

**ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ПОСЛЕ ТЕПЛОВОЙ ПРАВКИ ПРОГИБА ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ**

В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) в полосе размерами 600x60x4 мм из стали 08nc после тепловой правки прогиба её оси, обусловленного нагревом одной из её продольных кромок движущейся вольфрамовой сварочной дугой в аргоне (TIG-процесс сварки). Тепловая правка осуществлялась двумя последовательными нагревами второй кромки полосы по той же технологии, что и нагрев первой кромки. Оба нагрева второй кромки с целью тепловой правки прогиба проводились после формирования в ней остаточного НДС от предшествующей технологической операции. Анализ расчетного остаточного НДС в полосе осуществлялся по истечении 20 минут от начала предшествующего нагрева полосы. Режим нагрева обеих кромок полосы одинаковый с погонной энергией нагрева 120 Дж/мм. После нагрева первой кромки прогиб оси полосы в среднем поперечном сечении составляет 1,393 мм, продольное укорочение по осевой линии ~ 0,216 мм. После первого нагрева второй кромки с целью правки указанного выше прогиба его величина в остаточном состоянии уменьшилась до 0,761 мм (на 45,37%), укорочение увеличилось до 0,300 мм (на 38,89%). После второго нагрева второй кромки с целью дальнейшего уменьшения прогиба его величина стала равной 0,219 мм (общее уменьшение на 84,28%), укорочение полосы по оси увеличилось до 0,357 мм (увеличение от минимального на 65,28%).

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

Введение

Конечно-элементный расчет остаточного НДС после нагрева продольной кромки полосы выполнен авторами и представлен в работе [1]. Показано, что в средней части полосы на длине ~ 500 мм (~ 85% от общей длины полосы) формируется остаточное напряженное состояние, близкое к одноосному, поскольку значения нормальных продольных напряжений существенно больше других компонентов тензора напряжений. Поперечные напряжения, а также напряжения по толщине полосы незначительные. Продольные напряжения растяжения с максимальным значением до 250 МПа действуют на расстоянии от кромки нагрева ~ 2 мм. Зона растягивающих напряжений шириной ~ 10 мм располагается вдоль нагревавшейся кромки по всей длине полосы. За пределами этой зоны в центральной части по ширине полосы продольные напряжения являются сжимающими с максимумом ~ 144 МПа в точке, удаленной от нагреваемой кромки на ~ 20 мм. Далее по ширине полосы, по мере приближения к другой (не нагревавшейся)

продольной кромке, продольные напряжения сжатия уменьшаются по линейному закону, постепенно переходя в растягивающие, которые на не нагреваемой кромке достигают ~ 113 МПа. Такой характер продольных напряжений в этой мало нагреваемой части полосы по ее ширине свидетельствует о наличии в составе продольных напряжений сжимающей и изгибающей составляющих, порождаемых сформированной в полосе в остаточном состоянии условной продольной сжимающей усадочной силой и вызванным ею изгибающим моментом [2]. Величина изгибающего момента от усадочной силы для одномерных сварных конструкций определяется произведением данной силы на плечо, равное расстоянию между центром тяжести поперечного сечения полосы и точкой приложения усадочной силы в этом поперечном сечении [3–6]. Расчетное значение максимального остаточного прогиба оси полосы в среднем поперечном сечении после нагрева продольной кромки на принятом режиме составляет 1,393 мм, продольное укорочение полосы по осевой линии – 0,216 мм. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными.

Задачи исследования

В данной работе ставились следующие задачи исследования:

- решение МКЭ связанной температурной упругопластической задачи об остаточном НДС при TIG-нагреве движущимся сварочным источником тепла по модели J. Goldak [7] продольной кромки полосы из стали 08пс размерами 600×60×4 мм с последующей тепловой правкой прогиба полосы путем одно- и двукратного нагрева другой продольной кромки по той же технологии;
- получение новых расчетных данных относительно характера распределения параметров остаточного НДС в полосе с нагревавшимися продольными кромками;
- анализ эффективности тепловой правки по уменьшению величины остаточного прогиба полосы;
- подтверждение или опровержение правомерности допущения об одноосности остаточного НДС в полосе после тепловой правки прогиба по принятой в работе технологии;
- обсуждение и анализ в целом всех полученных расчетных результатов и формулирование общих выводов.

Основная часть

Полоса с нагреваемыми в той или иной последовательности продольными кромками в принятой для расчетов системе координат XYZ показана на рис. 1. Верхняя кромка нагревается при выполнении основной технологической операции, определяющей целевое назначение полосы или способ ее изготовления. Нижняя кромка нагревается с целью

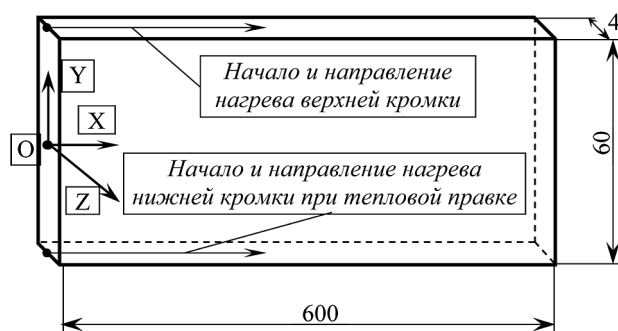


Рис. 1. Общий вид полосы с нагреваемыми верхней и нижней продольными кромками

выполнения вспомогательной технологической операции – тепловой правки прогиба полосы, возникающего отпредшествующего нагрева верхней продольной кромки. Расположение поперечных сечений по длине полосы определяется координатой x на продольной оси координат X в пределах $0 \leq x \leq 600$ мм. Продольные сечения определяются координатой y оси координат Y в пределах $-30 \leq y \leq 30$ мм.

Конечно-элементная сетка геометрической модели полосы формировалась таким образом, чтобы вблизи нагреваемых кромок полосы конечные кубические элементы имели размер ребра 1 мм. По мере удаления от нагреваемой кромки размер ребра конечных элементов увеличивали до 4 мм. Общее количество конечных элементов в полосе составило 49976. Материал полосы – сталь 08пс по ГОСТ 1050-88 с пределом прочности 280 МПа и ферритной структурой металла в состоянии поставки. Нагрев кромок полосы выполняли на специальной установке (рис. 2) с числовым прог-

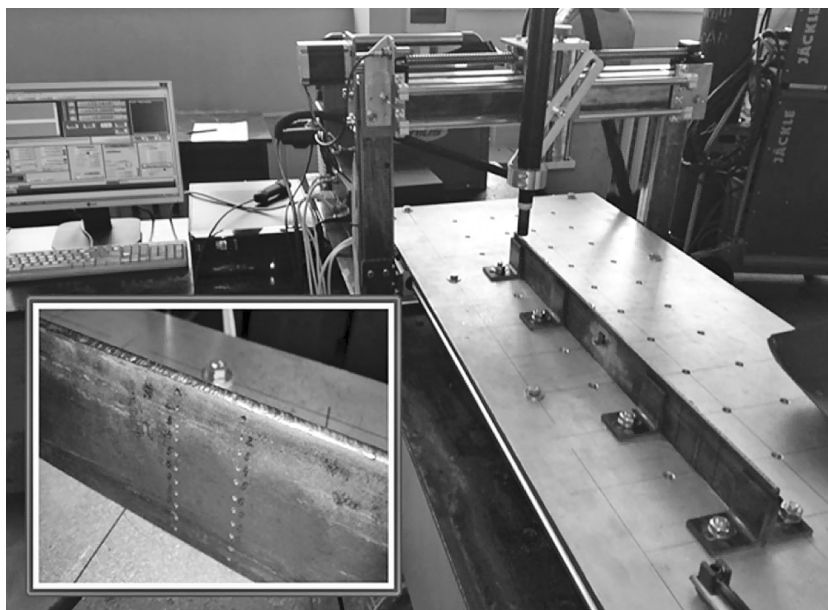


Рис. 2. Полоса с нагреваемой кромкой в установке для автоматической сварки с числовым программным управлением

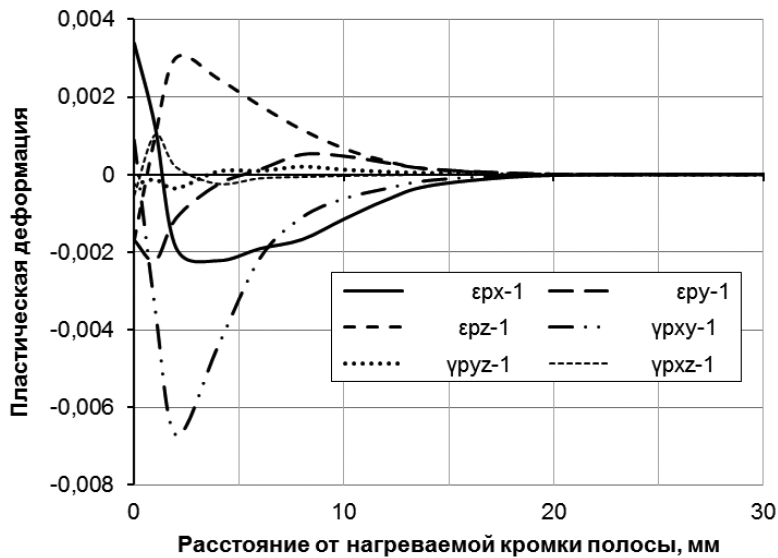


Рис. 3. Остаточные осевые линейные ϵ_{px-1} , ϵ_{py-1} , ϵ_{pz-1} и сдвиговые γ_{pxy-1} , γ_{pyz-1} , γ_{pxz-1} пластические деформации в среднем поперечном сечении полосы $x = 300$ мм

рамным управлением перемещением сварочной горелки [1].

На рабочем столе установки (рис. 2) показана установленная на ребро в зажимных приспособлениях исследуемая полоса для последующего нагрева верхней или нижней продольных кромок в соответствии с разработанным технологическим процессом.

Нагрев кромок полосы выполняется последовательно, за один проход на режиме: скорость движения источника нагрева – 4 мм/сек, погонная энергия нагрева – 120 Дж/мм. При этом сварочный ток – $I = 60$ А, напряжение на дуге – $U = 10$ В, – к.п.д. дуги $\eta = 0,8$. Для толщины полосы 4 мм данный режим нагрева обеспечивает полное расплавление кромки полосы без стекания с нее расплавленного металла.

Анализ по результатам расчета общего характера остаточного НДС в полосе можно выполнять на примере распределения в ней изолиний для какого-либо выбранного параметра НДС [1]. Остаточное НДС в полосе возникает после какого-либо этапа нагрева одной или двух продольных кромок с последующим полным охлаждением освобождением полосы от всех ее закреплений, технологически необходимых во время нагрева. Исследования показали, что со стороны торцов в полосе возникают две области протяженностью вдоль полосы по ~ 60 мм каждая, в которых характер распределения того или иного параметра остаточного НДС не является установившимся. Распределение параметра по поперечному сечению полосы изменяется от одного сечения к другому. Длина средней части полосы, где напряженное состояние можно считать практически одноосным, зависит от отношения длины полосы к ее ширине. Длину средней части

полосы следует принимать равной длине полосы за вычетом удвоенной ее ширины. Остаточное НДС в полосе после нагрева и охлаждения верхней продольной кромки по приведенному выше режиму представлено в работе [1].

В данной работе, как и в предыдущей [1], принимали, что полоса полностью охлаждается через 20 минут с момента начала нагрева ее верхней или нижней кромки.

Вблизи нагреваемых кромок полосы формируется зона остаточных пластических деформаций шириной ~ 20 мм. Распределение в среднем поперечном сечении ($x = 300$ мм) полосы с нагревавшейся одной продольной кромкой линейных осевых ϵ_{px-1} , ϵ_{py-1} , ϵ_{pz-1} и сдвиговых γ_{pxy-1} , γ_{pyz-1} , γ_{pxz-1} пластических деформаций (соответственно продольных, поперечных и в направлении толщины металла полосы) показано на рис. 3. В этих обозначениях цифрой 1 отмечено, что рассматривается остаточное состояние после нагрева первой кромки полосы.

Как видно из рис. 3, по направлениям X, Y, Z остаточные пластические деформации в зоне их распределения двузначны, особенно для точек поперечного сечения вблизи нагревавшейся кромки полосы.

Остаточные значения перемещений любой точки полосы формируются на стадии охлаждения под влиянием преимущественно продольной пластической деформации в зоне ее распределения. Другие компоненты тензора пластических деформаций, в частности сдвиговая пластическая деформация $\gamma_{pxy} = \gamma_{pyx}$, также влияют на общий характер НДС, но это влияние не является существенным. При этом в сварной конструкции (сварном изделии, узле, соединении) возникает изменяю-

пчаяся по мере охлаждения внутренняя самоуравновешенная система напряжений, постепенно переходящая в остаточное состояние.

Таким образом, решение задач об НДС при сварке по МКЭ следует рассматривать как точное, в отличие от решений с помощью инженерных методов [8–12], не принимая во внимание накапливаемые в процессе расчета погрешности от реализации самих вычислительных алгоритмов численных методов решения систем уравнений. Важным преимуществом МКЭ является то, что на каждом инкременте вычислений методом последовательных приближений решается сложная система уравнений с новыми текущими и изменяющимися по ходу сварки параметрами НДСв конструкции.

Далее рассмотрим вопрос о тепловой правке уже имеющихся в сварной конструкции перемещений, обусловленных предварительной сваркой сварных швов. Идея тепловой правки не допустимых перемещений от ранее заваренных швов состоит в нагреве по разработанной технологии определенных мест конструкции с тем, чтобы в ней за счет такого нагрева произошли направленные в нужную сторону процессы упругопластического деформирования, которые бы скомпенсировали нежелательные перемещения от сварки и уменьшили их до требуемых показателей точности изготовления конструкции [2].

В нашем случае с полосой по тем или иным причинам подвергалась нагреву на заданном режиме одна из продольных кромок. В результате этого в остаточном состоянии образовался нежелательный прогиб полосы в плоскости выпуклостью в сторону не нагревавшейся кромки величиной $f_{max} = 1,393$ мм. Для частичного уменьшения или полного устранения прогиба необходимо путем нагрева второй продольной кромки полосы на некотором технологически обоснованном режиме создать в полосе новое остаточное НДС, которое

скомпенсировало бы остаточный прогиб от нагрева первой кромки. Исследованию этого вопроса посвящена дальнейшая часть этой работы.

Предварительно представляется, что для решения этой задачи необходимо осуществить нагрев второй кромки полосы на режиме, одинаковым с режимом нагрева первой кромки. Окажется ли этого достаточно, заранее сказать сложно, поскольку детально и всесторонне в научном плане эта научно-техническая задача до настоящего времени не изучалась.

Итак, решаем МКЭ задачу об остаточном НДС в полосе для следующего процесса. Одна из продольных кромок полосы нагревается движущимся источником нагрева, как это описано в работе [1]. Время нагрева кромки – 150 секунд, далее до 1200 секунды полоса охлаждается. На 1200 секунде начинается нагрев в течение 150 секунд по такой же технологии и в том же направлении другой продольной кромки полосы с целью тепловой правки остаточного прогиба от нагрева первой кромки. Последующее охлаждение полосы – до 2400 секунды. После этого прогиб полосы изменяется соответственно установившемуся суммарному (от нагрева двух продольных кромок) остаточному НДС. Результаты решения этой задачи представлены ниже.

Рассмотрим вопрос о распределении в средней части по длине полосы остаточных осевых линейных и сдвиговых пластических деформаций ϵ_{px-2} , ϵ_{py-2} , ϵ_{pz-2} , γ_{pxy-2} , γ_{pyz-2} , γ_{pxz-2} для среднего поперечного сечения $x = 300$ мм. Цифрой 2 в этих обозначениях отмечено, что деформации рассматриваются для остаточного состояния после двух нагревов полосы. Распределение этих деформаций по поперечному сечению показано на рис. 4. Слева на рисунке кромка нагревалась первой по основной технологии изготовления полосы как конструктивного элемента сварного изделия. Справа вторая кромка нагревалась после нагрева и охлаждения первой кромки в порядке реализации технологи-

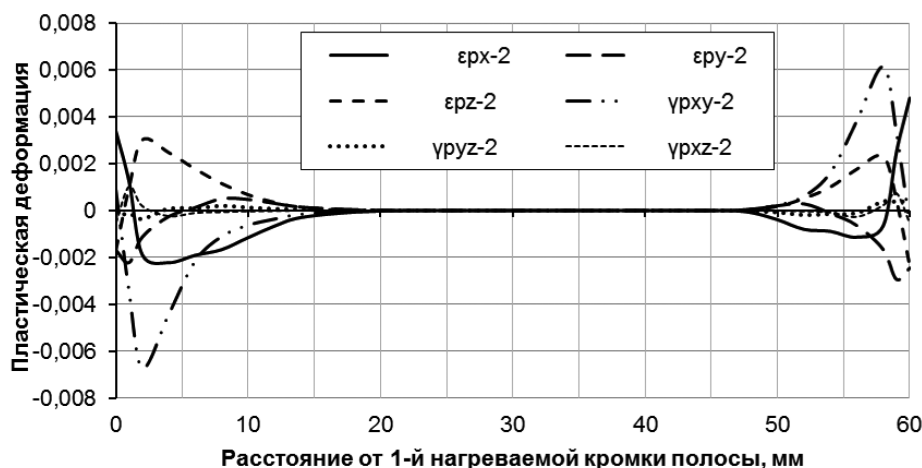


Рис. 4. Остаточные осевые линейные ϵ_{px-2} , ϵ_{py-2} , ϵ_{pz-2} и сдвиговые γ_{pxy-2} , γ_{pyz-2} , γ_{pxz-2} пластические деформации в среднем поперечном сечении полосы $x = 300$ мм

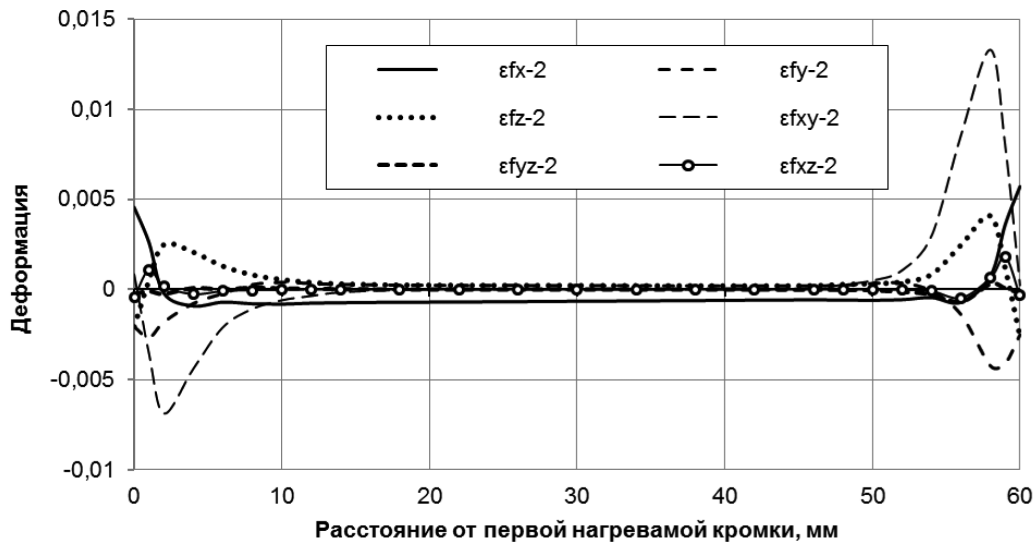


Рис. 5. Остаточные полные линейные осевые и сдвиговые деформации после нагрева двух кромок полосы (2400 секунда) в среднем поперечном сечении $x = 300$ мм

ческого процесса тепловой правки остаточного прогиба полосы.

Сравнивая графики деформаций на рис. 3 с аналогичными графиками возле нагревавшейся первой кромки на рис. 4, видим, что в остаточном состоянии после нагрева второй кромки эти графики практически не изменились. Зато графики этих же деформаций возле второй кромки полосы изменились существенно. Образовавшиеся после нагрева второй кромки линейные продольные пластические деформации ϵ_{rx-2} оказались меньшими по величине в два и более раза по сравнению с такими же деформациями возле первой кромки. В зоне пластического удлинения для узла сетки кромке полосы эти деформации увеличились со значения на первой кромке $+0,00339023$ до значения на второй кромке $+0,00479883$, т.е. \sim в 1,42 раза. Возросли \sim в 1,5 раза максимальные пластические поперечные деформации укорочения ϵ_{ry-2} . Уменьшились \sim в 1,5 раза максимальные пластические деформации укорочения ϵ_{pz-2} в направлении оси Z (по толщине металла полосы). Уменьшилась \sim в 2 раза ширина зоны пластических деформаций возле второй кромки полосы. При этом еще раз обращаем внимание, что режим нагрева второй кромки при тепловой правке был принят точно таким же, как и при нагреве первой кромки. Из этого следует, что такие изменения обусловлены наличием в полосе перед нагревом второй кромки начального НДС от нагрева первой кромки. При нагреве и последующем охлаждении второй кромки процесс деформирования полосы происходил при другом нагружении.

После нагрева для тепловой правки полные остаточные линейные осевые и сдвиговые деформации в среднем поперечном сечении $x = 300$ мм представлены на рис. 5.

В целом необходимо отметить примерно двукратное увеличение большинства компонент полной деформации в области второй кромки полосы, нагревавшейся с целью тепловой правки прогиба. Особенно это относится к полным сдвиговым деформациям γ_{xy-2} в плоскости XY . В средней части полосы по ее ширине уровень всех компонент полных деформаций незначительный с относительно равномерным их распределением по ширине центральной части поперечного сечения.

Остаточные упругие линейные осевые и сдвиговые деформации после нагрева двух кромок полосы в среднем поперечном сечении показаны на рис. 6.

Из рисунка видно, что вблизи кромок упругая продольная линейная осевая деформация является растягивающей и относительно значительной, особенно вблизи первой нагревавшейся кромки полосы. Следует ожидать в этой области полосы больших остаточных нормальных продольных напряжений, что будет показано ниже. Также в зоне второй нагревавшейся кромки очень большой является сдвиговая упругая деформация γ_{xy-2} в плоскости XY . Здесь следует ожидать больших соответствующих касательных напряжений. В средней по ширине сечения части полосы наблюдается почти равномерная упругая продольная линейная деформация укорочения ϵ_{ex-2} со значением $\sim -0,000633763$, что составляет примерно половину такой же деформации, соответствующей пределу текучести.

Остаточные нормальные и касательные напряжения в полосе после нагрева двух продольных кромок показаны на рис. 7. Однозначно можно сказать, что кроме продольных нормальных напряжений, всеми остальными напряжениями можно пренебречь ввиду их малости. Вблизи второй кромки полосы напряжения значительно выше, чем возле

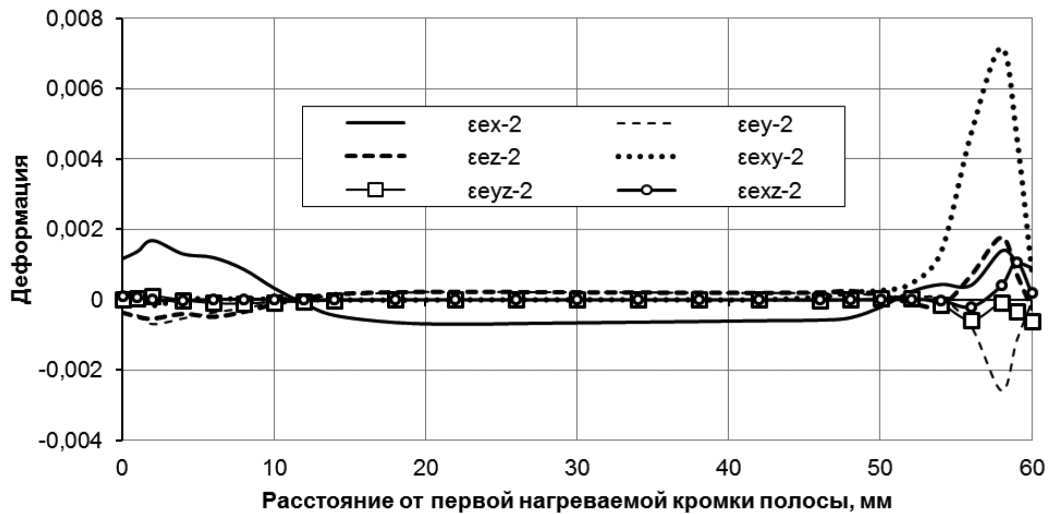


Рис. 6. Остаточные упругие линейные осевые и сдвиговые деформации после нагрева двух кромок полосы (2400 секунда) в среднем поперечном сечении $x = 300$ мм

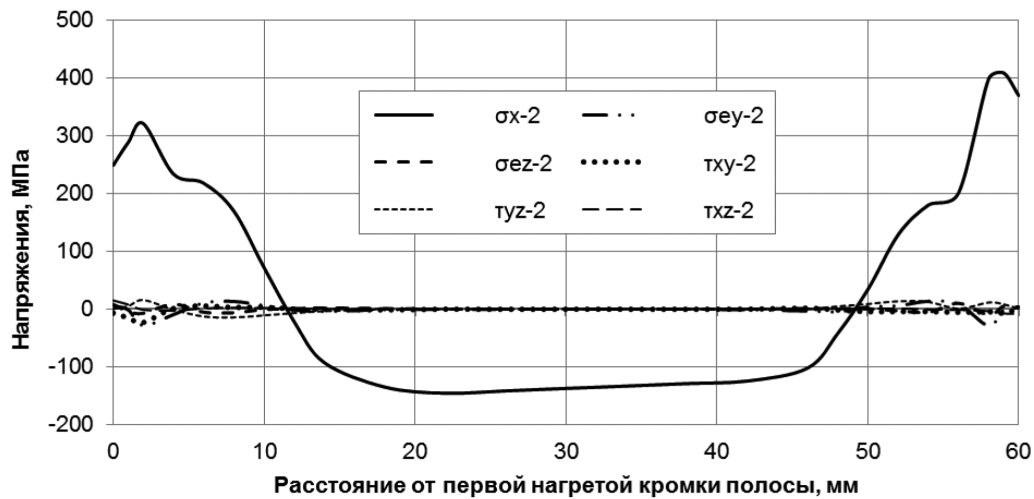


Рис. 7. Остаточные нормальные осевые и касательные напряжения после нагрева двух кромок полосы в среднем поперечном сечении $x = 300$ мм

первой кромки. Это связано с наличием высоких продольных напряжений возле первой кромки, что повышает сопротивляемость полосы изгибу в сторону второй кромки, в результате чего возле нее продольные напряжения повышаются примерно на ~ 30%.

Продольные напряжения сжатия в средней части поперечного сечения распределены более-менее равномерно. Возвращаясь к пластическим деформациям укорочения ϵ_{rx-2} возле первой и второй нагреваемых кромок в узлах сетки, принадлежащих боковой поверхности полосы $z = 2$ мм, чисто зрительно можно сравнить объемы продольного пластического укорочения возле обеих кромок. Видно, что возле первой нагреваемой кромки объем продольного пластического укорочения примерно в 2 больше аналогичного объема возле второй нагреваемой кромки, возникшего при тепловой прав-

ке прогиба полосы. Это свидетельствует о неуравновешенности изгибающих моментов усадочных сил возле кромок, что означает невозможность устранения в полной мере остаточного прогиба полосы на таком режиме тепловой правки. По расчету МКЭ максимальный прогиб осевой линии полосы после тепловой правки однократным нагревом второй кромки составляет $f_{max} = 0,761$ мм (уменьшение на 45,37%), продольное укорочение полосы по осевой линии $\Delta L_{ук} = 0,3$ мм (увеличение на 38,86%). Перемещения $U_z(x)$ точек оси в направлении толщины полосы равны нулю. Кривые перемещений точек оси балки $U_y(x)$ (прогибы), $U_x(x)$ (укорочения), $U_z(x)$ (депланация) показаны на рис. 8. От перемещений по оси X закреплялся узел сетки на оси полосы с координатой $x = 600$ мм.

Представляет большой интерес распределение в остаточном состоянии в поперечных сечениях сред-

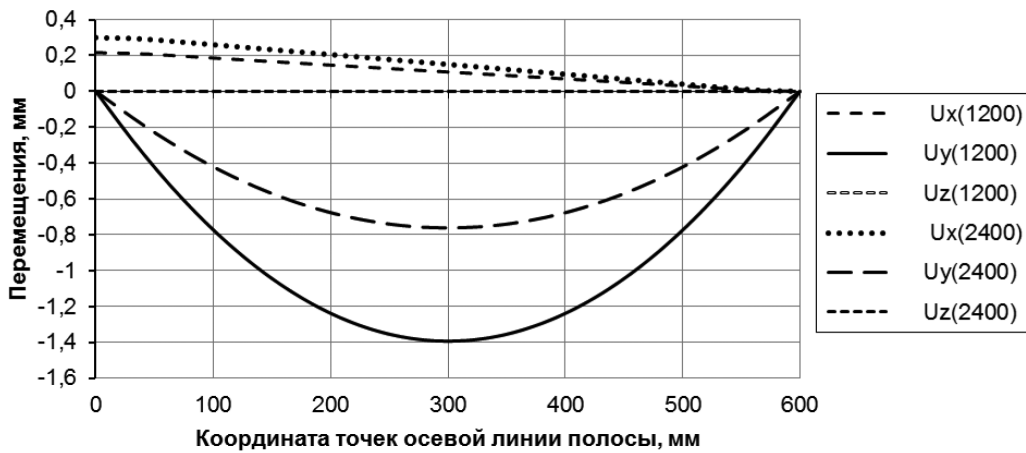


Рис. 8. Остаточные перемещения точек осевой линии полосы по осям координат после нагрева первой кромки (1200 секунда) и после нагрева с целью тепловой правки второй кромки (2400 секунда)

ней по длине части полосы с установившимся НДС продольных перемещений U_x . На рис. 9 представлены для двух пар поперечных сечений ($x = 540$ мм и $x = 60$ мм, $x = 348$ мм и $x = 252$ мм) перемещения U_x , а также их разница [$U_x(540) - U_x(60)$, $U_x(348) - U_x(252)$], представляющая собой продольные укорочения (удлинения) полосы в миллиметрах, соответственно на базах 480 мм и 100 мм. Обращаем внимание на некоторый загиб вниз кривых перемещений в зонах возле кромок, одинаковый для всех кривых, хотя разница перемещений в паре сечений представляется практически идеальной прямой, как это видно из рис. 9. Это свидетельствует о том, что загиб кривых перемещений возле кромок обусловлен значительными трансляционными пластическими сдвиговыми деформациями γ_{pxy-2} (рис. 4), одинаковыми для всех точек выбранного

продольного сечения полосы в средней ее части по длине.

Таким образом, однократный нагрев второй кромки для тепловой правки прогиба полосы на погонной энергии нагрева, одинаковой с нагревом первой кромки, не решает в полной мере проблему устранения остаточного прогиба. Как было показано выше, прогиб можно уменьшить только на 45,37%. Возможно, при большей погонной энергии нагрева второй кромки удалось бы достичь лучшего результата по уменьшению остаточного прогиба полосы. Однако по технологическим причинам нельзя для данной толщины полосы 4 мм существенно увеличивать погонную энергию нагрева по причине стекания расплавленного металла с кромки. В связи с этим было решено продолжить расчет МКЭ данной задачи для случая повторного нагрева

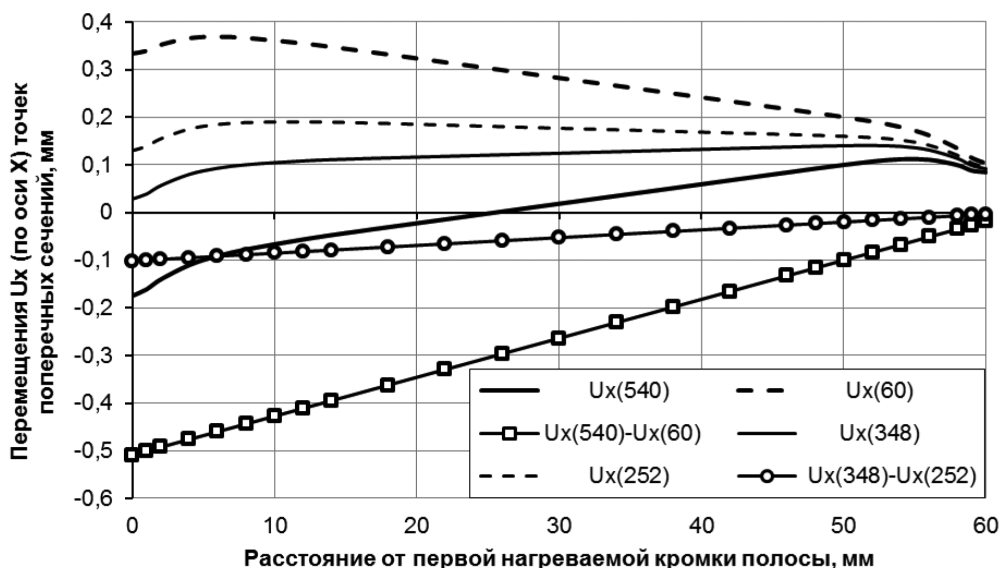


Рис. 9. Остаточные после нагрева двух кромок полосы продольные перемещения U_x (по оси X) четырех поперечных сечений, попарно симметричных ($x = 540$ мм и $x = 60$ мм, $x = 348$ мм и $x = 252$ мм) относительно среднего поперечного сечения $x = 300$ мм

второй кромки на прежней погонной энергии и выяснить, что же происходит с прогибом и остаточным НДС полосы.

Поскольку все исходные вопросы по моделированию этой задачи остаются без изменения, было решено продлить ее еще на один временной промежуток в 1200 секунд и продолжить общее решение до 3600 секунд. Решение успешно получено и базовые результаты, представлены ниже на рис. 10...15. Характер, тенденции и значимость обнаруженных изменений основных параметров остаточного НДС в среднем поперечном $x = 300$ мм сечении полосы показаны на рисунках тремя кривыми для трех остаточных состояний, соответствующих трем реперным точкам временного интервала решения задачи, соответственно 1200, 2400 и 3600 секунд.

Рассмотрим общие результаты с остаточных линейных осевых продольных пластических

деформаций ϵ_{rx} -1200, ϵ_{rx} -2400, ϵ_{rx} -3600, показанных на рис. 10. Можно отметить, что после нагрева второй кромки с целью тепловой правки прогиба, вблизи этой кромки (справа на рисунке), как и положено, возникает зона пластических деформаций несколько меньшей ширины с преобладанием наиболее значимых продольных пластических деформаций (точечная кривая) как удлинения с выходом их на кромку, так и укорочения.

Максимальное пластическое удлинение равно +0,00479883, что больше, чем на первой кромке +0,00339023.

Это обусловлено напряжениями растяжения на второй кромке после нагрева первой кромки, которые активно способствовали более интенсивному пластическому удлинению на стадии охлаждения в этой зоне второй кромки, что хорошо известно из

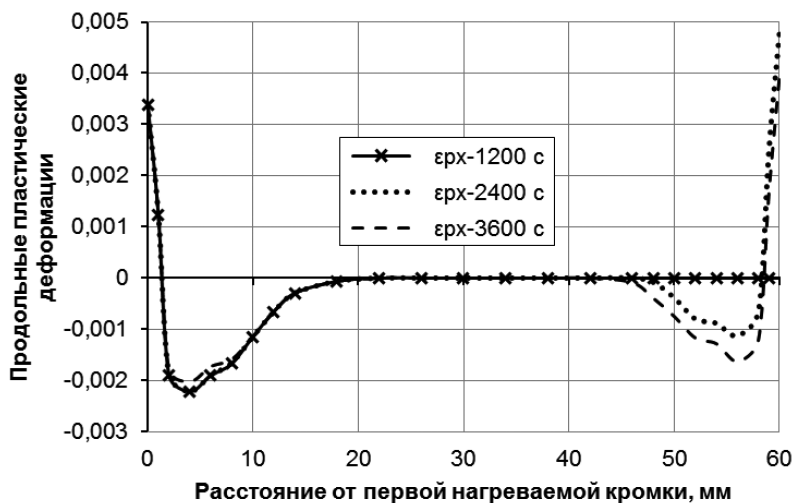


Рис. 10. Распределение в среднем поперечном сечении полосы линейных осевых продольных пластических деформаций для трех остаточных моментов времени

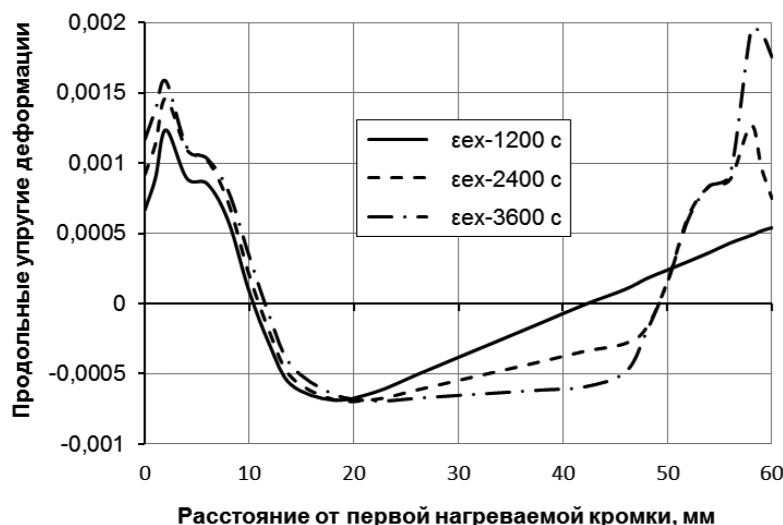


Рис. 11. Распределение в среднем поперечном сечении полосы линейных осевых продольных упругих деформаций для трех остаточных моментов времени

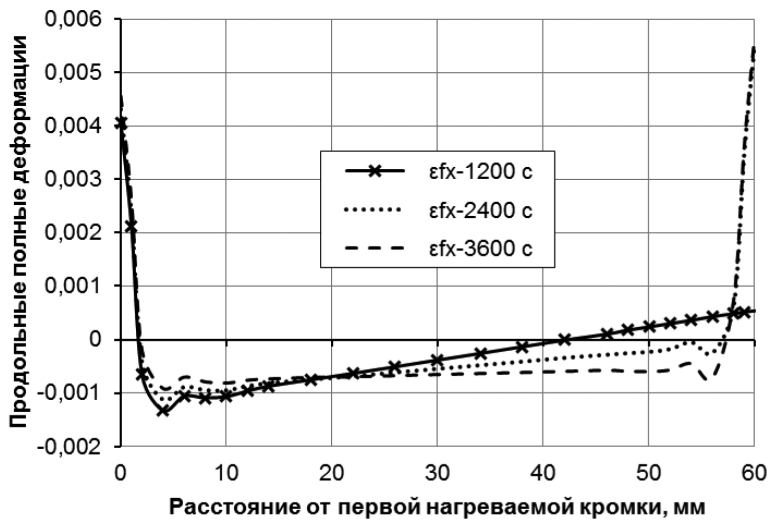


Рис. 12. Распределение в среднем поперечном сечении полосы линейных осевых продольных полных деформаций для трех остаточных моментов времени

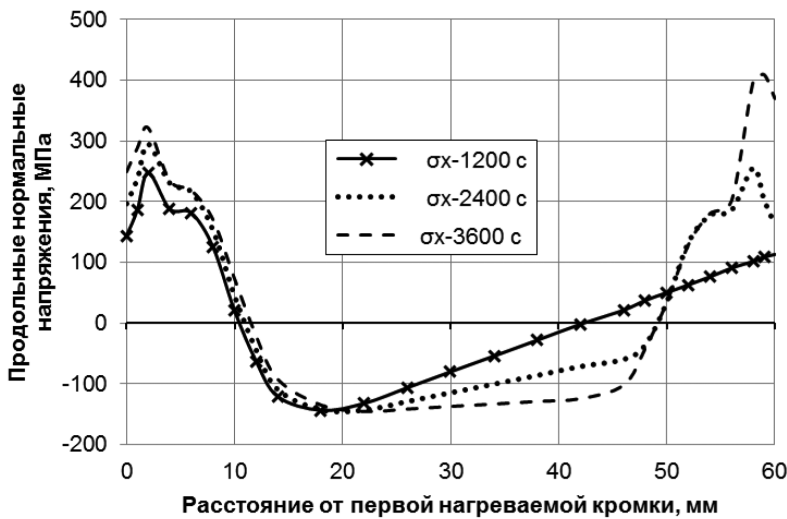


Рис. 13. Распределение в среднем поперечном сечении полосы нормальных осевых продольных напряжений для трех остаточных моментов времени

теории сварочных напряжений и деформаций [2]. Максимальные пластические деформации укорочения вблизи второй кромки равны $-0,00113142$ меньше таких же максимальных деформаций укорочения в зоне первой кромки, составляющих $-0,00221991$. Причиной этого также являются напряжения растяжения возле второй кромки от нагрева первой кромки, которые мешали возникновению большего пластического укорочения возле второй кромки на стадии ее нагрева [2]. После повторного нагрева второй кромки пластические деформации удлинения на второй кромке уменьшаются до $+0,003956$, максимальные пластические деформации укорочения возрастают до $-0,00163453$, а возле первой кромки уменьшаются до $-0,00202286$. Причиной этих процессов является значительный поворот поперечного сечения по

часовой стрелке при изгибе полосы и образование значительных продольных упругих деформаций укорочения перед зоной пластических деформаций возле второй кромки, что и вызывает такое изменение пластических деформаций укорочения.

Упругие деформации в сечении показаны на рис. 11. Наблюдается интенсивное нарастание продольного укорочения в реактивной зоне полосы с выравниванием распределения этого укорочения по ширине полосы. В этом проявляется действие усадочных явлений в зоне второй кромки на стадии охлаждения после первого и второго нагрева второй кромки при тепловой правке. В зонах возле обеих кромок действуют значительные упругие деформации удлинения.

Полные продольные деформации для остаточных состояний (сумма упругих и пластических)

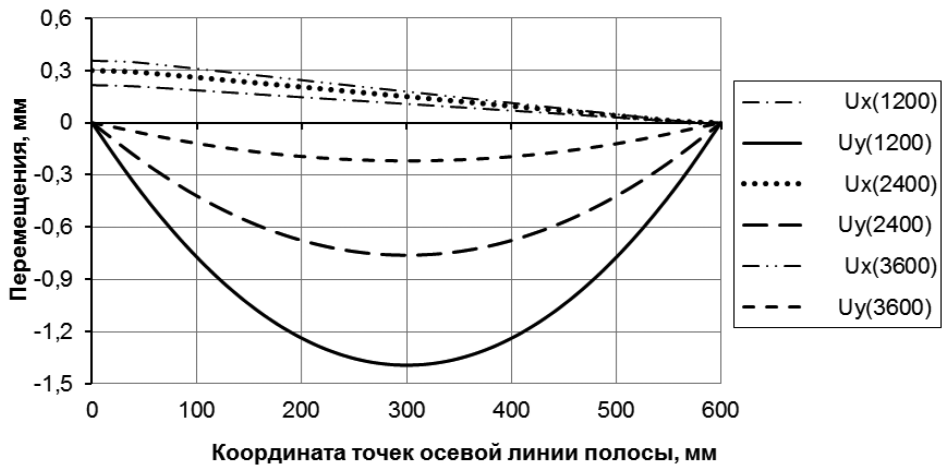


Рис. 14. Остаточные перемещения точек осевой линии полосы по осям координат: после нагрева первой кромки (1200 секунда), после первого нагрева второй кромки (2400 секунда), после второго нагрева второй кромки (3600 секунда)

показаны на рис. 12. Видно, что узкие, до 2 мм шириной, полоски металла растянуты вдоль полосы за счет упругого и пластического удлинения. Средняя часть после второго нагрева второй кромки почти равномерно укорочена.

Следует заметить, что все эти рисунки вследствие краевых эффектов, возникающих в исследуемой полосе, будут иметь значительные отличия для областей вблизи торцов полосы протяженностью до 60..80 мм.

Продольные напряжения после трех этапов нагрева полосы показаны на рис. 13. Заметное увеличение напряжений возле второй кромки, по-видимому, связано с образованием в этой зоне бейнитно-мартенситной структуры. Средняя часть поперечного сечения почти равномерно сжата напряжениями ~ 140 МПа.

Перемещения U_x и U_y соответственно по осям координат X и Y точек осевой линии полосы в оста-

точном состоянии после трех временных этапов (1200 с, 2400 с и 3600 с) нагрева кромок полосы представлены на рис. 14. Перемещения U_z тех же точек по оси Z (депланация полосы) равны нулю и на рис. 14 не представлены. Как видно из рис. 14, существенно уменьшился максимальный прогиб осевой линии полосы после повторного нагрева второй кромки с целью тепловой правки прогиба. Теперь он составляет 0,219 мм. Общее уменьшение прогиба при тепловой правке двукратным нагревом второй кромки полосы составило ~ 84,35%. Очевидно, что повторный нагрев второй кромки с целью снижения прогиба продольной оси полосы даёт ощутимый эффект, и возможно, при последующих таких же нагревах второй кромки было бы дальнейшее уменьшение прогиба, но такая задача в данной работе не рассматривалась.

В заключение на рис. 15. представлены в среднем поперечном сечении остаточные сдвиговые

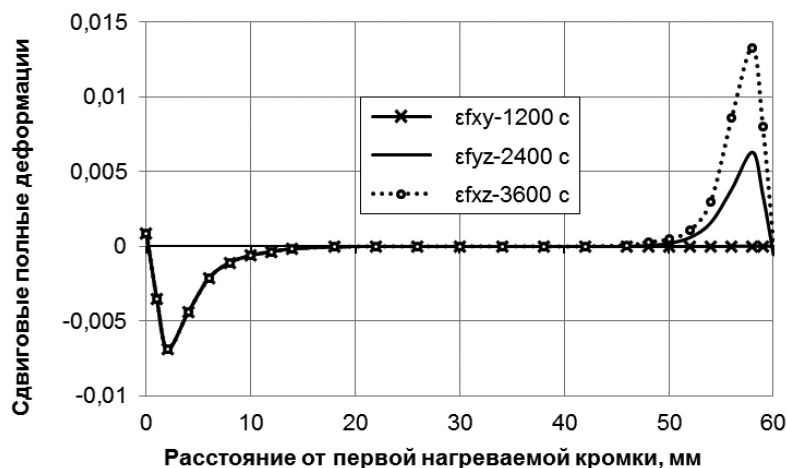


Рис. 15. Остаточные сдвиговые полные деформации в среднем поперечном сечении полосы для трех этапов нагрева кромок полосы

полные деформации ϵ_{fx} , ϵ_{fy} и ϵ_{fz} для тех же трех этапов нагрева полосы. Роль этих деформаций в процессах сдвигообразования при нагреве кромок полосы на данный момент до конца не установлена.

Выводы

1. Конечно-элементным методом получено решение связанной температурной упруго-пластической задачи при тепловой правке прогиба продольной оси полосы размерами 600×60×4 мм из стали 08пс двукратным нагревом второй продольной кромки и выполнен сравнительный анализ параметров остаточного НДС для трех этапов нагрева кромок полосы.

2. Установлено, что остаточное НДС после нагрева первой кромки влияет на формирование остаточного НДС после нагрева второй кромки. Ширина зоны пластических деформаций возле второй кромки уменьшается ~ в 2 раза. Максимальные пластические деформации укорочения в пластической зоне второй кромки изменяются следующим образом: продольные ϵ_{rx} -2 уменьшаются ~ в 2 раза, деформации укорочения ϵ_{rz} -2 по толщине металла полосы уменьшаются ~ в 1,5 раза, поперечные деформации укорочения ϵ_{ry} -2 увеличиваются ~ в 1,5 раза; максимальное пластическое удлинение на второй кромке ~ в 1,42 больше, чем на первой кромке. Это объясняется влиянием напряжений растяжения на второй кромке после нагрева первой кромки, которые активно способствуют более интенсивному пластическому удлинению на стадии охлаждения в этой зоне второй кромки.

3. Установлено, что в результате тепловой правки остаточный прогиб продольной оси полосы после первого нагрева второй кромки составил 0,761 мм (уменьшился на 45,37%), укорочение увеличилось до 0,300 мм (на 38,89%). После повторного нагрева второй кромки с целью дальнейшего уменьшения прогиба, его величина составила 0,219 мм (общее уменьшение прогиба на 84,28%), продольное укорочение полосы увеличилось до 0,357 мм (что на 65,28% больше первоначального продольного укорочения после нагрева первой кромки).

Литература

- [1] Прохоренко В. М., Перепичай А. А., Прохоренко Д. В. //Остаточное напряженно-деформированное состояние стальной полосы при нагреве продольной кромки движущимся источником тепла. //Технологические системы. – 2016. – № 3(76). – С. 112–120.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Прохоренко О. В., Прохоренко В. М., Зворикін К. О. //Розрахунок залишкового прогину та технологічних параметрів теплової правки коробчастих балок з двома поздовжніми швами з метою усунення прогину. //Технологические системы. – 2009. – № 2 (46). – С. 60–66.
- [5] Прохоренко О. В. //Залишковий прогин хребтової балки вагона від зварювання поздовжніх швів. // Технологические системы. – 2009. – № 4(48). – С. 82–93.
- [6] Прохоренко О. В. //Нова концепція запобігання залишкового прогину хребтової балки вагона від зварювання поздовжніх швів. //Технологические системы. – 2010. – № 2(51). – С. 58–63.
- [7] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. – USA: – Springer, 2005. – 325.
- [8] Прохоренко О. В., Прохоренко В. М. //Порівняння розрахункових схем зварювальних джерел тепла за результатами обчислення залишкового прогину штаби при нагріві її поздовжньої крайки. //Технологические системы. – 2008. – № 3(43). – С. 67–77.
- [9] Трочун И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машгиз, 1964. – 180 с.
- [10] Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Изд. «Судостроение», 1974. – 286 с.
- [11] Гатовский К. М., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.
- [12] Винокуров В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст]/В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – М. Машиностроение, 1984. – 280 с.

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

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

RESIDUAL STRESS-STRAIN STATE OF THE STEEL STRIP AFTER THE THERMAL STRAIGHTENING OF LONGITUDINAL AXIS FLEXURE

The paper presents the results of finite element modeling of the residual stress-strain state (SSS) in a strip of dimensions 600x60x4 mm from 08nc steel after thermal straightening of its axis flexure due to heating of one of its longitudinal edges by a moving tungsten welding arc in argon (TIG welding process). Thermal straightening was carried out by two consecutive heating of the second edge of the strip using the same technology as the heating of the first edge. Both heating of the second edge for the purpose of thermal straightening of the flexure was carried out after the formation of a residual SSS from the previous technological operation in it. Analysis of the estimated residual SSS in the strip was carried out after 20 minutes from the beginning of the previous strip heating. The heating mode of strip both edges is the same as the heat input energy of heating 120 J/mm. After heating the first edge, the flexure of the axis of the strip in the middle cross-section is 1.393 mm, longitudinal shortening along the center line is ~0.216 mm. After the first heating of the second edge to straighten the above, the flexure in the residual state decreased to 0.761 mm (by 45.37%), the shortening increased to 0.300 mm (by 38.89%). After the second heating of the second edge in order to further reduce the flexure, its value became equal to 0.219 mm (total reduction by 84.28%), the shortening of the strip along the axis increased to 0.357 mm (an increase from the minimum by 65.28%).

Key@ords: residual stress-strain state; the steel strip; moving heat source J. Goldak; flexure; shortening; thermal straightening of the strip flexure.

References

- [1] Prokhorenko V. M., Perepichay A. A., Prokhorenko D. V. // Ostatochnoe naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie stal'noj polosy pri nagreve prodol'noj kromki dvizhushhimsja istochnikom tepla. // Tehnologicheskie sistemy. – 2016. – № 3(76). – S. 112–120.
- [2] Prokhorenko V. M., Prokhorenko O. V. Napruzheniya ta deformatsiyi u zvarnykh z'yednannykh i konstruktsiyakh [Tekst]: navch. posib. / . – K.: NTUU «KPI», 2009. – 268 s. – Bibliohr.: s.267. – 400 pr. ISBN 978-966-622-331-2.
- [3] Prokhorenko O. V. Rozrobka ta zastosuvannya metodu skladnykh pereriziv dlya rozrakhunku zalishkovykh deformatsiy vid zvaryuvannya pozdovzhnykh 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.
- [4] Prokhorenko O. V., Prokhorenko V. M., Zvorykin C. O. // Rozrahunok zalishkovogo proginu ta tehnologichnih parametriv teplovoi pravki korobchastih balok z dvoma pozdovzhnimi shvami z metoju usunennja proginu. // Tehnologicheskie sistemy. – 2009. – № 2(46). – S. 60–66.
- [5] Prokhorenko O. V. // Zalishkovij progin hrebtovoï balki vagona vid zvarjuvannya pozdovzhnykh shviv. // Tehnologicheskie sistemy. – 2009. – № 4(48). – S. 82–93.
- [6] Prokhorenko O. V. // Nova koncepcija zapobigannya zalishkovogo proginu hrebtovoï balki vagona vid zvarjuvannya pozdovzhnykh shviv. // Tehnologicheskie sistemy. – 2010. – № 2(51). – S. 58–63.
- [7] John A. Goldak, Mehdi Akhlaghi. Computational welding mechanics. – USA: – Springer, 2005. – 325.
- [8] Prokhorenko O. V., Prokhorenko V. M. // Porivnjannya rozrakhunkovykh shem zvarjuval'nih dzherel tepla za rezul'tatami obchislennja zalishkovogo proginu shtabi pri nagrivi ii pozdovzhn'oi krajki. // Tehnologicheskie sistemy. – 2008. – № 3(43). – S. 67–77.
- [9] Trochun I. P. Vnutrennie usilija i deformacii pri svarke. – M.: Mashgiz, 1964. – 180 s.
- [10] Kuz'minov S. A. Svarochnye deformacii sudovykh korpusnykh konstrukcij. – L.: Izd. «Sudostroenie», 1974. – 286 s.
- [11] Gatovskij K. M., Karhin V. A. Teorija svarochnykh deformacij i naprjazhenij. Ucheb. pos. Leningr. korablestr. in-t, 1980. – 331 s.
- [12] Vinokurov V. A. Teorija svarochnykh deformacij i naprjazhenij [Tekst]/V. A. Vinokurov, A. G. Grigor'janc. – M. Mashinostroenie, 1984. – 280 s.