

УДК 621.77.014

**Т. Б. КОРОБКО**, канд. техн. наук, доц., ДонДТУ, Алчевськ;  
**А. Г. ПРИСЯЖНИЙ**, ст. викл., ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь;  
**М. О. СВЯТОЙ**, ПАТ «ММК ім. Ілліча», Маріуполь;  
**М. Г. КОРЕНКО**, канд. техн. наук, КМІ ДВНЗ «КНУ», Кривий Ріг

## **УТОЧНЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОДВОЄНОГО ОПОРУ МЕТАЛУ ЗРУШЕННЮ ПРИ ХОЛОДНІЙ ТОНКОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ**

У статті проаналізовані математичні моделі напруження плинності і подвоєного опору металу зрушенню при холодному тонколистовому прокатуванні. На основі виконаного аналізу показана доцільність урахування у вказаних моделях впливу температурно-швидкісних умов процесу деформації. Вдосконалена авторами статті числова математична модель дозволила уточнити розрахунок подвоєного опору металу зрушенню із врахуванням температури і швидкості холодної тонколистової прокатки, а також реального характеру розподілу по довжині осередку деформації геометричних параметрів і показників зовнішнього контактного тертя.

**Ключові слова:** холодна прокатка, напруження плинності, подвоєний опір зрушенню, температурно-швидкісні умови, осередок деформації, математичне моделювання.

**Вступ.** Розвиток технології виробництва холоднокатаних штаб обумовлює необхідність підвищення точності математичних моделей, що забезпечують роботу систем автоматизованого управління технологічним процесом. Зокрема, достовірність визначення розрахункових значень подвоєного опору зрушенню деформованого металу істотно впливає на точність прогнозування енергосилових параметрів прокатки [1].

**Аналіз останніх публікацій і постановка проблеми.** Автор роботи [2] вважає, що розрахункове визначення значень напруження плинності і, отже, подвоєного опору зрушенню металу потрібно здійснювати тільки в залежності від показника ступеня обтиснення смуг, які прокатують. В роботах [3, 4] показано, що нехтування впливом температурно-швидкісних умов деформації призводить до істотних похибок розрахунку значень величин  $\sigma_T$  і  $2K$ . Для визначення напруження плинності і подвоєного опору зрушенню смуг залежно від швидкості холодної прокатки В. Робертсом [5] розроблено математичну модель, яка не враховує вплив температури деформації. Більш працездатний метод розрахунку запропоновано в роботі [6]. Проте в даному методі не враховано вплив ступеня попереднього обтиску металу. Відзначених недоліків позбавлена математична модель авторів роботи [4]. Використовуваний при цьому числовий підхід до розрахунку нормальних контактних напружень, що визначають температуру смуги, характеризується низкою припущень, основними з яких є сталість коефіцієнта тертя по довжині осередку деформації, застосування закону тертя Амонтона-Кулона, а також ідеалізація реальної

форми контактної поверхні робочих валків. Математична модель [7] виключає прийняття зазначених припущень, тому представляє інтерес уточнення на її основі методу [4] кількісної оцінки локальних і інтегральних значень величин  $\sigma_T$  і  $2K$ .

**Мета.** Метою статті є вдосконалення математичної моделі для розрахунку подвоєного опору металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистової прокатки.

**Математична модель.** Для визначення контактних напружень використовували математичну модель [7]. Осередок деформації (рис. 1, а), що складається із зон пластичної формозміни завдовжки  $L_{\text{пл}}$  і пружного відновлення довжиною  $L_{\text{пр}}$ , розбивали з кроком  $\Delta x$  на кінцеву безліч  $n$   $i$ -их елементарних об'ємів (рис. 1, б), положення граничних перетинів (перетин  $ae$  і  $cd$  на рис. 1, б) яких визначали координатами  $x_{i1}$  і  $x_{i2}$ . Висоти  $h_{x_{i1}}$  і  $h_{x_{i2}}$  даних перетинів розраховували на основі підходу І.Я. Штаєрмана [8], а швидкості  $V_{x_{i1}}$  і  $V_{x_{i2}}$  (рис. 1, б) переміщення частинок металу – на основі гіпотези ковзання [1]. При цьому, зону пластичної формозміни (рис. 1, а) розділили на зону відставання завдовжки  $L_{\text{від}}$  і зону випередження, довжину  $L_{\text{вип}}$  якої і товщину  $h_{\text{н}}$  смуги в нейтральному перетині визначали з урахуванням напружень заднього  $\sigma_0$  і переднього  $\sigma_1$  натягнення, окружної швидкості валків  $V_{\text{в}}$ , а також товщини розкату до  $h_0$  і  $h_1$  після пропуску. Для розрахунку дотичних контактних напружень  $\tau_{x_{i1}}$  і  $\tau_{x_{i2}}$  (рис. 1, б) використовували закон О.М. Леванова, а для розрахунку нормальних контактних ( $p_{x_{i1}}$  і  $p_{x_{i2}}$ ) і нормальних осьових ( $\sigma_{x_{i1}}$  і  $\sigma_{x_{i2}}$ ) напружень – умови статико-динамічної рівноваги та пластичності.

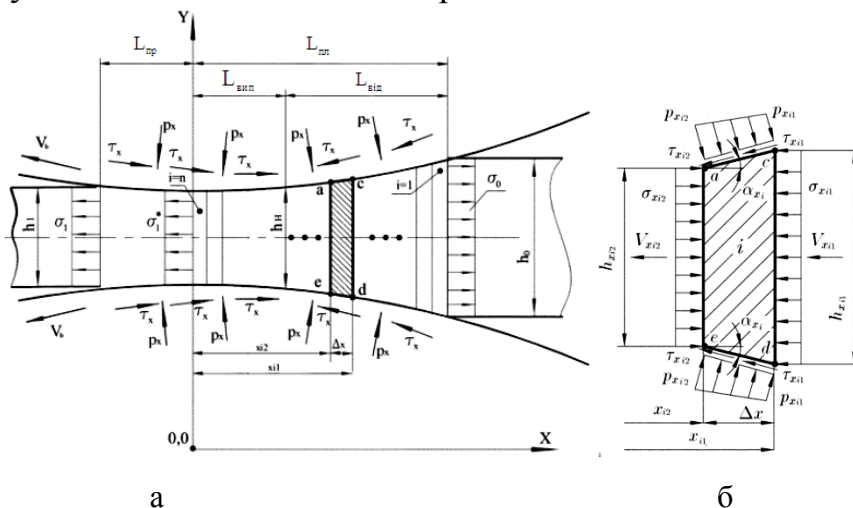


Рис. 1 – Розрахункові схеми: а – осередку деформації та б –  $i$ -го елементарного об'єму:

$\sigma_1^*$  – нормальне осьове напруження, що діє на границі зони пластичної формозміни і пружного відновлення;  $\alpha_{xi}$  – кут контакту  $i$ -го елементарного об'єму з валками

Подвоєний опір металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистовий прокатки визначали як [3, 4]:

$$2K_{uxi2} = 2K_{exi2} \cdot k_{txi2} \cdot k_{uxi2}, \quad (1)$$

де  $2K_{exi2}$  – поточне значення показника подвоєного опору зрушенню металу, яке визначається з урахуванням впливу зміцнення;

$k_{txi2}, k_{uxi2}$  – поточні значення коефіцієнтів, які враховують вплив температури і швидкості деформації відповідно;

цифра 2 в індексі змінних позначає кінцевий граничний перетин (перетин ає на рис. 1, б) виділеного  $i$ -го елементарного об'єму.

Для аналітичного опису зміни значень показника  $2K_{exi2}$  використані поліноми 3-го ступеня [7, 8]:

$$2K_{exi2} = 1,155(\sigma_{To} + a_1^* \varepsilon_{xi2} + a_2^* \varepsilon_{xi2}^2 + a_3^* \varepsilon_{xi2}^3), \quad (2)$$

де  $\sigma_{To}$  – значення напруження плинності металу у вихідному (відпаленому) стані;

$\varepsilon_{xi2} = (H_0 - h_{xi2}) / H_0$  – поточні значення показника сумарного ступеня обтиску металу ( $H_0$  – товщина гарячекатаного підкату);

$h_{xi2}$  – поточне значення товщини смуги в осередку деформації;

$a_1^*, a_2^*, a_3^*$  – коефіцієнти, які залежать від хімічного складу металу [8].

Значення коефіцієнтів  $k_{txi2}$  і  $k_{uxi2}$  розраховували за аналогією з авторами робіт [3, 4]:

$$k_{txi2} = a_0 + a_1 \left( \frac{t_{xi2} - t_{cr}}{t_{пл}} \right) + a_2 \left( \frac{t_{xi2} - t_{cr}}{t_{пл}} \right)^2 + a_3 \left( \frac{t_{xi2} - t_{cr}}{t_{пл}} \right)^3; \quad (3)$$

$$k_{uxi2} = 1 + \frac{7682,4}{2K_{exi2} \cdot k_{txi2}} \left( \frac{u_{xi2}}{5 \cdot 10^{11} \cdot 60,842^{\ln(h_0/h_{xi2})}} \right)^{\frac{\chi(t_{xi2}+273)}{0,14}}, \quad (4)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коефіцієнти, які залежать від хімічного складу металу [3];

$t_{xi2}$  – поточне значення температури смуги в осередку деформації;

$t_{cr} = 20^\circ \text{C}$  – температура металу при статичних випробуваннях;

$t_{пл}$  – температура плавлення металу;

$u_{xi2} = 2\Delta h V_1 h_1 (x_{i2} / L_{nl}) / h_{xi2}^2 L_{nl}$  – поточне значення швидкості деформації ( $V_1$  – швидкість прокатки;  $\Delta h = h_0 - h_1$  – абсолютне обтиснення за пропуск);

$\chi$  – постійна Больцмана ( $0,862 \cdot 10^{-4}$ , еВ / К).

З урахуванням рекомендацій автора [3] для визначення значень величини  $t_{xi2}$  використана алгоритмічна послідовність виду:

$$\Delta x_{xi2} = \frac{\eta_{вых} P_{nl} \lambda_{xi2}}{\gamma_m c_m}; \quad (5)$$

$$t_{xi2}^* = \frac{2\lambda h_{xi2} L_{nl} [1 - (x_{i2} / L_{nl})]}{V_1 (h_0 + h_{xi2})}; \quad (6)$$

$$t_{xi2} = (t_0 + \Delta t_{xi2} - t_g) \exp\left(-\frac{4}{\gamma_m c_m (h_0 + h_{xi2})} \sqrt{\frac{\gamma_g c_g \lambda_g t_{xi2}^*}{\pi}}\right) + t_g, \quad (7)$$

де  $t_{xi2}$  – поточне по довжині  $L_{nl}$  (рис. 1, а) прирощення температури смуги за рахунок тепла, що виділяється при деформації;

$P_{nl}$  – середнє на ділянці пластичної формозміни значення тиску металу на валки, яке визначається з урахуванням результатів розрахунку нормальних контактних напружень  $p_{xi1}$  і  $p_{xi2}$ ;

$\eta_{вых}$  – коефіцієнт виходу тепла при деформації, рівний 0,84 – 0,94 [3];

$\lambda_{xi2} = h_0 / h_{xi2}$  – поточні значення коефіцієнта обтиску;

$\gamma_m, c_m$  – відповідно питома вага і теплоємність металу;

$t_{xi2}^*$  – поточне по довжині зони формозміни значення тривалості контакту частинок металу із валками;

$\lambda = h_0 / h_1$  – коефіцієнт обтиску смуги за пропуск;

$t_0$  – температура смуги на вході в осередок деформації;

$t_g$  – середньомасова температура робочих валків;

$\gamma_g, c_g, \lambda_g$  – відповідно питома вага, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу робочих валків.

**Результати досліджень.** В результаті числової реалізації уточненої математичної моделі (формули (1–7)) отримали розрахунковий розподіл по довжині  $L_{nl}$  значень ступеня обтиснення  $\varepsilon_{xi2}$ , температури  $t_{xi2}$  і швидкості  $u_{xi2}$  деформації (рис. 2), а також значень подвоєного опору металу зрушенню  $2K_{exi2}$  і  $2K_{inxi2}$  (рис. 3). Математичне моделювання виконали стосовно до першої кліті стану холодної тонколистової прокатки ПАТ «ММК ім. Ілліча». При цьому, в якості вихідних даних використовували: матеріал смуги – сталь 08кп; товщина смуги до пропуску  $h_0 = 2$  мм; ширина смуги = 1260 мм; показник ступеня обтиснення за пропуск  $\varepsilon = 0,3$ ; напруження заднього натягнення  $\sigma_0 = 0$  МПа;

напруження переднього натягнення  $\sigma_1 = 100$  МПа; швидкість виходу смуги із осередку деформації  $V_1 = 5$  м / с; коефіцієнт тертя  $f = 0,12$ .

Аналіз отриманих в ході математичного моделювання результатів показав, що зміна температури і швидкості деформації по довжині зони пластичної формозміни має складний характер (рис. 2). При цьому, врахування впливу температурно-швидкісних умов холодної тонколистової прокатки призводить до перерозподілу значень подвоєного опору металу зрушенню (рис. 3).

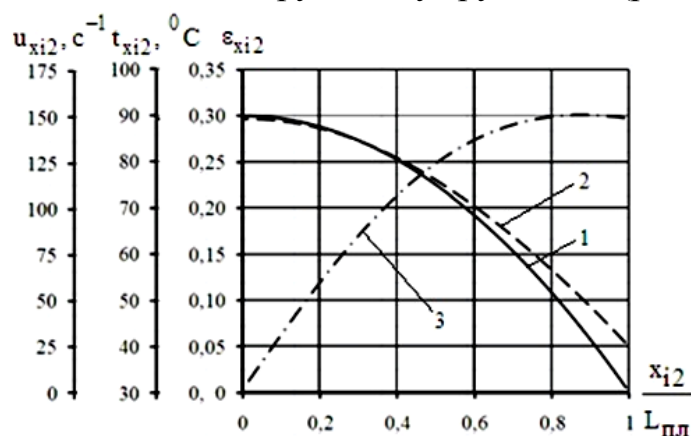


Рис. 2 – Розрахунковий розподіл значень: 1 – ступеня обтиснення  $\varepsilon_{xi2}$ , 2 – температури  $t_{xi2}$  і 3 – швидкості  $u_{xi2}$  деформації по довжині зони пластичної формозміни осередку деформації

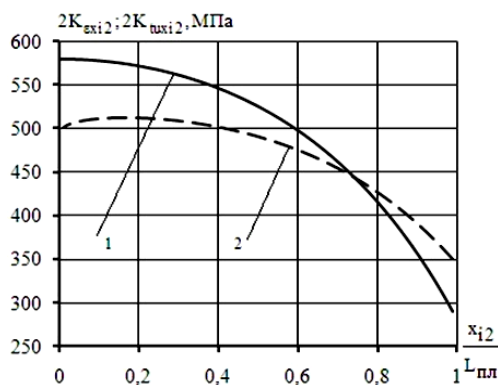


Рис. 3 – Розрахунковий розподіл по довжині зони пластичної формозміни значень подвоєного опору металу зрушенню при холодній тонколистової прокатці, який визначено з урахуванням: 1 – впливу тільки зміцнення  $2K_{\varepsilon xi2}$  та 2 – з урахуванням температурно-швидкісних умов деформації  $2K_{nxi2}$

В окремих випадках відмінність у значеннях величин  $2K_{\varepsilon xi2}$  і  $2K_{nxi2}$  може досягати 20% та вище, що істотно, і це повинно бути враховано при прогнозуванні тиску металу на валки, а також сили і потужності холодної прокатки тонких смуг.

**Висновки.** Запропонована математична модель для розрахунку подвоєного опору металу зрушенню з урахуванням впливу температурно-швидкісних умов деформування, більшою мірою відповідна реальним умовам отримання холоднокатаних смуг на промислових станах. За результатами числової реалізації розробленої математичної моделі було встановлено, що якщо виключити вплив на значення величин  $\sigma_T$  і  $2K$  температури і швидкості холодної тонколистової прокатки, то помилка, що допускається при цьому розрахунку, досягає 20% і більше, а це підтверджує доцільність рішення поставленого в статті завдання.

**Список літератури:** 1. Грудев А.П. Теория прокатки. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с. 2. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки. (Теория, оборудование, технология) / Э.А. Гарбер. – М.: ОАО «Черметинформация»; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. – 416 с. 3. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с. 4. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 500 с. 5. Робертс В. Холодная прокатка стали / Cold rolling of steel: пер. с англ. / В. Робертс; под. ред. П.И. Полушина, В.П. Полушина. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с. 6. Капланов В.И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива : монография / В.И. Капланов. – Мариуполь : Рената, 2008. – 456 с. 7. Сатонин А.В. Развитие численных одномерных математических моделей напряженно-деформированного состояния металла при холодной прокатке относительно тонких полос / А.В. Сатонин, А.Г. Присяжный, А.М. Спаская, А.С. Чурунаков // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2(31). – С. 62–68. 8. Федоринов В.А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков; Донбас. гос. машиностроит. акад. – Краматорск, 2010. – 243 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Grudev A.P. Teorija prokatki. Uchebnik dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1988. – 240 P. 2. Garber Je.A. Stany holodnoj prokatki. (Teorija, oborudovanie, tehnologija) Je.A. Garber. – Moscow: ОАО «Chermetinformacija»; Cherepovec: GOU VPO ChGU, 2004. – 416 P. 3. Vasilev Ja.D. Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov holodnoj prokatki Ja.D. Vasilev. – Moscow: Metallurgija, 1995. – 368 P. 4. Mazur V.L., Nogovicyn A.V. Teorija i tehnologija tonkolistovoj prokatki (chislennyj analiz i tehniczeskie prilozhenija). – Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2010. – 500 P. 5. Roberts V. Holodnaja prokatka stali Cold rolling of steel: per. s angl. V. Roberts; pod. red. P.I. Poluhina, V.P. Poluhina. – Moscow: Metallurgija, 1982. – 544 P. 6. Kaplanov V.I. Dinamika i tribonika vysokoskorostnoj tonkolistovoj prokatki. Mirovaja tendencija i perspektiva: monografija V.I. Kaplanov. – Mariupol': Renata, 2008. – 456 P. 7. Satonin A.V. Razvitie chislennyh odnomernyh matematicheskikh modelej naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri holodnoj prokatke otnositel'no tonkih polos A.V. Satonin, A.G. Prisjazhnyj, A.M. Spaskaja, A. P. Churunakov Obrabotka metallov davleniem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – No 2(31). – P. 62–68. 8. Fedorinov V.A. Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenij, deformacij i osnovnyh pokazatelej kachestva pri prokatke otnositel'no shirokih listov i polos : monografija V. A. Fedorinov, A. V. Satonin, Je. P. Gribkov; Donbas. gos. mashinostroit. akad. – Kramatorsk, 2010. – 243 p.

*Надійшла (received) 28.10.2014*