

УДК 621.771

Прищип Микола Гнатович, професор, кандидат технічних наук
 Бондаренко Юлія Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук
 Бадулка Дмитро Володимирович, магістрант

ОЦІНКА ПОХИБОК ФОРМУЛ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗШИРЕННЯ МЕТАЛУ ПІД ЧАС ПРОКАТКИ

Запорізька державна інженерна академія

Здійснено порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних щодо визначення розширення металу під час прокатки. Одержані результати дозволили визначити найбільш точні формули для обчислення зазначеного показника.

Ключові слова: прокатка, метал, розширення, осередок деформації, формула

Вступ. Операцію розширення металу під час прокатки вивчають протягом тривалого часу: було запропоновано значну кількість формул [1-5]. Найбільш відомі формули для визначення зазначеного показника зведено до чотирьох головних типів.

Розширення, в першу чергу, пов'язане з обтисканням і його спочатку визначали лише залежно від абсолютного обтискання Δh . Одна з перших найпростіших емпіричних формул розширення лінійного типу запропонована у роботі Л. Жеза [6]:

$$\Delta b = k \cdot \Delta h, \quad (3)$$

де Δb – розширення; k – показник розширення, $k = 0,35 \dots 0,40$, верхню межу рекомендовано для прокатки м'якої сталі, нижню – для сталі з підвищеним вмістом вуглецю.

Пізніше було встановлено, що показник розширення k у формулі (1) змінюється у широких межах: від 0,1 у разі прокатки товстих штаб до 1,0 і більше за прокатки тонких штаб, тобто залежність розширення від різних чинників є більш складною. Перш за все, зазначений показник залежить від товщини штаби H , отже, відносного обтискання, а також діаметра валків, коефіцієнта тертя та інших чинників, що впливають на коефіцієнт контактного тертя.

Незважаючи на теоретичну недосконалість формули (1), її вживають в інженерних розрахунках для попереднього визначення розширення, підбираючи відповідний коефіцієнт пропорційності з урахуванням товщини штаби.

Більш досконалою є формула, яку було запропоновано Е. Зібелем [7] та незалежно від нього Б.П. Бахтіновим [8] та іншими авторами:

$$\Delta b = \frac{k \cdot \Delta h}{H} \cdot (R \cdot \Delta h)^{0,5}, \quad (2)$$

де Δh – абсолютне обтискання; H – товщина розкату; $\Delta h/H$ – відносне обтискання; $(R \cdot \Delta h)^{0,5}$ – хорда дуги дотику.

Значення коефіцієнта k для формули (2) було рекомендовано Е. Зібелем у межах 0,35...0,45, Б.П. Бахтіновим – 0,28...0,48, а М.І. Злотніковим – сталим (0,33).

В роботі [9] було показано, що $k = \gamma/\alpha$. Тоді, враховуючи нейтральний кут $\gamma = 0,5\alpha \cdot (1 - \alpha/2f)$ і кут дотику $\alpha = (\Delta h/R)^{0,5}$, а, також, коефіцієнт $k = 0,5 \left[1 - (1/2f) \cdot (\Delta h/R)^{0,5} \right]$, на основі закону найменшого опору отримано формулу для обчислення розширення третього типу:

$$\Delta b = \frac{0,575 \Delta h}{H} \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \frac{\Delta h}{2f} \right], \quad (3)$$

де враховано всі головні чинники прокатки, включаючи коефіцієнт тертя f .

Споріднені формули для визначення розширення запропонували С.І. Губкін, С.М. Петров та інші дослідники [8]. Слід зазначити, що у формулі (3) головним аргументом є наближене обтискання $\Delta h/H$, тоді як правильніше визначити розширення з урахуванням істинного обтискання у логарифмічній формі.

Четверту групу формул розширення, отриманих на основі гіпотези шляху найменшого опору, складають формули логарифмічного типу [10,11]

$$\Delta b = R \cdot \gamma \cdot \ln \eta. \quad (4)$$

Тоді враховуючи, що коефіцієнт обтискання $\eta = H/b$ і кут поділу осередку деформації на зони випередження та відставання γ становить

$$\gamma = 0,5 \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{0,5} \cdot \left[1 - \frac{1}{2f} \cdot \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{0,5} \right], \quad (5)$$

одержують формулу для обчислення розширення у нижче наведеному вигляді:

$$\Delta b = 0,5 \ln \left(\frac{H}{h} \right) \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \frac{\Delta h}{2f} \right]. \quad (6)$$

Формула (6) враховує істинне обтискання $\ln(H/h)$, а також всі інші основні фактори прокатки.

У процесі прокатки з нормальним обтисканням, коли коефіцієнт обтискання $\eta \geq 2$, логарифмічну формулу розширення, не змінюючи її природи та зберігаючи достатню точність і маючи на увазі, що $\ln(H/h) \approx (H-h)/(H \cdot h)^{0,5} = \Delta h / (H \cdot h)^{0,5}$, можна перетворити на більш зручний для розрахунків вигляд:

$$\Delta b = \frac{\Delta h}{2(H \cdot h)^{0,5}} \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \frac{\Delta h}{2f} \right]. \quad (7)$$

Формули розширення (3), (6) і (7) мають структурну схожість, а відрізняються тим, що у формулі (3) враховується наближене відносне обтискання $\Delta h/H$, а в формулах (6) і (7) – більш точне істинне обтискання $\ln(H/h)$. У разі відносно малих обтискань чисельні значення розширення за обома формулами мало відрізняються, але із збільшенням обтискання їх різниця буде зростати. Тому краще використовувати точніші формули (6) і (7).

У всіх розглянутих формулах розширення відсутньою є ширина розкату. Пояснюється це тим, що під час прокатки за умов широкого осередку деформації (такі формули саме й призначені для зазначених умов), вплив ширини штаби на розширення є незначним і ним звичайно нехтують, хоча, як встановлено експериментально та підтверджено теоретично [9,10], за умов широкого осередку деформації зі збільшенням ширини розкату розширення дещо зменшується. За умов вузького осередку деформації, навпаки, із збільшенням ширини розкату значення розширення суттєво зростає тому шириною розкату нехтувати не можна [10].

Під час аналізу формули розширення третього (3) та четвертого (6) і (7) типу, видно, що за умов широкого осередку деформації розширення збільшується із зростанням абсолютного Δh і відносного $\Delta h/H$ або $\ln(H/h)$ обтискання, діаметра валків, хорди дуги дотику та коефіцієнта тертя f . Головним аргументом, від якого залежить розширення, є відносне обтискання, меншою мірою – хорда дуги дотику, а отже, і діаметр валків, та ще менше впливає коефіцієнт тертя. Тому в інженерних розрахунках у разі гарячої прокатки сталі з достатньою точністю можна

брати для сталевих валків $f = 0,4$, а для чавунних $f = 0,3$.

Постановка завдання – виконати порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних щодо визначення розширення металу під час прокатки, що дозволить вибрати найбільш точні формули.

Головна частина досліджень. Роботу виконували на двовалковому стані з діаметром валків 200 мм. Під час дослідження впливу обтиску на розширення здійснювали прокатку трьох уступчастих за формою і розмірами зразків із свинцю (рис 1а) зі збільшенням обтиску: $\Delta h_1 = 4,2$ мм, $\Delta h_2 = 7,2$ мм; $\Delta h_3 = 10,2$ мм. Товщину і ширину зразків вимірювали до та після прокатки.

Дослідження впливу початкової ширини b_0 на розширення виконували за прокатки одного уступчастого за шириною зразка (рис. 1б) із свинцю однієї товщини H_0 , завдяки чому обтискання було постійним.

Обчислення розширення Δb здійснювали за формулами:

– Е. Зібеля:

$$\Delta b = (0,35 \dots 0,45) \Delta h / h_0 \cdot (R \cdot \Delta h)^{0,5};$$

– С.І. Губкіна:

$$\Delta b = (1 + \Delta h / H_0) \cdot \mu \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \Delta h / 2f \right] \cdot \Delta h / H_0;$$

– Б.П. Бахтінова:

$$\Delta b = 1,15 \Delta h / 2h_0 \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \Delta h / 2f \right];$$

– О.І. Целікова:

$$\Delta b = 0,54 C_b \cdot C_\sigma \cdot \left[(R \cdot \Delta h)^{0,5} - \Delta h / 2f \right] \cdot \ln(H_0 / h_1);$$

– О.П. Чекмарьова:

$$\Delta b = \frac{2k_B \cdot \Delta h \cdot b_{cep}}{(H_0 + h_1) \cdot \left[1 + (1 + \alpha) \left(\frac{b_{cep}}{R \cdot \alpha} \right)^n \right]}$$

де h_0, H_0 – товщина зразків до та після прокатки відповідно, R – радіус бочки валків, b_{cep} – середня ширина зразка; C_σ, C_b, k_B, n – коефіцієнти.

У табл. 1 і 2 наведено експериментальні дані щодо впливу ширини зразків до прокатки $\Delta b = f(\Delta B_0)$ та обтиснення $\Delta b_1 = f(\Delta h)$ на розширення за експериментальними даними.

Результати обчислень розширення за різними формулами подано у табл. 3-4.

Графічні залежності експериментальних та розрахункових значень, отриманих за вищенаведеними формулами, наведено на рис. 2 та 3.

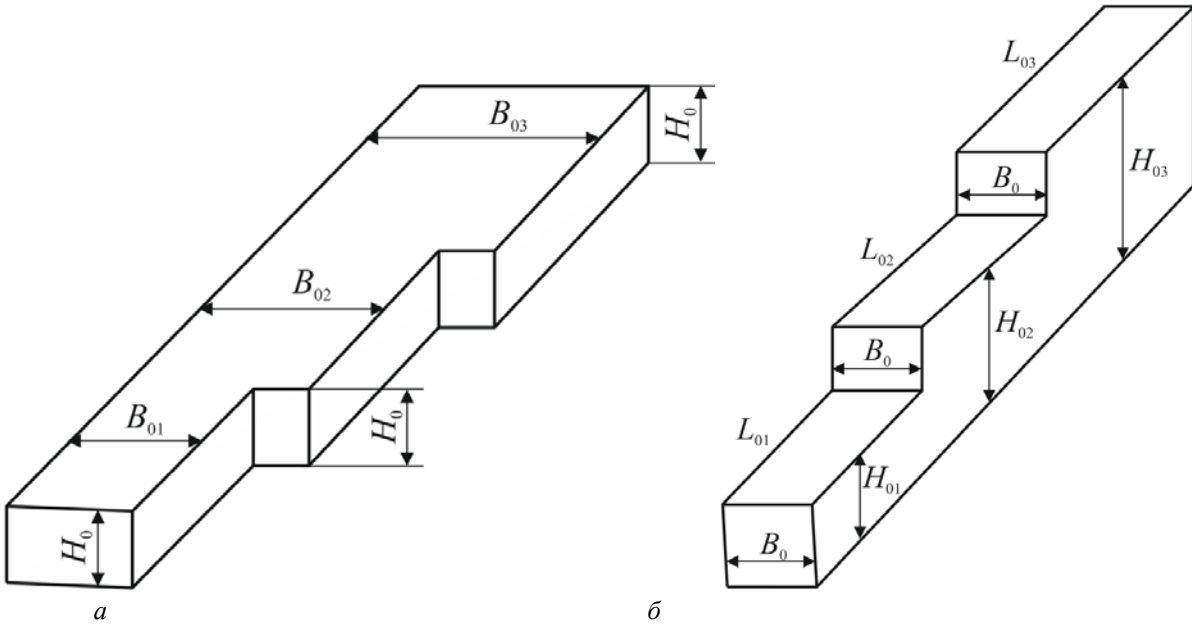


Рисунок 1 – Зразок, ступінчатий за шириною (а) та висотою (б)

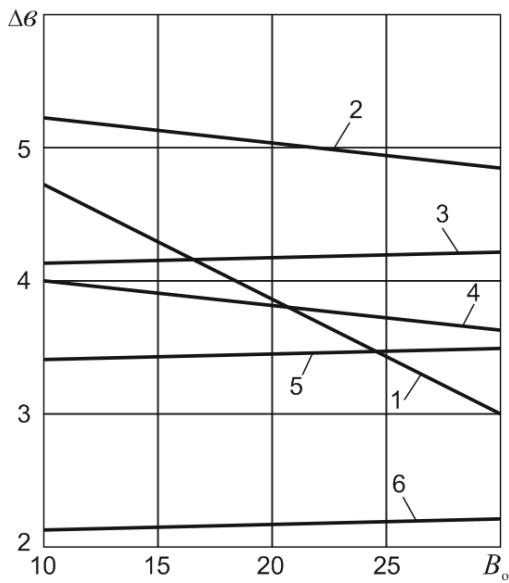


Рисунок 2 – Залежність розширення Δb від вихідної ширини B_0 за $\Delta h = \text{const}$; експериментальна (1) та розрахункова за формулами О.П. Чекмарьова (2), Е. Зібеля (3), О.І. Целікова (4), Б.П. Бахтінова (5), С.І. Губкіна (6)

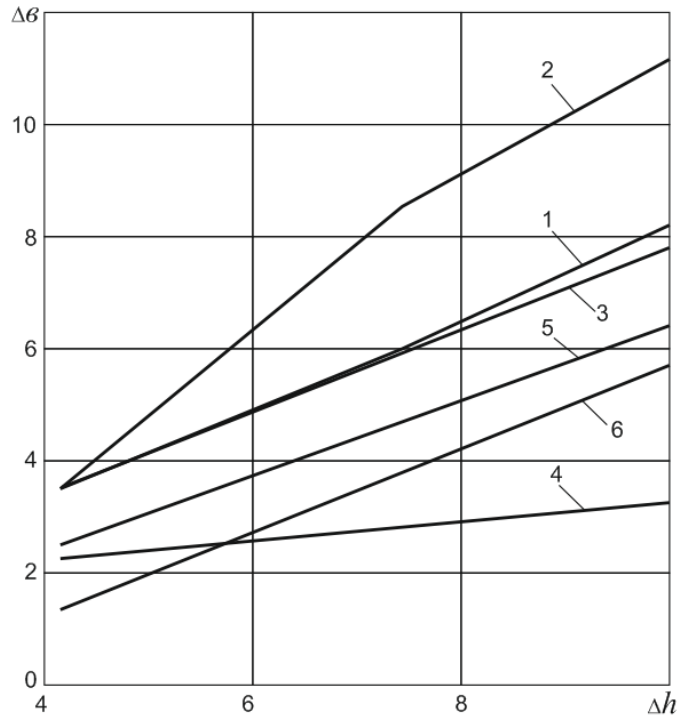


Рисунок 3 – Залежність розширення Δb від абсолютного обтіснення Δh , за $B_0 = \text{const}$; експериментальна (1) та розрахункова за формулами О.П. Чекмарьова (2), Е. Зібеля (3), Б.П. Бахтінова (4), С.І. Губкіна (5), О.І. Целікова (6)

Таблиця 1 – Експериментальні дані щодо впливу ширини зразків до прокатки на розширення $\Delta b = f(\Delta B_0)$

Розміри зразків, мм				Коефіцієнти деформації		Параметри осередку деформації							
H_0	B_0	h_1	b_1	Δh , мм	Δb , мм	$b_{сер}$, мм	$h_{сер}$, мм	α	k	$b_{сер}/h_{сер}$	$\ln(H_0/h)$	H_0/h_1	C_b
9,8	10,2	4,8	14,9	5,0	4,7	12,6	7,3	0,24	0,46	1,72	0,70	2,04	0,90
9,8	20,1	4,8	24,1	5,0	4,0	22,1	7,3	0,24	0,20	3,03	0,70	2,04	0,82
9,8	30,2	4,8	33,2	5,0	3,0	31,7	7,3	0,24	0,10	4,34	0,70	2,04	0,78

Таблиця 2 – Експериментальні дані щодо впливу обтиснення на розширення $\Delta b = f(\Delta h)$

Розміри зразків, мм				Коефіцієнти деформації		Параметри осередку деформації							
H_0	B_0	h_1	b_1	Δh , мм	Δb , мм	$b_{сер}$, мм	$h_{сер}$, мм	α	k	$b_{сер}/h_{сер}$	$\ln(H_0/h)$	H_0/h_1	C_b
9,0	15,8	4,8	19,2	4,2	3,4	17,5	6,9	0,20	0,22	2,54	0,76	2,13	0,58
12,0	15,8	4,8	21,6	7,2	5,8	18,7	8,4	0,27	0,37	2,23	0,92	2,50	0,45
15,0	15,8	4,8	24,2	10,2	8,4	20,0	9,9	0,32	0,53	2,03	1,14	3,13	0,35

Таблиця 3 – Результати обчислення похибки впливу ширини зразків до прокатки на розширення $\Delta b = f(\Delta B_0)$

Розширення	За формулами:														
	Е. Зібеля			С.І. Губкіна			Б.П. Бахтінова			О.І. Целікова			О.П. Чекмарьова		
Δb	Δb_3	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Г$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Б$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Ц$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Ч$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$
4,7	4,20	-0,50	-10,2	2,21	-2,5	-53,2	3,40	-1,30	-27,7	4,00	-0,60	-12,8	5,27	+0,57	+12,1
4,0	4,20	+0,70	+5,0	2,21	-1,8	-45,0	3,40	-0,60	-15,3	3,76	-0,24	-6,0	5,10	+1,10	+27,5
3,0	4,20	+1,20	+40,0	2,21	-0,8	-26,7	3,40	+0,40	+13,3	3,61	+0,61	+20,0	4,8	+1,80	+39,5

Примітка: $\pm\delta\Delta b$, $\pm\delta\%$ - відповідно відхилення та похибка розрахункового розширення від експериментальних даних

Таблиця 4 – Результати обчислення похибки впливу обтиснення на розширення $\Delta b = f(\Delta h)$

Розширення	За формулами:														
	Е. Зібеля			С.І. Губкіна			Б.П. Бахтінова			О.І. Целікова			О.П. Чекмарьова		
Δb	Δb_3	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Г$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Б$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Ц$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$	$\Delta b_Ч$	$\pm\delta\Delta b$	$\pm\delta\%$
3,4	3,55	+0,15	-4,0	1,35	-2,1	-60,0	2,70	-0,70	-20,8	2,38	-1,02	-30,0	3,4	-0,05	-1,5
5,8	5,90	+0,10	+1,6	3,50	-2,3	-40,0	4,70	-1,10	-19,0	3,01	-2,79	-48,0	8,4	+2,6	+31,3
8,4	8,00	-0,40	-4,7	5,85	-2,5	-30,0	6,60	-1,80	-21,0	3,23	-5,17	-61,5	11,3	+2,9	+25,6

Обговорення результатів. Аналіз впливу ширини зразків до прокатки на розширення показує, що розрахунки за формулою С.І. Губкіна дають заниженні, а за формулою О.П. Чекмарьова – завищенні результати. Одночасно під час обчислень за формулами Е. Зібеля та Б.П. Бахтінова одержано значення, які є близькими до експериментальних даних розширення, але не показують впливу початкової ширини на поперечну деформацію. Найбільш точною є формула розширення логарифмічного типу О.І. Целікова.

Аналіз результатів розрахунків розширення за різними формулами залежно від абсолютного обтиску показує, що використання формули О.П. Чекмарьова дозволяє одержати найбільш точні результати в області обтиснень, прийнятих

на практиці, але за великих обтиснень розрахункове розширення значно перевищує експериментальні значення. В той час формули О.І. Целікова та С.І. Губкіна дають занижені результати щодо розрахункового розширення порівняно з експериментальними даними. Найбільш точною формулою для розрахункового визначення розширення за різних обтискань є формула Е. Зібеля.

Висновки. Виконано аналіз результатів експериментів і обчислень з визначення розширення металу під час прокатки. Встановлено, що найбільш точною формулою для розрахункового визначення зазначеного показника за різних обтискань у процесі прокатки є формула Зібеля.

Бібліографічний список

1. **Чекмарев, А. П.** Теория продольной прокатки [Текст] / А. П. Чекмарев, А. А. Нефедов, В. А. Николаев. – Харьков. : ХГУК, 1965. – Т. 2. – 206 с.
2. **Целиков, А. И.** Теория продольной прокатки [Текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
3. **Николаев, В. А.** Теория и практика процессов прокатки [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. – 232 с.
4. **Грудев, В. П.** Теория прокатки [Текст] / В. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1988. – 288 с.
5. **Старченко, Д. И.** Кинематика позадвальной прокатки [Текст] / Д. И. Старченко. – Київ : НМКВО, 1992. – 296 с.
6. **Жез, Л.** Калибровка валков при прокатке железа и стали [Текст] / Л. Жез.; пер. с франц. – Л. : Техника и производство, 1929. – 327 с.
7. **Zibel, E.** Widerstand deformation und auslauf material unter auswalzen [Text] / E. Zibel // Stahl und Eisen. – 1910. – No. 51. – S. 1769-1775.
8. **Бахтинов, Б. П.** Некоторые вопросы теории прокатки [Текст] / Б. П. Бахтинов // Сталь, 1946. – № 4. – С. 93-94.
9. **Целиков, А. И.** Теория прокатки [Текст] / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – Справочник. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
10. **Старченко, Д. И.** Опережение, отставание и уширение при прокатке с нормальными и сверхвысокими обжатиями [Текст] / Д. И. Старченко. – Труды межвуз. научно-техн. конф., – Т. 1. – 1958. – С. 48-61.
11. **Старченко, Д. И.** Теорическое исследование уширения при прокатке [Текст] / Д. И. Старченко // Производство и обработка стали : сборник научн. трудов Мариупольского металлургического института. – 1960. – Вып. V. – С. 156-174.
12. **Бондаренко, Ю. В.** Розробка алгоритму розрахунку раціональних режимів прокатки на блюмінгу [Текст] / Ю. В. Бондаренко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 12-15.

Прищип Николай Игнатьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

Бондаренко Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

Бадулка Дмитрий Владимирович, магистрант кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: admin@zgia.zp.ua

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ

Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по определению расширения металла. Полученные результаты позволили определить наиболее точные формулы для расчета данного показателя.

Ключевые слова: прокатка, металл, расширение, очаг деформации, формула

Prischip Nicholas, Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Treatment of Metals by Pressure of Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

Bondarenko Julia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Treatment of Metals by Pressure of Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail metal.forming@zgia.zp.ua

Badulka Dmitri, Postgraduate of Department of Treatment of Metals by Pressure of Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail admin@zgia.zp.ua

AN ESTIMATION OF ERROR OF FORMULAS FOR DETERMINATION OF METAL EXPANSION AT ROLLING

A comparative analysis of calculated and experimental data on the determination of metal expansion was carried out. Derived results allows to determine the most accurate formulas for estimation of the this index.

Keywords: rolling, metal, expansion, deformation zone, formula

Стаття надійшла до редакції 26.03.2018 р.
Рецензент, проф. Й.К. Огинський

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>