

© В.В. Кухар¹, О.Г. Курпе¹

¹ ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНОЇ ПОДОБИ СВИНЦЮ ТА СТАЛЕЙ ДЛЯ ПЛОСКОЇ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

© V. Kukhar¹, O. Kurpe¹

¹ Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL ANALOGY OF LEAD AND STEEL FOR FLAT HOT-ROLLED PRODUCTS

Мета. Пошук умов та марок сталі різноманітного призначення, в тому числі тих, які виробляються способом термомеханічної прокатки, властивостям яких відповідає свинець як матеріал-аналог, для використання його в подальшому фізичному моделюванні.

Методика дослідження. У роботі, шляхом осадження, в лабораторних умовах, виконано дослідження властивості свинцевих зразків при ступеню деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. По результатах 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 °С, швидкості деформації 1 с⁻¹, ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.), при яких вони є наближеними до властивостей свинцю.

Результати досліджень. Отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для сплаву 0X18МФТ та марок сталі – аналогів 15X25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, 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.

Наукова новизна. Вперше виконано розширення можливостей для фізичного моделювання в межах температур від 1200 °С до 1000 °С, які відповідають більшості режимів обробки сучасних марок сталі при чорновій прокатці, шляхом введення коефіцієнту змінення істинного опору деформації K_{σ} та розробки залежностей для розрахунку по кожній марці сталі (сплаву) – аналогу.

Практичне значення. 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 Х70. 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.

З 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 межі їх застосування та дозволяють отримати результати на новому якісному рівні.

Таким чином, дослідження нових марок сталі та 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 проводилося через стиснення свинцевих зразків на гідравлічному пресі моделі ПММ-125, максимальною силою 1,23 МН, швидкістю ходу штоку 2 мм/с, рис.1.

При випробуваннях на стиснення використовувались 9 зразків циліндричної форми, табл. 1. 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 °С, ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од., швидкість деформації 1 с^{-1} .



Рис. 1. Зовнішній вигляд гідравлічного преса ПММ-125

Таблиця 1

Розміри дослідних зразків

Параметр зразка	Номер дослідного зразка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Діаметр, D_0 , мм	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Висота, H_0 , мм	21,3	23	25	28	31	34,9	38	40	42

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. 2.

Для порівняння аналогів, вибрані марки сталі які є більш наближені, по своїх властивостях, при відповідних умовах (температура деформації 1200 °С, швидкість деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$, 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 0X18MTФ 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.

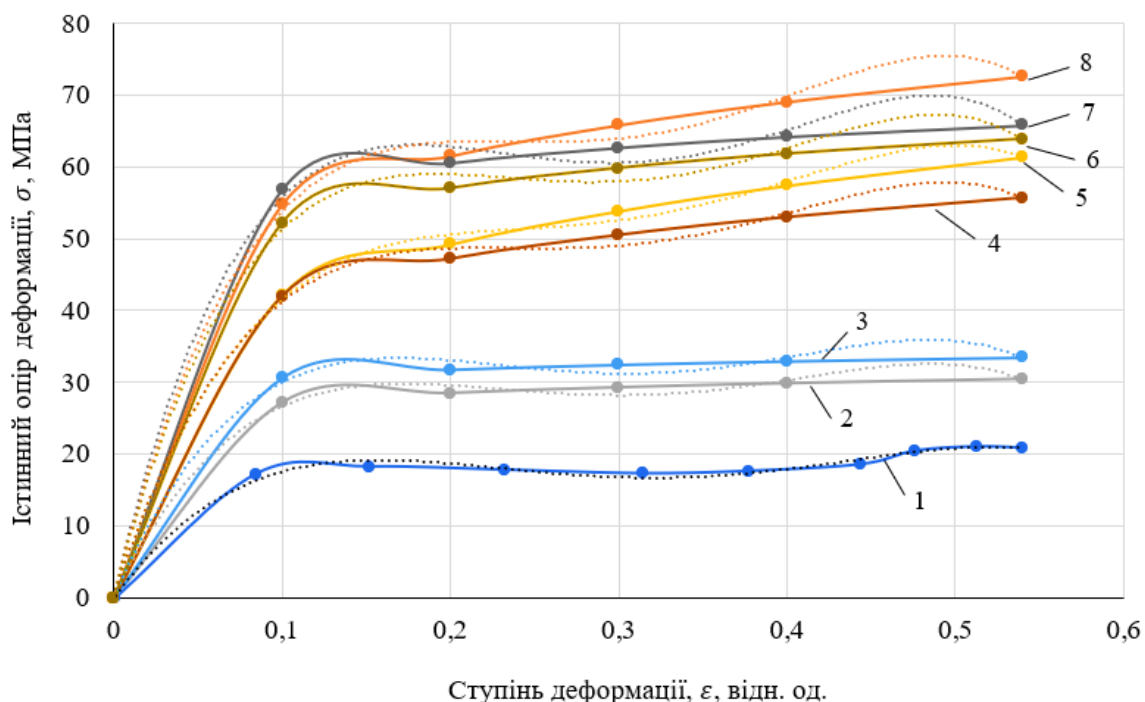


Рис. 2. Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі 20 °С (1) та марок сталі (сплаву)-аналогів 0X18МФТ (2), 15X25Т (3), DD11 (4), 65Г (5), X80 (6), X70 (7), СтЗсп (8) при температурі 1200 °С, пунктиром вказані лінії тренду

На підставі рис. 2 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:

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

$$\sigma_{X18MFT} = -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; R^2 = 0,996. \quad (3)$$

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

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

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

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

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

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

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. 2.

Таблиця 2

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

Відхилення, %	Матеріал / нормативний документ							
	Свинець ССу / ГОСТ 1292	0Х18МФТ / спецсплав	15Х25Т / 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

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 (сплаву)-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 (сплаву)-аналогу від ступеня деформації.

Результати розрахунку коефіцієнтів пропорційності наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплаву)-аналогів

Марка сталі (сплаву)- ана- лога	Коефіцієнт пропорційності n_i , для відповідного коефі- цієнту поліному				
	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4
0Х18МТФ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15Х25Т	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

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 °С, швидкість деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$, ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Слід зазначити що більшість сучасних марок сталі, при чорновій прокатці, обробляються при температурах 1200-1000 °С, в тому числі марки що виробляються способом ТМСР. З метою розширення можливостей для фізичного моделювання виконано додаткові розрахунки істинного опору деформації марок сталі (сплаву)-аналогів при температурах від 1200 °С до 1000 °С 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_σ . В якості базового прийнято істинний опір деформації при температурі $t=1200$ °С, для кожного ступеня деформації.

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

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

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

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

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

$$\text{для сталі марки X80} \quad K_\sigma = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999. \quad (15)$$

$$\text{для сталі марки X70} \quad K_\sigma = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993. \quad (16)$$

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

В рівняннях (11)-(17) – t - температура деформації, °С; R^2 - величина вірогідності апроксимації

Таким чином, використання отриманих коефіцієнтів пропорційності, табл. 3, сумісно з рівняннями (11)-(17) дозволяє моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18MTФ та марки сталі 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп при наступних умовах: температура деформації 1200-1000°С, 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_σ , має наступний вигляд:

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

На підставі залежності (18) розрахована сила прокатки по відомій методиці [18], порівняння якої з фактичною силою прокатки наведено на рис. 4. Прокатка здійснювалась в діапазоні температур 1126-1028 °С.

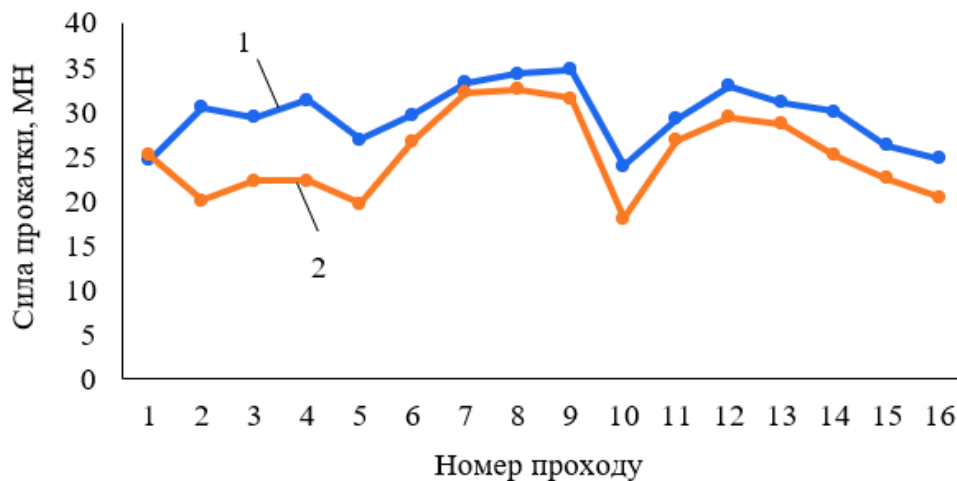


Рис. 4. Порівняння фактичної сили (1) отриманої при чорнової прокатці товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм, зі сталі марки Х70 та розрахованої (2)

Підвищена розбіжність між фактичними та розрахованими даними, рис. 4, 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. Шляхом проведення лабораторних досліджень отримано графіки кривих зміцнення свинцю, визначено перелік марок сталі (сплаву)-аналогів 0Х18МТФ, 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп, які є найбільш наближеними до свинцю, що дозволяє здійснювати подальше дослідження силових процесів прокатки методами фізичного моделювання.

Вперше отримано залежності для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації K_σ , які в комплексі з розрахованими коефіцієнтами про-

порційності n_i , дозволяють поширити результати фізичного моделювання свинцю на марки сталі (сплав)-аналоги при наступних умовах - температурі деформації 1000-1200 °С, ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од., швидкості деформації $u = 1 \text{ c}^{-1}$.

Комплекс залежностей, що був отриманий, перевірено на фактичних даних прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», середня похибка не перевищує 11,6 %.

Перелік посилань

1. Kim, J., Lee, J., & Hwang, S. M. (2009). An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7–8), 1864–1874.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.013>
2. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., & Chernenko, S. (2020). Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill. *Materials Science Forum*, 989, 609–614.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>
3. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018). Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, 29 (68) (3), 121–126.
4. Kurpe, O., & Kukhar, V. (2019). Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200. *Materials Science Forum*, 946, 794–799.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>
5. Xu, Y., Yu, Y., Liu, X., & Wang, G. (2008). Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng Ed)*, 15(4), 396–401.
[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. (2015). Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, 4534–4547.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.017>
7. Pan, Q. K., Chen, Q. da, Meng, T., Wang, B., & Gao, L. (2017). A mathematical model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production. *Applied Mathematical Modelling*, 48, 516–533.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>
8. Rudkins, N., & Evans, P. (1998). Mathematical modelling of mill set-up in hot strip rolling of high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 80–81, 320–324.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00190-3)
9. Ettl, A., Prinz, K., Mueller, M., Steinboeck, A., & Kugi, A. (2018). Mathematical Model and Stability Analysis of the Lateral Plate Motion in a Reversing Rolling Mill Stand. *IFAC-PapersOnLine*, 51(2), 73–78.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.013>
10. Phaniraj, M. P., Behera, B. B., & Lahiri, A. K. (2005). 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*, 170(1–2), 323–335.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.009>
11. Hinton, J., & Beynon, J. (2008). A laboratory Steckel mill simulation. *Steel Research International*, 79, 277–286.
<https://doi.org/10.1002/srin.200806352>
12. Chastukhin, A., Ringinen, D., Khadeev, G., & Efron, L. (2013). Effect of Reheating on Grain Size Evolution in High Strength Linepipe Steel. *Materials Science Forum*, 753, 449–452.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.753.449>

13. Lenard, J. G. (2007). Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process. In *Primer on Flat Rolling* (pp. 36–98). Elsevier Science Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>
14. Полухин, П.И., Гун, Г.Я., & Галкин, А.М. (1976). *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник*. Металлургия.
15. Коновалов, Ю.В., Остапенко, А.Л., & Пономарев, В.И. (1986). *Расчет параметров листовой прокатки. Справочник*. Металлургия.
16. Капланов, В.И., & Курпе, А.Г. (2009). Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности X70. *Университетская наука – 2009*, тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 156–157.
17. Капланов, В. И., Володарский, В. В., Курпе, А. Г., Носоченко, А. О., Сагиров, Р. И., Ганюшенко, И. В., & Матросов, Ю. И. (2007). Исследование прочностных свойств стали категории прочности X70 и X80. *Производство проката*, (2), 7-10.
18. Старченко, Д.И. (1994). *Динамика продольной прокатки. Учебное пособие*. ИСЮ.

АННОТАЦИЯ

Цель. Поиск условий и марок стали различного назначения, в том числе тех, которые производятся способом термомеханической прокатки, свойствам которых соответствует свинец как материал-аналог, для использования его при дальнейшем физическом моделировании.

Методика исследований. В работе, путем осадки, в лабораторных условиях, выполнено исследование свойства свинцовых образцов при степени деформации от 0,1 отн. ед. до 0,54 отн. ед. По результатам эксперимента определены параметры образцов и рассчитано значение истинного сопротивления деформации. Выполнен сравнительный анализ свойств и установлен перечень марок стали (сплава) - аналогов, и условия (температура деформации 1200 °С, скорости деформации 1 с⁻¹, степень деформации от 0,1 отн. ед. до 0,54 отн. ед.), при которых они являются приближенными к свойствам свинца.

Результаты исследования. Получены полиномиальные зависимости истинного сопротивления деформации от степени деформации для свинца, а также для сплава 0X18MФТ и марок стали - аналогов 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп, с соответствующей величиной достоверности аппроксимации от 0,992 до 0,998. Рассчитаны коэффициенты пропорциональности, с помощью которых результаты дальнейших экспериментов по прокатке свинцовых образцов можно пересчитать на соответствующую марку стали (сплав) - аналог.

Научная новизна. Впервые выполнено расширение возможностей для физического моделирования в пределах температур от 1200 °С до 1000 °С, которые соответствуют большинству режимов обработки современных марок стали при черновой прокатке, путем введения коэффициента изменения истинного сопротивления деформации K_σ и разработки зависимостей для расчета по каждой марке стали (сплава) - аналога.

Практическое значение. Проверка полученных результатов выполнена на фактических данных по результатам черновой прокатки толстых листов на стане 3600 МК «Азовсталь» с конечными размерами 17,5×3268×12200 мм из стали марки X70. При сравнении фактических данных с данными, рассчитанными на основании полученных коэффициентов пропорциональности и коэффициентов изменения истинного сопротивления деформации, средняя погрешность составляет 11,6%, что позволяет использовать полученные данные для дальнейшего физического моделирования процессов горячей прокатки.

Ключевые слова: физическое моделирование, коэффициент пропорциональности, истинное сопротивление деформации, горячая прокатка, марки стали

ABSTRACT

Purpose. Search for conditions and steel grades of various purposes, including those produced by the method of thermomechanical rolling, which properties are similar to lead as a material-analogue, for its further implementation in physical modeling.

Research methods. 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 $u = 1 \text{ c}^{-1}$, 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.

Findings. 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.

Scientific originality. 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_σ and developing dependences for calculation for each steel grade (alloy) - analogue.

Practical implications. 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.

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