

Дніпродзержинський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ТОНКОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ

Вступ. При теоретичному прогнозуванні контактних напружень p_x та t_x в процесі прокатки використовується диференціальне рівняння рівноваги Т.Кармана [1,2]. Для його розв'язання необхідно мати залежність між нормальними контактними напруженнями та напруженнями тертя.

З цією метою в [1, 2] наведено кулонівську та зібелівську моделі тертя, а також формули, за якими можна побудувати розподіл контактних напружень по довжині зони контакту, використовуючи ці залежності.

Однак, як показують різні дослідження, зокрема, наведені в [3], отримані епюри кількісно не відповідають експериментальним, а є завищеними. Це пояснюється утворенням піку на графіку p_x , оскільки напруження t_x різко змінюють знак в нейтральному перетині осередку деформації γ (рис.1).

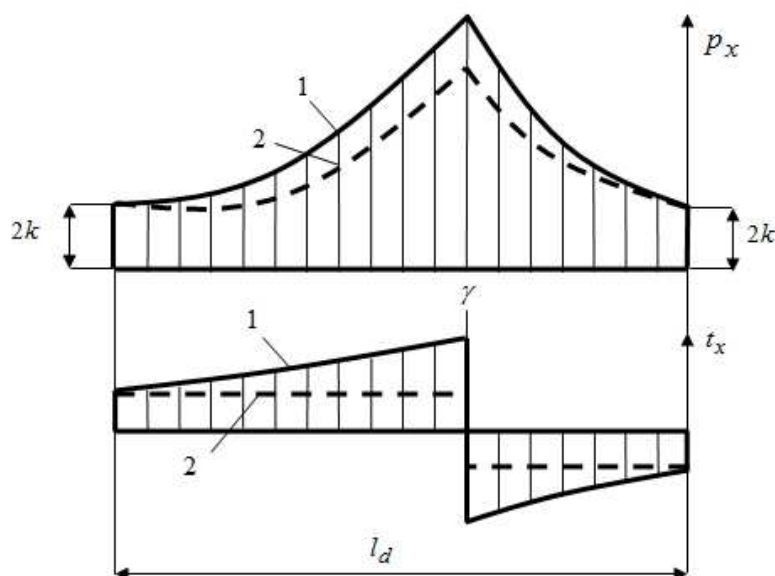


Рисунок 1 – Епюри розподілу контактних напружень при моделях тертя Кулона (1) та Зібеля (2)

В роботах [3, 4] пропонується уточнена модель тертя, яка по суті є законом Ньютона, що в свою чергу застосовується при холодній тонколистовій прокатці зі змащенням.

В дослідженнях [5, 6] розроблено залежність між контактними напруженнями, що може використовуватися у всіх випадках тонколистової прокатки, коли справедливе рівняння Т.Кармана. Вона є складовою частиною нової методики оцінки поздовжньої сталості процесу прокатки.

Постановка задачі. Метою роботи є моделювання епюр розподілу контактних напружень, використовуючи модель тертя, що розроблена в роботах [5, 6], та обґрунтування її використання для прогнозування розподілу напружень p_x та t_x при тонколистовій прокатці.

Результати роботи. Вищезгадана залежність включає 3 ділянки (рис.2): на двох з них виконується кулонівська закономірність між p_x та t_x , а третя ділянка описується наступною лінійною функцією:

$$\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{p_x}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, \quad (1)$$

де f_y – коефіцієнт тертя в зонах ковзання осередку деформації;

φ^* – кут, що відповідає перетину переходу від моделі $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$, яка діє в зоні відставання, до кривої, яка описує зону прилипання (1);

$\frac{P_x^*}{2k}$ – безрозмірний тиск в перетині φ^* .

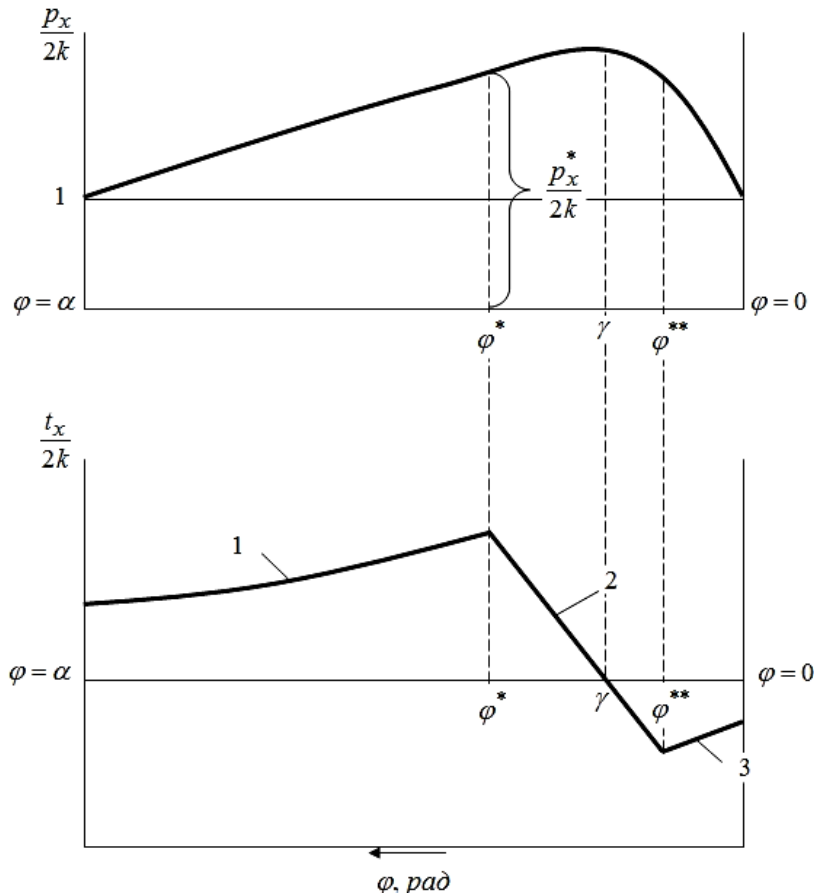


Рисунок 2 – Модель тертя з урахуванням плавного переходу від максимальних значень напружень тертя до мінімальних

Коефіцієнт тертя f_y попередньо приймається, а потім при ітерації його значення уточнюється.

В загальному випадку запропонована модель тертя має наступний вигляд:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \alpha_y > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{P_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (2)$$

де φ^{**} – кут, що відповідає перетину переходу від моделі $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$, яка діє в зоні випередження, до кривої, яка описує зону прилипання (1).

Вираз (2) дозволяє забезпечити плавний перехід від позитивних значень напружень тертя до негативних.

Перетини φ^* та φ^{**} обираються ітераційним шляхом за допомогою ЕОМ при виконанні наступних умов:

- величина напружень тертя в безрозмірній формі не повинна перевищувати 0,5, тобто:

$$-0,5 \leq \frac{t_x}{2k} \leq 0,5.$$

- середній коефіцієнт тертя, визначений по епюрах контактних напружень за формулою

$$f_{cp} = \frac{\int_0^{\alpha_y} \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^{\alpha_y} \frac{p_x}{2k} d\varphi}, \quad (3)$$

повинен дорівнювати коефіцієнту тертя f_y , який прийнятий в осередку деформації або визначений за відомими емпіричними формулами [1, 2, 3].

Дослідження Я.Д.Василева показують, що при тонколистовій прокатці, коли $\frac{l_d}{h_{cp}} > 3-4$, доцільно використовувати для розрахунку середнього коефіцієнту тертя наступну формулу [3]:

$$f_{cp} = \frac{t_{cp}}{p_{cp}} \frac{\left(\frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{h_\gamma}{h_0} \right)}{\left[\left(1 - \frac{h_\gamma}{h_0} \right) \left(1 - \frac{l_{on}}{l} \right) + S \frac{l_{on}}{l} \right]}. \quad (4)$$

Побудова епюр напружень тертя (рис.2).

За формулою (2) визначаємо розподіл напружень тертя.

Кут нейтрального перетину визначається за формулою, наведеною нижче.

Побудова епюр нормального контактного напруження (рис.2).

1. Підставляємо вираз $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{p_x}{2k}$ у диференціальне рівняння рівноваги

Т.Кармана та, розв'язуючи його методом послідовних наближень Рунге-Кутта для зон відставання та випередження, отримуємо криві розподілу нормального напруження (зони 1 та 3).

2. Підставляючи вираз (1) в рівняння рівноваги, маємо:

$$\frac{dp_x}{2k} = \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x}.$$

Попередньо визначимо dh_x :

$$h_x = h_1 + R\varphi^2;$$

$$dh_x = 2R\varphi d\varphi.$$

Приймаємо $tg\varphi \approx \varphi$, тоді:

$$\frac{dp_x}{2k} = \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x}. \quad (5)$$

Проінтегруємо обидві частини виразу (5):

$$\frac{p_x}{2k} = \int \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x} d\varphi = \int \frac{dh_x}{h_x} d\varphi - \int \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi + \int \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi.$$

Отримуємо остаточно:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln|h_x| - f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x| + 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \arctg \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + c_1. \quad (6)$$

Постійну c_1 знайдемо з відомої граничної умови в перетині φ^* .

При $\varphi = \varphi^*$, $p_x = p_x^*$ та $h_x = h_x^*$

$$c_1 = -\ln|h_x^*| + f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x^*| - 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \arctg \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + \frac{p_x^*}{2k}.$$

Підставляючи c_1 в (6), остаточно отримуємо:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln \left| \frac{h_x}{h_x^*} \right| \left(1 - f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \right) + 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(\arctg \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \arctg \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x^*}{2k}.$$

Значення кута нейтрального перетину отримуємо з відомої граничної умови в перетині φ^{**} .

При $\varphi = \varphi^{**}$, $p_x = p_x^{**}$ та $h_x = h_x^{**}$

$$\gamma = \frac{\varphi^* \left(\frac{p_x^{**}}{2k} - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right| \right) + f_y \frac{p_x^*}{2k} \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right|}{2f_y \frac{p_x^*}{2k} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(\arctg \frac{\varphi^{**}}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \arctg \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x^{**}}{2k} - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right|}. \quad (7)$$

Таким чином, при вихідних умовах h_1 , R , f_y та α_y , задаючи попередньо перетини φ^* та φ^{**} , отримуємо епюри нормального контактного напруження та напруження тертя.

Далі визначаємо значення середнього коефіцієнта тертя по епюрах за формулами (3) або (4). Якщо отриманий коефіцієнт тертя не відповідає необхідному значенню, змінюємо перетини φ^* та φ^{**} .

Використовуючи ЕОМ, побудова епюр контактних напружень за наведеним алгоритмом є нескладною і проводиться, як правило, за 6-10 ітерацій.

Для визначення доцільності використання моделі тертя (2) для прогнозування розподілу контактних напружень, проведемо порівняння експериментальних епюр з теоретичними, побудованими з використанням запропонованої залежності (рис.3).

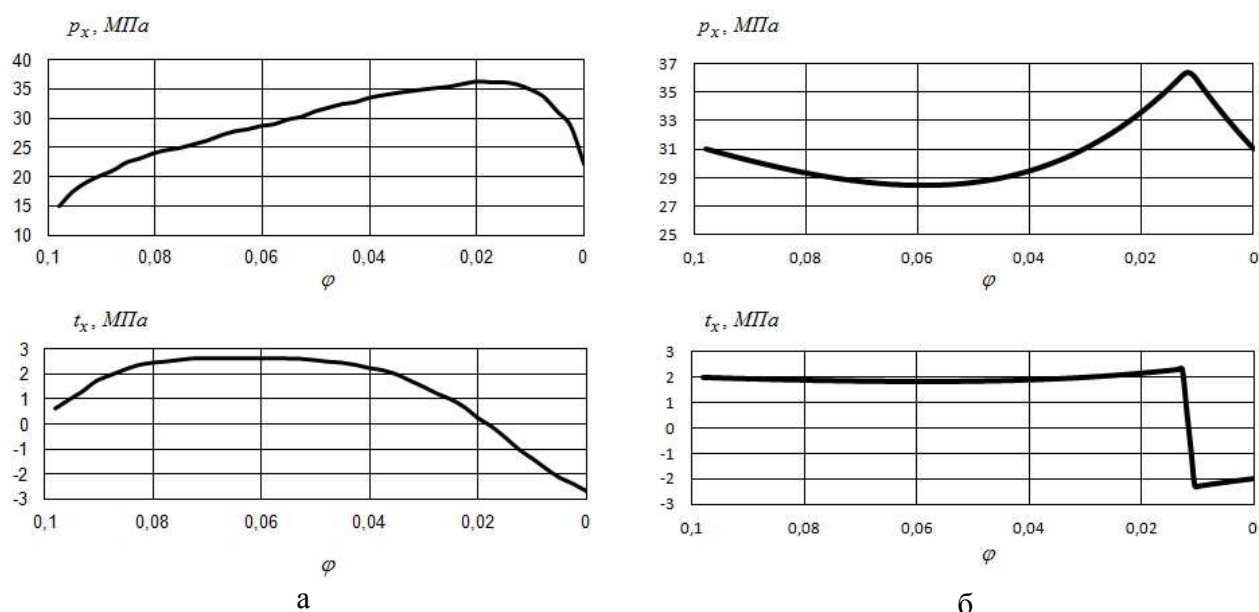


Рисунок 3 – Порівняння експериментальних (а) епюр контактних напружень з теоретичними (б)

Умови, за якими були отримані експериментальні епюри контактних напружень, наступні [7]:

Товщина зразків, мм		Ширина b , мм	Діаметр валків D , мм	Кут захвату α_y , рад	Параметр форми $\frac{l_d}{h_{cp}}$	f_{cp}	Матеріал зразків
h_0	h_1						
2	1	50	208	0,098	7	0,064	свинець

З наведених графіків випливає, що якісно вони відрізняються, оскільки при теоретичній побудові приймаються припущення: усереднюється напруження текучості по дузі контакту та на границях осередку деформації нормальне контактне напруження дорівнює примусовій межі текучості. Але кількісно теоретичний розподіл p_x та t_x є задовільним і різниця при визначенні середнього нормального контактного напруження у порівнянні з експериментальною епюрою не перевищує 5%. Тому можна зробити ви-

сновок, що запропонована модель може використовуватися для прогнозування розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці.

Висновки. Відомі в теорії моделі тертя Кулона і Зібеля не дають достатньої точності при прогнозуванні розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці.

Розроблено модель тертя, яка дозволяє із задовільною точністю визначити теоретичні епюри нормального контактного напруження та напруження тертя, а також розрахувати середнє нормальне контактне напруження.

Описана залежність використовується як складова частина нової методики оцінки поздовжньої сталості процесу прокатки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Теория прокатки: [учебник для вузов] / А.П.Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240с.
2. Целиков А.И. Теория продольной прокатки / А.И.Целиков, Г.С.Никитин, С.Е.Роко-тян. – М.: Металлургия, 1980. – 320с.
3. Василев Я.Д. Теория поздовжньої прокатки / Я.Д.Василев, О.А.Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488с.
4. Василев Я.Д. Определение контактных напряжений при тонколистовой прокатке / Я.Д.Василев, Д.В.Коноводов, А.В.Дементенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематичн. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2002. – С.277-283.
5. Максименко О.П. Оценка устойчивости процесса прокатки по эпюрам контактных напряжений / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №2. – С.110-114.
6. Максименко О.П. Анализ устойчивости процесса прокатки с учётом продольных сил / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк, К.В.Романюк // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорськ: ДГМА. – 2011. – №1 (26). – С.154-159.
7. Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке с технологической смазкой / П.Л.Клименко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: “Системні технології”. – 2005. – С.44-49.

Поступила в редколлегию 15.01.2013.

УДК 621.771.0

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., профессор
ИЗМАЙЛОВА М.К., к.т.н., доцент
ПИКУШ Р.В., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ С ОДНИМ ПРИВОДНЫМ ВАЛКОМ

Введение. Известно, что при прокатке с одним холостым валком в очаге деформации, наряду с зонами отставания и опережения, имеет место и смешанная зона [1], где удельные силы трения со стороны верхнего и нижнего валков направлены в разные стороны. Кроме того, опыты показывают, что углы захвата со стороны приводного и холостого валков неодинаковые. На приводном валке угол захвата несколько больше