

# МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.771.014.2

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>**Кухар В.В.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Курпе О.Г.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЧОРНОВОЇ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

У роботі шляхом осадження в лабораторних умовах виконано дослідження властивості свинцевих зразків за умови ступеню деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. За результатами експерименту визначено параметри зразків та розраховано значення істинного опору деформації. Виконано порівняльний аналіз властивостей та встановлено перелік марок сталі (сплаву) – аналогів, та умови (температура деформації 1200°C, швидкості деформації 1с<sup>-1</sup>, ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.), за яких вони є наближеними до властивостей свинцю. Отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для сплаву 0X18MФТ та марок сталі – аналогів 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, Ст3сп, з відповідною величиною вірогідності апроксимації від 0,992 до 0,998. Розраховано коефіцієнти пропорційності за допомогою яких результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі (сплав) – аналог. Виконано розширення можливостей для фізичного моделювання в межах температур від 1200°C до 1000°C, які відповідають більшості режимів обробки сучасних марок сталі при чорновій прокатці, шляхом введення коефіцієнту змінення істинного опору деформації  $K_0$  та розробки залежностей для розрахунку по кожній марці сталі (сплаву) – аналогу. Перевірку отриманих результатів виконано на фактичних даних по результатах чорнової прокатки товстих листів на стані 3600 МК «АЗОВСТАЛЬ» з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі марки X70. При порівнянні фактичних даних з даними розрахованими на підставі отриманих коефіцієнтів пропорційності та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації, середня похибка становить 11,6 %, що дозволяє використовувати отримані дані для подальшого фізичного моделювання процесів гарячої прокатки.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, коефіцієнт пропорційності, істинний опір деформації, гаряча прокатка, марки сталі.

**Постановка проблеми.** Фізичне моделювання, як один із способів дослідження процесів прокатки дозволяє, в лабораторних умовах, отримати дані про процеси, які в реальних умовах поточного виробництва є неможливими, або потребують суттєвих витрат.

Серед таких трудомістких досліджень можна розглядати процеси, що відбуваються при чорновій гарячій прокатці сталі.

Важливим етапом, який супроводжує фізичне моделювання є дослідження, пов'язані з пошуком матеріалу-аналога, властивості якого, при певних умовах, повинні відображати властивості дослідної сталі. Цей етап є унікальним для кожного дослідження, так як враховує особливості та

умови процесу для якого буде застосовано результати фізичного моделювання.

Таким чином, фізичне моделювання складається з двох етапів, безпосереднього експерименту і обробки експериментальних даних та аналітичного етапу, який дозволяє встановити межі застосування для відповідного процесу обробки тиском.

Із розвитком нових технологій та їх впровадженням на підприємствах, як наприклад термомеханічні процеси прокатки (ТМСП), фізичне моделювання, як інструмент дослідження та вдосконалення, набуває нового сенсу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Серед методів досліджень, які проводяться

для вивчення процесів прокатки, наразі найбільш розповсюдженими є аналітичні методи [1–4] та методи математичного моделювання [5–10], які отримали своє поширення з розвитком комп'ютерних технологій. Однак лабораторні дослідження з фізичного моделювання, як приклад, дослідження процесів на лабораторній моделі стану Стеккеля [11], сучасних комплексів імітації технологічних процесів [12], та окремих процесів плоскої гарячої прокатки [13] дозволяють наблизити експерименти до реальних умов промислового виробництва та суттєво поглибити знання щодо покращення процесів засвоєння технології. Поєднання процесів фізичного моделювання з сучасними можливостями інформаційної обробки результатів суттєво розширює межу їх застосування та дозволяють отримати результати на новому якісному рівні.

Таким чином, дослідження процесів прокатки, у тому числі сучасних технологічних процесів, таких як термомеханічна прокатка, шляхом фізичного моделювання з використанням сучасних можливостей обробки інформації за допомогою комп'ютерної техніки є актуальним завданням.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є пошук умов та марок сталі, в тому числі тих, які виробляються способом термомеханічної прокатки, властивостям яких відповідає свинець як матеріал-аналог, для використання його в подальшому фізичному моделюванні.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Дослідження проводилося через стиснення свинцевих зразків на гідравлічному пресі моделі ПММ-125, максимальною силою 1,23 МН, швидкістю ходу штоку 2 мм/с.

При випробуваннях на стиснення використовувались 9 зразків циліндричної форми. Виконуючи по черзі осаджування зразків, за 5 підходів, до кінцевої висоти  $H_k = 19,5$  мм, контактні поверхні яких були попередньо змащені індустріальною оливою марки И-20А, фіксували силу стиснення  $P$ , Н. Температура випробувань  $20 \pm 8$ С, ступінь деформації 0,1–0,54 відн. од., швидкість деформації  $1 \text{ с}^{-1}$ .

Для визначення коефіцієнту тертя  $f$  між контактними поверхнями, два циліндричних свинцевих зразка з діаметром  $D_0 = 19,5$  мм та висотою  $H_0 = 20,3$  мм додатково осаджували до кінцевої висоти  $H_k = 14,5$  мм, також фіксувалася сила стиснення  $P$ , Н. Для кожного зразка визначали середню силу стиснення  $P_{\bar{x}}$ .

Параметри зразків, по результатах експерименту, визначали по методології [14]. Дійсний опір деформації визначали по формулі С.І. Губкіна, Е. Зибеля [14]:

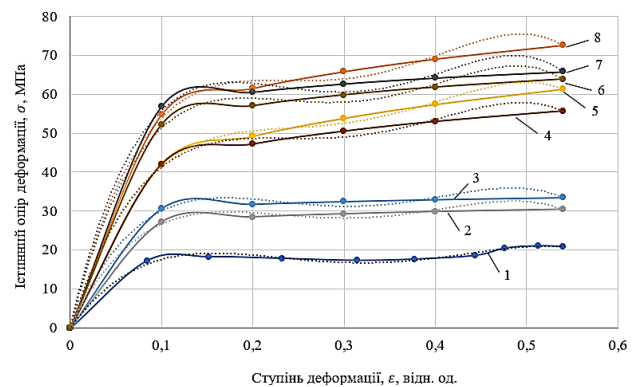
$$\sigma = \frac{q}{1 + \left[ \frac{1}{3} f (d/h) \right]}, \quad (1)$$

де  $q$  – середній тиск, Н;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $d, h$  – поточні діаметр та висота зразка, мм.

Результати розрахунку дійсного опору деформації свинцю по формулі (1) наведені на рис. 1.

Для порівняння аналогів, вибрані марки сталі які є більш наближені, по своїх властивостях, при відповідних умовах (температура деформації  $1200^\circ\text{C}$ , швидкість деформації  $u = 1 \text{ с}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.) до властивостей свинцю, рис. 1. Дані умови є наближеними до режимів, які є на перших проходах чорнової гарячої прокатки.

Розрахунок істинного опору деформації для сплаву 0X18МТФ та марок сталі СтЗсп, 15X25Т, 65Г виконували по методиці Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева [15], для марки сталі DD11 по методиці Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева (по хімічному складу) [15], для марок сталі X70 та X80 - по розробках [16] та [17] відповідно.



**Рис. 1.** Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі  $20^\circ\text{C}$  (1) та марок сталі (сплаву)-аналогів 0X18МФТ (2), 15X25Т (3), DD11 (4), 65Г (5), X80 (6), X70 (7), СтЗсп (8) при температурі  $1200^\circ\text{C}$ , пунктиром вказані лінії тренду

На підставі рис. 1 отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для марок сталі (сплаву)-аналогів, з відповідною величиною вірогідності апроксимації  $R^2$ . Залежність істинного опору деформації свинцю, сплаву 0X18МФТ, марок сталі 15X25Т, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп від ступеня деформації  $x$ , мають наступний вигляд:

$$\sigma_{pb} = -3059,9x^4 + 4073,8x^3 - 1832x^2 + 321,82x - 0,1057; R^2 = 0,992. \quad (2)$$

$$\sigma_{X18MФТ} = -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; R^2 = 0,996. \quad (3)$$

$$\sigma_{15X25T} = -5378,2x^4 + 6870,1x^3 - 3022,6x^2 + 537,27x + 0,1351; R^2 = 0,996. \quad (4)$$

$$\sigma_{DD11} = -6445,7x^4 + 8308,4x^3 - 3722,3x^2 + 706,37x + 0,1572; R^2 = 0,998. \quad (5)$$

$$\sigma_{65Г} = -6026x^4 + 7796,2x^3 - 3529,2x^2 + 694,54x + 0,1448; R^2 = 0,998. \quad (6)$$

$$\sigma_{X80} = -8385x^4 + 10783x^3 - 4811,5x^2 + 891,99x + 0,2053; R^2 = 0,997. \quad (7)$$

$$\sigma_{X70} = -9558,6x^4 + 12251x^3 - 5427,5x^2 + 984,91x + 0,2371; R^2 = 0,996. \quad (8)$$

$$\sigma_{Ст3сп} = -8411,1x^4 + 10835x^3 - 4857x^2 + 921,64x + 0,2051; R^2 = 0,998. \quad (9)$$

Результати оцінки відхилень в розрахунках по отриманих залежностях (2)-(9) в порівнянні з розрахунком істинного опору деформації по вихідних методиках [15, 16, 17], та по формулі (1) для свинцю, наведені в табл. 1.

Таким чином, можна побачити збільшення як максимальних відхилень так і середнього відхилення в міру віддалення або «зниження» ступеню аналогічності (100-відхилення, %) матеріалу від свинцю.

Для поширення результатів експерименту, як інструменту для фізичного моделювання процесів прокатки, для марок сталі (сплав)-аналогів розраховано коефіцієнти пропорційності:

$$n_i = \frac{a_{i \text{аналог}}}{a_{i \text{pb}}}, \quad (10)$$

де  $a_{i \text{pb}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації;  $a_{i \text{аналог}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації марки сталі (сплав)-аналогу від ступеня деформації.

Результати розрахунку коефіцієнтів пропорційності наведено в табл. 2.

За допомогою отриманих коефіцієнтів пропорційності, результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі (сплав)-аналог для наступних умов: температура деформації 1200°C, швидкість деформації  $u = 1c^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Слід зазначити що більшість сучасних марок сталі, при чорновій прокатці, обробляються при

Таблиця 1

Оцінки відхилень в розрахунках істинного опору деформації свинцю та марок сталі (сплав)-аналогів

Відхилення, %	Матеріал / нормативний документ							
	Свинець ССу / ГОСТ 1292	0X18MФТ / спецсплав	15X25T / ГОСТ 5632	DD11 / EN10111	65Г / ГОСТ 14959	X80 / API- 5L	X70 / API-5L	Ст3сп / ДСТУ 2651
мін	-5,15	-3,93	-4,04	-3,26	1,80	-1,73	-3,14	-0,21
мах	5,29	3,62	3,77	2,54	9,91	9,46	9,31	9,65
середнє	0,20	0,10	0,12	-0,38	6,46	4,04	3,28	5,20

Таблиця 2

Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплавів)-аналогів

Марка сталі (сплав)-аналога	Коефіцієнт пропорційності $n_i$ , для відповідного коефіцієнту поліному				
	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0X18MФТ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15X25T	1,758	1,686	1,650	1,669	-1,278
DD11	2,107	2,039	2,032	2,195	-1,487
65Г	1,969	1,914	1,926	2,158	-1,370
X80	2,740	2,647	2,626	2,772	-1,942
X70	3,124	3,007	2,963	3,060	-2,243
Ст3сп	2,749	2,660	2,651	2,864	-1,940

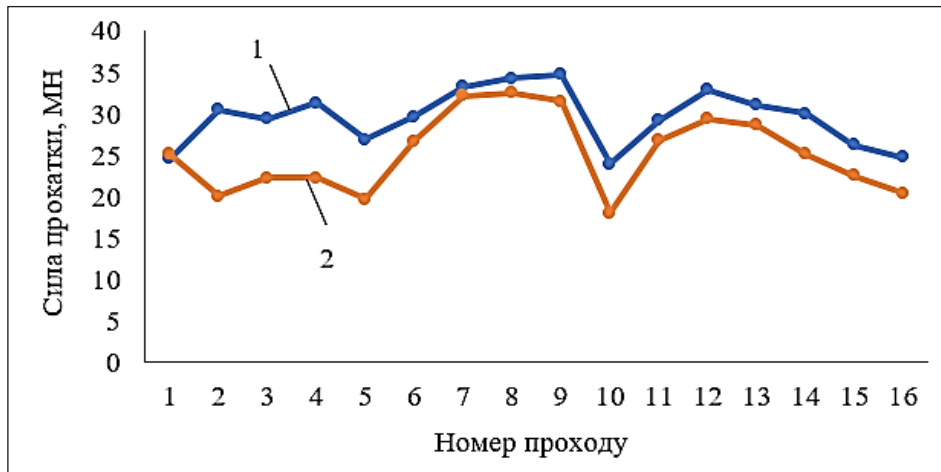


Рис. 2. Порівняння фактичної сили (1) отриманої при чорновій прокатці товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм, зі сталі марки Х70 та розрахованої (2)

температурах 1200-1000°C, в тому числі марки що виробляються способом ТМСП. З метою розширення можливостей для фізичного моделювання виконано додаткові розрахунки істинного опору деформації марок сталі (сплаву)-аналогів при температурах від 1200°C до 1000°C зі ступенем деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Для встановлення залежностей впливу змінення температури на істинний опір деформації з врахуванням ступеню деформації, по кожній з досліджених марок сталі (сплаву)-аналогів розраховано коефіцієнти змінення істинного опору деформації  $K_{\sigma}$ . В якості базового прийнято істинний опір деформації при температурі  $t=1200^{\circ}\text{C}$ , для кожного ступеня деформації.

Ідентичність розрахованих коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_{\sigma}$  в залежності від температури  $t$ , для різних ступенів деформації дозволило встановити залежності впливу змінення температури на істинний опір деформації для кожній з дослідних марок сталі (сплаву)-аналогів та отримати відповідні рівняння:

$$\text{для сплаву 0X18MTФ } K_{\sigma} = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,64}; R^2 = 1. \quad (11)$$

$$\text{для сталі марки 15X25T } K_{\sigma} = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,7}; R^2 = 1. \quad (12)$$

$$\text{для сталі марки DD11 } K_{\sigma} = 2 \times 10^{10} \times t^{-3,33}; R^2 = 1. \quad (13)$$

$$\text{для сталі марки 65Г } K_{\sigma} = 2 \times 10^9 \times t^{-3,02}; R^2 = 1. \quad (14)$$

$$\text{для сталі марки Х80 } K_{\sigma} = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999. \quad (15)$$

$$\text{для сталі марки Х70 } K_{\sigma} = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993. \quad (16)$$

$$\text{для сталі марки Ст3сп } K_{\sigma} = 7 \times 10^7 \times t^{-2,54}; R^2 = 1. \quad (17)$$

в рівняннях (11)-(17) –  $t$  – температура деформації, °C;  $R^2$  – величина вірогідності апроксимації

Таким чином, використання отриманих коефіцієнтів пропорційності, табл. 2, сумісно з рівняннями (11)-(17) дозволяє моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18МФТ та марки сталі 15X25T, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при наступних умовах: температура деформації 1200-1000°C, швидкість деформації  $u=1\text{c}^{-1}$ , ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од.

З метою перевірки якості отриманих результатів, для застосування при подальшому фізичному моделюванні, виконано порівняння з фактичними даними по параметрах прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».

Для перевірки використано дані чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі марки Х70, плавка №1302503, партія 9063, з розмірами слябу в холодному стані 300×1850×3003 мм.

Залежність, яка була використана для розрахунку істинного опору деформації, враховує відповідні значення  $n_i$  та  $K_{\sigma}$ , має наступний вигляд:

$$\sigma_{pb} = \begin{pmatrix} -3059,9 \times 3,124x^4 + 4073,8 \times 3,007x^3 - \\ -1832 \times 2,963x^2 + 321,82 \times 3,060x - \\ -0,1057 \times (-2,243) \end{pmatrix} \times 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}. \quad (18)$$

На підставі залежності (18) розрахована сила прокатки по відомій методиці [18], порівняння якої з фактичною силою прокатки наведено на рис. 2. Прокатка здійснювалась в діапазоні температур 1126-1028°C.

Підвищена розбіжність між фактичними та розрахованими даними, рис. 2, спостерігається у 2-5 проходах, в яких безпосередньо здійснювалась розбивка розкату по ширині, та яка може

бути пов'язана з нерівномірним нагріванням або переохолодженням торців слябів.

Загальна середня похибка по всіх проходах становить 14,9%. Якщо не враховувати вплив розбивки розкату по ширині у 2-5 проходах, тоді середня похибка становить 11,6%, що є задовільним рівнем.

**Висновки.** З метою дослідження силових процесів прокатки методами фізичного моделювання, шляхом проведення лабораторних досліджень, отримано графіки кривих зміцнення свинцю, визначено перелік марок сталі (сплаву)-аналогів 0X18MTФ, 15X25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп, які є найбільш наближеними до свинцю.

Уперше отримано залежності для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які в комплексі з розрахованими коефіцієнтами пропорційності  $n_i$ , дозволяють поширити результати фізичного моделювання свинцю на марки сталі (сплав)-аналоги при наступних умовах - температурі деформації 1000-1200°C, ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од., швидкості деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$ .

Отриманий комплекс залежностей перевірено на фактичних даних прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», середня похибка не перевищує 11,6%.

#### Список літератури:

1. Kim J., Lee J., Hwang S. M. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling. *International journal of heat mass transfer*. 2009. Vol. 52. P. 1864–1874.
2. Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill / O. H. Kurpe, V. V. Kukhar, E. S. Klimov, S. M. Chernenko. *Materials Science and Metallurgical Technology II*. Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 609–614.
3. Курпе О.Г., Кухар В.В. Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. № 3, т. 29(68). С. 121–126.
4. Kurpe O.H., Kukhar V.V. Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200. *Materials Science and Metallurgical Technology*. Materials Science Forum. 2018. Vol. 946. P. 794–799.
5. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. *Journal of University of Science and Technology*. Beijing. 2008. Vol. 15. P. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
6. Schausberger F., Steinboeck A., Kugi A. Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 39. P. 4534–4547. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.017>.
7. A mathematical model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production / Quan-Ke Pan, Qing-da Chen, Tao Meng, Bing Wang, Liang Gao. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 48. P. 516–533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>.
8. Rudkins N., Evans P. Mathematical modelling of mill set-up in hot strip rolling of high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Vol. 80–81. P. 320–324. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00190-3).
9. Mathematical Model and Stability Analysis of the Lateral Plate Motion in a Reversing Rolling Mill Stand / Andreas Ettl, Katharina Prinz, Martin Mueller, Andreas Steinboeck, Andreas Kugi. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, № 2. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.013>.
10. Phaniraj M. P., Behera B. B., Lahiri A. K. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 170. P. 323–335.
11. Hinton John S., Beynon John H. A Laboratory Steckel Mill Simulation. *Steel research international*. 2008. Vol. 79, № 4. P. 278–286. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>.
12. Частухин А.В. Закономерности процессов рекристаллизации аустенита и совершенствование технологии контролируемой прокатки микролегированных трубных сталей повышенной хладостойкости : дис. на соискание уч. степени к-та т. наук : 05.16.01 / ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина. Москва, 2017. 171 с.
13. Lenard John. G. Primer on Flat Rolling. *Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process*. Elsevier Ltd. 2007. Chapter 3. P. 36–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>.
14. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. Москва : Металлургия, 1976. 486 с.
15. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки : Справочник. Москва : Металлургия, 1986. 430 с.
16. Капланов В.И., Курпе А.Г. Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности Х70. *Университетская наука – 2009* : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Мариуполь : ПГТУ, 2009. С. 156–157.

17. Курпе А.Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»: автореф. дис. на соискание учен. Степени к-та т. наук : 05.16.05. Мариуполь, 2006. 23 с.
18. Старченко Д.И. Динамика продольной прокатки : учебное пособие. Киев : ИСНУ, 1994. 400 с.

### **Kukhar V.V., Kurpe O.H. PHYSICAL SIMULATION OF THE HOT ROUGHING ROLLING POWER PROCESSES**

*In the paper, by upsetting, in laboratory conditions, the properties of lead samples have studied at a degree of deformation from 0.1 relative units to 0.54 relative units. According to the results of the experiment, the parameters of the samples have been determined, and the true strain resistance has been calculated. Comparative analysis of properties has been made and the list of steel grades (alloy) – analogues and conditions (deformation temperature 1200°C, deformation rates  $u = 1 \text{ s}^{-1}$ , deformation degree from 0.1 relative units to 0.54 relative units) under which they are close to the properties of lead has been determined. The polynomial dependences of true strain resistance on the degree of deformation for lead, as well as for alloy 0X18MFT and steel grades – analogues 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp, with corresponding magnitude of approximation probability from 0.992 to 0.998 have been obtained. The proportionality coefficients have been calculated by which the results of further experiments on rolling lead samples can be converted to the corresponding steel grade (alloy) – analogue. Expansion of possibilities for physical modeling has been performed within the temperature range from 1200°C to 1000°C, which corresponds to most modes of processing of modern steel grades during roughing rolling, by introducing the coefficient of change of the true deformation resistance  $K_\sigma$  and developing dependences for calculation for each steel grade (alloy) – analogue. The verification of the obtained results has been performed based on the actual data of the thick plates roughing rolling results on the mill 3600 AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS with final dimensions of 17.5 × 3268 × 12200 mm of steel grade X70. When comparing the actual data with the data calculated on the basis of the obtained proportionality coefficients and the coefficients of change of the true deformation resistance, the average error is 11.6 %, which allows to use the obtained data for further physical modeling of hot rolling processes.*

**Key words:** physical modeling, proportionality coefficients, true strain resistance, hot rolling, steel grades.