

М.М. Бережний, д-р.техн.наук, проф., В.А. Чубенко, канд.техн.наук, доц., А.А. Хіноцька, асист.,
А. Шепель, студ.
Криворізький технічний університет, м. Кривий Ріг, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ОБ'ЄМУ ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОКАТУВАННІ

Предложено формулы для определения объема очага деформации при продольной прокатке. Впервые определены величины объема очага деформации полос при холодной и горячей обработке давлением. Они изменяются в границах от $(0,004 \div 0,058) \cdot 10^6$ до $0,1 \div 0,14 \text{ м}^3$. Расчеты этого объема определили постоянную составляющую, значение которой около 2, и переменную, значение которой изменяются от $(2,52 \div 26) \cdot 10^3$ до $(2 \div 55) \cdot 10^6$. Проверка адекватности формул для определения объема очага деформации показала возможность ошибки меньше 1 %, а отношения скоростей металла при входе в очаг деформации и выходе из него меньше 5 %.

Formulas are offered for determination of volume of hearth of deformation at the longitudinal rolling. The sizes of volume of hearth of deformation of stripes are first certain at cold and hot treatment pressure. They change in borders from $(0,004 \div 0,058) \cdot 10^6$ to $0,1 \div 0,14 \text{ м}^3$. The calculations of this volume defined a permanent constituent value of that about 2, and variable value of that change from $(2,52 \div 26) \cdot 10^3$ to $(2 \div 55) \cdot 10^6$. Verification of adequacy of formulas for determination of volume of hearth of deformation showed possibility of error меньше 1 %, and relations of speeds of metal at included in the hearth of deformation and exit from him меньше 5 %.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В сучасній теорії прокатного виробництва багато уваги приділяється вивченню осередку деформації при прокатуванні, визначенню його коефіцієнтів та параметрів [1]. Це має великий вплив на визначення технологічних параметрів прокатування [2], що приводить до підвищення продуктивності і якості прокатування. Нам відомо, що осередок деформації – це об'єм металу, що підлягає пластичній деформації в цю саме мить.

Аналіз досліджень та публікацій показує, що величина цього об'єму металу в теорії прокатки не визначається [1 – 6]. Вивчення об'єму осередку деформації є задача актуальна, тому що це дозволить глибше вивчити осередок деформації, його вплив на режими прокатування, на якість отриманих виробів.

Постановка завдання: перевірити адекватність наведених формул визначення об'єму осередку деформації та відношення швидкостей металу на вході і виході в осередок деформації.

Викладення матеріалу та результатів. Нами запропоновано формули розрахунку об'єму осередку деформації:

$$V_{od}^1 = 0,5b_0h_0R \sin \frac{\alpha_y}{2} \left[1 + \frac{b_1h_1}{b_0h_0} + \frac{R}{h_0} \left(1 + \frac{b_1}{b_0} \right) \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \right]; \quad (1)$$

$$V_{od}^{11} = 0,5b_0h_0R \sin \frac{\alpha_y}{2} \left[\frac{b_1}{b_0} \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \right) - \frac{3h_1}{h_0} - 1 + \frac{2R}{h} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$V_{od}^{111} = 0,5b_0h_0R \sin \frac{\alpha_y}{2} \left[2 + \frac{2b_1R}{b_0h_0} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \right]; \quad (3)$$

де: h_0, h_1 – висота смуги до та після прокатування;

b_0, b_1 – ширина смуги до та після прокатування;

R – радіус валків, $\frac{\alpha_y}{2}$ – кут захвату.

Для перевірки адекватності формул визначення об'єму осередку деформації та відношення швидкостей металу на вході і виході в осередок деформації приймаємо за даними [1 – 8] геометричні характеристики режиму прокатування наведені в табл. 1.

Використовуючи дані табл. 1 розраховували значення об'єму осередку деформації за трьома формулами і середнє його значення, звівши ці показники в табл. 2. В цій таблиці також наведено величини двох множників добутку, яким є названий осередок: частина $A^1 = A^{11} = A^{111}$ – однакова для всіх трьох формул, та маюча розмірність об'єму (мм^3 чи м^3) частина $B^1 \approx B^{11} \approx B^{111}$ – різна за складом відношень для цих трьох формул,

безрозмірна і змінюється від формули до формули і від режиму прокатування до прокатування значно менше першої частини А.

Для додаткового вивчення об'єму осередку деформації розрахуємо середні його значення як середнє арифметичне V_{odcp}^* з трьох формул і як за формулою, що узагальнює формули (1)-(3) V_{odcp}^{**} (табл. 2).

Таблиця 1

| Параметри прокатування в характерних випадках | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| * № пп | ** $\frac{\alpha_z}{2}$, град | ** $\frac{\alpha_y}{2}$, град | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | b_0 , мм | b_1 , мм | Δb , мм | v_0 , м/с | v_1 , м/с | R_B , мм |
| 1 | 4 | 2,7 | 2,0 | 1,92 | 0,08 | 1000 | 1010 | 10 | 20 | 21,9 | 60 |
| 2 | 10 | 6,0 | 5,0 | 4,7 | 0,3 | 1000 | 1020 | 20 | 15 | 17,15 | 100 |
| 3 | 15 | 11,54 | 100 | 92 | 8 | 1000 | 1100 | 100 | 10 | 11,4 | 200 |
| 4 | 24 | 18,5 | 200 | 180 | 20 | 1000 | 1150 | 150 | 8 | 9,0 | 300 |
| 5 | 29 | 22,3 | 300 | 255 | 45 | 1000 | 1170 | 170 | 5 | 5,7 | 400 |
| 6 | 34 | 26,0 | 500 | 400 | 100 | 1000 | 1200 | 200 | 3 | 3,4 | 500 |

*1,2 – Листові стани холодної прокатки; 3,4 – Листової стани гарячої прокатки; 5, 6 – Блємінги і слябінги;

** – $\frac{\alpha_z}{2}$, $\frac{\alpha_y}{2}$ - кути захвату та при усталеному режимі прокатування.

$$V_{od}^{**} = 0,5b_0h_0R \sin \frac{\alpha_y}{2} \left[\frac{b_1}{3b_0} + \frac{3h_1}{h_0} + \frac{3R}{h_0} \left(1 + \frac{b_1}{b_0} \right) \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) + \frac{2}{3} \right]; \quad (4)$$

Далі прирівнюємо неоднакові частини формул (1)-(3), якими визначено об'єм одного й того ж осередку деформації. Будемо прирівнювати $V_{od}^1 = V_{od}^{11}$, $V_{od}^{11} = V_{od}^{111}$, $V_{od}^1 = V_{od}^{111}$.

Як видно (табл. 2) об'єм осередку деформації, визначений трьома способами, має загальний множник $0,5 b_0 h_0 R \sin \frac{\alpha_y}{2} = A$ та суму безрозмірних відношень параметрів деформації (обтиснення, уширення, швидкостей на входу і виході з осередку розкату, радіуса валків та висоти (товщини) штаби), з якої віднімаються об'єми поза осередком деформації, залучені до розрахунку. Саме частини формул для визначення об'єму осередку деформації, якими вони відрізняються одна від одної цікаві для вивчення зв'язку між складовими відношеннями.

Таблиця 2

| № режи- мів з табл..1 | Об'єми осередку деформації та його складових частин А і В | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---------------|--------------------|--------------|--------------------|-----------|--------------------|------------|--------------------|---------------|
| | Об'єми осередку деформації, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$ | | | | | | | | | |
| | V_{od}^1 | V_{od}^{11} | V_{od}^{111} | V_{odcp}^* | V_{odcp}^{**} | | | | | |
| 1 | 0,0054 | 0,004 | 0,0042 | 0,0453 | 0,005813 | | | | | |
| 2 | 0,0466 | 0,054 | 0,0574 | 0,0526 | 0,05594 | | | | | |
| 3 | 4012 | 5538 | 3994 | 4513 | 3895 | | | | | |
| 4 | 19085 | 17006 | 18960 | 18350 | 18300 | | | | | |
| 5 | 43847 | 37807 | 44702 | 42119 | 41800 | | | | | |
| 6 | 103347 | 140937 | 107338 | 117208 | 98239 | | | | | |
| | A^1 | B^1 | A^{11} | B^{11} | A^{111} | B^{111} | A_{cp}^* | B_{cp}^* | A_{cp}^{**} | B_{cp}^{**} |
| 1 | 2520 | 2,142 | 2520 | 1,578 | 2520 | 1,655 | 2520 | 1,792 | 2520 | 2,307 |
| 2 | $26 \cdot 10^3$ | 1,793 | $26 \cdot 10^3$ | 2,083 | $26 \cdot 10^3$ | 2,207 | $26 \cdot 10^3$ | 2,028 | $26 \cdot 10^3$ | 2,151 |
| 3 | $2 \cdot 10^6$ | 2,006 | $2 \cdot 10^6$ | 2,766 | $2 \cdot 10^6$ | 1,997 | $2 \cdot 10^6$ | 2,256 | $2 \cdot 10^6$ | 1,947 |
| 4 | $9,6 \cdot 10^6$ | 1,988 | $9,6 \cdot 10^6$ | 1,771 | $9,6 \cdot 10^6$ | 1,975 | $9,6 \cdot 10^6$ | 1,91 | $9,6 \cdot 10^6$ | 1,903 |
| 5 | $22,8 \cdot 10^6$ | 1,923 | $22,8 \cdot 10^6$ | 1,658 | $22,8 \cdot 10^6$ | 1,961 | $22,8 \cdot 10^6$ | 1,847 | $22,8 \cdot 10^6$ | 1,834 |
| 6 | $54,75 \cdot 10^6$ | 1,888 | $54,75 \cdot 10^6$ | 2,574 | $54,75 \cdot 10^6$ | 1,961 | $54,75 \cdot 10^6$ | 2,141 | $54,75 \cdot 10^6$ | 1,795 |

V_{odcp}^* - середнє арифметичне за формулами (1)-(3);

V_{odcp}^{**} - за узагальнюючою формулою (4).

Усреднення безрозмірної складової об'єму осередку деформації за формулами і режимами дало результати, що наведено у нижній частині табл. 2.

Отже, як видно з табл. 2 середні значення складової об'єму осередку деформації за формулами і режимами відрізняються на

$$\frac{1,996 - 1,9957}{1,996} \times 100 = 0,015 \%$$

Ці середні значення V відрізняються від 2: $\frac{2 - 1,9957}{2} \times 100 = 0,215 \%$. При такій малій неув'язці пропонується меншу складову добутку AB прийняти $V=2$.

Розрахунок випередження виконували за формулами:

$$\frac{v_0^1}{v_1^{11}} = 0,5 \left[\frac{b_1}{b_0} + \frac{3h_1}{h_0} + \frac{R}{h_0} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \left(1 - \frac{b_1}{b_0} \right) - 2 \right]; \quad (5)$$

$$\frac{v_0^1}{v_1^{111}} = 1 - \frac{R}{h_0} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \left(1 - \frac{b_1}{b_0} \right); \quad (6)$$

$$\frac{v_0^{11}}{v_1^{111}} = \frac{b_1}{b_0} + \frac{3h_1}{h_0} - \frac{2R}{h_0} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) - \frac{2b_1 R}{b_0 h_0} \left(1 - \frac{b_1}{b_0} \right) - 1; \quad (7)$$

Середні значення лінійних швидкостей розкату після захоплення валками зведено в табл. 3. Там же наведено і середні значення за середньою узагальнюючою формулою (8).

$$\frac{v_{0cp}^1}{v_{1ch}^{11}} = 0,5 \left[\frac{b_1}{b_0} + 3 \frac{h_1}{h_0} + \frac{R}{h_0} \left(1 - \frac{0,0174 \frac{\alpha_y}{2}}{\sin \frac{\alpha_y}{2}} \right) \left(1 - \frac{b_1}{b_0} \right) - 2 \right]; \quad (8)$$

Таблиця 3

Середні значення відношення лінійних швидкостей валків та розкату на виході з валків, розраховані за формулами (5)-(8)

| №№ режимів за табл.1 | Значення відношення швидкості | | | | |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | $\frac{v_0^1}{v_1^{11}}$ | $\frac{v_0^1}{v_1^{111}}$ | $\frac{v_0^{11}}{v_1^{111}}$ | $\frac{v_{0cp}^*}{v_{1cp}}$ | $\frac{v_{0cp}^{**}}{v_{1cp}}$ |
| 1 | 0,944 | 0,829 | 0,8866 | 0,887 | 0,946 |
| 2 | 0,919 | 0,9977 | 0,835 | 0,917 | 0,92 |
| 3 | 0,435 | 0,9998 | 0,86 | 0,765 | 0,93 |
| 4 | 0,6926 | 0,997 | 0,843 | 0,922 | 0,923 |
| 5 | 0,6857 | 0,9994 | 0,708 | 0,855 | 0,867 |
| 6 | 0,803 | 0,993 | 0,601 | 0,799 | 0,7967 |
| середнє | 0,814 | 0,969 | 0,789 | 0,8575 | 0,897 |

$\frac{v_{0cp}^*}{v_{1cp}}$ - середні значення відношень швидкостей, розрахованих за наведеними формулами (5)-(7);

v_{1cp}

$\frac{v_{0cp}^{**}}{v_{1cp}}$ - середнє значення відношення швидкостей за узагальнюючою формулою (8).

v_{1cp}

Різниця між середніми значеннями за формулами і за режимами:

$$\frac{0,8575 - 0,8574}{0,8575} \cdot 100 = 0,017 \%$$

Ці середні значення відрізняються від середнього значення за узагальнюючою формулою:

$$\frac{0,897 - 0,8574}{0,897} \cdot 100 = 4,62 \%$$

Внесок же великого перемінного члена добутку і малого більш-менш сталого члена наступним чином:

перший член збільшується від першого до шостого режиму в $\frac{54,75 \cdot 10^6}{2520} = 21726,2$ раз, а другий член змінюється в

межах $\frac{2,307}{1,795} = 1,285$ раз. Співвідношення між членами змінюється від $\frac{2520}{2,307} = 1092,3$ до $\frac{54,75 \cdot 10^6}{1092,3} = 27923$ раз

перший член добутку превалірує над другим співмножником. Виходячи з закону про постійність секундного об'єму металу, який проходить через площу поперечного перерізу на вході і виході з осередку деформації, або з закону безперервності потоку металу, можна вважати подовження – співвідношення швидкості на вході до швидкості на

виході в осередок деформації, як відношення довжин розкату після і до осередку деформації [7, 8]: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{l_0}{l_1}$ або

$\frac{v_1}{v_0} = \frac{l_1}{l_0} = \frac{b_0 h_0}{b_1 h_1}$; тобто прокатування здійснюється, коли відбувається зміна поперечного перерізу розкату, а з ним і

зовнішньої його поверхні за рахунок внутрішніх переміщених об'ємів металу у вільні боки (уширення) і в напрямку прокатки (подовження).

Висновок і подальший напрямок дослідження. Перевірка адекватності формул для визначення об'єму осередку деформації показала можливість похибки менше 1%, а відношення швидкостей металу на вході і виході осередку деформації менше 5%, що свідчить про достатню точність пропонуємих формул. В подальшому потрібно визначити площу знову утвореної поверхні при прокатуванні та скласти енергетичний баланс процесу.

Список літератури

1. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія повздовжньої прокатки. – Підручник. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
2. Головин А.Ф. – Прокатка. – Ч.1. – Свердловськ: Metallurgizdat, 1933. – 273 с.
3. Смирнов В.С. – Теория прокатки. – М.: Metallurgiya, 1967. – 460 с.
4. Целиков А.И. – Основы теории прокатки. – М.: Metallurgiya, 1965. – 247 с.
5. Долженников Ф.Е. – О некоторых противоречиях современной теории прокатки. – Сучасні проблеми металургії. «Наукові вісті». – Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – с. 121 – 127.
6. Шломчак Г.Г. – Реологическая концепция в теории прокатки металлов. – Сучасні проблеми металургії. «Наукові вісті». – Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – с. 97 – 101.
7. Старченко Д.І. – Динаміка повздовжньої прокатки. – Навч. посібник. – Київ, ІСДО. – 1995. – 384 с.
8. Коновалов Ю.В. – Справочник прокатника. – Справочн.изд – е в 2 – х книгах. – Книга 1. – Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2009. – 640 с.