

УДК 621.771: 621.774.21

Добронос Ю. К.
Дмитриев С. А.
Тимченко В. В.
Коробенко А. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СВАРНЫХ ШВОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

Среди существующих методик определения энергосиловых параметров процесса прокатки сварных соединений труб большого диаметра, следует отметить методики, такие как метод верхней оценки и метод полей линий скольжения [1].

Однако данные методики не позволяют учитывать изменение величины удвоенного сопротивления сдвигу $2k_c$ в очаге деформации вследствие неравномерного нагрева металла по толщине сварного шва [1].

Неравномерное распределение температуры в металле, характерное для сварки и других видов местной тепловой обработки металла, неустойчиво. С течением времени температура в неравномерно нагретом теле выравнивается, причём более нагретые части отдают тепло непосредственно соприкасающимися с ними менее нагретыми частями. Этот вид передачи тепла носит название теплопроводности. Поэтому в твёрдых телах теплопроводность является единственным механизмом распространения тепла [2].

Целью работы является математическое моделирование энергосиловых параметров процесса локальной термомеханической обработки сварных соединений на основе метода верхней оценки с учётом особенностей теплопроводности металла в зоне сварного шва.

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

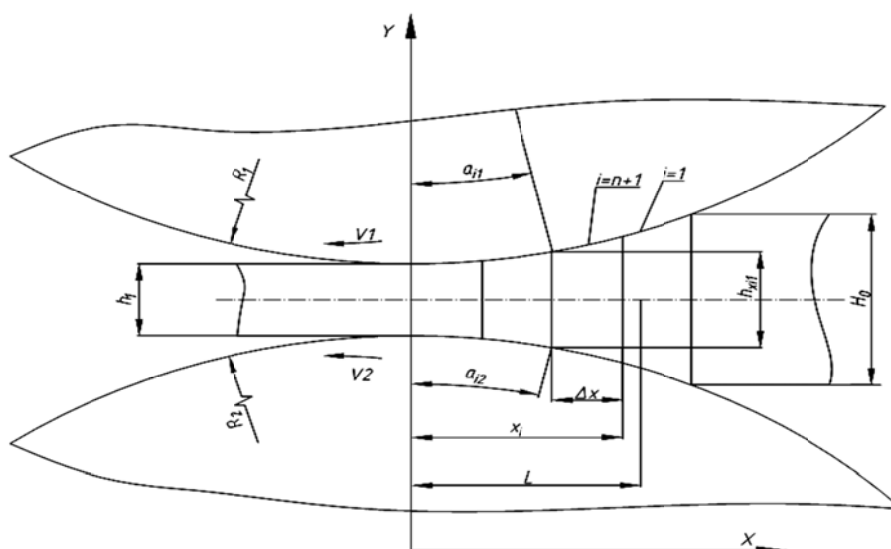


Рис. 1. Общий вид расчётной схемы очага деформации при горячей прокатке сварных швов

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 с учётом неравномерности нагрева по толщине очага деформации [1].

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

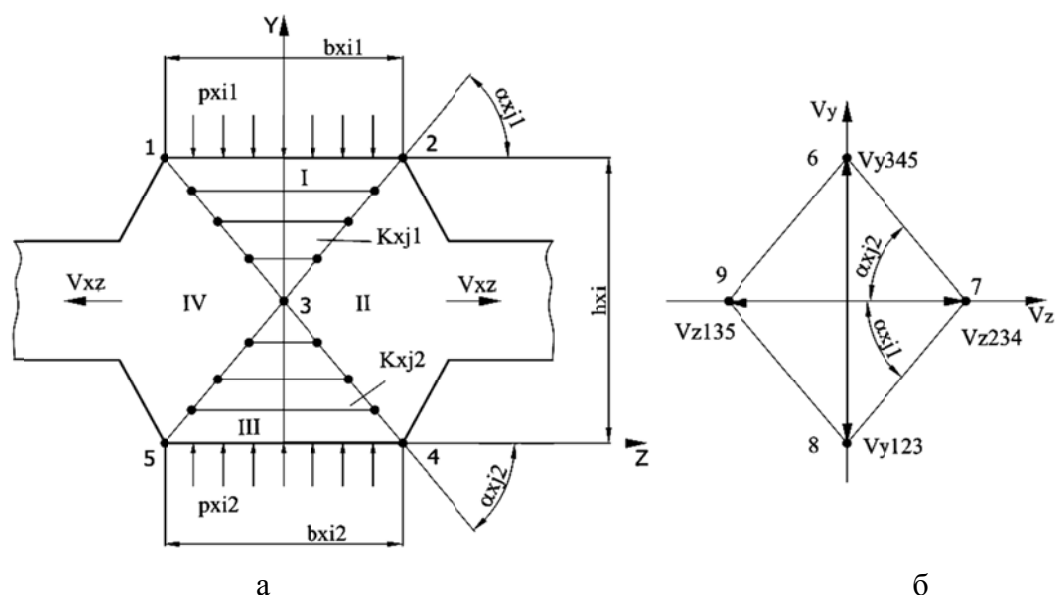


Рис. 2. Расчетные схемы кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости (а) и в плоскости годографа скоростей (б)

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:

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

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

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_{Σ} .

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:

$$N_{\Sigma j} = 2 \left[K_{xj1} l_{23} l_{78} + K_{xj2} l_{34} l_{67} \right] =$$

$$= 2 \left[K_{xj1} \sqrt{(y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2} \sqrt{(Z_{V7} - Z_{V8})^2 + (Y_{V7} - Y_{V8})^2} + \right.$$

$$\left. + K_{xj2} \sqrt{(y_3 - y_4)^2 + (z_4 - z_3)^2} \sqrt{(Z_{V7} - Z_{V6})^2 + (Y_{V6} - Y_{V7})^2} \right], \quad (5)$$

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].

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

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

где U – скорость деформации;

σ_{T0} – значение предела текучести материала;

ε_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).

В соответствии с методикой расчета неоднородности распределения температурных полей в процессе нагрева заготовок расчётная схема будет иллюстрирована рис. 3 [2]:

$$T_j(y, z, t) = T(0, 0, t) \left(-\frac{z^2}{4at} - \frac{y^2}{4a(t_0 + t)} \right), \quad (8)$$

$$T(0, 0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda\theta\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}}. \quad (9)$$

Откуда получим зависимость неоднородного распределения температуры нагрева по толщине очага деформации :

$$T_j(y, z, t) = \left(\frac{q}{2\pi\lambda\mathcal{G}\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \right)^{\left(-\frac{z^2}{4at} - \frac{y^2}{4a(t_0 + t)} \right)}, \quad (10)$$

где q – эффективная мощность нагревателя;
 \mathcal{G} – скорость перемещения нагревателя;
 λ – коэффициент теплопроводности стали;
 t_0 – время, за которое температура на поверхности нагреваемого участка станет равная заданной;
 α – коэффициент температуропроводности стали [2].

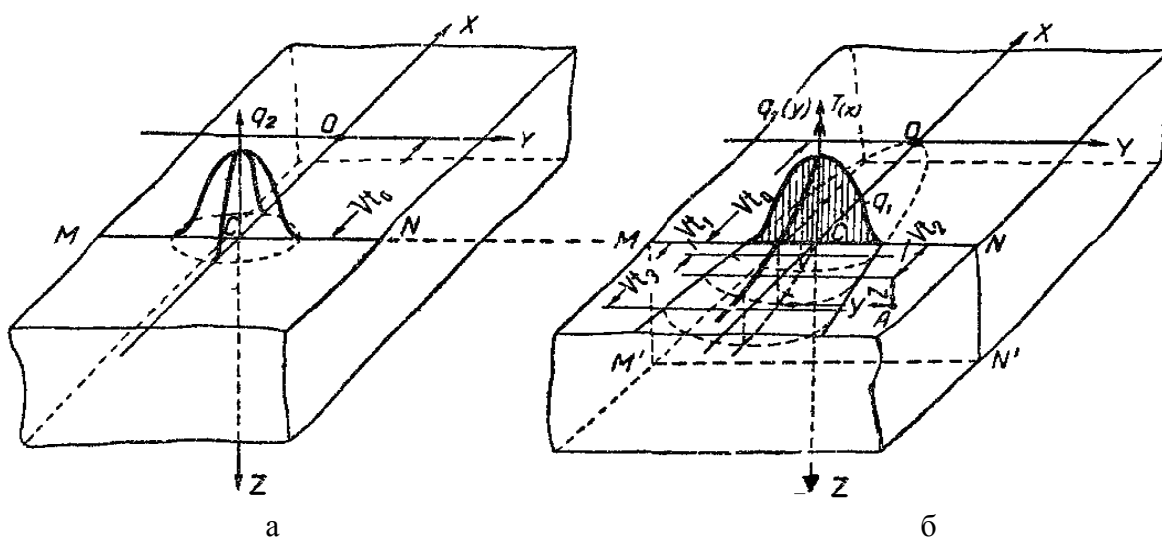


Рис. 3. Схема нагрева поверхности полубесконечного тела мощным быстро движущимся нормально-круговым источником (а) и эквивалентная ей схема нагрева нормально-линейным источником (б)

В результате расчетов были получены следующие зависимости распределения температуры нагрева по толщине очага деформации в зависимости от протяжённости геометрической координаты y_{3i} / H .

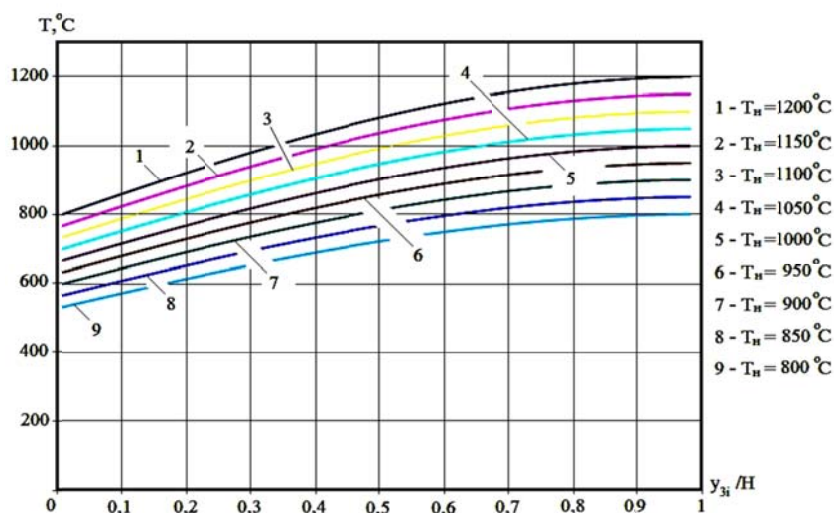


Рис. 4. Зависимость распределения температуры нагрева очага деформации в зависимости от протяжённости геометрической координаты y_{3i} / H

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. 5, 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.

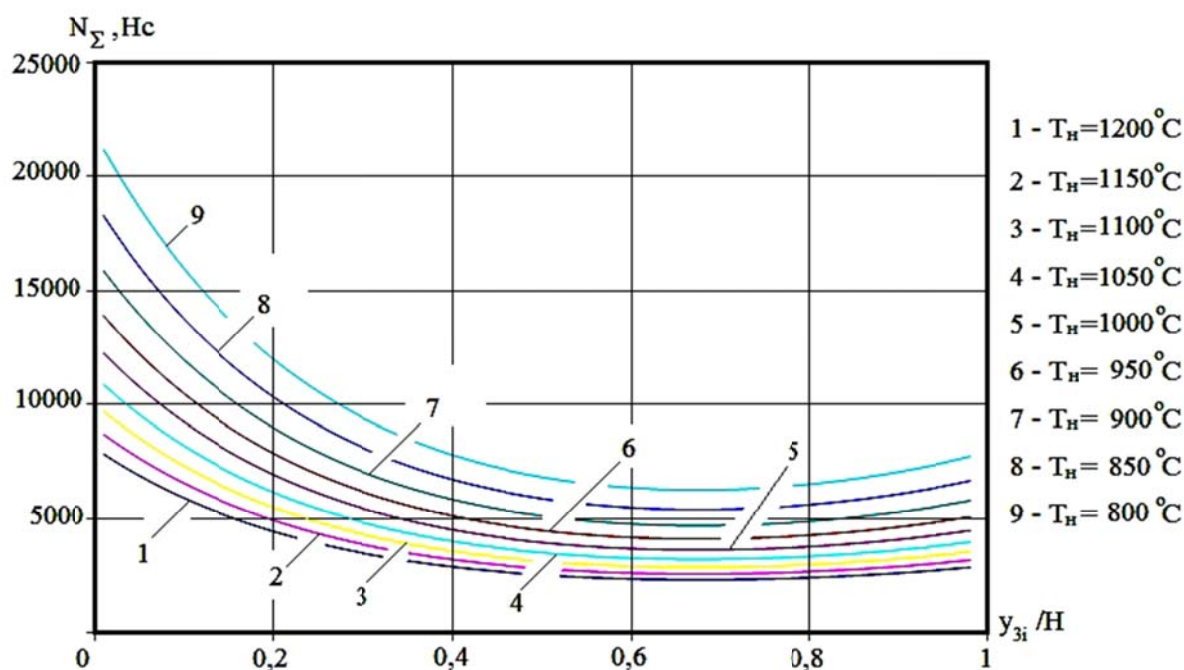


Рис. 5. Расчетные распределения значения суммарной мощности сдвига N_{Σ} в зависимости от относительной протяженности геометрической координаты y_3 / h_{xj} , полученные при различных соотношениях температур нагрева внешнего и внутреннего сварных швов

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. 6 и может быть представлена аналитически:

$$y_{3(t+1)} / h_{xi} = y_{3t} / h_{xi} + A_y \text{sign} \{ N_{\Sigma i(t-1)} - N_{\Sigma it} \}, \quad (11)$$

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. 6), 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:

$$sign[N_{\Sigma j(t-1)} - N_{\Sigma jt}] = \begin{cases} +1 \text{ при } N_{\Sigma j(t-1)} > N_{\Sigma jt}; \\ 0 \text{ при } N_{\Sigma j(t-1)} \approx N_{\Sigma jt}; \\ -1 \text{ при } N_{\Sigma j(t-1)} < N_{\Sigma jt}. \end{cases} \quad (12)$$

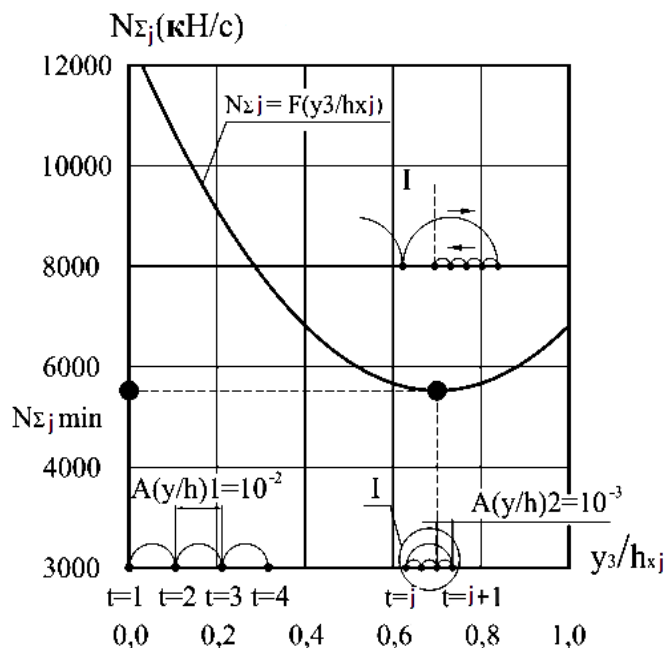


Рис. 6. Графическая интерпретация метода целенаправленного перебора вариантов с переменным шагом, используемого при определении минимума суммарной мощности сдвига $N_{\Sigma j}$ в зависимости от относительной протяженности геометрической координаты y_3/h_{xj}

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:

$$p_{xi1} = p_{xi2}b_{xi2}/b_{xi1}; \quad (13)$$

$$p_{xi2}b_{xi2}Y_{V6} + p_{xi1}b_{xi1}Y_{V8} = p_{xi2}b_{xi2}(Y_{V6} + Y_{V8}) = N_{\Sigma i}; \quad (14)$$

откуда:

$$p_{xi1} = N_{\Sigma j}/[b_{xi1}(Y_{V6} + Y_{V8})]; \quad p_{xi2} = N_{\Sigma j}/[b_{xi2}(Y_{V6} + Y_{V8})]; \quad (15)$$

$$P_1 = \sum_{i=2}^n 0,5[p_{xi1}b_{xi1} + p_{x(i-1)1}b_{x(i-2)1}]\Delta x; \quad (16)$$

$$P_2 = \sum_{i=2}^n 0,5[p_{xi2}b_{xi2} + p_{x(i-1)2}b_{x(i-2)2}]\Delta x. \quad (17)$$

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

$$X_{ci(i-1)} = \frac{2(x_i + 0,5 \Delta x)P_{x(i-1)l} + [P_{xi1} - P_{x(i-1)l}](x_i + 0,333 \Delta x)}{[P_{xi1} + P_{x(i-1)l}]\Delta x} \Delta x; \quad (18)$$

$$M_1 = \sum_{i=2}^n 0,5[P_{x(i-1)l} + P_{xi}]X_{ci(i-1)}, \quad (19)$$

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

ВЫВОДЫ

Полученная математическая модель с учётом неравномерности и неоднородности распределения температуры нагрева очага деформации позволила в полной мере учесть особенность распределения температуры нагрева по высоте очага деформации, а так же уточнить существующие методики по определению энергосиловых параметров процесса локальной термомеханической обработки сварных соединений с использованием процесса горячей прокатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов на основе метода верхней оценки / Ю. К. Добронос, С. А. Дмитриев, Е. А. Воротникова, С. А. Шевцов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – 240 с. – С. 38–43.*
2. Рыкалин Н. Н. *Расчёты тепловых процессов при сварке* / Н. Н. Рыкалин. – Москва, 1981. – 297 с.
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. – 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.

Добронос Ю. К. – канд. техн. наук, доц. каф. АММ ДГМА;

Дмитриев С. А. – аспирант ДГМА;

Тимченко В. В. – директор НИИПТМаш;

Коробенко А. С. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

НИИПТМаш – Научно-исследовательский институт подъемного и транспортного машиностроения, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 18.02.2013 г.