

УДК 621.771: 621.774.21

Макаренко Н. А.  
Добронос Ю. К.  
Дмитриев С. А.  
Воротникова Е. А.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ УСИЛЕНИЙ СВАРНЫХ ШВОВ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Комплексное теоретическое исследование локальных и интегральных характеристик напряженного, деформированного, а также кинематического состояния металла при горячей прокатке сварных швов было проведено на основе методов полей линий скольжения и верхней оценки с рядом принятых допущений. Это позволило упростить расчёты и в полной мере учесть двухмерный характер пластического формоизменения отличающегося высокой степенью своей информативности [1, 2].

Вместе с тем, используемое и в первом, и во втором случае допущение о постоянстве удвоенного сопротивления сдвигу  $2k_c$  прокатываемого металла во всем объеме зоны его пластического формоизменения, делает целесообразным применение данных методик, преимущественно, для анализа процессов горячей прокатки

В самом общем случае процесс прокатки усиления сварных швов электросварных труб большого диаметра можно представить в виде поэтапной осадки внутреннего и наружного усиления сварного шва гладкими бойками. В такой постановке задача сводится к двухмерному анализу напряженно-деформированного состояния металла с учетом гипотезы плоских деформаций, что позволяет упростить её постановку, а также снизить трудоемкость численной реализации [3].

Целью работы является определение локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при реализации данного технологического процесса и, в частности, силы осадки, а также её зависимости от перемещения пуансона.

Расчетная схема предложенной математической модели, а так же исходные данные представлены на рис. 1. При этом постановка задачи осуществлялась с помощью создания плоской модели сечения усиления сварного шва, а также верхнего и нижнего пуансонов, которые в самом общем случае могут быть сложной формы. С целью снижения трудоемкости численной реализации математической модели, а также повышения степени стабильности получаемого в каждом конкретном случае решения верхний и нижний пуансоны моделировались аналитическими недеформируемыми поверхностями.

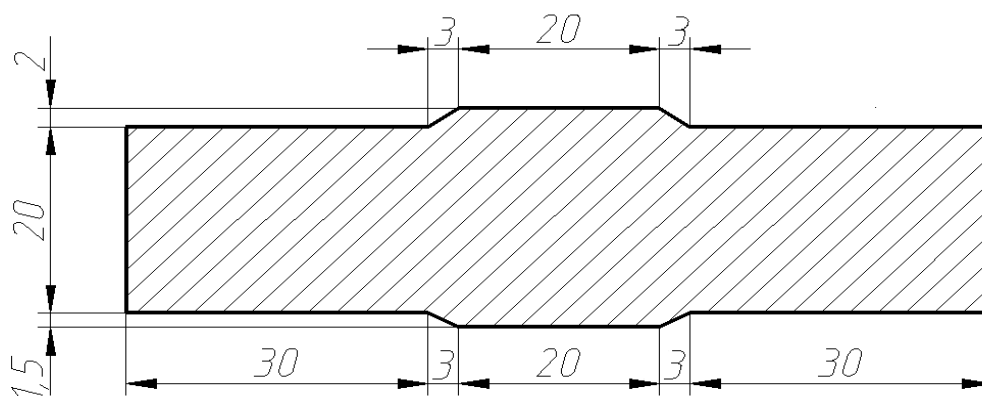


Рис. 1. Расчётная схема и исходные данные к математическому моделированию процесса осадки усиления сварных швов труб большого диаметра на основе метода конечных элементов

Деформируемый металл усиления сварного шва моделировался твердотельными четырехузловыми элементами с плоской деформацией.

Задача была поставлена и решена в статической постановке, то есть масса металла не учитывалась, что позволило использовать решатель Abaqus/Student значительной степени снизить трудоемкость численной реализации полученной математической модели при одновременном и весьма существенном повышении степени стабильности получаемых результатов.

В качестве граничных условий использовали следующие:

- нижний пуансон неподвижен, т. е. зафиксирован относительно перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также вращения;
- верхний пуансон зафиксирован относительно перемещения в горизонтальной плоскости и вращения, в то время как его перемещение в вертикальной плоскости является варьируемым и соответствует величине осадки усиления сварного шва;
- контакт между поверхностями верхнего и нижнего пуансонов и соответствующими поверхностями металла моделировался, исходя из закона Амонтона-Кулона, при этом величина коэффициента внешнего трения является также величиной варьируемой.

В качестве характеристик механических свойств металла при осадке использовали модуль упругости и коэффициент Пуассона, а также кривую упрочнения осаживаемого материала. При этом кривая упрочнения рассматриваемого материала задается с помощью определения точек с известной величиной относительной деформации и соответствующего ему значения предела текучести и последующей аппроксимацией заданной кривой непосредственно решателем.

В качестве результатов анализу подлежали распределения локальных характеристик напряженно-деформированного состояния металла, а также силы на верхнем и нижнем пуансонах.

В качестве примера результатов численной реализации полученной математической модели на рис. 2 распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в ходе осадки. При этом коэффициент внешнего трения на контактных поверхностях верхнего и нижнего пуансонов соответствовал 0,3, модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел текучести осаживаемого материала – 200000 МПа, 0,3 и 100 МПа, соответственно [3].

Следует отметить, что представленная конечно-элементная модель позволяет анализ процесса осадки несимметричных относительно вертикальной оси усиления сварных швов. При этом в большинстве случаев усиления сварных швов являются симметричными. Исходя из отмеченного, а также с целью дальнейшего снижения трудоемкости численной реализации математической модели была разработана конечно-элементная модель, рассматривающая половину очага деформации.

Для обеспечения корректного учета граничных условий было также добавлено условие симметричности модели относительно вертикальной оси. Таким образом, количество элементов может быть сокращено вдвое, что в значительной мере снижает трудоемкость численной реализации полученной математической модели, а также повышает степень стабильности получаемых результатов.

На рис. 3 представлены расчетные значения перемещения и силы верхнего и нижнего пуансонов в зависимости от времени.

Следует отметить, что с учетом рассмотрения половины очага деформации получены адекватные результаты, что позволяет рекомендовать упрощенную математическую модель для анализа процесса осадки симметричных относительно вертикальной оси усиления сварных швов труб большого диаметра.

В свете изложенного, возможным представляется численное интегрирование полученных данных с целью определения результирующей силы и момента прокатки, соответственно [4].

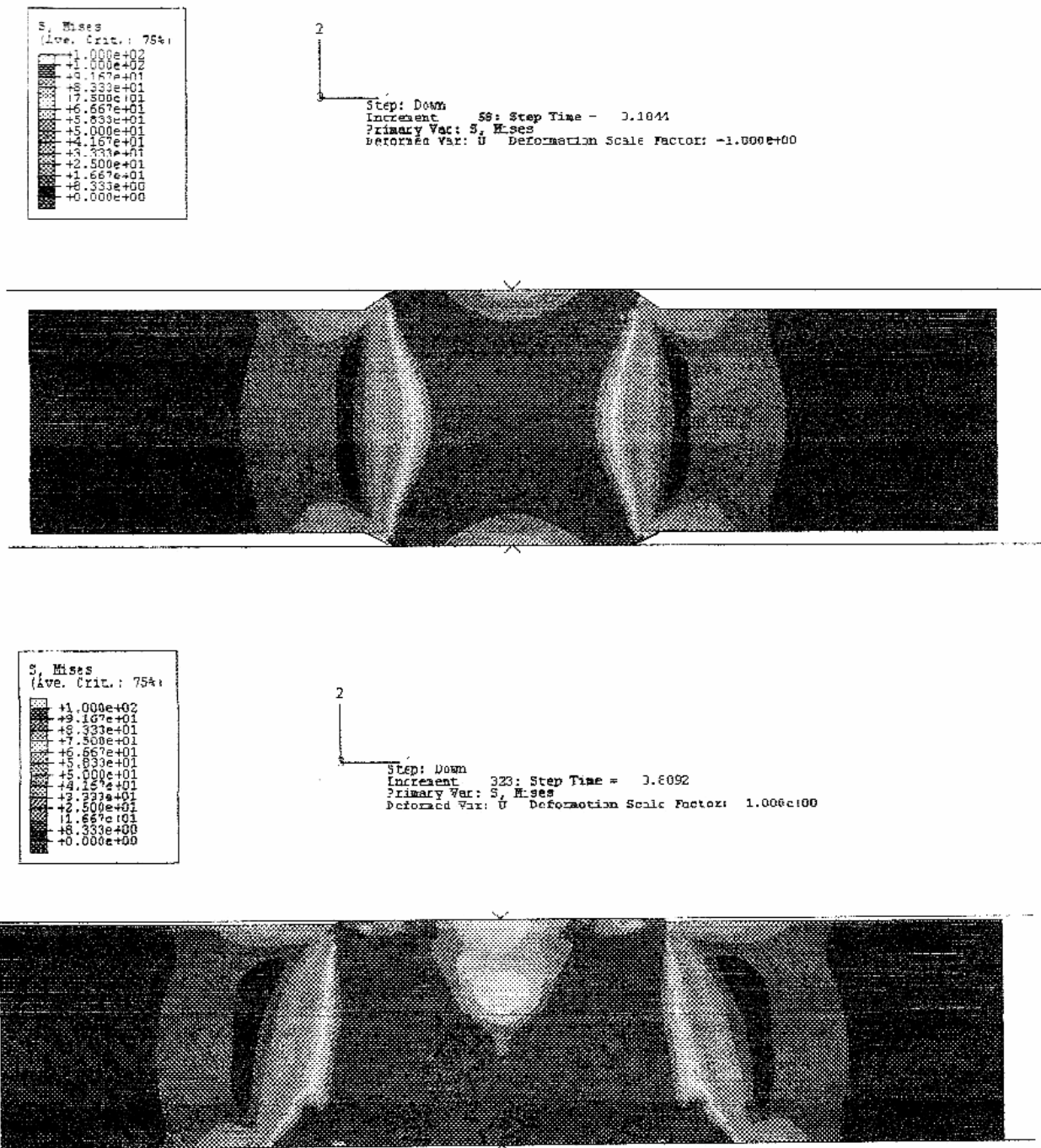


Рис. 2. Расчетные распределения эквивалентных напряжений в очаге деформации при реализации процесса осадки усиления сварных швов труб большого диаметра

Исходя из известного времени  $t_i$ , а также суммарного времени осадки  $t_\Sigma$ , определим текущий межвалковый зазор  $S_i$  исходя из условия равномерного перемещения пуансона:

$$S_i = S_0 - \Delta S t_i / t_\Sigma, \quad (1)$$

где  $S_0$  – исходный зазор между пуансонами, соответствующий исходной толщине усиления;

$\Delta S$  – суммарная величина осадки, соответствующая перепаду толщин усиления и основного материала трубы.

Текущая толщина металла в сечении, находящемся на расстоянии  $x$  от выхода из очага деформации может быть определена из чисто геометрических соотношений:

$$S(x) = S_1 + R_1 + R_2 - \sqrt{R_1^2 - x^2} - \sqrt{R_2^2 - x^2}, \quad (2)$$

где  $S_1$  – результирующий межвалковый зазор, в общем случае соответствующий толщине основного материала трубы;

$R_1, R_2$  – величины радиусов наружного и внутреннего рабочих валков.

Для решения полученного уравнения относительно геометрической координаты  $x$  перенесем выражения с дробными степенями в левую сторону и возведем обе части уравнения в квадрат:

$$R_1^2 - x^2 + R_2^2 - x^2 + 2\sqrt{x^4 - x^2(R_1^2 + R_2^2) + R_1^2 R_2^2} = (S_1 - S(x) + R_1 + R_2)^2 \quad (3)$$

или:

$$4[x^4 - x^2(R_1^2 + R_2^2) + R_1^2 R_2^2] = [(S_1 - S(x) + R_1 + R_2)^2 - R_1^2 - R_2^2]^2. \quad (4)$$

Решив полученное уравнение относительно  $x$ , получим выражение для определения геометрической координаты сечения с толщиной  $S(x)$ :

$$x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4R_1^2 R_2^2 - [(S_1 - S(x) + R_1 + R_2)^2 - R_1^2 - R_2^2]^2}{(S_1 - S(x) + R_1 + R_2)^2}}. \quad (5)$$

Исходя из рассмотренных математических преобразований, числовой массив результатов расчета относительно перемещения пуансона и величины силы осадки можно преобразовать в массив распределений сил прокатки, действующих в каждом из сечений с геометрической координатой  $x_i$ . В дальнейшем, с целью определения интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при реализации процесса прокатки усиленных сварных швов труб большого диаметра, необходимо произвести численное интегрирование полученного распределения, используя, например, метод трапеций [4]. Определим интегральное значение силы прокатки  $P_\Sigma$ :

$$P_\Sigma = \int_{x=0}^L p(x) dx = \sum_{i=1}^{N-1} (P_i + P_{(i+1)})(x_i - x_{(i+1)}) / 2, \quad (6)$$

где  $N$  – размерность получаемого числового массива результатов расчета, которая определяется величиной временного инкремента, необходимого для стабильного решения, непосредственно решателем, реализующим конечно-элементный расчет. Аналогично для определения интегрального значения момента прокатки  $M_\Sigma$  получим выражение следующего вида:

$$M_\Sigma = \int_{x=0}^L p(x) x dx = \sum_{i=1}^{N-1} (P_i + P_{(i+1)})(x_i^2 - x_{(i+1)}^2) / 4. \quad (7)$$

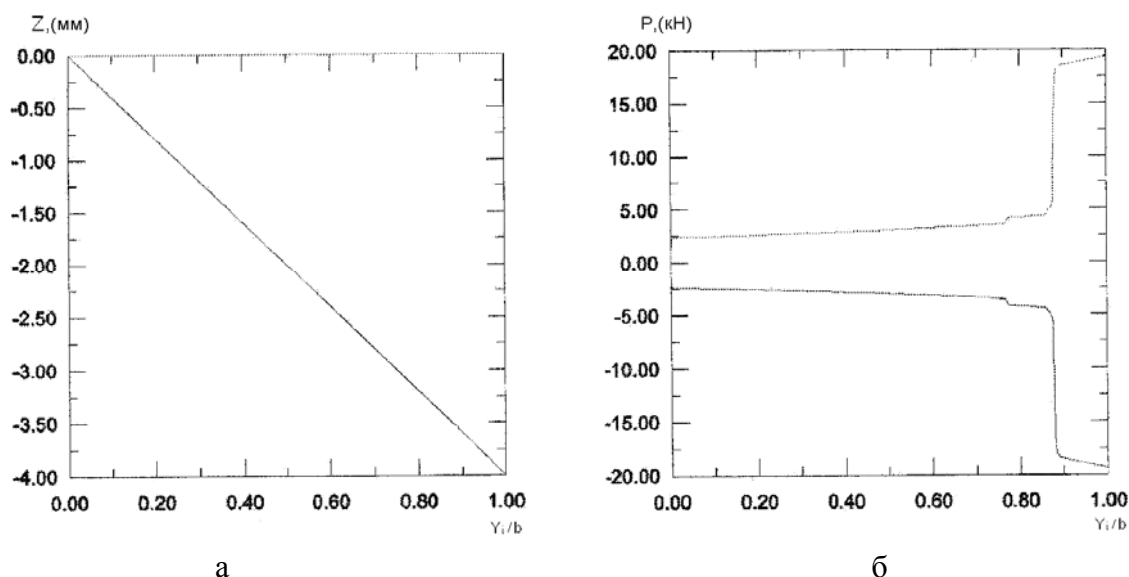


Рис. 3. Расчетные распределения перемещений (а), а также энергосиловых параметров (б) процесса осадки усиления сварных швов труб большого диаметра

### ВЫВОДЫ

В свете существующих методик по исследованию напряженно-деформированного состояния деформируемого металла, а так же, исходя из полученных результатов исследований на основе метода конечных элементов, следует заключить, что, применительно к математическому моделированию процесса прокатки усиления сварных швов электросварных труб большого диаметра, решаемая задача сводится к двумерному анализу напряженно-деформированного состояния металла с учётом гипотезы плоских деформаций. Так же в ходе моделирования следует использовать метод половины очага деформации, это позволяет упростить постановку задачи, а так же снизить трудоёмкость и машинное время численной реализации и в сочетании с известными методиками позволит в полной мере исследовать данный процесс.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Технология, оборудование и методы расчета процесса локальной термомеханической обработки электросварных труб большого диаметра с использованием горячей прокатки* / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, С. В. Новоселов, С. Б. Вольченко, А. В. Послушник // *Металлург*. – 2004 (Спецвыпуск). – С. 27–30.
2. *Сатонин А. В. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при локальной термомеханической обработке сварных швов* / А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, В. В. Тимченко // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 428–433.
3. *Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов* / А. Д. Томленов. – М. : *Металлургия*, 1972. – 408 с.
3. *Соколовский В. В. Теория пластичности* / В. В. Соколовский. – М. : *Высш. школа*, 1968. – 608 с.
4. *Качанов Л. Н. Основы теории пластичности* / Л. Н. Качанов. – М. : *Наука*, 1969. – 420 с.

Макаренко Н. А. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ОиТСП ДГМА;

Доброносков Ю. К. – канд. техн. наук, доц. кафедры АММ ДГМА;

Дмитриев С. А. – аспирант ДГМА;

Воротникова Е. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua