

УДК 621.771: 621.774.21

Доброносов Ю. К.  
 Дмитриев С. А.  
 Воротникова Е. А.  
 Шевцов С. А.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СВАРНЫХ ШВОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ

Одними из наиболее точных методов расчета энергосиловых параметров процесса прокатки сварных соединений труб большого диаметра (аналогично процессу прокатки относительно толстых листов и полос, характеризующегося диапазоном отношения длины дуги контакта  $L$  и средней толщины  $h_{cp}$  соответствующим  $L/h_{cp} \leq 2,5..3,0$  являются методики, полученные на основе метода полей линий скольжения и метода верхней оценки [1, 2].

Особенностью метода полей линий скольжения является допущение об отсутствии изменения величины удвоенного сопротивления сдвигу  $2k_c$  в очаге деформации, что в условиях горячей прокатки приводит к погрешностям. Вместе с тем при ЛТМО сварных швов имеет место неравномерный по толщине шва нагрев и как следствие неравенство температур и механических свойств наружного и внутреннего швов, что необходимо учитывать [1].

Целью работы является математическое моделирование энергосиловых параметров процесса локальной термомеханической обработки сварных соединений на основе метода верхней оценки с учётом неравномерности температурного поля.

В самом общем случае расчётная схема разбиения очага деформации по длине представлена на рис. 1.

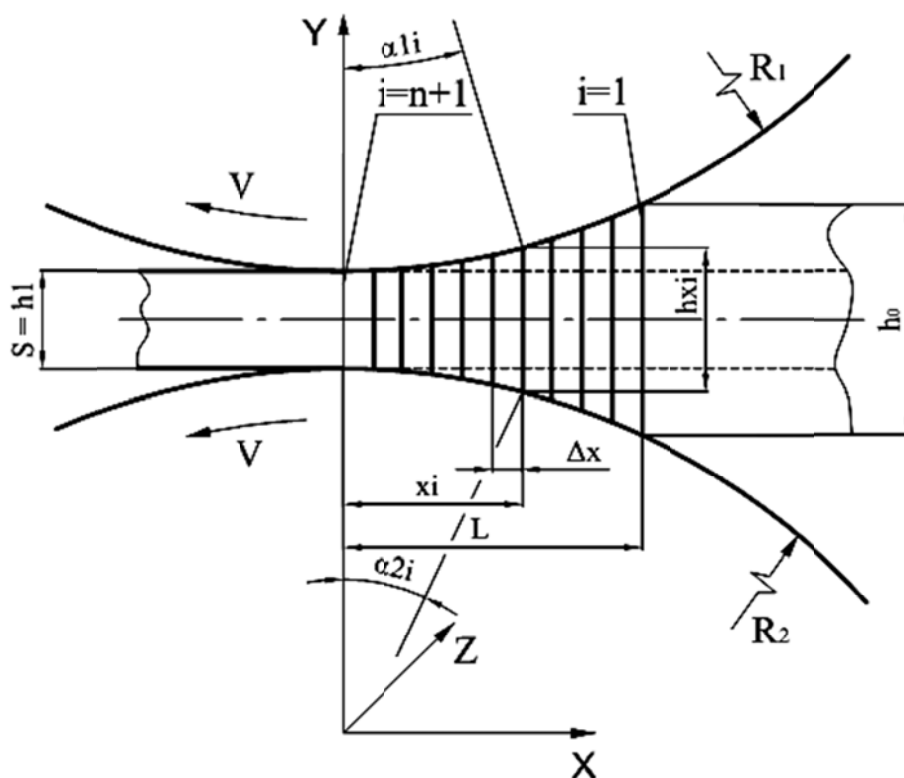


Рис. 1. Расчётная схема интегрального очага деформации применительно к математическому моделированию напряженного состояния металла при горячей прокатке сварных швов

В основу математической модели была положена численная интерпретация метода верхней оценки с учётом неравномерности нагрева наружной и внутренней поверхностей сварных швов, заключающаяся в количественном определении геометрических координат особых точек кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости в плоскости годографа скоростей [2].

Используемая в этом случае расчетная схема представлена на рис. 2.

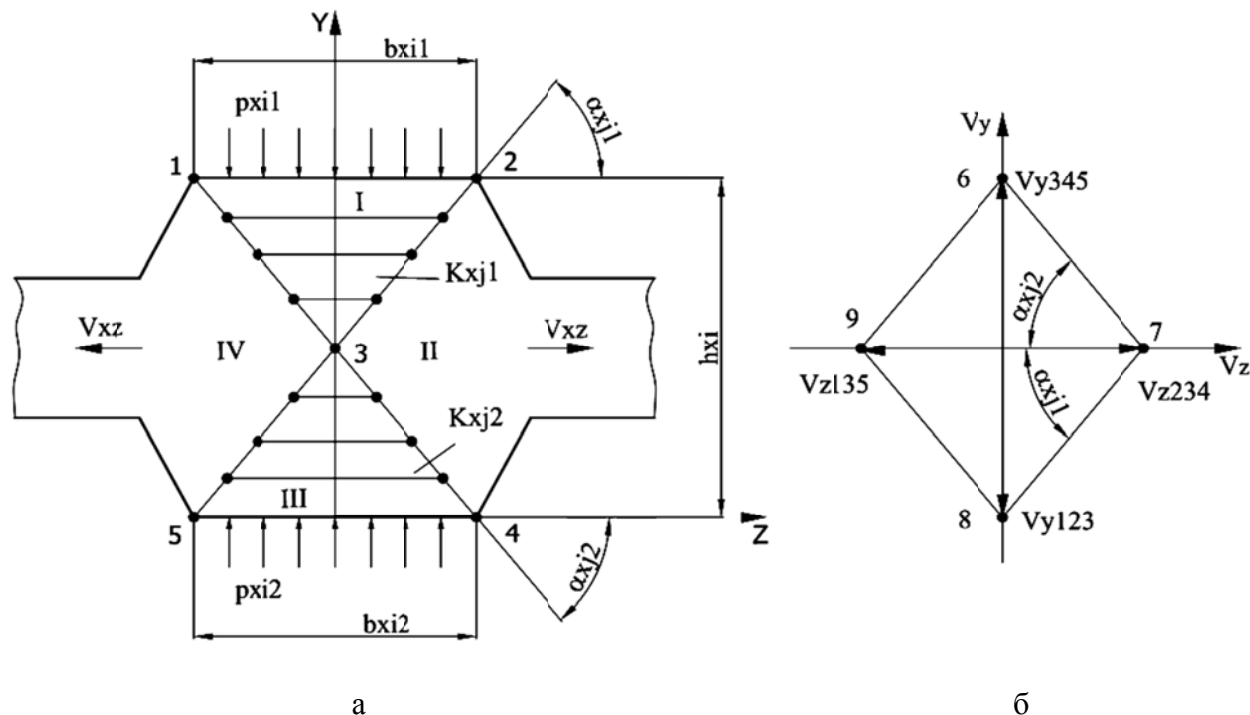


Рис. 2. Расчетные схемы кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости (а) и в плоскости годографа скоростей (б)

При этом количественному определению, следуя указанному выше, подлежат геометрические координаты особых точек 2, 3 и 4, характеризующих границы раздела жестких зон I, II и III в физической плоскости  $ZY$  (см. рис. 2, а), а также геометрические координаты особых точек 6, 7 и 8, характеризующих скорости перемещения данных жестких зон в плоскости годографа скоростей  $Z_v Y_v$  (см. рис. 2, б).

С учетом предположения о первоначально известной геометрической координате  $Y_3$  по отношению к другим геометрическим координатам и угловым параметрам  $\alpha_{xj1}$ ,  $\alpha_{xj2}$  физической плоскости  $ZY$  (рис. 2, а) очевидными являются следующие соотношения:

$$z_2 = b_{xi1} / 2; \quad y_2 = h_{xi}; \quad z_3 = 0,0; \quad z_4 = b_{xi2} / 2; \quad y_4 = 0,0; \quad (1)$$

$$\alpha_{xj1} = \arctg [(y_2 - y_3) / (z_2 - z_3)]; \quad \alpha_{xj2} = \arctg [(y_3 - y_4) / (z_4 - z_3)], \quad (2)$$

где  $h_{xj}$  – текущее значение толщины прокатываемого металла по длине очага деформации.

Аналогично по отношению к геометрическим координатам особых точек в плоскости годографа скоростей  $V_x$ ,  $V_z$  (см. рис. 2, б), следуя правилу ортогональности соответствующих характеристик, получим:

$$Z_{V7} = V_{z234}; Y_{V7} = 0,0; Z_{V6} = 0,0; Y_{V6} = Z_{V7} \operatorname{tg} \alpha_2; \quad (3)$$

$$Z_{V8} = 0,0; Y_{V8} = -Z_{V7} \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (4)$$

где  $V_{z234}$  – скорость перемещения прокатываемого участка, определяемая заданным масштабом построения кинематически возможных полей характеристик в плоскости годографа скоростей.

Таким образом, применительно к процессу горячей прокатки сварных швов задача по построению кинематически возможных полей характеристик сводится к определению геометрической координаты  $Y_3$ , количественная оценка которой, следуя основным положениям вариационных методов анализа [1, 3, 4], должна соответствовать минимуму суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma}$ .

Исходя из известных значений геометрических координат всех особых точек кинематически возможных полей характеристик (см. рис. 1), аналитическая зависимость для определения значения суммарной мощности сдвига может быть определена как:

$$\begin{aligned} N_{\Sigma j} &= 2[K_{xj1}l_{23}l_{78} + K_{xj2}l_{34}l_{67}] = \\ &= 2\left[ K_{xj1} \sqrt{(y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2} \sqrt{(Z_{V7} - Z_{V8})^2 + (Y_{V7} - Y_{V8})^2} + \right. \\ &\quad \left. + K_{xj2} \sqrt{(y_3 - y_4)^2 + (z_4 - z_3)^2} \sqrt{(Z_{V7} - Z_{V6})^2 + (Y_{V6} - Y_{V7})^2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l_{ij}$  – протяженности соответствующих отрезков на поле характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей;

$K_{xj1}$ ,  $K_{xj2}$  – текущие по высоте очага деформации значения сопротивления сдвигу металла наружного и внутреннего сварных швов, определяемые в зависимости от соответствующих температур нагрева [5–7].

$$2K_{xj1-2} = 1,15\sigma_{TCj}; \quad (6)$$

$$\sigma_{TCj} = \sigma_{T0} U^{a_1} \left( \frac{2}{3} \varepsilon_j \right)^{a_2} \left( \frac{t_j}{1000} \right)^{a_3}, \quad (7)$$

где  $U$  – скорость деформации;  $\sigma_{T0}$  – значение предела текучести материала;  $\varepsilon_j$  – относительное обжатие;  $a_1, a_2, a_3$  – эмпирические коэффициенты [7],  $t_j$  – текущее по высоте очага деформации значение температуры нагрева, определяемое по формуле (8).

$$t_j = t_{nej} + (t_{nnj} - t_{nej}) \cdot \left( \frac{y_{3j}}{h_j} \right)^{at}, \quad (8)$$

где  $t_{ne}$  – температура нагрева внутреннего шва;  $t_{nn}$  – температура нагрева наружного шва.

Количественная оценка аналитической зависимости (5), выполненная при различных соотношениях температур нагрева внешнего и внутреннего сварных швов. При этом температура нагрева внешнего сварного шва больше температуры нагрева внутреннего сварного шва, что обусловлено невозможностью нагрева внутреннего шва конструктивно.

Данная зависимость, представленная на рис. 2, показала, что во всех случаях функциональная связь значения суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma j}$  и относительной величины геометрической координаты  $y_3/h_{xj}$  является довольно монотонной и характеризуется наличием только одного ярко выраженного глобального минимума, который в зависимости от разности температур может сдвигаться в сторону большего значения температуры поверхности.

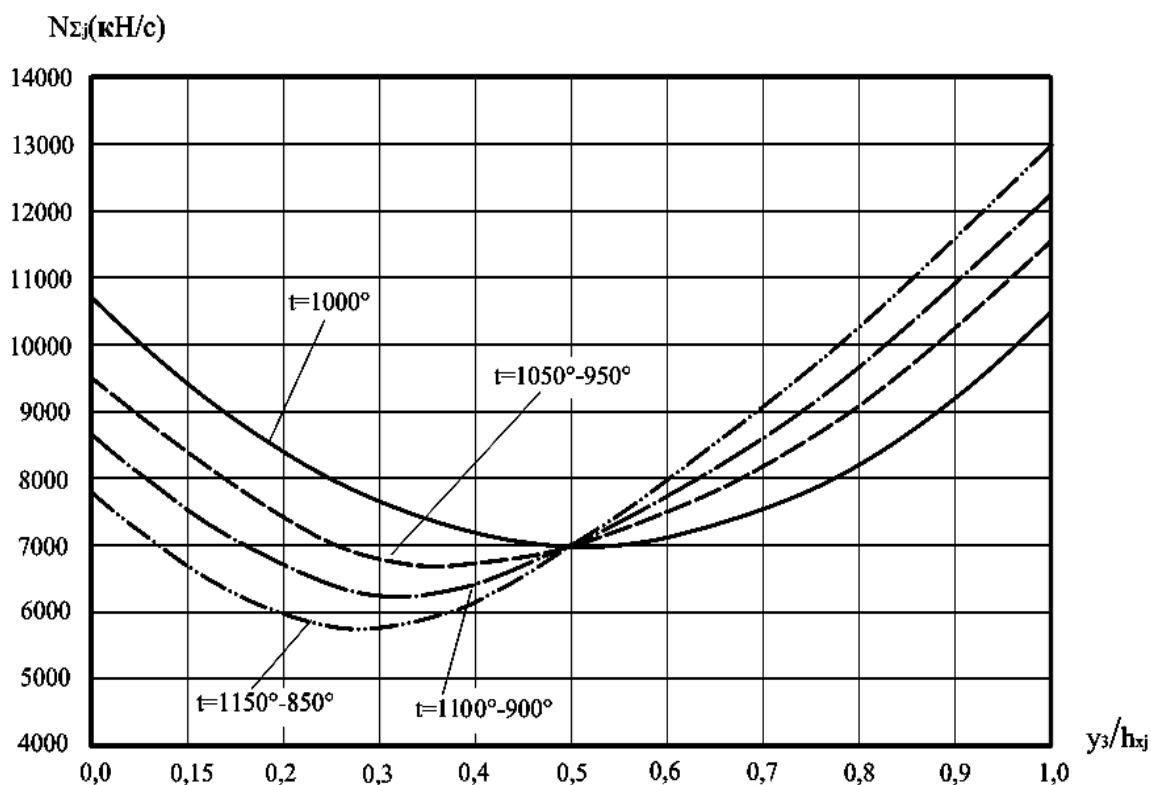


Рис. 2. Расчетные распределения значения суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma}$  в зависимости от относительной протяженности геометрической координаты  $y_3/h_{xj}$ , полученные при различных соотношениях температур нагрева внешнего и внутреннего сварных швов

Отмеченное послужило основанием для использования в качестве минимизационного решения при непосредственном определении  $y_3/h_{xj}$  метода целенаправленного перебора вариантов с переменным шагом [8], алгоритмическая последовательность которого изображена на рис. 4 и может быть представлена аналитически:

$$y_{3(t+1)}/h_{xi} = y_{3t}/h_{xi} + A_y \text{sign} \{N_{\Sigma i(t-1)} - N_{\Sigma it}\}, \quad (9)$$

где  $t$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения, начальные условия которого соответствовали  $(y_3/h_{xj})_t|_{t=1} = 0,0$ ;

$A_y$  – шаг изменения соотношения  $y_3/h_{xj}$ , величина которого была принята переменной по величине в зависимости от степени приближения к искомому результату (см. рис. 3), при этом на завершающем этапе количественная оценка данного шага не превысила  $10^{-5}$ ;

$sign[N_{\Sigma j(t-1)} - N_{\Sigma jt}]$  – градиентная функция знака, соответствующая количественно:

$$sign[N_{\Sigma j(t-1)} - N_{\Sigma jt}] = \begin{cases} +1 & \text{при } N_{\Sigma j(t-1)} > N_{\Sigma jt}; \\ 0 & \text{при } N_{\Sigma j(t-1)} \approx N_{\Sigma jt}; \\ -1 & \text{при } N_{\Sigma j(t-1)} < N_{\Sigma jt}. \end{cases} \quad (10)$$

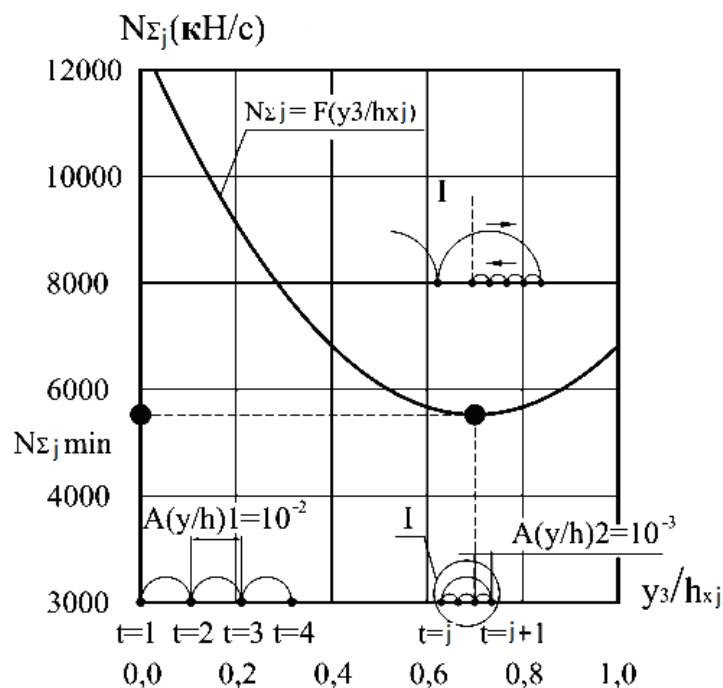


Рис. 3. Графическая интерпретация метода целенаправленного перебора вариантов с переменным шагом, используемого при определении минимума суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma j}$  в зависимости от относительной протяженности геометрической координаты  $y_3/h_{xj}$

Исходя из известного значения минимума суммарной мощности сдвига  $N_{\Sigma j min}$  и соответствующих этому значению кинематически возможных полей характеристик, а также исходя из интегрального условия равновесия  $p_{xi1}b_{xi1} = p_{xi2}b_{xi2}$ , могут быть определены и нормальные напряжения на контакте с наружным  $p_{xi1}$  и внутренним  $p_{xi2}$  усилениями, а вместе с этим и силы, действующие на наружные  $P_1$  и внутренние  $P_2$  рабочие валки.

$$p_{xi1} = p_{xi2}b_{xi2} / b_{xi1}; \quad (11)$$

$$p_{xi2}b_{xi2}Y_{V6} + p_{xi1}b_{xi1}Y_{V8} = p_{xi2}b_{xi2}(Y_{V6} + Y_{V8}) = N_{\Sigma j}. \quad (12)$$

Откуда:

$$p_{xi1} = N_{\Sigma j} / [b_{xi1}(Y_{V6} + Y_{V8})]; \quad p_{xi2} = N_{\Sigma j} / [b_{xi2}(Y_{V6} + Y_{V8})]; \quad (13)$$

$$P_1 = \sum_{i=2}^n 0,5 [p_{xi1}b_{xi1} + p_{x(i-1)}b_{x(i-2)}] \Delta x; \quad (14)$$

С учетом изложенного может быть определен и момент прокатки, действующий на наружный  $M_1$  рабочий валок (с выводом промежуточной текущей координаты  $X_{ci(i-1)}$ ):

$$X_{ci(i-1)} = \frac{2(x_i + 0,5 \Delta x)P_{x(i-1)l} + [P_{xi1} - P_{x(i-1)l}](x_i + 0,333 \Delta x)}{[P_{xi1} + P_{x(i-1)l}] \Delta x}; \quad (16)$$

$$M_1 = \sum_{i=2}^n 0,5 [P_{x(i-1)l} + P_{xi}] X_{ci(i-1)}, \quad (17)$$

где  $n$  – общее количество элементарных сечений, полученных при разбиении всей протяженности очага деформации (см. рис. 1) при горячей прокатке сварных швов.

## ВЫВОДЫ

В целом, представленная математическая модель с учётом неравномерности нагрева в сочетании с подпрограммами расчета геометрических параметров и механических свойств деформируемого металла, позволила уточнить существующие методики и составить полный алгоритм по автоматизированному расчету энергосиловых параметров процесса локальной термомеханической обработки сварных швов с использованием их горячей прокатки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапкин В. Ф. *Метод полей линий скольжения в теории процессов обработки металлов давлением* : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 158 с.
2. Сатонин А. В. *Теоретическое исследование напряжённо- деформированного состояния металла при локальной термомеханической обработке сварных швов* / А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, В. В. Плясунов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА. – 2007. – С. 428–433.
3. *Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций)* / И.Я. Тарновский и [др.]. – М. : Металлургия. – 1963. – 672 с.
4. Колмогоров В. Л. *Механика обработки металлов давлением* / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
5. Сатонин А. В. *Вариационное математическое моделирование деформированного состояния металла при прокатке с затеканием в целевой паз* / А. В. Сатонин, Д. Ю. Михеенко, А. А. Иванов // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1(20). – С. 111–117.
6. *Определение интегральных показателей напряженно- деформированного состояния металла при горячей прокатке* / Л. Н. Соколов, В. Ф. Потапкин, В. Н. Ефимов, В. Н. Демин, А. В. Сатонин // *Металлургия и коксохимия*. – 1987. – Вып. 94. – С. 7–10.
7. Федоринов В. А. *Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос* : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с.
8. Бронштейн И. Н. *Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов)* / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 720 с.

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

Дмитриев С. А. – аспирант кафедры АММ ДГМА;

Воротникова Е. А. – студент ДГМА;

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

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 17.01.2012 г.