

*д. т. н. Бережний М. М.,
к. т. н. Світгарєєв Л.Н.,
к. т. н. Чубенко В.А.,
Хіноцька А.А.,
Глінкин С.О.*

(ДВНЗ «КНУ», м. Кривий Ріг, Україна; slevann@rambler.ru)

МНОЖИННА КОРЕЛЯЦІЙНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ГРАНИЦІ ТЕКУЧОСТІ СТАЛІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ, СТУПЕНЯ ТА ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ

Отримано кореляційну регресію та визначено вплив різних чинників на границю текучості металу. Складено енергетичний баланс осередку деформації, де враховано тепло заготовки, кінетичну та потенційну енергію валків й розкату, роботу деформації і теплоту розкату. Визначено зміну границі текучості сталі при різних режимах прокатування.

***Ключові слова:** границя текучості, ступінь та швидкість деформації, температура, теплота, енергетичний баланс.*

Получена корреляционная зависимость и определено влияние различных факторов на предел текучести металла. Составлен энергетический баланс очага деформации, где учтено тепло заготовки, кинетическую и потенциальную энергию валков и раската, работу деформации и теплоту полосы. Определено изменение предела текучести стали при разных режимах прокатки.

***Ключевые слова:** предел текучести, степень и скорость деформации, температура, теплота, энергетический баланс.*

Постановка проблеми та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.

При пластичній деформації велика увага приділяється границі текучості матеріалу, оскільки від неї залежить витрата енергії на процес. Опір матеріалу пластичній деформації залежить від температури, ступеня та швидкості обробки. Тому визначення множинної кореляційної залежності границі текучості сталі від перелічених показників є актуальною задачею.

Аналіз досліджень та публікацій показує, що визначенню необхідної та корисної аналітичної залежності границі текучості металів від зміни температури, швидкості й ступеня деформації приділена увага ба-

гачьох вчених [1]. Але не зовсім зрозуміло, чому так широко розповсюджене зображення названої залежності від перелічених параметрів у вигляді добутку степеневих функцій [2]. Вірогідно, що це обумовлює наявність п'яти сталих величин на три змінних параметра.

Метою даної статті є визначення та перевірка математичної залежності опору сталі від умов деформації. Вибір оптимальних параметрів, які впливають на границю текучості, та обґрунтування на підставі моделювання режимів прокатування дозволяють підвищити якість металів та сплавів, збільшити продуктивність виробництва, зменшити економічні витрати на сам процес прокатування.

Викладення матеріалу та результатів.

Обробивши 230 результатів експериментально визначених залежностей границі текучості середньовуглецевих сталей [1] від температури, ступеня та швидкості деформації, отримано таку множинну кореляційну регресію:

$$\sigma_T^t = 26,1 - 0,0175t + 0,0813u + 0,2314\varepsilon - 5 \cdot 10^{-5} \cdot t \cdot u - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot t\varepsilon + 0,0011u\varepsilon - 5 \cdot 10^{-7} tu\varepsilon, \quad (1)$$

де σ_T , t , u , ε – відповідно границя текучості, Мпа; температура металу, °С; швидкість деформації, с⁻¹; ступінь деформації, %.

Вивчивши взаємовпливи змінних параметрів на границю текучості, виявлено, що їх впливом можна знехатати, оскільки вони в сотні й тисячі раз менші, як плюсових, так і мінусових факторів: коефіцієнт кореляції рівняння (1) дорівнює 0,65. Діапазон зміни факторів такий: $\sigma_T=200\div 900$ Мпа; $t=600\div 1200$ °С; $u=0,002\div 300$ с⁻¹; $\varepsilon=0\div 70\%$.

На вході в осередок деформації відбувається найшвидше зменшення границі текучості внаслідок роботи деформації і виділення тепла. Протягом перебування в осередку деформації під впливом швидкості та ступеня деформації метал зміцнюється і для його видавлювання в уширення й подовження необхідно збільшити зусилля валків. Для визначення рівноважної температури металу в осередку деформації, при якій сталь витікатиме з нього без збільшення зусиль валків, складемо енергетичний баланс осередку деформації [3]:

Прихід енергії

1. Тепло заготовки:

$$Q_{od}^{3np} = \frac{V_{od}}{\tau_{np}} i_{np}^{tmp} = \xi \rho i_{np}^{tmp} \text{ кДж/с}, \quad (2)$$

де V_{od} – об'єм осередку деформації, м³; τ_{np} – час перебування металу в осередку деформації, с; ξ – об'ємна продуктивність, м³/с; ρ – гус-

тина сталі: $\rho=7850$ кг/м³; i_{np}^{inn} – тепловміст сталі заготовки при приходній температурі t_{np} , °С.

2. Кінетична енергія валків:

$$W_{od} = \sigma_T^{inn} R_b b_{cp} v_{вал} \sin \frac{\alpha_y}{2}, \quad (3)$$

де σ_T^{inn} – границя текучості сталі при вхідній температурі, кДж/кг; R_b – радіус валків, м; b_{cp} – середня ширина штаби: $b_{cp} = \frac{b_0 + b_1}{2}$, м; $v_{вал}$ – кругова швидкість валків, м/с; $\frac{\alpha_y}{2}$ – та кут захвату при усталеному режимі прокатування, град.

3. Потенційна енергія валків:

$$E_{od}^{\Pi} = 2(b_0 h_0) v_0 \sigma_{\Pi}^{inp} + \xi \sigma_T^{emp}, \quad (4)$$

де b_0 , h_0 , v_0 – відповідно ширина, висота й швидкість штаби перед входом в осередок деформації, м і м/с; σ_{Π}^{inp} – поверхневий натяг сталі при температурі входу у валки, кДж/м²; ξ – об'ємна продуктивність, м³/с; σ_T^{emp} – границя текучості сталі при температурі входу у валки, кДж/кг.

Сумарний прихід енергії в осередок деформації:

$$\sum_{od}^{emz} = Q_{od}^3 + W_{od}^k + E_{od}^{\Pi}. \quad (5)$$

Витрати енергії

1. Кінетична енергія розкату:

$$W_{od}^k = \frac{m v_1^2}{q 2 \cdot 102} = \frac{\rho b_1 h_1 v_1^3}{2001,24}, \quad (6)$$

де m , v , b_1 , h_1 , q – відповідно масова продуктивність, кг/с; швидкість розкату, м/с; ширина й товщина розкату, м; прискорення сили земного тяжіння: $q=9,81$ м/с²; 102 – коефіцієнт переводу кгс в кДж.

2. Потенційна енергія розкату

$$E_{odn}^{tb} = 2(b_1 + h_1) v_1 \sigma_n^{tb} + \xi \sigma_T^{tb}, \quad (7)$$

де позначення такі ж, як у формулі (4) для розкату.

3. Робота деформації металу:

$$A_{oo}^{tb} = \sigma_{oo}^{tb} \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot \frac{b_{cp} h_{cp} R \sin \frac{\alpha_y}{2}}{102 \tau_{кр}}, \quad (8)$$

де σ_{oo}^{tb} – границя текучості сталі на виході з осередку деформації, кДж/кг; $\frac{\Delta h}{h}$, $\frac{\Delta b}{b}$, $\frac{\Delta l}{l}$ – відносна деформації штаби в обтиснення, уширення й подовження; R , $\frac{\alpha_y}{2}$, b_{cp} , h_{cp} – відповідно радіус валків, м; кут захвату в усталеному режимі прокатування, град; середні ширина й товщина осередку деформації, м; $\tau_{кр}$ – час перебування металу в осередку деформації, с.

4. Тепло розкату:

$$Q_{oo}^{pb} = \xi \rho i_b^{tb}, \quad \text{кДж/с} \quad (9)$$

де позначення такі ж, як у формулі (2), але з індексами для розкату і витрати енергій.

Сумарні витрати енергії в осередку деформації:

$$\sum_{oo}^{tb} = Q_{oo}^{pb} + W_{oo}^{kb} + E_{oo}^{tb} + A_{oo}^{tb}. \quad (10)$$

Прирівнявши згідно закону збереження енергії суму приходних статей до суми витратних статей енергетичного балансу та прийнявши, що метал входе в осередок деформації при температурі, до якої його нагріто, і з границею текучості, відповідною цій температурі, а витікає з осередку деформації відповідно при більшій температурі із меншою границею текучості внаслідок виділення тепла за рахунок роботи деформації, методом наближення визначено температуру металу, яку він набув при прокатуванні. При цьому з балансу було видалено статтю витрат на утворення нової зовнішньої поверхні розкату, оскільки її вплив на енергетичний баланс складає лише тисячні частки відсотка.

У результаті отримано таке рівняння:

$$\rho V i_{np}^{tnn} + V \sigma_T^{tnn} + V 2 F_0 \sigma_{ноє}^{tnn} = \rho V i_b^{tb} + \frac{\rho v^2}{2001,24} + V \sigma_T^{tb} + V \epsilon u \sigma_T^{tb} + 2 F_1 \sigma_{ноє}^{tb}. \quad (11)$$

Розділивши праву і ліву частини рівняння (11) на V маємо:

$$\rho (i_b^{tb} - i_{np}^{tnn}) + \rho v^2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-2} v^2 + \sigma_T^{tnn} - \frac{2(F_1 \sigma_{ноє}^{tnn})}{V} - \sigma_T^{tb} (1 + \epsilon) = 0, \quad (12)$$

де V – об’ємна продуктивність, м/с; F_0 і F_1 – відповідно зовнішня поверхня штаби до й після осередку деформації, м².

Підставивши у рівняння (12) значення тепловмісту у вигляді $i^t=0,7t$, а також вираз σ_T^t за формулою (1) без добутоків, отримано остаточне рівняння:

$$5425,6(i_b - i_{np}) + 39,6v_{вал}^2 + 5,3 \cdot 10^{-3} t_{np} \varepsilon - 2,713 - 1,707u - 2,896\varepsilon - 5,3 \cdot 10^{-3} t_{np} \varepsilon - 0,0813u\varepsilon - 0,23\varepsilon^2 + 0,265t_b \varepsilon^2 = 0 \quad (13)$$

де t_b , t_{np} – відповідно температури металу після і до осередку деформації, °С.

Використовуючи рівняння (13) визначено температуру сталі на виході з осередку деформації для характерних режимів, параметри яких взято з роботи [2]: 1, 2 – холодне прокатування (50÷100°С), 3, 4 – тепле прокатування (500÷900°С), 5, 6 – гаряче прокатування (1100÷1300°С). [3]. Результати розрахунків зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати визначення зміни границі текучості сталі при різних режимах прокатування

Показники	№№ режимів					
	1	2	3	4	5	6
Температура заготовки, °С	50	100	500	900	1100	1300
Кругова швидкість поверхні валків, м/с	20	15	10	8	5	3
Границя текучості сталі, кДж/кг	2,57	2,48	1,77	1,05	0,7	0,34
Ступінь деформації, %	8	12	16,5	22,0	32,4	18,7
Швидкість деформації, с ⁻¹	0.769·10 ⁶	1.4·10 ⁶	1471	364	234	34,1
Температура розкату, °С	379	786	487	878	1044	1103
Зміна температури в осередку деформації, °С	+329	+686	-13	-22	-56	-193
Границя текучості сталі при виході з валків, кДж/кг	1,983	1,257	1,79	1,093	0,796	0,69
Зміна границі текучості в осередку деформації, кДж/кг	-0,587	-1,223	+0,02	+1,043	+0,096	+0,35

Висновок: результати визначення температури штаби на виході з валків, отримані за рівнянням енергетичного балансу осередку деформації, свідчать про рівність приходу і витрати енергій за величиною

цього параметра, розрахованого методом наближення, [3]. Також підтверджується положення [4] про те, що надлишкове тепло при гарячому прокатуванні витрачається на зміцнення сталі і його можна закріпити в ній шляхом швидкого охолодження, а не перегрівати метал на $100\div 200^{\circ}\text{C}$.

Бібліографічний список

1. Полухін П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник, 2-е изд., перераб. И доп.* / П. И. Полухін, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия. – 1983. – 352 с.

2. Старченко Д. І. *Динаміка поздовжньої прокатки: навч. посібник* / Старченко Д. І. – К. : ІСДО. – 1995. – 384 с.

3. Бережний М. М. *Енергетичний баланс та реологічні властивості осередку деформації при прокатуванні штаби гладкими валками* / М. М. Бережний, В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька. – Кривий Ріг : Діоніс. – 2011. – 120 с.

4. *Влияние режимов деформации слитка на трансформацию дендритной структуры в заготовках* / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, Е. П. Демина и др. // *Обработка материалов давлением.* – № 1(19). – 2008. – С. 135 – 140.

Рекомендовано до друку к.т.н., доц. Денищенком П.М