УДК 621.771

Бережний М.М., Хіноцька А.А., Чубенко В.А.

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОТОКУ МЕТАЛУ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ПРОКАТУВАННІ

Berezhniy M. M., Hinotcka A.A., Chubenko V.A.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE FLOW OF METAL IN DEFORMATION IN THE LONGITUDINAL ROLLING

Наведено результати визначення в'язкості сталі при поздовжньому прокатуванні. Визначено, що ця величина за різних режимів обробки знаходиться в діапазоні 4,8-28,3 кПа·с. Установлено особливості течії металу в осередку деформації. Викладено новий погляд на визначення швидкості потоку сталі при прокатуванні. Узагальнені результати досліджень визначенням величин критеріїв Рейнольдса і Фруда, характеризуючих фізичний стан потоку метала в осередку деформації при різних температурних і геометричних режимах прокатування штаби в гладких валках.

***Ключові слова**: осередок деформації, прокатування, в'язкість, реологічні властивості, швидкість.*

Вступ

Велика кількість недосить обґрунтованих допущень для спрощення розрахунків, узагальнених в сучасній теорії поздовжньої прокатки [1] та суперечності в ній [2], роблять актуальними задачі реологічної концепції в теорії обробки металів тиском [3].

При опису механічних процесів, які відбуваються в осередку деформації при поздовжній прокатці металів, використовують поняття «плин», «течія», «текучість», «повзучість» та інші, звичайно застосовані в механіці рідин та газів [1]. Але з гідродинаміки для опису процесу прокатування взято тільки закон сталості секундного об'єму (маси) через поперечний переріз потоку. Саме недостатньою увагою до реології можна пояснити недоліки та суперечності сучасної теорії прокатування металів [1, 2].

Актуальними задачами слід вважати створення теорій процесів пластичного формозмінювання: реологічно складних (аномально динамічно знеміцнюючих) металів; процесів зі складними видами навантаження [3].

Будучи в принципі згодними з висновками Г.Г. Шломчака [3], зробимо таке зауваження: існуюча теорія обробки металів тиском добре

обслуговувала інженерні потреби і буде це робити далі, а нова теорія, побудована на реологічній концепції, повинна бути більше узагальнюючою, ширшою і глибшою, та не заперечуючою повністю досягнень попередньої теорії.

Тому дослідження властивостей нен'ютоновських рідин і пластичних матеріалів при їх течії, як задачі реології, зовсім не виключають вивчення місця, де і як в ньому створюється тиск, тобто русла течії металу – осередку деформації.

Течія металу в осередку деформації при поздовжньому прокатуванні має свої особливості, до яких відноситься створення рушійного тиску. Звернемо увагу на величезну величину тиску в осередку деформації металу, здатну збільшити в'язкість, температуру та зменшити границю текучості потоку. Друга особливість потоку металу в осередку деформації полягає в дуже малій величині часу перебування металу в процесі – від мільйонних до десятих часток секунди. Вплив швидкості деформації металу на границю текучості та міцності викладено раніше [6].

Третя особливість осередку деформації між гладкими валками полягає в наявності двох відкритих поверхонь металу. Тому тут гідравлічний радіус потоку повинен визначитись згідно рекомендації для відкритих калібрів [4].

Мета

Метою роботи є визначення реологічних властивостей металу в осередку деформації при поздовжньому прокатуванні.

Методика дослідження

Для визначення в'язкості сталі в осередку деформації модифікуємо формулу Хагена-Пуазейля до зручного у наших умовах вигляду [5]:

$$\eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8 V_{пр} \ell} t = \frac{\frac{\pi}{8}\left(\frac{F_{пер}}{L}\right) \cdot \left(\sigma^{t}_{ТП1} - \sigma^{t}_{ТП2}\right)}{\upsilon_{ср} \cdot b_{ср} h_{ср} R \sin\alpha_y} t = \frac{\pi}{8}\left(\frac{(b_0 h_0 + b_1 h_1) \cdot 2}{2 \cdot 2(b_0 - b_1)}\right)^4 \times \tag{1}$$

$$\times \frac{\left(\sigma^{t}_{ТП1} - \sigma^{t}_{ТП2}\right)}{\upsilon_{ср} \cdot b_{ср} h_{ср} R \sin\alpha_y} t = 0{,}02454 (h_{ср})^4 \cdot \frac{\sigma^{t}_{ТП1}}{\upsilon_{ср} \cdot b_{ср} h_{ср} R \sin\alpha_y} t$$

де $b_{ср}$, $h_{ср}$, t – відповідно середні ширина і висота осередку деформації, час перебування металу в ньому;

$V_{пр}$ – об'ємна продуктивність осередку деформації:

$$V_{пр} = \upsilon_{ср} \cdot F_{ср},$$

$$F_{cp} = b_{cp} l,$$

υ_{cp} – середня швидкість і площа перерізу потоку в осередку деформації;

$l = R \cdot \sin \alpha_y$ – довжина осередку деформації;

R – радіус валка;

α_y – кут захвату при сталому режимі прокатування;

$\sigma^t_{ТП1}$ і $\sigma^t_{ТП2}$ – відповідно границі текучості сталі в осередку деформації при температурі заготовки на вході та при виході розкату з валків при замкнутому енергетичному балансі осередку деформації.

Після виходу металу з валків знімається тиск, що діє, тому останнє напруження дорівнює нулю.

Для розрахунків використовувалися режими прокатування [6], які наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри прокатування в характерних випадках

* № з/п	** $\alpha_з$, град	** α_y, град	h_0, мм	h_1, мм	b_0, мм	b_1, мм	υ_0, м/с	υ_1, м/с	R_B, мм
1	4	2,4	2,0	1,92	1000	1010	20	20,6	60
2	10	6,0	5,0	4,7	1000	1020	15	15,6	100
3	15	11,54	100	92	1000	1100	10	10,35	200
4	24	18,5	200	180	1000	1150	8	8,1	300
5	29	22,3	300	255	1000	1170	5	5,12	400
6	34	26,0	500	400	1000	1200	3	3,2	500

*1,2 – листові стани холодної прокатки; 3,4 – листові стани гарячої прокатки; 5, 6 – блюмінги і слябінги;

** – $\alpha_з, \alpha_y$ – кути захвату в початковому та усталеному режимі прокатування.

Результати дослідження

Для визначення в’язкості розглянемо формулу (1), яка об’єднує дві складові: геометричну і силову.

Геометрична складова за режимами прокатування:

$$ГС = \frac{0{,}02554\left(h_{cp}\right)^4}{\upsilon FR \sin \alpha_y}. \qquad (2)$$

Складові формули (2) наведено в табл. 2 за наведеними в табл. 1 режимами прокатування.

Таблиця 2

Параметри для розрахунку в'язкості етапів осередку деформації за режимами прокатування

$h_{ср}$, м	$h_{ср}^4$, м^4	$b_{ср}$, м	$F_{од}$, м^2	$\sigma_{од1}^t$, МПа	$R\sin\alpha_y$, м	$\upsilon_{ср}$, м/с
$1{,}96\cdot10^{-3}$	$1{,}48\cdot10^{-11}$	1,005	$1{,}97\cdot10^{-3}$	3,54	$2{,}5\cdot10^{-3}$	20,3
$4{,}85\cdot10^{-3}$	$5{,}53\cdot10^{-10}$	1,010	$4{,}9\cdot10^{-3}$	1,588	0,0104	15,3
0,096	$8{,}49\cdot10^{-5}$	1,050	0,1008	0,083	0,04	10,2
0,19	$1{,}303\cdot10^{-4}$	1,075	0,204	0,024	0,0952	8,05
0,272	$5{,}473\cdot10^{-3}$	1,085	0,295	0,0133	0,1527	5,06
0,45	0,041	1,1	0,495	0,00945	0,219	3,1

Наступними параметрами, які характеризують потік сталі в осередку деформації є числа (критерії) Рейнольдса (*Re*) та Фруда (*Fr*):

$$Re = \frac{\upsilon_{ср}\cdot\rho\cdot d_{ск}}{\eta}; \qquad Fr = \frac{\upsilon_{ср}^2}{q\cdot d_{ск}}, \tag{3}$$

де $\upsilon_{ср}$ – середня швидкість потоку;

ρ – густина рідини потоку;

$d_{ск}$ – характерний поперечний розмір каналу, по якому тече рідина;

η – динамічна в'язкість рідини.

Раніше реологічні властивості сталі в осередку деформації визначали при швидкості течії рівній середній швидкості потоку, тобто

$$\upsilon_{ср} = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_1}{2}, \tag{4}$$

де υ_0 та υ_1 відповідно швидкість смуги на вході та виході з валків.

Цей рух фактично утворюється коловою швидкістю контактної поверхні гладких валків [6]. При такому уявленні про течію сталі в осередку можна вважати течію (рух) заготовки і розкату по рольгангу відносно навколишнього середовища. Від цих рухів течія води в річці, чи трубі, чи повітря в роторі вентилятора відрізняється тим, що вода біля берега, чи газ біля стінки не рухаються відносно їх, бо прилипли до них і на течію витрачається енергія для подолання опору внутрішньої структури текучого матеріалу, тобто в'язкості або напруження текучості чи зміцнення між

шарами в напрямку перпендикулярному напрямку прокатування (течії). Важко уявити турбулентність в течії сталі, але в ламінарній течії рідин є тертя між паралельно текучими шарами та втрати енергії на тертя, що призводе до поступового зменшення швидкості течії від осі потоку до його берега.

Отже, з вище викладеної точки зору швидкість потоку сталі в осередку деформації необхідно розраховувати за формулою:

$$\upsilon_{cp} = \frac{R_B \sin \alpha_y}{\tau_{np}}, \qquad (5)$$

де R_B – радіус захвату валків, м;

τ_{np} – час перебування металу в осередку деформації, с.

Результати розрахунку критеріїв реологічних властивостей сталі за новою точкою зору на швидкість руху металу в осередку деформації наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку реологічних властивостей сталі в осередку деформації за режимами прокатування

№№ Ре-жи-мів	$c \cdot 10^{-6}$	υ_{cp}, м/с	t_p, °C	$d_{ск}$, м	*Re*	*Fr*	$\frac{\sigma_T^{\text{ê}}}{\text{ê}\ddot{A}æ / \text{ê}\tilde{A}}$,	η, Па·с
1	1,3	1938,5	973	$1{,}96 \cdot 10^{-3}$	24415	21432	14,4	12,68
2	0,728	14286	717	$4{,}85 \cdot 10^{-3}$	20806	4920	19,1	27,64
3	3867	10,37	769	0,096	1793	109,9	8,8	4222
4	11520,6	8,255	463	0,19	2452	34,77	6,62	4834
5	27518,7	5,523	412	0,272	1357	9,595	3,23	7858
6	74248,5	2,95	53	0,45	382	2,177	6,85	28297

Розрахунок в’язкості сталі в осередку деформації виявив, що ця величина за різних режимів прокатування знаходиться в діапазоні 4,834 - 28,3 кПа·с.

Звернемо увагу на відносно малі значення в’язкості сталі в осередку деформації порівняно з іншими матеріалами. Але це не забезпечує превалірування інерційних сил над в’язкістними силами і числа Рейнольдса є відносно малими. Особливо числа Рейнольдса великі при холодному прокатуванні вони на 1, 2 порядки вищі чисел Рейнольдса при теплому та гарячому прокатуванні. Останній факт підтверджує, що в’язкість металу в осередку деформації, як і температура, в кожній точці простору різні і залежать від режиму прокатування. На величину чисел Рейнольдса і Фруда найбільший

вплив мають температура та тиск через величину в'язкості, або границю текучості.

Висновки

Узагальнено вище описані результати досліджень визначенням величин критеріїв Рейнольдса і Фруда, характеризуючих фізичний стан потоку метала в осередку деформації при різних температурних і геометричних режимах прокатування штаби в гладких валках. Новий погляд на швидкість руху металу в осередку деформації дозволив по новому визначити ці критерії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Василев Я.Д. Теорія повздовжньої прокатки: підручник / Я.Д. Василев, О.А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
2. Долженков Ф.Е. – О некоторых противоречиях современной теории прокатки / Ф.Е. Долженков // Сучасні проблеми металургії. «Наукові вісті». – Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – С. 121 – 127.
3. Шломчак Г.Г. – Реологическая концепция в теории прокатки металлов / Г.Г. Шломчак // Сучасні проблеми металургії. «Наукові вісті». – Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – С. 97 – 101.
4. Прокатное производство / [П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев]: Металлургия, – 1982. – 695 с.
5. Эберт Г. Краткий справочник по физике / Г. Эберт; перев. со 2-го немецкого изд. – М.: Госиздат физико-математ. л-ры, 1963. – 551 с.
6. Бережний М. М. Енергетичний баланс і реологічні властивості металу в осередку деформації при повздовжньому прокатуванні прямокутної штаби гладкими валками: монографія // М.М. Бережний, В.А. Чубенко. А.А. Хіноцька. – Кривий Ріг: Діоніс, 2011. – 125 с.

REFERENCES

1. Vasilev Ja.D. Teorija povzdovzhn'oї prokatki: pidruchnik / Ja.D. Vasilev, O.A. Minaєv – Donec'k: UNITEH, 2009. – 488 p.
2. Dolzhenkov F.E. – O nekotoryh protivorechijah sovremennoj teorii prokatki / F.E. Dolzhenkov // Suchasni problemi metalurgiї. «Naukovi visti». – Tom 5. Plastichna deformacija metaliv. Dnipropetrovs'k: «Sistemni tehnologiї», 2002. – P. 121 – 127.
3. Shlomchak G.G. – Reologicheskaja koncepcija v teorii prokatki metallov / G.G.Shlomchak // Suchasni problemi metalurgiї. «Naukovi visti». – Tom 5. Plastichna deformacija metaliv. Dnipropetrovs'k: «Sistemni tehnologiї», 2002. – P. 97 - 101.
4. Prokatnoe proizvodstvo. – Uch-k dlja vuzov. – 3-e izd./ [P.I. Poluhin, N.M. Fedosov, A.A. Korolev, Ju.M. Matveev]: Metallurgija, – 1982. – 695 p.
5. Jebert G. Kratkij spravochnik po fizike / G. Jeberg. – M.: Gosizdat fiziko-matemat. l-ry, 1963. – 551 p.
6. Berezhnij M.M. Energetichnij balans i reologichni vlastivosti metalu v oseredku deformaciї pri povzdovzhn'omu prokatuvanni prjamokutnoї shtabi gladkimi valkami:

monografija: // M.M. Berezhnij, V.A. Chubenko. A.A. Hinoc'ka. – Krivij Rig: Dionis, 2011. – 125 p.

Бережной Н.Н., Хиноцкая А.А., Чубенко В.А. Реологические свойства потока метала в очаге деформации при продольной прокатке.

Приводяться результаты определения вязкости стали при продольной прокатке. Определено, что эта величина для разных режимов обработки находится в диапазоне 4,8-28,3 кПа·с. Установлено особенности течения металла в очаге деформации. Выложен новый взгляд на определение скорости потока стали при прокатке. Обобщены результаты исследования определением величин критериев Рейнольдса и Фруда, которые характеризуют физическое состояние потока металла в очаге деформации при разных температурах и режимах прокатки полосы в гладких валках.

Ключевые слова*: очаг деформации, прокатка, вязкость, реологические свойства, скорость.*

Berezhniy M.M., Hinotcka A.A., Chubenko V.A. Rheological properties of the flow of metal in deformation in the longitudinal rolling.

Determination of rheological properties of metals in deformation along the longitudinal rolling is the purpose of this work.

Determination of the viscosity of steel during deformation by the modified Hagen-Pyazale formula. The studies were carried out for different regimes.

The viscosity of steel in deformation calculated. Peculiarities of metal flow in the deformation zone have determined. A new approach for determination of the flow rate of the steel during rolling proposed. The results of the studies have summarized by definition of Reynolds and Frood criteria. They are characterizing a physical state of metal flow during deformation at different temperatures and modes.

Physical condition of metal flow at deformation using Reynolds and Frood criteria defined.

Keywords: *deformation zone, rolling, viscosity, rheological properties, speed.*

Бережний М. М. – д-р техн.наук, професор, зав. кафедри ОМТ МО ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг.

Чубенко В. А. – канд.техн.наук, доцент ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг.
e-mail: victoria_4@rambler.ru

Хіноцька А. А. – старший викладач ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг.