

ЧИСЛЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ В ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЯХ

Смолякова В. В.

Представлена математическая модель, позволяющая прогнозировать точность результирующих геометрических характеристик сортовых профилей, а также степень стабильности энергосиловых параметров процесса прокатки по длине прокатываемой заготовки с учетом стохастического изменения исходных технологических параметров и конструктивных особенностей чистовых рабочих клетей сортопрокатных станов. Приведены расчетные распределения продольной разнотолщинности углового профиля для случая прокатки в клетях с различными значениями модуля жесткости, дана статистическая оценка полученным результатам. Данная модель может быть использована для оптимизации технологических режимов прокатки и конструктивных параметров чистовых рабочих клетей сортопрокатных станов.

Представлена математична модель, що дозволяє прогнозувати точність результуючих геометричних характеристик сортових профілів, а також ступінь стабільності енергосилових параметрів процесу прокатки по довжині заготовки, що прокочують, з урахуванням стохастичної зміни вихідних технологічних параметрів і конструктивних особливостей чистових робочих клітей сортопрокатних станів. Наведено розрахункові розподіли поздовжньої різнотолщинності кутового профілю для випадку прокатки в клітях з різними значеннями модуля жорсткості, дана статистична оцінка отриманих результатів. Дана модель може бути використана для оптимізації технологічних режимів прокатки та конструктивних особливостей чистових робочих клітей сортопрокатних станів.

The mathematical model allowing to predict accuracy of resulting geometric characteristics of section bars as well as stability degree of energy-power parameters of rolling process along length of rolled billet taking into account a stochastic changes of initial process parameters and design features of finishing work stands section mills is represented. Design distributions of longitudinal crown of angle section in case of to rolling in stands with different rigidity modulus are given, statistical estimation of findings is produced. The model can be used for optimization of technological modes and constructive parameters of finishing work stands section rolling mills.

Смолякова В. В.

канд. техн. наук, ассистент кафедры ТиУП ДГМА

vlada1057@rambler.ru

УДК 621.771.01: 621.771.26

Смолякова В. В.

**ЧИСЛЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ
ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ В ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЯХ**

Проектирование новых и модернизация существующих технологических процессов прокатки и прокатного оборудования в современных условиях предполагает высокую степень научной и экономической обоснованности принимаемых решений. Для достижения указанных требований необходимо соответствующее программное обеспечение и математический аппарат, позволяющий учесть достаточное количество факторов, влияющих на показатели процесса прокатки, и определить последние с достаточной степенью точности в необходимом объеме.

Среди показателей качества готового металлопроката, в том числе и сортовых профилей, одно из главных мест занимает точность геометрических характеристик, к основным количественным оценкам которой относится продольная разнотолщинность, т. е. размах изменения конечной толщины h_1 по длине прокатываемых заготовок. Данный показатель позволяет оценить прокатанный профиль как с точки зрения годности, соответствия существующим допускам, так и с точки зрения рациональности затраты металла на каждый погонный метр производимого профиля.

В самом общем случае условий реализации процессов прокатки величина продольной разнотолщинности получаемых сортовых профилей зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются исходная разнотолщинность подката Δh_0 , изменение величины предварительного межвалкового зазора ΔS_0 , обусловленное радиальным биением рабочих валков, погрешностью отработки нажимных механизмов, температурными деформациями и т. д., а также стохастические изменения ширины b , показателя механических свойств $\Delta \sigma_{S_0}$, температуры Δt и скорости ΔV_1 прокатки, коэффициентов внешнего трения Δf , величины переднего T_1 и заднего T_0 натяжений [1]. Количественно указанное выше можно представить в виде дифференциального уравнения, вытекающего из известной зависимости Головина-Симса [2]:

$$dh_1 = dS_0 + dP/G_{кл} , \tag{1}$$

где $G_{кл}$ – модуль жесткости рабочей клетки соответствующего прокатного стана, определяемый упругими деформациями рабочих валков, узла станин и других основных элементов её силовой линии [3, 4].

Целью работы является создание математической модели, позволяющей прогнозировать изменение толщины h_1 по длине прокатываемого сортового профиля с учетом основных факторов, влияющих на данный параметр. Для этого было осуществлено разбиение исходной длины рассматриваемой заготовки на конечное множество участков, каждый из которых имел порядковый номер $k = 1 \dots n$ (рис. 1).

Текущие по длине прокатываемой заготовки значения исходной толщины h_0 , температуры t_0 и опорного значения сопротивления деформации σ_{S_0} определялись по зависимостям вида:

$$h_{0k} = h_{0\min} + A_{h_{00}} \frac{x_k}{L_0} + A_{h_{01}} \sin\left(2\pi \frac{x_k}{L_1}\right) + A_{h_{02}} \sin\left(2\pi \frac{x_k}{L_2}\right); \quad (2)$$

$$t_{0k} = t_{0\max} - A_{t_0} \frac{x_k}{L_0}; \quad \sigma_{S_0k} = \sigma_{S_0\min} + A_{\sigma_{S_0}} \frac{x_k}{L_0}, \quad (3)$$

где $h_{0\min}$ – минимальное значение исходной толщины, соответствующее первому ($k = 1$) поперечному сечению прокатываемой заготовки;

$A_{h_{00}}, A_{h_{01}}, A_{h_{02}}$ – низко- и высокочастотные составляющие исходной продольной разнотолщинности;

x_k – геометрическая координата, соответствующая расстоянию от k -го участка до плоскости осей рабочих валков;

L_0 – исходная длина прокатываемой заготовки;

L_1, L_2 – длины окружностей рабочих валков в двух предыдущих проходах, равные $\pi D_{\text{в1(2)}}$;

$A_{t_0}, A_{\sigma_{S_0}}$ – полуразмах изменения значений температур и напряжений текучести по длине прокатываемой заготовки.

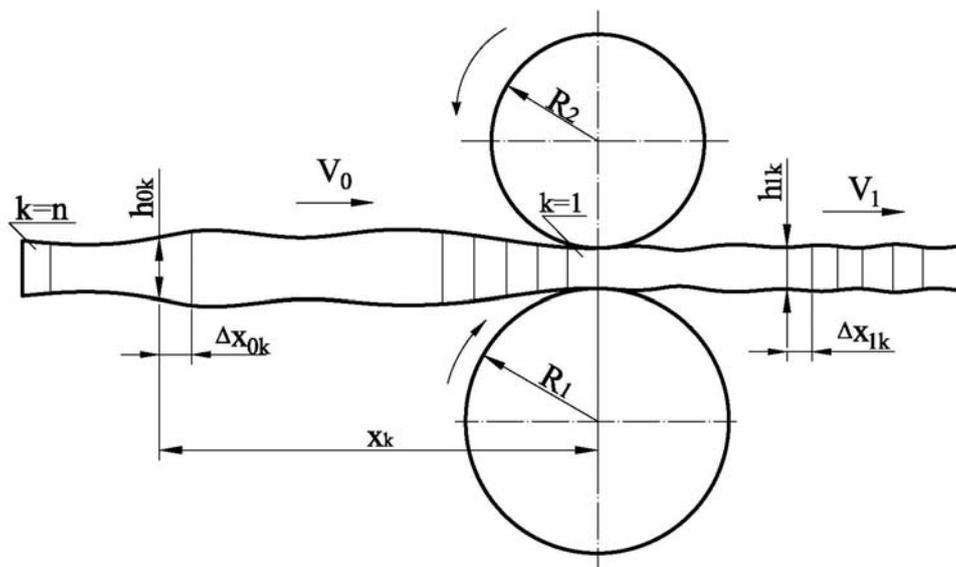


Рис. 1. Расчетная схема к численному математическому моделированию точности геометрических характеристик прокатываемого сортового профиля

В первом цикле расчета ($k = 1; x_k = 0; h_{0k} = \bar{h}_0$) на основе зависимости (1) производили определение номинального значения исходной величины межвалкового зазора \bar{S}_0 :

$$\bar{S}_0 = \bar{h}_1 - \bar{P} / G_{\text{кл}} = \bar{h}_1 - P_{k|_{k=1}} / G_{\text{кл}}. \quad (4)$$

В последующих циклах расчета текущее значение исходного межвалкового зазора S_{0k} вычисляли с учетом величины радиального биения рабочих валков A_{S_0} в соответствии с синусоидальным законом вида:

$$S_{0k} = \overline{S_0} + 2A_{S_0} \sin(x_k/R_g) \tag{5}$$

и именно данное значение использовали в качестве критериального при оценке сходимости итерационной процедуры расчета конечной толщины полосы h_{1k} , получаемой в каждом k -ом цикле решения.

Непосредственно организация данной процедуры была осуществлена на основе метода дихотомии [5] в соответствии со следующей алгоритмической схемой:

$$h_{1k(t+1)} = (h_{1\min k_t} + h_{1\max k_t})/2; \tag{6}$$

$$h_{1\max k_t} \Big|_{t=1} = h_{0t}; \quad h_{1\min k_t} \Big|_{t=1} = 0,55h_{0k}; \tag{7}$$

$$S_{0k_t} = h_{1k_t} - P_{k_t} / G_{кл}; \tag{8}$$

$$h_{1\min k_t} = h_{1k_t}; \quad h_{1\max k_t} = h_{1\max k_{(t-1)}} \quad \text{при } S_{0k_t} < S_{0k}; \tag{9}$$

$$h_{1\min k_t} = h_{1\min k_{(t-1)}}; \quad h_{1\max k_t} = h_{1k_t} \quad \text{при } S_{0k_t} > S_{0k}, \tag{10}$$

где t – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения, для которой в качестве начальных условий при $t = 1$ использовали соотношение вида:

$$h_{1\max k_t} \Big|_{t=1} = h_{0k}; \quad h_{1\min k_t} \Big|_{t=1} = 0,6h_{0k}.$$

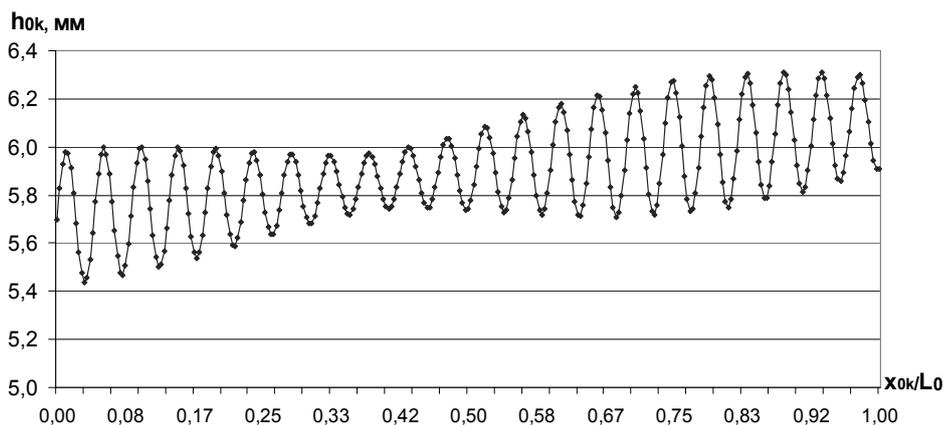
Помимо расчета текущего значения конечной толщины h_{1k} в рамках данной математической модели возможно вычисление суммарной результирующей длины прокатанного сортового профиля L_1 :

$$L_1 = \sum_{k=1}^n \Delta x_{1k}; \quad \Delta x_{1k} = \Delta x_0 h_{0k} / h_{1k} = (L_0 / n) h_{0k} / h_{1k}. \tag{11}$$

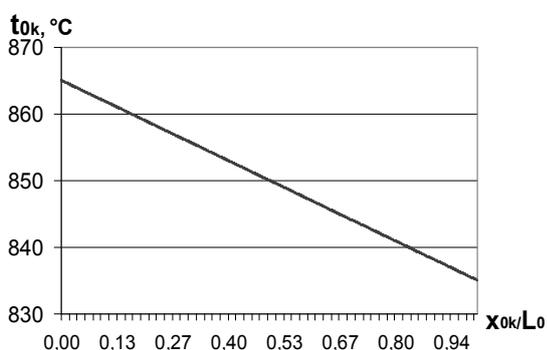
В качестве примера результатов численной реализации рассмотренной математической модели на рис. 2, 3 представлены расчетные распределения исходных и конечных параметров применительно к процессу прокатки угловых профилей в чистовой рабочей клетки среднесортного стана 330 Краматорского металлургического завода. Результирующие распределения конечной толщины полок горячекатаных угловых профилей h_{1k} по длине прокатываемой заготовки, а также вертикальной составляющей силы P_{yk} и суммарного момента $M_{\Sigma k}$ представлены для случаев прокатки с модулем жесткости клетки $G_{кл} = 1000$ кН/мм и $G_{кл} = 500$ кН/мм (см. рис. 3).

При этом силы и моменты прокатки в каждом k -ом цикле решения вычислялись с использованием регрессионных зависимостей, полученных на основе численной математической модели, разработанной с использованием рекуррентного решения конечно-разностной формы условия баланса энергетических затрат выделенных элементарных объемов. Подробное описание указанного моделирования изложено в работах [6, 7].

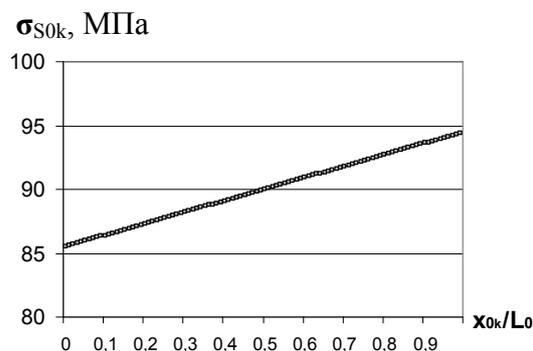
В табл. 1 представлены результаты статистической обработки полученных расчетных распределений (см. рис. 3).



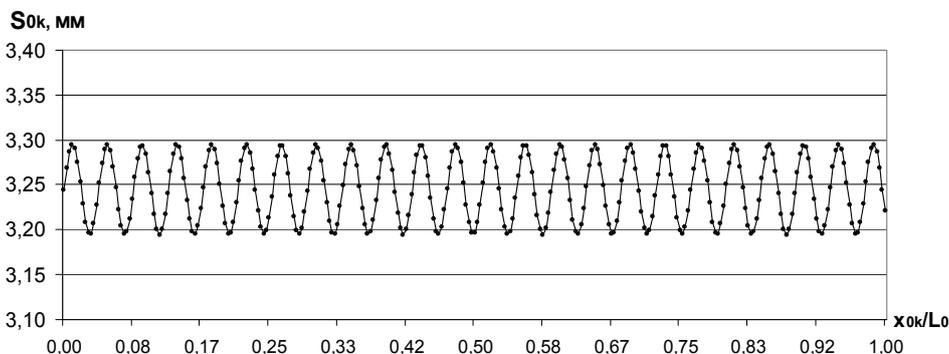
а



б



в



г

Рис. 2. Расчетные распределения начальной толщины полки исходной заготовки h_0 , температуры t_0 , опорного значения сопротивления деформации σ_{S_0} и величины межвалкового зазора S_0 в зависимости от относительной координаты рассматриваемого сечения по длине X_{0k} / L_0 : стан 330, уголок 60×40 мм; $\bar{h}_0 = 6$ мм; $\bar{h}_1 = 4$ мм; $L_0 = 24$ м

Обобщая представленные результаты, можно сделать вывод о достаточно существенном влиянии исходных технологических и конструктивных параметров процесса горячей прокатки угловых профилей в чистовых рабочих клетях сортовых прокатных станков на результирующие геометрические характеристики. В частности, при увеличении значения модуля жесткости данных рабочих клетей с $G_{кл} = 500$ кН/мм до $G_{кл} = 1000$ кН/мм размах изменения конечной толщины полок уменьшился с 0,463 мм до 0,332 мм (см. табл. 1, рис. 3, а), т. е. снизился на 28 %. Аналогичная картина имеет место при снижении размаха стохастического

изменения исходной толщины полок, температуры и механических свойств металла прокатываемой заготовки, а также при снижении радиальных биений рабочих валков. Одновременно с этим повышение модуля жесткости рабочих клеток обуславливает весьма существенное увеличение размаха изменения энергосиловых параметров рассматриваемого процесса (см. табл. 1, рис. 3, б, в).

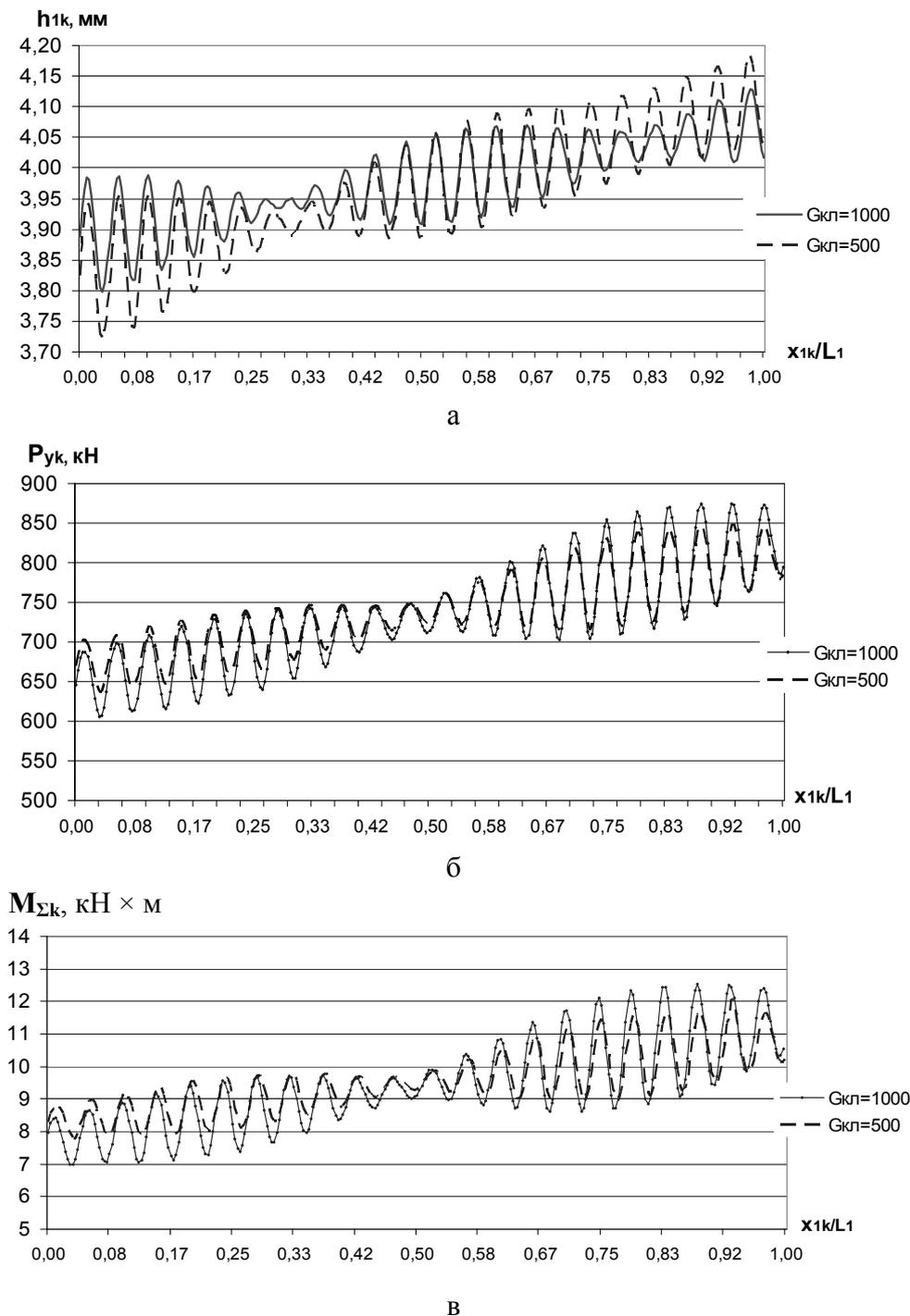


Рис. 3. Расчетные распределения конечной толщины h_{1k} , вертикальной составляющей силы P_{yk} и суммарного момента $M_{\Sigma k}$ прокатки, по длине L_1 углового профиля, прокатываемого в чистой рабочей клетке с различным значением модуля жесткости $G_{кл}$ (кН/мм):

стан 330, уголок 60×40 мм; $\bar{h}_0 = 6$ мм; $\bar{h}_1 = 4$ мм; $L_0 = 24$ м

Таблица 1

Сопоставление результатов статистической обработки результирующих геометрических и энергосиловых параметров для случаев горячей прокатки угловых профилей в клетях с модулем жесткости $G_{кл} = 500$ кН/мм и $G_{кл} = 1000$ кН/мм (см. рис. 3)

	S_{0_k}		h_{1_k}		P_{y_k}		M_{Σ_k}	
	$G_{кл} = 500$	$G_{кл} = 1000$						
\bar{x}	2,4898	3,2452	3,9683	3,9799	739,2	734,9	9,54	9,43
x_{\min}	2,4392	3,1946	3,7211	3,7976	636,4	606,2	7,78	6,99
x_{\max}	2,5392	3,2946	4,1845	4,1295	847,8	874,5	12,08	12,53
Δx	0,1	0,1	0,4634	0,332	211,3	268,2	4,30	5,54
$\delta, \%$	4,02	3,08	11,678	8,34	28,6	36,5	45,09	58,7
D_x	0,0012	0,00124	0,0097	0,0044	2501	4125,55	0,911	2,091
σ_x	0,0346	0,0353	0,0985	0,0663	50	64,23	0,954	1,45
ν_x	1,39	1,09	2,48	1,67	6,77	8,74	10,01	15,34

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать результирующую продольную разнотолщинность прокатываемых сортовых профилей, их конечную длину, а также степень стабильности энергосиловых параметров процесса прокатки по длине прокатываемой заготовки с учетом стохастического изменения исходных разнотолщинности, температуры, механических свойств металла и радиального биения рабочих валков. С помощью разработанной модели и соответствующих программных средств получены расчетные распределения указанных исходных и результирующих параметров для случая горячей прокатки неравнополочных угловых профилей, произведена статистическая обработка результатов. Данная математической модель может быть использована для оптимизации существующих и проектирования новых технологических режимов и конструктивных параметров чистовых рабочих клетей сортопрокатных станов с целью достижения требуемых показателей качества сортовых профилей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочков Н. Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах / Н. Г. Бочков. – М. : Металлургия, 1988. – 312 с.
2. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
3. Алгоритмы расчетов основных параметров прокатных станов / В. П. Полухин, В. Н. Хлопонин, Е. В. Сигитов [и др.]. – М. : Металлургия, 1975. – 232 с.
4. Василев Я. Д. Теория поздвожньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв, – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
5. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
6. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей сортовой прокатке угловых профилей / А. В. Сатонин, В. В. Смолякова, П. М. Стежкин // Известия вузов. Черная металлургия. – Москва : МИСИС, 2010. – № 11. – С. 16–21.
7. Регрессионное математическое моделирование энергосиловых параметров процесса прокатки угловых профилей / А. В. Сатонин, З. А. Александрова, В. В. Смолякова, П. М. Стежкин // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1(20). – С. 261–264.

Статья поступила в редакцию 31.10.2011 г.