

УДК 621.771

*В.А. ЧУБЕНКО, А.А. ХИНОЦЬКА***ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКІСНИХ УМОВ ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОКАТУВАННЯ В ОБ'ЄМІ ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ**

Коефіцієнти і параметри осередку деформації та його об'єм, що застосовуються при поздовжньому прокатуванні, визначають час знаходження металу між валками, швидкість відносного переміщення смуги, що впливає на енерговитрати, продуктивність та собівартість процесу. Виявлення раціональних швидкісних умов прокатування є задача актуальна, що дозволить підвищити ефективність обробки. Мета роботи полягає у визначенні швидкісних умов прокатування в об'ємі осередку деформації для виявлення закономірностей впливу параметрів обробки на швидкість та час перебування металу між валками. Удосконалено методику визначення об'єму і поверхні осередку деформації за рахунок отримання нових залежностей. Перевірка адекватності пропонуємих формул для визначення об'єму осередку деформації показала можливість похибки менше 1 %, а відношення швидкостей металу на вході й виході осередку деформації менше 5 %, що свідчить про достатню точність пропонуємих залежностей. Встановлено максимально можливі обтиснення та кути захоплення при холодному та гарячому прокатуванні в залежності від діаметра валків. Визначено закономірності впливу об'єму осередку деформації та його параметрів на час перебування металу в осередку деформації. Розрахунок показав, що метал під час прокатування знаходиться в осередку деформації в межах від  $7 \cdot 10^{-5}$  до 0,2 с в залежності від режимів обробки. На цій основі обґрунтовані шляхи зменшення часу перебування металу в осередку деформації з метою збільшення продуктивності процесу. Висновок: аналіз режимів поздовжнього прокатування дозволив визначити можливі обтиснення та максимальні кути захоплення при холодній та гарячій обробці металів тиском; визначено об'єм і поверхню осередку деформації та час перебування металу в ньому; виконано перевірку адекватності пропонуємих формул, яка свідчить про достатню точність виявлених залежностей. Визначено закономірності впливу початкових умов прокатування на час перебування металу між валками та швидкість деформації, що дозволяє намітити шляхи зменшення тривалості обробки в осередку деформації і, відповідно, збільшити продуктивність процесу.

**Ключові слова:** прокатування, об'єм осередку деформації, швидкість обробки, час перебування металу між валками, обтиснення.

*В.А. ЧУБЕНКО, А.А. ХИНОЦКАЯ***ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ УСЛОВИЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ В ОБЪЕМЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ**

Кoeffициенты и параметры очага деформации, его объем, используемые при продольной прокатке, определяют время нахождения металла между валками, скорость относительного перемещения полосы, что влияет на затраты энергии, производительность и себестоимость процесса. Определение рациональных скоростных условий прокатки – это задача актуальная, которая позволит увеличить эффективность обработки. Цель работы состоит в определении скоростных условий прокатывания в объеме очага деформации для определения закономерностей влияния параметров обработки на скорость и время нахождения металла между валками. Усовершенствовано методику определения объема и поверхности очага деформации за счет выявления новых зависимостей. Проверка адекватности предлагаемых формул для определения объема очага деформации показала возможность ошибки меньше 1 %, а отношения скоростей металла на входе и выходе очага деформации меньше 5 %, что свидетельствует о достаточной точности предлагаемых зависимостей. Установлены максимально возможные обжатия и углы захвата при холодной и горячей прокатке в зависимости от диаметра валков. Определены закономерности влияния объема очага деформации и его параметров на время нахождения металла в очаге деформации. Расчет показал, что металл во время прокатывания находится в очаге деформации в пределах от  $7 \cdot 10^{-5}$  до 0,2 с в зависимости от режимов обработки, на этом положении обоснованы пути уменьшения времени нахождения металла в очаге деформации с целью увеличения производительности процесса. Вывод: анализ режимов продольной прокатки позволил определить возможные обжатия и максимальные углы захвата при холодной и горячей обработке металлов давлением; определены объем и поверхность очага деформации, время нахождения металла в нем; выполнена проверка адекватности предлагаемых формул, которая свидетельствует о достаточной точности выявленных зависимостей. Определены закономерности влияния начальных условий прокатки на время нахождения металла между валками и скорость деформации, что позволяет наметить пути уменьшения продолжительности обработки металла в очаге деформации и, соответственно, увеличить производительность обработки.

**Ключевые слова:** прокатывание; объем очага деформации, скорость обработки, время нахождения металла между валками, обжатие.

*V.A. CHUBENKO, A.A. KHINOTSKAYA***STUDY OF THE VELOCITY CONDITIONS OF LONGITUDINAL ROLLING IN THE VOLUME OF THE DEFORMATION CELL**

The coefficients and parameters of the deformation cell and its volume used for longitudinal rolling determine the time of metal found between the rolls, the relative velocity of the displacement of the strip affecting the energy consumption, the productivity and the cost of the process. Detection of rational high-speed rolling conditions is a topical task, which will increase the efficiency of processing. The purpose of the work is to determine the speed conditions of rolling in the volume of the deformation cell to detect patterns of influence of processing parameters on the speed and time of metal stay between the rollers. The method of determining the volume and the surface of the deformation cell due to obtaining new dependencies has been improved. The verification of the adequacy of the proposed formulas to determine the volume of the deformation cell showed an error rate of less than 1%, and the ratio of metal speeds at the entrance and exit of the deformation cell is less than 5%, which suggests a sufficient accuracy of the offered dependencies. The maximum possible compression and angles of capture at cold and hot rolling depending on the diameter of rolls are set. The regularities of the influence of the volume of the deformation cell and its parameters on the time of the metal stay in the deformation cell are determined. The calculation showed that the metal during rolling is located in the deformation cell in the range from  $7 \cdot 10^{-5}$  to 0.2 s, depending on the processing modes, on this basis, the ways of reducing the time of stay of the metal in the deformation cell are grounded in order to increase the productivity of the process. Conclusion: analysis of longitudinal rotation regimes allowed to determine possible bending and maximum angles of capture during cold and hot metal processing under pressure; determined the volume and surface of the deformation cell and the residence time of the metal in it, an examination of the adequacy of the proposed formulas has been performed, which indicates the sufficient accuracy of the detected dependencies. The regularities of the influence of the initial conditions of rolling on the time of metal staying between the rolls and the rate of deformation are determined, which allows us to outline ways of reducing the length of processing in the deformation cell and, accordingly, increase the productivity of the process.

**Keywords:** rolling, volume of deformation cell, processing speed, time of metal staying between rolls, compression.

**Вступ.** Подальший розвиток прокатного виробництва пов'язаний з використанням нових прогресивних технологій, що забезпечують раціональне використання енергетичних ресурсів. Введення в експлуатацію на металургійних підприємствах сучасних високошвидкісних прокатних станів ставить питання про необхідність розробки нових і удосконалення існуючих режимів обробки. Вихідні параметри прокатування та величини обтиснення суттєво впливають на осередок деформації при прокатування, його об'єм, час знаходження металу між валками, швидкість відносного переміщення металу, що впливає на продуктивність та собівартість процесу. Визначення раціональних швидкісних режимів повздовжнього прокатування є задача актуальна, що дозволить покращити ефективність обробки при зменшенні енерговитрат на обтиснення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Знання про процес прокатки необхідні для визначення сили та потужності обробки, удосконалення технології виробництва та для удосконалення роботи прокатних станів [1]. При подачі штаби до валків, які обертаються, на площадках контакту, які утворилися, виникають сили тертя, які спочатку втягують штабу у валки, а далі забезпечують передачу енергії, що необхідна для здійснення процесу прокатки [2]. В процесі прокатки товщина штаби зменшується, а її довжина і ширина збільшуються, на що витрачається енергія. Таким чином утворюється осередок деформації, де діють нерівномірні напруження, що впливає на якість виробу [3, 4].

Визначено, що загальна робота пластичної деформації металевого зразка враховує роботу, що витрачена на створення потенційної енергії пружної деформації, роботу пластичної формозміни та утворення нової внутрішньої поверхні, роботу руйнування з утворенням двох нових зовнішніх поверхонь. З'ясовано перетворення енергії, підведеної до деформованого тіла в інші види [5]. На величину енергетичних витрат впливає величина обтиснення та швидкість деформації металу. Дослідниками багато уваги приділено впливу технологічних параметрів на осередок деформації при прокатуванні [1-7], швидкісним режимам деформації [8, 9] з метою визначення раціональних режимів обтиснення.

Ретельно досліджено сили, що виникають в осередку деформації [10] та їх вплив на стійкість смуги. У зв'язку з цим потрібно виявити закономірності впливу величини обтиснення, на швидкісні умови прокатування.

**Мета дослідження.** Визначити швидкісні умови прокатування в об'ємі осередку деформації для виявлення закономірностей впливу параметрів обробки на швидкість та час перебування металу між валками.

#### Задачі дослідження:

- виконати аналіз режимів повздовжнього прокатування та визначити раціональні;
- визначити об'єм і поверхню осередку деформації та час перебування металу в ньому;

– виявити закономірності впливу початкових умов прокатування на час перебування металу між валками та швидкість деформації.

**Методи дослідження.** В роботі використано методи дослідження, що містять науковий аналіз і узагальнення раніше виконаних досліджень процесів обробки металів тиском з метою збільшення точності, покращення, якості прокатних виробів та зменшення витрат енергії на виготовлення листів.

Удосконалено методику визначення об'єму і поверхні осередку деформації за рахунок отримання нових залежностей, які впливають на процес прокатування [11].

$$V_{одср} = 0,5Bb_0h_0 \sin \alpha,$$

де  $B$  – коефіцієнт, що залежить від режимів обтиснення та діаметру валків,  $B=1,8 \div 2,1$ ;

$V_{одср}$  – об'єм осередку деформації середній при повному режимі;

$b_0$  – початкова ширина смуги;

$h_0$  – початкова висота смуги.

Перевірка адекватності пропонуємих формул для визначення об'єму показала можливість похибки менше 1 %, а відношення швидкостей металу на вході і виході осередку деформації менше 5 %, що свідчить про достатню точність виявлених залежностей.

Визначено час перебування металу в осередку деформації [12] за формулою:

$$\tau = \frac{V_{одср}}{v_0 F_0},$$

де  $v_0$  – швидкість металу (м/с), який проходить через початкову площу поперечного перерізу  $F_0 = b_0 h_0$ .

Швидкість утворення нової поверхні при прокатуванні:

$$v_{\Delta h} = \frac{\Delta F}{\tau},$$

де  $\Delta F$  – величина новоутвореної поверхні.

**Результати дослідження швидкісних умов повздовжнього прокатування в об'ємі осередку деформації.** Досліджено вплив геометричних параметрів процесу на умови прокатування, що дозволило побудувати залежності між можливими обтисненнями при холодному та гарячому прокатуванні (рис. 1) [5].

Побудовано залежності між обтисненням, діаметром валків та кутом захоплення в межах їх зміни:  $\Delta h = 0,1 \div 280$  мм;  $D = 20 \div 1600$  мм;  $\alpha = 3 \div 36^\circ$ .

З рисунку 1 було визначено вплив відношення можливого обтиснення до діаметра валків та коефіцієнта тертя між поверхнею валків та поверхнею прокатуємого металу. Ці залежності дозволили визначити максимальні кути захоплення в залежності від умов прокатування та оброблюваний матеріал, що використовуються в дослідженнях (табл. 1). Досліджено швидкості фізико-механічних процесів в осередку деформації при обробці металів тиском. Співставлення часу перебування металу в осередку деформації обґрунтовує твердження, що процес обробки металів тиском є адиабатичним.

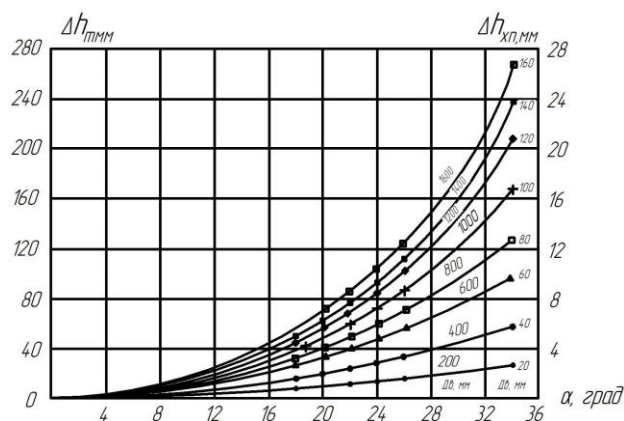


Рисунок 1 – Залежності між можливими обтисненнями при холодній ( $\Delta h_{хп}$ ) та гарячій ( $\Delta h_{гп}$ ) прокатці, діаметромвалків і кутом захвату

Таблиця 1 – Максимальні кути захвату при прокатуванні металів

№ з/п	Умови прокатування і прокатуємий матеріал	Кут захвату*		$\mu$	D, мм	$\Delta h$ , мм	$\frac{\Delta}{D}$	$\sin \alpha$
		рад	град					
1	З мастилом на добре відшліфованих валках	0,05÷0,07	3÷4	0,0524÷0,07	350÷550	0,35÷1,1	0,001÷0,002	0,052÷0,07
2	Без мастила на грубих валках	0,1÷0,14	6÷8	0,105÷0,14	350÷550	0,15÷2,75	0,005÷0,001	0,105÷0,14
3	Стальних листів	0,3÷0,38	18÷22	0,325÷0,404	615÷650	30,13÷47,3	0,049÷0,073	0,31÷0,375
4	Алюмінію при 350°C	0,35÷0,38	20÷22	0,364÷0,404	350÷700	21÷51,1	0,06÷0,08	0,34÷0,375
5	Нікелю при 1100°C і мельхіору при 950°C	0,38	22	0,404	350÷700	25,5÷51	0,073	0,375
6	Латуні при 800°C, (Л62 і Л68)	0,37÷0,42	21÷24	0,384÷0,445	500÷650	33,0÷56	0,07÷0,09	0,36÷0,41
7	Стальних сортових профілів	0,38÷0,42	22÷24	0,404÷0,445	800÷950	58,4÷82	0,07÷0,09	0,375÷0,41
8	Міді при 900°C	0,47	27	0,51	700÷800	76,3÷87,2	0,11	0,455
9	Стальних профілів на валках з насічкою, рифленою чи навареною поверхнею	0,47÷0,59	27÷34	0,51÷0,675	1000÷1200	109÷171	0,11÷0,17	0,45÷0,06

Уявлення про характер розподілу швидкостей деформації та дані про реологічні особливості металів дозволили вперше пояснити, яким чином відбувається збільшення або зменшення міцності металу. Було складено баланс зовнішньої, поверхні, об'єм і час

перебування металу в осередку деформації (табл. 2). З таблиці 2 видно, що при збільшенні початкової товщини смуги час перебування металу в осередку деформації збільшується, а швидкість деформації зменшується.

Таблиця 2 – Баланс зовнішньої, поверхні, об'єм і час перебування металу в осередку деформації

№ з/п	Показники	Режими прокатування *					
		1	2	3	4	5	6
1	Ширина штаби, м Заготовки Розкату	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		1,02	1,02	1,05	1,1	1,15	1,2
2	Товщина штаби, м Заготовки розкату	0,002	0,005	0,1	0,2	0,3	0,5
		0,00192	0,0047	0,092	0,18	0,255	0,4
3	Швидкість, м/с Заготовки розкату	20	15	10	8	5	3
		20,6	15,6	10,35	8,1	5,12	3,2
4	Продуктивність поверхнева, м <sup>2</sup> /с Вихідна Кінцева Приріст	40,08	30,15	22,0	19,2	13	9
		42,4	30,74	23,64	20,736	14,39	10,24
		2,32	0,59	1,64	1,536	1,39	1,24
5	Поверхня, м <sup>2</sup> Контактна Вільна Осередку	0,005	0,02	0,0822	0,203	0,334	0,498
		0,0000126	0,0002	0,0033	0,002	0,052	0,113
		0,0051	0,022	0,083	0,223	0,386	0,611
6	Об'єм осередку деформації, м <sup>3</sup> ·10 <sup>-6</sup>	0,0052	0,0546	3857	18433	41278,3	111372,7
7	Час перебування, с·10 <sup>-6</sup>	0,13	0,728	3857	11520,6	27518,7	74248,5
8	Швидкість деформації, с <sup>-1</sup>	7,7·10 <sup>6</sup>	1,4·10 <sup>6</sup>	2,6·10 <sup>2</sup>	86,8	0,36	13,5

\* 1, 2 – тонколистові стани холодного прокатування; 3, 4 – листові стани гарячого прокатування; 5, 6 – блюмінги і слябінги

Таким чином, вперше визначено закономірності впливу об'єму осередку деформації та його параметрів на час перебування металу в осередку деформації. Розрахунок часу перебування металу в осередку деформації показав, що метал під час прокатування знаходиться в осередку деформації в межах від  $7 \cdot 10^{-5}$  до, 0,2 с в залежності від режимів обробки. Для збільшення продуктивності процесу потрібно зменшувати час перебування металу в осередку деформації, що можливо при зменшенні початкової товщини смуги, або при збільшенні швидкості деформації.

#### Висновки:

– аналіз режимів повздовжнього прокатування дозволив визначити можливі обтиснення та максимальні кути захоплення при холодній та гарячій обробці тиском;

– визначено об'єм і поверхню осередку деформації та час перебування металу в ньому для перевірки адекватності пропонуємих залежностей, яка доводить, що при визначені об'єму осередку деформації можливість похибки менше 1 %, а відношення швидкостей металу на вході і виході осередку деформації менше 5 %, що свідчить про достатню точність виявлених залежностей.

– виявлено закономірності впливу початкових умов прокатування на час перебування металу між валками та швидкість деформації, що дозволяє зменшити час перебування металу в осередку деформації і, відповідно, збільшити продуктивність процесу.

#### Список літератури

1. Василев В.Д., Мінаєв А.О. *Теорія повздовжньої прокатки*. Донецьк: УНІТЕХ, 2009. 488 с.
2. Данченко В.М., Грінкевич В.О., Головко О.М. *Теорія процесів обробки металів тиском*: Підручник. Дніпропетровськ:

- Пороги, 2008. 370 с.
3. Серєда Б.П. *Обробка металів тиском: Навчальний посібник*., Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2009. – 344 с.
4. Максименко О.П., Лясота С.М., Романюк Р.Я. *Теорія процесів прокатного, трубного ковальсько-штампувального та волоочильного виробництва: Навчальний посібник*. Дніпропетровськ: ДДТУ, 2009. 208 с.
5. В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька. *Дослідження об'ємно-структурних і енергетичних перетворень в сталях при прокатуванні: Монографія*., Кривий Ріг: Видавництво (ФО-П Чернявський Д.О.), 2018. – 178 с.
7. Сторожев М.В. Попов Е.А. *Теория обработки металлов давлением: Уч-к для вузов*. М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
8. Грудев А.П. *Теория прокатки: Уч-к для вузов*. М: Металлургия, 1988. – 240 с.
9. Целиков А.И., Гришков А.И. *Теория прокатки*. М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
10. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е.. *Теория продольной прокатки*. М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
11. Максименко О.П., Лобойко Д.И. Баланс продольных сил в очаге деформации и предельные условия прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. № 4 (301), 2016. – С. 34-37.
12. Бережний М.М., Чубенко В.А., Хіноцька А.А., Шепель А. Результати розрахунку об'єму осередку деформації при повздовжньому прокатуванні. *Вісник Національного технічного університету України*, 2011., Випуск 62. – С. 112–116.
13. Бережний М.М., Чубенко В.А., Хіноцька А.А. *Набуття сталю реологічних властивостей в осередку деформації при прокатуванні: Монографія*. Кривий Ріг: Діонат, 2014. – 148 с.

#### References (transliterated):

1. Vasy'lev V.D., Minayev A.O. *Teoriya pozdovzhn'oyi prokatky*. Donec'k: UNITEK, 2009. – 488 p.
2. Danchenko V.M., Grinkevych V.O., Golovko O.M. *Teoriya procesiv obrobky metaliv ty'skom*: Pidruchny'k. Dnipropetrovs'k: Porogy', 2008. – 370 p.
3. Sereda V.P. *Obrobka metaliv ty'skom: Navchal'ny'j posibny'k*. Zaporizhzhya: RVV ZDIA, 2009. – 344 p.
4. Maksy'menko O.P., Lyasota S.M., Romanyuk R.Ya. *Teoriya procesiv prokatnogo, trubnogo koval's'ko-shtampoval'nogo ta volochy'l'nogo vy'robny'cziv: Navchal'ny'j posibny'k*. Dniprodzerzhyn's'k: DDTU, 2009. – 208 p.

5. V.A. Chubenko, A.A. Xincz`ka. *Doslidzhennya ob`yemno-strukturny`x i energety`chny`x peretvoren` v stalyax pry` prokatuvanni: Monografiya.*, Kry`vy`j Rig: Vy`davny`ctvo (FO-P Chernyavs`ky`j D.O.), 2018. – 178 p.
6. Storozhev M.V. Popov E.A. *Teory`ya obrabotky` metallov dovleny`em: Uch-k dlya vuzov.* Moscow: Mashy`nostroeny`e, 1971. – 424 p.
7. Grudev A.P. *Teory`ya prokatky`: Uch-k dlya vuzov.* Moscow: Metallurgy`ya, 1988. – 240 s.
8. Cely`kov A.Y., Gry`shkov A.Y. *Teory`ya prokatky.* Moscow: Metallurgy`ya, 1970. – 358 p.
9. Cely`kov A.Y., Ny`ky`ty`n G.S., Rokotyay S.E.. *Teory`ya prodol`noy prokatky`.* Moscow: Metallurgy`ya, 1980. – 320 p.
10. Maksy`menko O.P., Lobjko D.Y`. Balans prodol`ny`x sy`l v ochage deformacy`y` y` predel`nye uslovy`ya prokatky`. *Metallurgy`cheskaya y` gornorudnaya promyshlennost`.* No 4 (301), 2016. – P. 34–37.
11. Berezny`j M.M., Chubenko V.A., Xincz`ka A.A., Shepel` A. Rezul`taty` rozrakhunku ob`yemu oseredku deformaciyi pry` povzdovzhn`omu prokatuvanni. *Visnyk Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu Ukrainy`* Vy`pusk 62. 2011. – P. 112–116.
12. Berezny`j M.M., Chubenko V.A., Xincz`ka A.A. *Nabuttya stallyu reologichny`x vlasty`vostej v oseredku deformaciyi pry` prokatuvanni: Monografiya.* Kry`vy`j Rig: Dionat, 2014. – 148 p.

Надійшла (received) 10.11.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Чубенко Вікторія Анатоліївна (Чубенко Виктория Анатольевна, Chubenko Victoria Anatolievna)** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, доцент кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва, м. Кривий Ріг, Україна, тел.: 0507472823, e-mail: victoria\_4@rambler.ru

**Хіноцька Алла Анатоліївна (Хиноцкая Алла Анатольевна, Khinotskaya Alla Anatolievna)** – старший викладач кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, тел.: 0676287472, e-mail: vfoer@ukr.net