

УДК 621.771: 621.774.21

Кулик А. Н.  
Дмитриев С. А.  
Ситник А. А.  
Шевцов С. А.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЗАКАТКЕ  
СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ  
РОТАЦИОННОЙ ОБКАТКИ**

Основной задачей является снижение себестоимости производства баллонов высокого давления путем использования одношовной сварной трубы в качестве заготовки вместо цельноркатаной, а также за счет максимально возможного приближения их формы и размеров к конечным геометрическим характеристикам готовой детали. Это способствует снижению трудоемкости, энергоемкости технологического процесса, повышению коэффициента использования материала, улучшению эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции, что особенно актуально для массового, в том числе при изготовлении толстостенных изделий из труб типа баллонов различной емкости и формы, а также деталей им подобных [1].

Последнее требование связано с тем, что непосредственно сварной шов является наиболее слабым местом сварной трубы, что обусловлено, прежде всего отличием литой структуры сварного шва от катаной структуры основного металла трубы. Как следствие, в зоне сварного шва имеет место снижение пластичности металла, вероятность возникновения дефектов сплошности, обусловленная как худшим качеством литого металла, так и особенностями технологии наложения сварных швов. Переходная зона от сварного шва к основному металлу имеет концентраторы напряжений вследствие возможности возникновения остаточных напряжений, а также вследствие особенностей геометрии сварного шва в виде наплывов металла – усилений, выступающих за пределы основного материала трубы. Пониженный уровень прочности, повышенная хрупкость и наличие дополнительных концентраторов напряжений приводят к увеличению вероятности появления дефектов при закатке днищ и горловин баллонов. Анализ фрагментов сварных швов в донной части баллонов показал, что даже при отлаженной технологии сварки вероятность возникновения дефектов велика [1].

Все отмеченное обусловило необходимость разработки мероприятий, направленных на существенное повышение качества сварных швов. Среди известных способов решения данной задачи наиболее эффективной является локальная термомеханическая обработка (ЛТМО) сварных швов, которая заключается в нагреве и последующей пластической деформации зоны сварного шва. Реализация такой технологии, включающая нагрев зоны шва до температуры 1000–1050 °С, раскатку усилений до уровня основного металла [2, 3].

Целью работы является проведение теоретических исследований, направленных на совершенствование технологий и оборудования ротационной обкатки, путем математического моделирования напряженно-деформированного состояния при закатке сварных швов трубных заготовок [1–3].

Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при деформации сварного шва, с учетом его реальных геометрических соотношений, полученных на основе обработки исходных данных, было проведено с использованием численных интерпретаций методов верхней оценки [4, 5]. Использование этого метода позволяет учесть двухмерный характер пластической деформации металла, а также исследовать возможность появления и развития внутренних дефектов сплошности.

Собственно само математическое моделирование заключалось в разбиении всей осевой протяженности очага деформации на отдельные  $i$ -е элементарные поперечные сечения и в последующем анализе каждого из них, что иллюстрировано рис. 1.

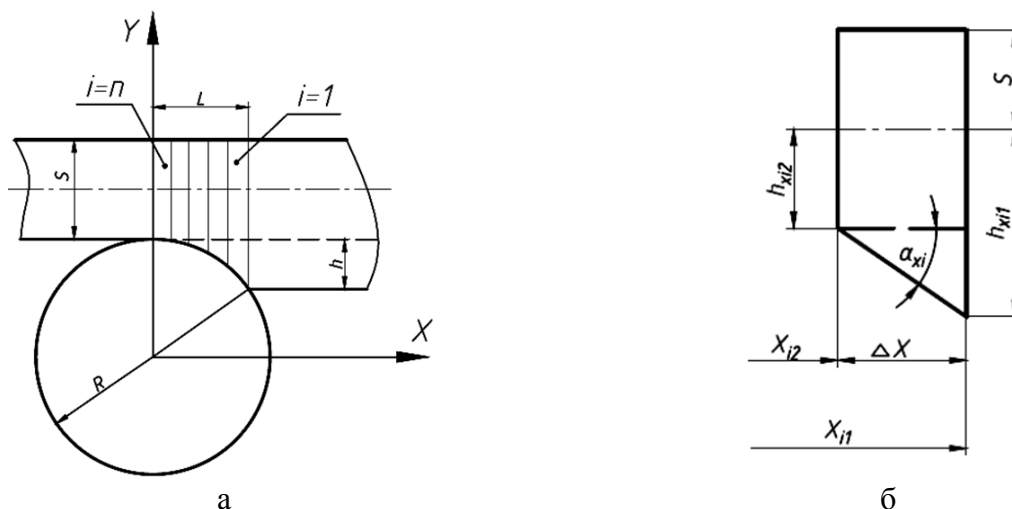


Рис. 1. Расчетные схемы очага деформации процесса горячей прокатки сварных швов

Текущие по длине очага деформации значения толщины сварного шва  $h_{xi}$  и его ширины  $b_{xi}$  и угла подхода боковой образующей трапеции определяли из очевидных геометрических соотношений с учетом радиуса рабочих валков, величины обжатия и величины смещенных объемов. При этом угол подхода трапеции к основанию считали неизменным, так как прилегающая зона является пластически недеформируемой.

$$L = \sqrt{2Rh - h^2}. \quad (1)$$

$$\Delta x = L / n. \quad (2)$$

$$x_{i1} = L - \Delta x(i - 1). \quad (3)$$

$$x_{i2} = x_{i1} - \Delta x = L - \Delta x \cdot i. \quad (4)$$

$$h_{xi1} = h \cdot \left( \frac{x_{i1}}{L} \right)^2. \quad (5)$$

$$h_{xi2} = h_{xi1} \cdot \left( \frac{x_{i2}}{L} \right)^2. \quad (6)$$

$$b_{0xi2} = b_{1xi2} + 2 \cdot h_{xi2} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (7)$$

Исходя из изложенного, в основу математической модели энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов была положена численная интерпретация метода верхней оценки, заключающаяся в количественном определении геометрических координат особых точек кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей [4, 5].

Этим обусловлено некоторое снижение интенсивности увеличения нормальных контактных напряжений в сечениях, близких ко входу в очаг деформации. С учетом же известных значений  $P_{xi}$  была произведена оценка силы, и момента процесса горячей прокатки сварных швов при реализации ЛТМО электросварных труб большого диаметра.

Используемая в этом случае расчетная схема для  $i$ -го сечения представлена на рис. 2, при этом количественному определению, следуя указанному выше, подлежат геометрические координаты особых точек 2, 3, 1, характеризующих границы раздела жестких зон I, II и III в физической плоскости, а также геометрические координаты особых точек 4, 5 и 6, характеризующих скорости перемещения данных жестких зон в плоскости годографа скоростей.

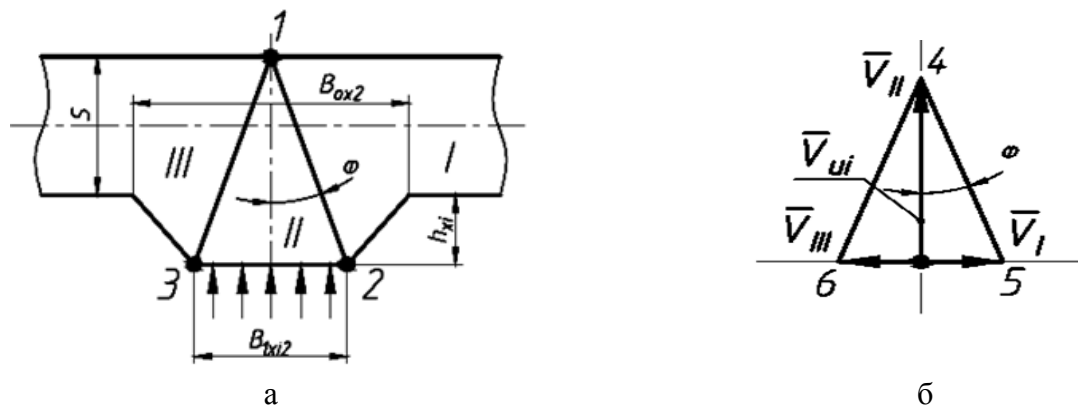


Рис. 2. Расчетные схемы кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости (а) и в плоскости годографа скоростей (б), используемые применительно к расчету энергосиловых параметров при реализации процесса горячей прокатки сварных швов

$$L_{12} = \sqrt{\left(\frac{B_{xi_2}}{2}\right)^2 + (h_{xi_2} + S)^2}. \tag{8}$$

$$\Psi_{xi} = \arctg\left(\frac{B_{xi_2}}{2(h_{xi_2} + S)}\right). \tag{9}$$

$$L_{45} = \frac{V_{ui_2}}{\cos \varphi_{xi_2}}. \tag{10}$$

Применительно к процессу горячей прокатки сварных швов непосредственно задача по построению кинематически возможных полей характеристик в каждом сечении сводилась к определению суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma_i}$ , после чего определялись нормальные контактные напряжения  $P_{xi}$ , действующие по длине очага деформации. Сама же сила прокати определялась согласно зависимости (13) [3].

$$N_{\Sigma_i} = 2K(L_{13} \cdot L_{45}). \tag{11}$$

$$P_{xi_2} = \frac{N_{\Sigma_i}}{V_{ui_2}} = \frac{2Kx_i}{\cos \varphi_{xi_2}}. \tag{12}$$

$$P_y = \sum_{i=1}^n \frac{(P_{xi_2} \cdot b_{xi_2} + P_{xi_1} \cdot b_{xi_1})}{2} \cdot \Delta X. \tag{13}$$

На рис. 3 представлены зависимости распределения силы прокатки в зависимости от геометрических параметров очага деформации, а так же от различной температуры нагрева сварного шва. Исходя из представленной зависимости, можно заключить, что сила прокатки уменьшается с увеличением температуры нагрева сварного шва, а так же с уменьшением размера сварного шва.

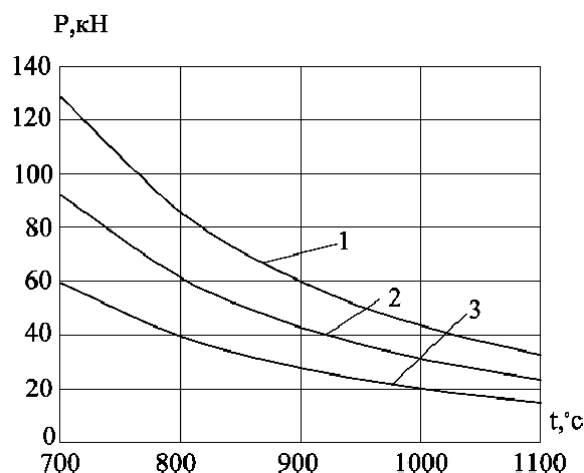


Рис. 3. Расчетные распределения силы прокатки от температуры при различных размерах усиления сварного шва

$$1 - B_0 \times B_1 = 2 \times 2; 2 - B_0 \times B_1 = 3 \times 3; 3 - B_0 \times B_1 = 4 \times 4$$

### ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования позволили установить некоторые особенности напряженно-деформированного состояния металла при локальной термомеханической обработке сварных швов трубных заготовок для производства баллонов высокого давления. Вместе с тем принятые допущения требуют дальнейшего уточнения в рамках учета реальных геометрических и температурных параметров процесса, а также экспериментальной проверки полученных теоретических результатов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капорович В. Г. *Обкатка в производстве металлоизделий* / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1973. – 168 с.
2. Пашков В. Г. *Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при упрочнении сварных соединений* / В. Г. Пашков, А. В. Анакин, А. В. Послушник // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 245–248.
3. *Технология, оборудование и методы расчета процесса локальной термомеханической обработки сварных соединений на основе процесса горячей прокатки* / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, А. Н. Кулик и др. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 462–467.
4. Бровман М. Я. *Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки* / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1995. – 256 с.
5. *Моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов на основе метода верхней оценки* / Ю. К. Доброносков, С. А. Дмитриев, Е. А. Воротникова, С. А. Шевцов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 38–43.

Кулик А. Н. – канд. техн. наук, доц. кафедры АММ ДГМА;

Дмитриев С. А. – аспирант ДГМА;

Ситник А. А. – студент ДГМА;

Шевцов С. А. – ст. преп. кафедры ВМ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua