

УДК 621.771

В.О. Ніколаєв, завідувач. кафедри, д.т.н.  
С.О. Васильєв, аспірант

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЛЕЧА КРУТНОГО МОМЕНТУ ПІД ЧАС ПРОКАТКИ

*Запорізька державна інженерна академія*

Выполнен анализ экспериментальных и теоретических методов определения коэффициента плеча крутящего момента в очаге деформации клетки кварто при прокатке. Показано, что при определении коэффициента плеча крутящего момента рассмотренными методами расхождение полученных данных составляет 3...8 %.

Ключевые слова: прокатка, клеть кварто, очаг деформации, крутящий момент, коэффициент плеча

Виконано аналіз експериментальних і теоретичних методів визначення коефіцієнта плеча крутного моменту в осередку деформації кліті кварто під час прокатки. Показано, що за визначенням коефіцієнта плеча крутного моменту розглянутими методами розбіжність отриманих даних складає 3...8 %.

Ключові слова: прокатка, кліть кварто, осередок деформації, крутний момент, коефіцієнт плеча

An analysis of experimental and theoretical methods of coefficient level determination for twisting moment in the deformation zone for cage quarto at rolling is executed. It is shown that at determination of level coefficient for twisting moment by considered methods difference of finding is 3...8 %.

Keywords: rolling, cage of quarto, zone of deformation, twisting moment, coefficient of level

*Вступ.* Коефіцієнт плеча крутного моменту прокатки металу є однією з важливих характеристик осередку деформації та за практичних умов змінюється у широких межах: від  $\psi \approx 0,10$  за холодною прокаткою штаб до  $\psi \approx 0,70...0,75$  під час прокатки розкатів на обтискних станах. Його значення визначають величину крутного моменту та необхідну потужність головного приводу.

*Головна частина досліджень.* У загальному випадку значення коефіцієнта плеча крутного моменту розраховують за формулою:

$$\psi = \frac{a}{l_d}, \quad (1)$$

де  $a$  – плече крутного моменту;  $l_d$  – довжина дуги контакту в осередку деформації.

Значення плеча крутного моменту визначають експериментальним шляхом або теоретично. Є відомими декілька методів експериментального визначення його значень.

Перший метод передбачає визначення крутного моменту на шийці валка  $M_{III}$  експериментальним шляхом з використанням тензометричних датчиків, що наліплюють на поверхні шпинделя приводу валків, і спеціальної апаратури. Проте цей метод потребує тарування тензометричної апаратури та його використовують тільки за лабораторних умов. Під час одночасного вимірювання сили та моменту прокатки величину кое-

фіцієнта плеча моменту розраховують як

$$\psi_{II} = \frac{M_{II}}{P \cdot l_d}, \quad (2)$$

де  $P$  – сила прокатки, що визначена експериментальним шляхом.

Таким чином, для кліті кварто коефіцієнт  $\psi_{III}$  обумовлює вплив на момент прокатки не лише параметрів власне осередку деформації ( $M_D$ ), але й опору тертя у підшипниках валків ( $M_{TII}$ ) і на міжвалковому контакті ( $M_{TK}$ ), тобто

$$M_{III} = M_D + M_{TII} + M_{TK}. \quad (3)$$

У роботі [1] з використанням цього методу визначено силу, крутний момент і коефіцієнт плеча моменту  $\psi$  під час холодної прокатки сталевих і алюмінієвих штаб у сухих валках діаметром 205 мм. За результатами дослідів одержано аналітичне співвідношення для розрахунків коефіцієнта плеча крутного моменту

$$\psi_C = 0,48 \left( \frac{l_d}{l_C} \right)^2, \quad (4)$$

де  $l_C$  – довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валків і штаби.

Встановлено, що за зменшенням відношення  $l_d/l_C$  від 0,95 до 0,65 значення коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi_C$  зменшується відповідно від 0,43 до 0,16. Автори роботи [1] вважають, що одержані ними значення коефіцієнта  $\psi_C$  відповідають безпосередньо осередку деформації.

Результати експериментальних досліджень змінювання коефіцієнта  $\psi_C$  залежно від значень обтиску сталевих штаб і типу технологічного мастила під час прокатки у робочих валках діаметром 135 мм (кліть кварто) подано у роботі [2]. З дослідів роботи [2] для вказаних вище параметрів деформації одержали відповідно  $\psi_C = 0,440$  і  $\psi_C = 0,177$ . Близькість значень дослідних даних двох незалежних експериментів дозволяє застосувати формулу (4) для розрахунків крутного моменту та потужності тільки на станах холодної прокатки, розміри яких близькі до дослідного стану. У роботі [2] відзначається, що тип технологічного мастила (коефіцієнт тертя) не впливає на величину  $\psi_C$ .

У іншому методі крутний момент прокатки на шийці валка за промислових умов визначають за величиною вимірної потужності головного приводу  $N_{np}$  з використанням формули

$$M = \frac{N \cdot R \cdot \eta}{2v}, \quad (5)$$

де  $R$  – радіус валка;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії передачі від валу двигуна на шийку валка,  $\eta = 0,83 \dots 0,95$ ;  $v$  – швидкість прокатки, м/с.

У цьому варіанті коефіцієнт плеча моменту  $\psi_{III}$  також визначають за формулою (2). З використання цього методу визначено величину крутного моменту в роботі [3] і запропоновано формулу для розрахунків коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi_{III}$ , за  $\eta = 0,83$ ) у виді

$$\psi_{III} = 0,498 - 0,0283 \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right). \quad (6)$$

Коефіцієнт  $\psi_{III}$  у формулі (6) визначено за наявності тертя ковзання на міжвалковому контакті та його можна застосовувати під час розрахунків енергосилових параметрів за умов, близьких до параметрів прокатки на широкоштабовому стані гарячої прокатки ШСГП 1680.

У роботах [4,5] величину коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  безпосередньо для осередку деформації визначають за експериментальними епюрами нормального контактного напруження після визначення центру тяжіння площі епюри. Вважають, що відстань від центру тяжіння епюри до осі валків дорівнює плечу крутного моменту, а коефіцієнт плеча цього моменту  $\psi$  розраховують за формулою (1). Графічні (аналітичні) залежності, що отримано в результаті досліджень, можуть бути використаними під час теоретичних розрахунків крутного моменту в осередку деформації ( $M_d$ ) та потім на шийці валка за наявності інших даних, що входять до формули (3). Проте в цьому разі виникають складнощі

з визначенням складової  $M_{TK}$ , даних про яку в літературі є недостатньо [6,7].

Четвертий метод враховує дослідні величини випередження і дозволяє визначити крутний момент і коефіцієнт плеча моменту  $\psi$  безпосередньо в осередку деформації під час прокатки з використанням відомої формули В.Ф. Баюкова [7,8]:

$$M_d = P \cdot f \cdot R \cdot \left( 1 - \frac{2\gamma}{\alpha} \right). \quad (7)$$

Після нескладних перетворень отримують

$$\psi = \frac{f}{a} \cdot \left( 1 - \frac{2\gamma}{\alpha} \right), \quad (8)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $\gamma$  – кут критичного перерізу;  $\alpha$  – кут контакту.

За  $\psi = 0,5$  отримують формулу Екелунда-Павлова [4,7]. Усі параметри, що входять у формулу (8), мають бути визначеними експериментальним шляхом, а розрахунки коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  за невідомим значенням коефіцієнта тертя виконують ітераційним методом.

Величину коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  безпосередньо в осередку деформації визначають аналітичним шляхом, використовуючи теоретичні вирішення для розрахунків розподілу нормального контактного напруження за довжиною дуги контакту. За цим методом А.А. Корольов [5] отримав наступні співвідношення:

– за прокатки з  $m \geq f \cdot (l_d / h_{cp})$

$$\psi = \frac{1}{2-\varepsilon} \cdot \left[ 1 - \varepsilon \cdot \left( \frac{e^m}{e^m - 1} - \frac{1}{m} \right) \right]; \quad (9)$$

– за прокатки з  $m < 0,5$

$$\psi = \frac{0,5}{1-0,5\varepsilon} \cdot \left( 1 - \varepsilon \cdot \frac{1+m}{2+m} \right), \quad (10)$$

де  $h_{cp}$  – середня товщина штаби,  $h_{cp} = 0,5 (H + h)$ ;  $\varepsilon$  – відносний обтиск  $\Delta h/H$ .

Формули (9) і (10) можуть бути використані за  $l_d/h_{cp} > 1$  та відсутності пружних деформацій валків і прокатуваної штаби.

У роботах [8,9] значення коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  безпосередньо в осередку деформації визначали графоаналітичним методом з використанням формули (1), де за теоретичними епюрами розподілу нормального контактного напруження знаходили центр тяжіння, відстань від якого до вертикальної осі валків дорівнює плечу моменту «а» (епюри побудовано за відомими формулами О.І. Целікова [5]. Коефіцієнт плеча  $\psi$  крутного моменту визначали

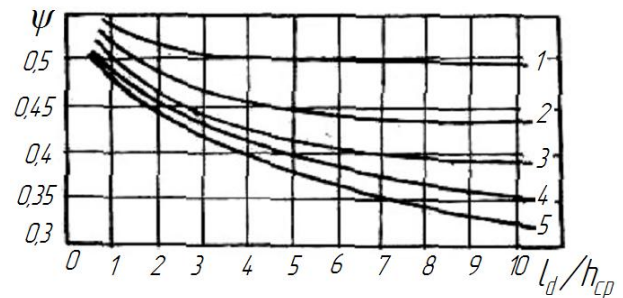
для різних величин коефіцієнта тертя  $f$  та чинника форми осередку деформації  $l_d/h_{cp}$  без урахування зміцнення металу та пружних деформацій валків і штаби.

При цьому вважали, що критичний переріз осередку деформації співпадає з максимумом нормального контактного напруження, що дозволяє встановити розрахункову величину кута  $\gamma$ , яка відповідає даним умовам прокатки штаби.

Результати досліджень подано на рис. 1, з якого виходить, що із збільшенням чинника  $l_d/h_{cp}$  та зменшенням відношення  $\gamma/\alpha$  коефіцієнт плеча  $\psi$  крутного моменту зменшується.

Зменшення коефіцієнта  $\psi$  як видно з рис. 1 обумовлено збільшенням більшою мірою опору течії металу в зоні відставання та зміщення при цьому максимуму нормального напруження у напрямі площини виходу металу з валків.

Результати досліджень (рис. 1) є придатними для розрахунків коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  за  $l_d/h_{cp} \geq 1,0$  та відсутності пружних деформацій валків і штаби. Надалі виконано додаткові дослідження коефіцієнта  $\psi$  за  $l_d/h_{cp} < 1,0$  і запропоновано узагальнені залежності виду [9]:



**Рисунок 1** – Залежність коефіцієнта плеча моменту  $\psi$  від параметра  $l_d/h_{cp}$  за  $\gamma/\alpha$ : 1 - 0,45; 2 - 0,35; 3 - 0,25; 4 - 0,15; 5 - 0,05; ( $f/\alpha$ : 1 - 5,0; 2 - 1,67; 3 - 1,0; 4 - 0,71; 5 - 0,55)

$$\psi = a \cdot \left[ 0,74 \left( \frac{\gamma}{\alpha} \right)^2 - 0,33 \frac{\gamma}{\alpha} + 0,53 \right] \cdot \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{(0,39 \frac{\gamma}{\alpha} - 0,21)}; \quad (11)$$

$$\psi \approx a \cdot \left( 0,5 + 0,007 \frac{f}{\alpha} \right) \cdot \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-(0,0145 + 0,097 \alpha / f)} \quad (12)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що враховує вплив чинника форми за  $l_d/h_{cp} < 1,0$  ( $a = 0,21 \dots 1,21 l_d / h_{cp}$ ).

У табл. 1 подано результати розрахунків коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  за різними теоретичними формулами та дослідними даними роботи [10].

**Таблиця 1** – Розрахункові значення коефіцієнта плеча моменту  $\psi$  за дослідними параметрами осередку деформації (сухі валки діам. 100 мм, алюмінієві штаби товщиною 1,07 мм і шириною 23 мм,  $h$  - товщина штаби після прокатки)

$h$ , мм	$l_d/h_{cp}$	$f$	$m$	$\gamma/\alpha$	$f/\alpha$	Значення $\psi$ , що розраховано за формулами:		
						(7)	(8), (9)	(10)
0,92	3,89	0,056	0,22	0,333	1,45	0,48	0,50	0,48
0,86	4,74	0,103	0,49	0,400	2,25	0,45	0,50	0,48
0,78	5,82	0,107	0,62	0,384	1,98	0,46	0,49	0,46
0,72	6,60	0,117	0,77	0,384	1,98	0,46	0,50	0,46
0,66	7,40	0,115	0,84	0,374	1,80	0,46	0,45	0,45
0,60	8,20	0,130	1,07	0,384	1,88	0,44	0,47	0,45

Під час розрахунків у вказаних формулах використано дослідні дані відношення  $\gamma/\alpha$ . Окрім того, уточнено значення коефіцієнта тертя  $f$  з урахуванням величини коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$  з рис. 1 та формули (10). Збігання значень коефіцієнта  $\psi$ , розрахованих за формулою (7), з дослідними даними з формули (10) з точністю 3...4 % свідчить про відповідність отриманих дослідних значень коефіцієнта тертя фактичним умовам тертя в осередку деформації.

З даних табл. 1 випливає, що значення коефіцієнта плеча крутного моменту  $\psi$ , одержані за формулами (8) і (9), дають його значення з помилкою 5...8 % порівняно з результатами розрахунків за формулою (10) (рис. 1). Коефіцієнт  $\psi$  дещо зменшується під час збільшення параметра  $m = f \cdot l_d/h_{cp}$ , що є логічним, оскільки підвищується вплив тертя у зоні відставання осередку деформації.

**Висновки.** Виконано аналіз відомих експериментальних і теоретичних методів визначення коефіцієнта плеча  $\psi$  крутного моменту. Відмічено, що крутний момент в осередку деформації можна визначати теоретичним шляхом або експериментально через випередження металу під час прокатки. Показано, що під час визначення коефіцієнта плеча крутного моменту в осередку деформації розглянутими методами розбіжність отриманих даних складає 3...8 %.

## Бібліографічний список

1. **Полухин, П. И.** Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке [Текст] / П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин и др. – М. : Металлургия, 1974. – 200 с. – Библиогр.: с. 195-199. – 2000 экз.
2. **Сафьян, М. М.** Экспериментальное определение коэффициента плеча момента при холодной прокатке [Текст] / М. М. Сафьян, Я. Д. Василев, Ю. Я. Кармазин и др. // Обработка металлов давлением : ДМетИ. – М. : Металлургия, 1971. – Вып. LVII. – С. 184-187. – Библиогр.: с. 187.
3. **Сафьян, М. М.** Прокатка широкополосной стали [Текст] / М. М. Сафьян. – М. : Металлургия, 1969. – 460 с. – Библиогр.: с.455-458. – 3700 экз.
4. **Грудев, А. П.** Теория прокатки [Текст] / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1988. – 240 с. – Библиогр.: с. 232-238. – 2500 экз.
5. **Целиков, А. И.** Теория прокатки [Текст] / справочник ; А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с. – Библиогр.: с. 332. – 8000 экз.
6. **Гарбер, Э. А.** Определение затрат энергии на трение качения в клетях кварто [Текст] / Э. А. Гарбер, С. Н. Самарин, В. В. Ермилов // Производство проката. – 2007. – № 2. – С. 25-32. – Библиогр.: с. 32.
7. **Николаев, В. А.** Определение крутящего момента при прокатке металла в клетки кварто. [Текст] / В. А. Николаев // Сталь. – 2016. – № 7. – С. 40-43. – Библиогр.: с. 43.
8. **Николаев, В. А.** Определение плеча момента при прокатке в гладких валках [Текст] / В. А. Николаев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1963. – № 2. – С. 82-86. – Библиогр.: с. 86.
9. **Николаев, В. А.** Исследование параметров, способы и устройства прокатки полос [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : Акцент Инвест-Трейд, 2012. – 264 с. – Библиогр.: с. 250-262. – 200 экз.
10. **Николаев, В. А.** Экспериментальное и теоретическое исследование силы прокатки полос [Текст] / В. А. Николаев, В. О. Куприков, А. Г. Васильев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 2. – С. 33-37. – Библиогр.: с. 37.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2016 р.  
Рецензент, проф. М.Г. Прищип

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