

УДК 621.77.014

Сатонін О. В.**Коренко М. Г.****Коробко Т. Б.****Присяжний А. Г.**

РЕГРЕСІЙНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛИ ПРОКАТКИ ПРИ ОТРИМАННІ ХОЛОДНОКАТАНИХ ШТАБ НА БЕЗПЕРЕРВНИХ І РЕВЕРСИВНИХ СТАНАХ

У статті обґрунтована актуальність вирішення задачі з математичного забезпечення роботи автоматизованих систем управління технологічним процесом отримання холоднокатаних штаб на безперервних і реверсивних станах. Для досягнення максимального ступеня швидкодії зазначених систем запропоновано числові математичні моделі напружено-деформованого стану металу замінювати їх регресійними аналогами.

Розширення сортаменту та підвищення якості холоднокатаних штаб можливо за рахунок використання автоматичних систем управління технологічним процесом прокатки (АСУТП), а також на основі використання до зазначеного процесу методів оптимізації [1–10]. Тому рішення задачі математичного забезпечення роботи АСУТП безперервних і реверсивних листових станів є досить актуальним.

З урахуванням особливостей технології та обладнання сучасних прокатних станів ефективна робота АСУТП повинна базуватися на математичних моделях, які в режимі реального часу дозволяють достовірно визначати значення таких інтегральних показників напружено-деформованого стану металу, як, наприклад, сила прокатки [8–10]. Безпосереднє використання для цієї мети інженерних [11–15] або числових [16–19] математичних моделей вимагає великих витрат машинного часу на їх числову реалізацію і тому не забезпечує швидкодію АСУТП, що призведе до зниження показників якості холоднокатаних штаб. Цей недолік згідно з рекомендаціями авторів роботи [20] може бути усунутий шляхом заміни зазначених математичних моделей їх регресійними аналогами, що мають порівняно просту структуру та одержані на основі теорії планованого експерименту [21–24].

Метою статті є розробка та оцінка ступеня достовірності регресійної математичної моделі сили холодної прокатки штаби стосовно до безперервного 4х-клітьового стану ПАТ «ММК ім. Ілліча».

Враховуючи нелінійний характер залежності інтегральних показників напружено-деформованого стану металу при холодній тонколистовій прокатці від факторів, які на них впливають, для регресійного математичного моделювання сили прокатки скористалися квадратичною математичною моделлю виду [20]:

$$P_{\text{рег}} = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq \frac{k(k-1)}{2}} b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де i, j – порядковий номер фактору, причому $i \leq j$;

k – загальна кількість факторів;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коефіцієнти регресії, які підлягають визначенню та загальна кількість яких дорівнює $(k+1)(k+2)/2$;

x_i, x_j – кодовані значення факторів (+, -, 0 та ін.), що визначаються як [21–24]:

$$x_{i(j)} = \frac{X_{i(j)}^* - X_{i(j)}^0}{\Delta_{i(j)}}, \quad (2)$$

де $x_{i(j)}^*$ – натуральне значення i -го (j -го) фактору, причому $x_{i(j)}^{\min} \leq x_{i(j)}^* \leq x_{i(j)}^{\max}$ ($x_{i(j)}^{\min}, x_{i(j)}^{\max}$ – відповідно мінімально та максимально можливі натуральні значення i -го (j -го) фактору, що встановлюються за практичними даними);

$x_{i(j)}^0$ – натуральне значення i -го (j -го) фактору на нульовому рівні, що задовольняє умовам сталого процесу прокатки;

$\Delta_{i(j)}$ – інтервал варіювання i -го (j -го) фактору.

Для побудови регресійної математичної моделі (1) скористалися рекомендаціями авторів роботи [20]. При цьому за певним планом, що складається з N дослідів, проводили числовий експеримент, який полягав у виконанні розрахунків значень цільової функції залежно від заданого в кожному u -тому досліді ($1 \leq u \leq N$) набору можливих значень факторів (x_i або x_i^*), які на неї впливають. В якості цільової функції застосували числову математичну модель [19], що дозволяє при визначенні значень сили прокатки більш повно врахувати особливості сучасних технологій та обладнання для отримання холоднокатаних штаб. Згідно з рекомендаціями авторів роботи [20] числовий експеримент проводили за композиційним планом Хартлі [22, 23], змінюючи у встановлених межах значення таких факторів, як товщина гарячекатаного підкату (H_0), товщина штаби до та після прокатки (відповідно h_0 і h_1), вихідна межа текучості деформованого металу (σ_{T0}), середнє значення показника сил зовнішнього контактного тертя (f_c^*), а також напруження сил переднього та заднього натягнення штаби (відповідно σ_1 і σ_0).

Позначивши для кожного u -го досліді результати визначення за числовою математичною моделлю значень сили прокатки як $P_{\text{числ}_u}$, розрахунок значень коефіцієнтів регресії здійснювали на основі методу найменших квадратів відповідно до алгоритмічної послідовністю виду [23]:

$$\lambda_2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2; \quad (3)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N (x_i^2 x_j^2)_u; \quad (4)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^4; \quad (5)$$

$$a = \frac{k\lambda_2^2}{\lambda_4 - \lambda_3 + k\lambda_3 - k\lambda_2^2} + 1; \quad (6)$$

$$b = \frac{\lambda_2}{\lambda_4 - \lambda_3 + k\lambda_3 - k\lambda_2^2}; \quad (7)$$

$$c = \frac{1}{\lambda_4 - \lambda_3}; \quad (8)$$

$$d = \frac{\lambda_3 - \lambda_2^2}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3 + k\lambda_3 - k\lambda_2^2)}; \quad (9)$$

$$b_0 = \frac{a}{N} \sum_{u=1}^N P_{\text{числ}_u} - \frac{b}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 P_{\text{числ}_u}; \quad (10)$$

$$b_i = \frac{1}{N\lambda_2} \sum_{u=1}^N x_{i_u} P_{\text{числ}_u}; \quad (11)$$

$$b_{ii} = \frac{c}{N} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 P_{\text{числ}_u} - \frac{d}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 P_{\text{числ}_u} - \frac{b}{N} \sum_{u=1}^N P_{\text{числ}_u}; \quad (12)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N\lambda_3} \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u P_{\text{числ}_u}, \quad (13)$$

де $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – парні моменти плану експерименту;

a, b, c, d – коефіцієнти, які повинні задовольняти системі рівнянь:

$$\begin{cases} a - bk\lambda_2 = 1; \\ b + (dk - c)\lambda_2 = 0; \\ b\lambda_2 + [d(k - 1) - c]\lambda_3 + d\lambda_4 = 0. \end{cases} \quad (14)$$

З урахуванням рекомендацій авторів роботи [20] формули (3) - (14) використовували для побудови регресійної математичної моделі (1) стосовно до отримання холоднокатаних штаб в умовах цеху холодної прокатки ПАТ «ММК ім. Ілліча». Як приклад в табл. 1 та 2 відповідно представлені вихідні дані для проведення числового експерименту, а також результати розрахунку коефіцієнтів регресії для випадку прокатки штаби зі сталі 08 кп з кінцевими розмірами поперечного перерізу 0,38×1 020 мм в 3-й кліті безперервного стану 1700 ПАТ «ММК ім. Ілліча».

Таблиця 1

Факторний простір плану Хартлі другого порядку з ядром типу 2^{7-2} для розрахунку сили холодної прокатки $P_{\text{рег}}$

Кодовані значення факторів	Фактори та їх натуральні значення						
	x_1 (H_0)	x_2 (h_0)	x_3 (h_1)	x_4 (σ_{T0})	x_5 (f_c^*)	x_6 (σ_0)	x_7 (σ_1)
	мм	мм	мм	МПа	-	МПа	МПа
1	1,83	0,80	0,54	263	0,11	269	296
0	1,60	0,70	0,47	230	0,10	235	259
-1	1,37	0,60	0,40	197	0,09	201	222

Таблиця 2

Коефіцієнти рівняння регресії (1) для розрахунку сили холодної прокатки $P_{\text{рег}}$, які відповідають кодованим значенням факторів

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
9305,928	665,409	1604,101	-2191,3	1006,615	716,368	-667,24	-268,20
b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{44}	b_{55}	b_{66}	b_{77}	b_{12}
-102,998	-292,18	118,970	29,487	14,688	3,491	-7,014	195,510
b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{23}	b_{24}	b_{25}
-129,613	43,083	60,850	-27,827	-21,348	250,244	142,658	125,060
b_{26}	b_{27}	b_{34}	b_{35}	b_{36}	b_{37}	b_{45}	b_{46}
-107,670	2,111	-218,946	-278,44	166,991	36,919	114,821	-37,635
b_{47}	b_{56}	b_{57}	b_{67}				
-71,407	-52,132	-65,711	33,190				

Слід зазначити, що врахування максимальної кількості факторів (наприклад, 7-ми) доцільне при вирішенні на їх основі оптимізаційних задач, але дещо ускладнює процедуру визначення значень коефіцієнтів $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}, b_i^*, b_{ii}^*, b_{ij}^*$ у зв'язку з необхідністю обробки

великого масиву числових даних. Тому побудову регресійних математичних моделей, призначених для використання в складі АСУТП, можна спростити за рахунок зменшення числа факторів, що в них враховуються. При цьому, розглядати потрібно тільки ті фактори, значення яких дозволяє реєструвати контрольно-вимірювальна апаратура даного безперервного або реверсивного стану холодної прокатки. Наприклад, в умовах стану холодної прокатки 1700 ПАТ «ММК ім. Ілліча» забезпечена можливість вимірювання товщини, а також сил заднього T_0 і переднього T_1 натягнення штаб, що прокатуються. У цьому випадку побудувати рівняння (1) можна при варіюванні значеннями лише 4^х факторів (h_0 , мм; h_1 , мм; T_0 , кН; T_1 , кН), що істотно зменшує обсяг числових даних, які обробляються (більш, ніж в 2 рази). Приймаючи за основу факторний простір, який представлено в табл. 1 для розглянутого вище випадку, значення факторів H_0 , σ_{T0} і f_c^* залишили постійними і відповідними сталому процесу прокатки, а перехід від змінних σ_0 і σ_1 до змінних T_0 і T_1 здійснили за формулами $T_0 = \sigma_0 h_0 B$ і $T_1 = \sigma_1 h_1 B$ (B – ширина штаби). При цьому отримали, що значення величин T_0 і T_1 на нульовому рівні дорівнювали 168 кН і 124 кН відповідно, а інтервали їх варіювання будуть $144 \text{ кН} \leq T_0 \leq 192 \text{ кН}$ і $106 \text{ кН} \leq T_1 \leq 142 \text{ кН}$. Застосували композиційний план Хартлі для чотирьохфакторного простору [23, 24], по рівняннях (3) – (14) розрахували значення коефіцієнтів регресії. В результаті отримали регресійні математичні моделі сили прокатки штаби зі сталі 08 кп з кінцевими розмірами поперечного перерізу 0,38 x 1020 мм в 3^{-й} кліті безперервного стану 1700 ПАТ «ММК ім. Ілліча», які відповідають кодованому виразу факторів:

$$P_{\text{рег}} = 9312,546 + 2266,272x_1 - 1912,635x_2 - 662,021x_3 - 261,082x_4 - \\ - 267,073x_1^2 + 20,537x_2^2 - 9,324x_3^2 - 19,489x_4^2 + 131,09x_1x_2 - 28,94x_1x_3 - \\ - 86,864x_1x_4 + 118,476x_2x_3 + 122,390x_2x_4 + 14,211x_3x_4, \text{ кН.} \quad (15)$$

і натуральному виразу факторів:

$$P_{\text{рег}} = 9312,546 + 22622,720(h_0 - 0,70) - 28486,053(h_1 - 0,47) - \\ - 27,584(T_0 - 168) - 14,739(T_1 - 124) - 26707,281(h_0 - 0,70)^2 + \\ + 4555,476(h_1 - 0,47)^2 - 0,016(T_0 - 168)^2 - 0,062(T_1 - 124)^2 + \\ + 19523,910(h_0 - 0,70)(h_1 - 0,47) - 12,057(h_0 - 0,70)(T_0 - 168) - \\ - 49,036(h_0 - 0,70)(T_1 - 124) + 73,522(h_1 - 0,47)(T_0 - 168) + \\ + 102,902(h_1 - 0,47)(T_1 - 124) + 0,033(T_0 - 168)(T_1 - 124), \text{ кН.} \quad (16)$$

ВИСНОВКИ

Виконаний аналіз отриманих результатів показав, що максимальне значення відносної похибки $\Delta P_u = \left\{ \left(P_{\text{числ}_u} - P_{\text{рег}_u} \right) / P_{\text{числ}_u} \right\} 100\%$ не перевищує 1,5 %, а максимальне значення відношення $P_{\text{числ}_u} / P_{\text{рег}_u}$ не більше 1,02. Це підтверджує достатній ступінь відповідності між числовою математичною моделлю [19] та її регресійними аналогами, а також робить обґрунтованим використання рівняння регресії (1). В якості одного з можливих напрямків подальших досліджень можна виділити застосування описаного регресійного підходу і до визначення показників якості холоднокатаних штаб, таких як, наприклад, їх поздовжня та поперечна різнотовщинність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ніколаєв В. О. *Виробництво плоского прокату : підруч. для студ. вищ. навч. закл.* / В. О. Ніколаєв, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2010. – 320 с.
2. Беняковский М. А. *Автомобильная сталь и тонкий лист* / М. А. Беняковский, В. А. Масленников. – Череповец : Издательский дом «Череповец», 2007. – 636 с.
3. Гарбер Э. А. *Производство проката : справочное издание; том I. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование)* / Э. А. Гарбер – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с.
4. *Управление качеством тонколистового проката* / В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, А. Н. Яценко. – К. : Техніка, 1997. – 384 с.

5. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л. А. Кузнецов. – М. : *Металлургия*, 1988. – 304 с.
6. Лель Р. В. Оптимизация процесса холодной листовой прокатки / Р. В. Лель, В. И. Двинский, В. А. Рудаков. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1984. – 130 с.
7. Скороходов А. Н. Оптимизация прокатного производства. / А. Н. Скороходов, П. И. Полухин, Б. М. Илюкович – М. : *Металлургия*, 1982. – 432 с.
8. Тимошенко Э. В. Синтез систем управления параметрами полос при холодной прокатке / Э. В. Тимошенко, А. А. Самецкий. – К. : НВК «КИА», 1999. – 264 с.
9. АСУ листопрокатных станов / В. И. Архангельский, И. Н. Богаенко, В. И. Васечник [и др.] – М. : *Металлургия*, 1994. – 264 с.
10. Автоматизация управления листовыми прокатными станами / Б. Н. Кузнецов, И. А. Опрышко, И. Н. Богаенко [и др.] – К. : *Техніка*, 1992. – 231 с.
11. Капланов В. И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива : монография / В. И. Капланов. – Мариуполь : Из-во «Рената», 2008. – 456 с.
12. Васильев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я. Д. Васильев – М. : *Металлургия*, 1995. – 368 с.
13. Анализ очага деформации и уточненный расчет усилий холодной прокатки полос толщиной менее 0,5 мм на непрерывных станах / Э. А. Гарбер, И. А. Шадрюнова, А. И. Трайно, В. С. Юсупов // *Металлы*. – 2002. – № 4. – С. 32–38.
14. Николаев В. А. Расчет силы при холодной прокатке / В. А. Николаев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 42–45.
15. Сердюк А. И. Определение энергосиловых параметров холодной прокатки тонколистовой стали / А. И. Сердюк, А. Г. Присяжный // *Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии : сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012 г. / под общ. ред. проф. А. М. Козлова. – Ч. 2. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 285–289.*
16. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке относительно тонких лент и полос / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, С. С. Настоящая, В. Г. Переходченко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 31–36.*
17. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке тонких полос / В. И. Капланов, А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, С. С. Настоящая // *Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – Вып. 4. – С. 45–48.*
18. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния по боковым кромкам прокатываемых заготовок / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, А. С. Чуруканов, К. Ю. Юрков // *Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз : збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : ВНТ, 2011. – С. 114–116.*
19. Развитие численных одномерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при холодной прокатке относительно тонких полос / А. В. Сатонин, А. Г. Присяжный, А. М. Спаская, А. С. Чуруканов // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 62–68.*
20. 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.
21. Румишинский Л. З. Организация эксперимента : учеб. пособие / Л. З. Румишинский. – М. : «МИСИС», 1984. – 140 с.
22. Ковиов В. Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковиов – Киев-Донецк : Вища школа, 1982. – 120 с.
23. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планируемого эксперимента / Ф. С. Новик, Е. Б. Арсов – М. : *Машиностроение. – София : Техника*, 1980. – 265 с.
24. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грачевский – М. : *Наука*, 1976. – 280 с.

REFERENCES

1. Nikolaev V. O. *Virobnictvo ploskogo prokatu : pidruch. dlja stud. vishh. navch. zakl.* / V. O. Nikolaev, V. L. Mazur. – Zaporizhzhja : ZDIA, 2010. – 320 s.
2. Benjakovskij M. A. *Avtomobil'naja stal' i tonkij list* / M. A. Benjakovskij, V. A. Maslennikov. – Cherepovec : Izdatel'skij dom «Cherepovec», 2007. – 636 s.
3. Garber Je. A. *Proizvodstvo prokata : spravocnoe izdanie; tom I. Proizvodstvo holodnokatanyh polos i listov (sortament, teorija, tehnologija, oborudovanie)* / Je. A. Garber – M. : *Teplotehnik*, 2007. – 368 s.
4. *Upravlenie kachestvom tonkolistovogo prokata* / V. L. Mazur, A. M. Saf'jan, I. Ju. Prihod'ko, A. N. Jacenko. – K. : *Tehnika*, 1997. – 384 s.
5. Kuznecov L. A. *Primenenie UVM dlja optimizacii tonkolistovoj prokatki* / L. A. Kuznecov. – M. : *Metallurgija*, 1988. – 304 s.
6. *Lel' R. V. Optimizacija processa holodnoj listovoj prokatki* / R. V. Lel', V. I. Dvinskij, V. A. Rudakov. – Sverdlovsk : UNC AN SSSR, 1984. – 130 s.

7. Skorohodov A. N. *Optimizacija prokatnogo proizvodstva*. / A. N. Skorohodov, P. I. Poluhin, B. M. Iljukovich – M. : Metallurgija, 1982. – 432 s.
8. Timoshenko Je. V. *Sintez sistem upravljenja parametrami polos pri holodnoj prokatke* / Je. V. Timoshenko, A. A. Sameckij. – K. : NVK «KIA», 1999. – 264 s.
9. *ASU listoprokatnyh stanov* / V. I. Arhangel'skij, I. N. Bogaenko, V. I. Vasechnik [i dr.] – M. : Metallurgija, 1994. – 264 s.
10. *Avtomatizacija upravljenja listovymi prokatnymi stanami* / B. N. Kuznecov, I. A. Opryshko, I. N. Bogaenko [i dr.] – K. : Tehnika, 1992. – 231 s.
11. Kaplanov V. I. *Dinamika i tribonika vysokoskorostnoj tonkolistovoj prokatki. Mirovaja tendencija i perspektiva : monografija* / V. I. Kaplanov. – Mariupol' : Iz-vo «Renata», 2008. – 456 s.
12. Vasilev Ja. D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki* / Ja. D. Vasil'ev – M. : Metallurgija, 1995. – 368 s.
13. *Analiz ochaga deformacii i utochnennyj raschet usilij holodnoj prokatki polos tolshhinoj menee 0,5 mm na neprerynyh stanah* / Je. A. Garber, I. A. Shadrinova, A. I. Trajno, V. S. Jusupov // *Metally*. – 2002. – № 4. – S. 32–38.
14. Nikolaev V. A. *Raschet sily pri holodnoj prokatke* / V. A. Nikolaev // *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija*. – 2005. – № 3. – S. 42–45.
15. Serdjuk A. I. *Opredelenie jenergosiловых parametrov holodnoj prokatki tonkolistovoj stali* / A. I. Serdjuk, A. G. Prisjazhnyj // *Fundamental'nye i prikladnye problemy modernizacii sovremennogo mashinostroenija i metallurgii : sb. nauch. trudov mezhdunar. nauch.-tehn. konf., posvjashhennoj 50-letiju kafedry tehnologii mashinostroenija LGTU. 17-19 maja 2012 g. / pod obshh. red. prof. A. M. Kozlova*. – Ch. 2. – Li-peck : Izd-vo LGTU, 2012. – S. 285–289.
16. *Chislennoe matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri gorjachej prokatke odnositel'no tonkih lent i polos* / A. V. Satonin, M. G. Korenko, S. S. Nastojashhaja, V. G. Perehodchenko // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 4 (25). – S. 31–36.
17. *Chislennoe matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri gorjachej prokatke tonkih polos* / V. I. Kaplanov, A. V. Satonin, M. G. Korenko, S. S. Nastojashhaja // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2011. – Vyp. 4. – S. 45–48.
18. *Chislennoe matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija po bokovym kromkam prokatyvaemyh zagotovok* / A. V. Satonin, M. G. Korenko, A. S. Churukanov, K. Ju. Jurkov // *Teoretichni i prikladni zadachi obrobki metaliv tiskom ta avtotehnichnih ekspertiz : zbirnik tez dopovidej mizhnarodnoї naukovotehnichnoї konferencii*. – Vinnicja : VNT, 2011. – S. 114–116.
19. *Razvitie chislennyh odnomernyh matematicheskikh modelej naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri holodnoj prokatke odnositel'no tonkih polos* / A. V. Satonin, A. G. Prisjazhnyj, A. M. Spaskaja, A. S. Churukanov // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 2 (31). – S. 62–68.
20. Fedorinov V. A. *Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenij, deformacij i osnovnyh pokazatelej kachestva pri prokatke odnositel'no shirokih listov i polos : monografija* / V. A. Fedorinov, A. V. Satonin, Je. P. Gribkov. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – 243 s.
21. Rumshinskij L. Z. *Organizacija jeksperimenta : ucheb. posobie* / L. Z. Rumshinskij. – M. : «MISIS», 1984. – 140 s.
22. Kovshov V. N. *Postanovka inzhenerenogo jeksperimenta* / V. N. Kovshov – Kiev-Donck : Vishha shkola, 1982. – 120 s.
23. Novik F. S. *Optimizacija processov tehnologii metallovmetodami planiruемого jeksperimenta* / F. S. Novik, E. B. Arsov – M. : Mashinostroenie. – Sofija : Tehnika, 1980. – 265 s.
24. Adler Ju. P. *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* / Ju. P. Adler, E. V. Markova, Ju. V. Grachevskij – M. : Nauka, 1976. – 280 s.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. каф. АММ ДГМА

Коренко М. Г. – канд. техн. наук, доц. КМИ ГВУЗ «КНУ»

Коробко Т. Б. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ

Присяжный А. Г. – ст. преп. ГВУЗ «ПГТУ»

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
КМИ ГВУЗ «КНУ» – Криворожский металлургический институт ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог;

ДГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Лисичанск;

ГВУЗ «ПГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

E-mail: marinak2010@bk.ru

Статья надійшла до редакції 09.02.2015 р.