, стоек и др.) позволяет научно подкрепить обоснованность априорно принимаемого в инженерных методах расчета допущения об одноосности остаточного напряженного состояния в одномерных сварных конструкциях.

Далее рассмотрим распределение относительных линейных и сдвиговых пластических деформаций в среднем поперечном сечении полосы (рис. 8). Из рис. 8 видно, что на границе зоны плавления металла (координата ~2 мм от нагреваемой кромки) наибольшими по величине являются сдвиговая пластическая деформация γ_{xy} и относительная линейная пласти-

ческая деформация ϵ_{yz} по толщине полосы. Продольная линейная пластическая деформация ϵ_{rx} имеет положительный максимум на кромке с последующим переходом в область отрицательных значений (укорочение металла) и достижением отрицательного максимума приблизительно на границе зоны плавления металла. Остальные компоненты тензора пластических деформаций за границей зоны плавления быстро уменьшаются.

Полные остаточные линейные и сдвиговые деформации в среднем поперечном сечении полосы представлены на рис. 9.

Анализ кривых распределения остаточных напряжений, показанных на рис. 10, позволяет сде-

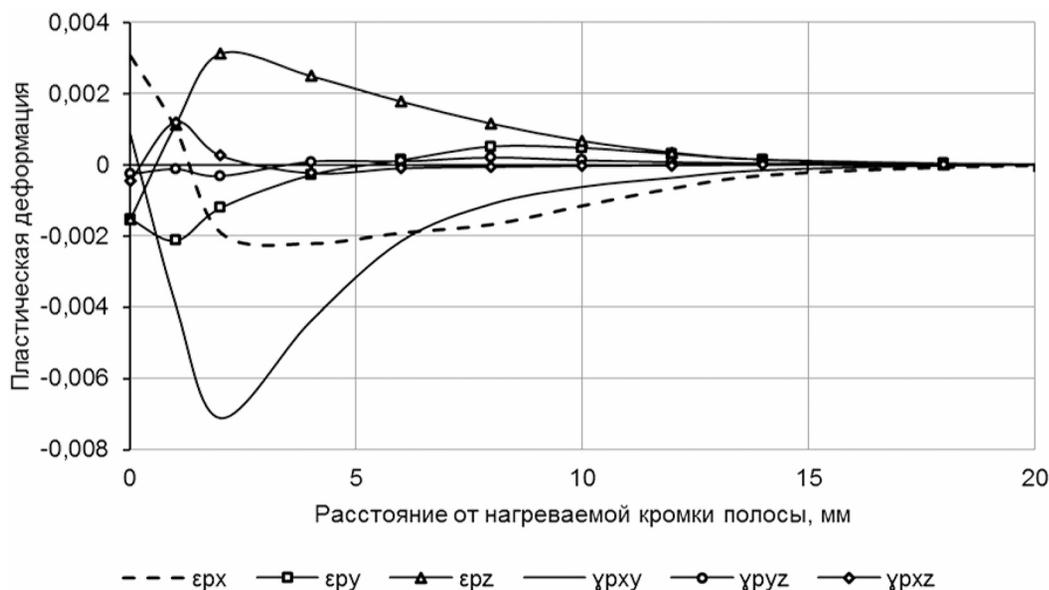


Рис. 8. Остаточные линейные ϵ_{rx} , ϵ_{ry} , ϵ_{rz} и сдвиговые γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz} пластические деформации в среднем поперечном сечении полосы

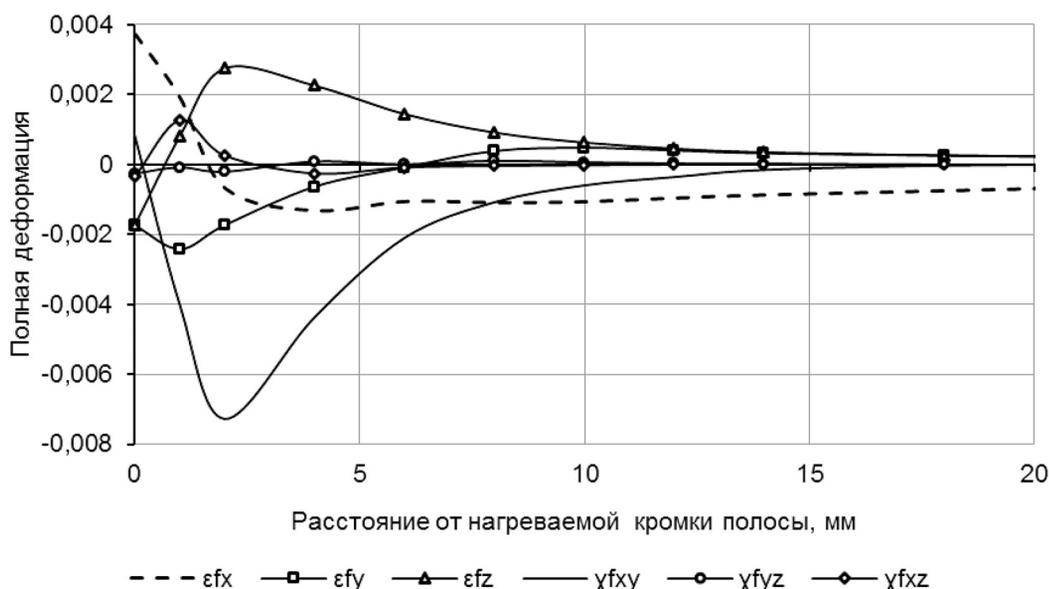


Рис. 9. Остаточные линейные ϵ_{fx} , ϵ_{fy} , ϵ_{fz} и сдвиговые γ_{fxy} , γ_{fyz} , γ_{fxz} полные деформации в среднем поперечном сечении полосы

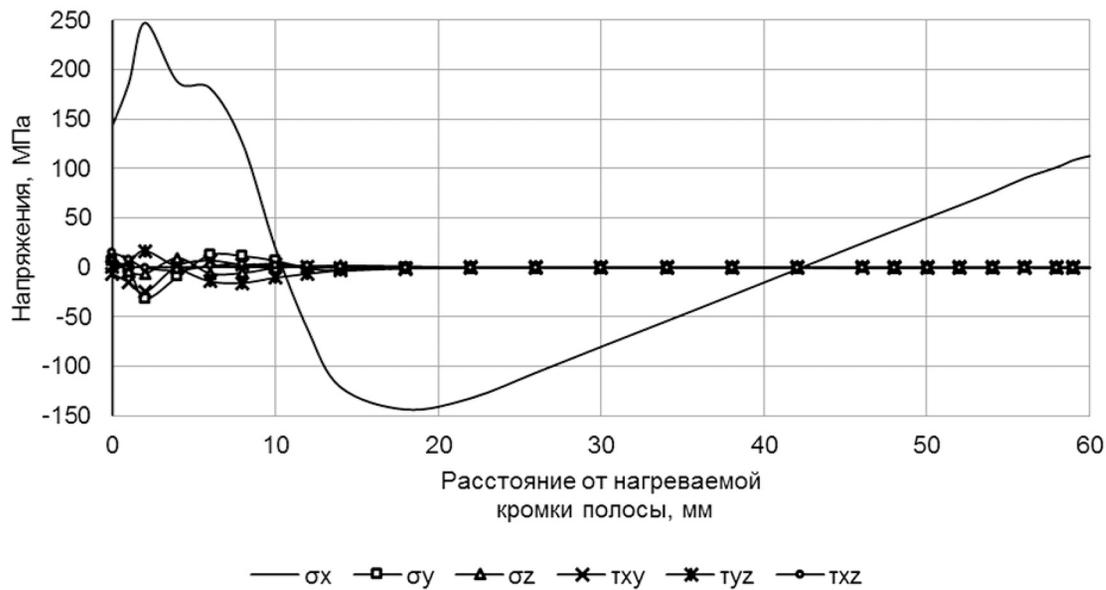


Рис. 10. Остаточные нормальные σ_x , σ_y , σ_z и касательные τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} напряжения в среднем поперечном сечении полосы

лать вывод об одномерности остаточного НДС полосы с нагретой кромкой, поскольку только продольные нормальные напряжения σ_x достигают максимума на растяжение в пластической зоне ~250 МПа, что не превышает предела прочности исходного материала. Остальные значения различных составляющих тензора напряжений по ширине поперечного сечения полосы не превышают по абсолютной величине ~25 МПа.

Характер распределения в поперечном сечении полосы остаточных продольных напряжений обусловлен образовавшимся в остаточном состоянии вблизи кромки полосы смешанным фазовым составом металла: ~8% феррита, ~10% мартенсита, ~82% бейнита.

Таким образом, непосредственно на самой поверхности нагревавшейся кромки, где металл расплавлялся, и вблизи нее в металле полосы за счет «мягкой» ферритной структуры величина растягивающих напряжений составляет ~150 МПа. Перемещаясь от края кромки полосы далее вглубь металла примерно до ~2 мм наблюдаем увеличение продольных напряжений до ~250 МПа (максимум) в связи с образованием в структуре металла мартенситной фазы с высокими значениями механических свойств. При дальнейшем удалении от нагреваемой кромки полосы в пределах ~2...4 мм наблюдается снижение продольных напряжений до уровня ~187 МПа за счет образования бейнитной структуры металла с более низкими показателями механических свойств.

Вблизи нагреваемой кромки в полосе на ширине порядка 20 мм формируется зона остаточных пластических деформаций и возникает в остаточном состоянии так называемый относительный объем продольного пластического укорочения, порож-

дающий в полосе продольную усадочную силу. Поскольку линия действия продольной усадочной силы (усадки разогретого пластически деформированного металла) не совпадает с продольной осью полосы, а смещена в зону пластических деформаций возле нагревавшейся кромки, то усадочная сила создает в полосе соответствующий изгибающий момент. Таким образом, в остаточном состоянии в полосе действуют два силовых фактора — усадочная сила и изгибающий момент этой силы, которые приводят к продольному укорочению полосы на 0,22 мм и максимальному прогибу продольной оси полосы 1,39 мм на длине 600 мм.

Выводы

1. Конечно-элементным методом получено решение и выполнен анализ результатов для связанной температурной упруго-пластической задачи при нагреве продольной кромки полосы размерами $600 \times 60 \times 4$ мм из стали 08пс.

2. Установлено, что в остаточном состоянии полоса укорачивается на 0,22 мм и прогибается по осевой линии на 1,39 мм выпуклостью в сторону не нагревавшейся продольной кромки.

3. Показано, что в остаточном состоянии распределение полной продольной деформации ϵ/x в поперечных сечениях средней части полосы вблизи нагревавшейся кромки не соответствует гипотезе плоских сечений по причине значительных пластических сдвиговых деформаций γ_{xy} в плоскости YX .

4. Остаточное напряженное состояние в полосе можно считать одноосным, поскольку все составляющие тензора напряжений, за исключением продольной, незначительны по величине и не превышают по абсолютному значению 25 МПа.

Литература

- [1] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. — USA: — Springer, 2005. — 325.
- [2] Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст]/В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. — М. Машиностроение, 1984. — 280 с.
- [3] Трочун, И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. — М. : Машгиз, 1964. — 180 с.
- [4] Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Изд. «Судостроение», 1974. — 286 с.
- [5] Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. — 331 с.
- [6] 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. — Библиогр.: с. 215 —224.
- [7] Прохоренко В.М., Прохоренко О.В. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб./ . — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 268 с. — Бібліогр.: с.267. — 400 пр. ISBN 978-966-622-331-2.

Prokhorenko V. M., Perepichay A. A., Prokhorenko D. V.

National Technical University of Ukraine «Kyiv polytechnic institute». Ukraine, Kyiv

**RESIDUAL STRESS-STRAIN STATE STEEL STRIP
AT A HEATING LONGITUDINAL EDGE MOVING HEAT SOURCE**

The results of finite-element modeling of residual stress-strain state (SSS) in a long, narrow and thin steel strip of steel 08nc after heating and cooling one of its longitudinal edges tungsten arc welding in argon (the TIG-welding process). Modeling SSS when welding using the finite element method (FEM) allowed us to obtain more information about SSS, necessary to clarify the concepts of the legitimacy of the assumptions and the mechanism of formation of the SSS when welding.

Keywords: residual stress-strain state; the steel strip; the moving heat source J. Goldak; bending; shortening.

References

- [1] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. — USA: — Springer, 2005. — 325.
- [2] Vinokurov, V. A. Teoriya svarochnyx deformatsiy i napryazhenij [Tekst]/V.A. Vinokurov, A.G. Grigoryanc. — M. Mashinostroenie, 1984. — 280 p.
- [3] Trochun, I. P. Vnutrennie usiliya i deformatsii pri svarke.— M. : Mashgiz, 1964. — 180 p.
- [4] Kuzminov S.A. Svarochnye deformatsii sudovyx korpusnykh konstrukcij. — L.: Izd. «Sudo-stroenie», 1974. — 286 p.
- [5] Gatovskij K.M., Karxin V.A. Teoriya svarochnyx deformatsiy i napryazhenij. Ucheb. pos. Le-ningr. korablestr. in-t, 1980. — 331 p.
- [6] Prokhorenko, O. V. Rozrobka ta zastosuvannya metodu skladnykh pereriziv dlya rozrakhunku zalyshkovykh deformatsiy vid zvaryuvannya pozdovzhnikh shviv odnomirnykh konstruktsiy [Tekst] : dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.06 : zakhyshchena 23.04.07 : zatv. 20.09.07 / Prokhorenko Odarka Volodymyrivna. — K., 2007. — 249 s. — Byblyohr.: s. 215 —224.
- [7] Prokhorenko V.M., Prokhorenko O.V. Napruzhennya ta deformatsiyi u zvarnykh z'yednannyakh i konstruktsiyakh [Tekst]: navch. posib./ . — K.: NTUU «KPI», 2009. — 268 p. — Bibliohr.: s.267. — 400 pr. ISBN 978-966-622-331-2.