

## МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-41-52

### ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОФІЛЮВАННЯ НА ЯКІСТЬ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

*О. Ю. Сєверін, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;  
вул. Курличова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: [serhii.pliesnetsov@kpi.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@kpi.edu.ua)*

У дослідженні детально проаналізовано швидкісний режим формування гнутих профілів відкритого типу з акцентом на зміні обертових швидкостей точок осьового перерізу валків залежно від співвідношення їхніх діаметрів і відстаней до основного діаметра нижнього валка. Було виявлено, що різниця між діаметрами валків, зокрема випадки, коли верхній валок має більший діаметр, ніж нижній, суттєво впливає на швидкісний режим процесу. При цьому зміщення робочого рівчака до нижнього валка, що супроводжується підгинанням елементів профілю до осі, призводить до зниження середньої швидкості профілювання. Це відкриває перспективу для детальнішого вивчення параметрів, таких як висота калібру та напрямок підгинання, з метою оптимізації швидкісного режиму. Швидкісний режим є вирішальним фактором, що впливає на цілу низку характеристик процесу та кінцевого продукту. Зокрема, від нього залежить якість поверхні профілів, рівень зносу валків, енергетичні витрати та розподіл обертових моментів між валками. Тому правильний підбір діаметрів і співвідношень валків, а також оптимальне розташування калібрів у профілебудівному обладнанні мають першочергове значення для забезпечення стабільного та якісного кінцевого результату. Дослідження також охопило аналіз конструктивних і технологічних аспектів швидкісного режиму, зокрема вплив тертя, стоншення металу та рівномірності обертання валків на загальну ефективність процесу. Виявлено, що врахування цих факторів сприяє вдосконаленню існуючих технологій профілювання, знижує виробничі втрати та сприяє створенню продукції високої якості. Таким чином, результати дослідження мають значення для модернізації обладнання, оптимізації виробничих процесів і підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку.

**Ключові слова:** вимірювання швидкості деформації, швидкісний режим, калібрування валків, основні діаметри, робочі валки, профілезгинальний стан, якість профілів, енергосилові витрати.

The study analyzed in detail the speed regime of forming bent profiles of the open type, focusing on the change in the peripheral velocities of the points of the axial section of the rolls depending on the ratio of their diameters and distances to the main diameter of the lower roll. It was found that the difference in the diameters of the rolls, in particular cases when the upper roll has a larger diameter than the lower one, significantly affects the speed regime of the process. At the same time, the displacement of the working groove to the lower roll, which is accompanied by bending the profile elements to the axis, leads to a decrease in the average profiling speed. This opens up prospects for a more detailed study of parameters such as the caliber height and the direction of bending, in order to optimize the speed regime. The speed regime is a decisive factor that affecting a number of characteristics of the process and the final product. In particular, the quality of the surface of the profiles, the level of wear of the rolls, energy consumption and the torque distribution between the rolls depend on it. Therefore, the correct selection of diameters and ratios of rolls, as well as the optimal location of calibers in the profile-making equipment are of paramount importance for ensuring a stable and high-quality final result. The study also included an analysis of the design and technological aspects of the speed regime, in particular the influence of friction, metal thinning and uniformity of roll rotation on the overall efficiency of the process. It was found that taking into account these factors contributes to the improvement of existing profiling technologies, reduces production losses and contributes to the creation of high-quality products. Thus, the results of the study are of practical importance for the modernization of equipment, optimization of production processes and increasing the competitiveness of products in the market.

**Key words:** deformation speed measurement, high-speed mode, calibration of rolls, main diameters, working rolls, profile condition, quality of profiles, energy consumption.

### Вступ

У сучасних умовах забезпечення високої якості та надійності роботи промислових об'єктів різних галузей економіки стає особливо важливим. Це досягається через впровадження ефективних систем контролю на всіх етапах життєвого циклу: від виготовлення і введення в експлуатацію до обслуговування і відновлення. На кожному з цих етапів необхідно здійснювати контроль технічного стану об'єктів за допомогою методів неруйнівного контролю, технічної діагностики та періодичного моніторингу. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти дефекти, оцінювати стан обладнання та забезпечувати його безпечно і ефективно експлуатацію.

Останнім часом у зв'язку з інтенсифікацією виробництва гнутих профілів прокату при розробці та вдосконаленні процесів профілювання прагнуть посилювати режими формування, а для зменшення тертя застосовують високоефективні мастила [1-9]. Однак, якщо коефіцієнт тертя не перевищує певної мінімальної величини, смуга не захоплюється валками, і вони буксують по ній. В результаті збільшуються витрати енергії, відбувається перерозподіл зусиль формування між клітями, виникають додаткові динамічні навантаження на передавальні елементи приводу, погіршується якість профілів. Однак, скорочення додаткових витрат енергії, що досягається завдяки застосуванню дорогих високоякісних мастил, часто дає незначний економічний ефект, особливо при невеликому зменшенні коефіцієнта тертя. З урахуванням викладеного, кінематичний аналіз швидкісного режиму технологічного процесу профілювання є **важливим і актуальним** завданням.

**Мета роботи** – аналіз впливу швидкісного режиму профілювання на якість гнутих профілів.

### Задачі роботи:

- 1) проаналізувати швидкісний режим технологічного процесу профілювання;
- 2) проаналізувати розподіл швидкостей у робочому калібрі валків.

### Швидкісний режим технологічного процесу профілювання

При виробництві гнутих профілів швидкісний режим технологічного процесу істотно впливає на якість поверхні готових профілів, зношення робочих валків, енерговитрати, величини обертових моментів і розподіл їх між верхнім і нижнім валками. Для конструкції профілезгинальних станів промислового призначення, як правило, робочі валки виготовляють складовими (рис. 1), тобто складаються з робочого валу та укріплених на ньому профільних дискових елементів (шайб).

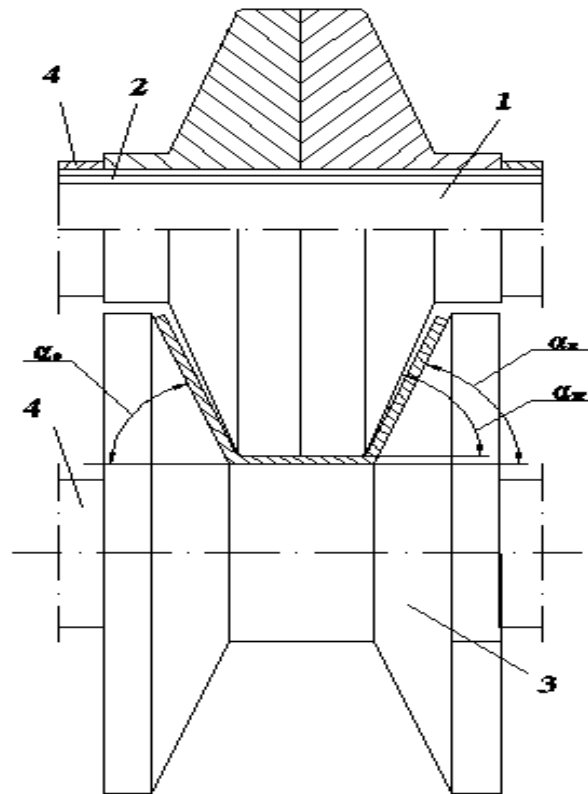


Рисунок 1 – Схема валків для формування швелера: 1 - робочий вал; 2 – шпонка; 3 – профільні дискові елементи; 4 – дистанційні дискові елементи

Такі валки найбільш зручні в експлуатації. Основні діаметри нижніх валків приймають мінімальних розмірів із забезпеченням умов міцності валу та профільних елементів валка.

При проектуванні стану основні діаметри верхніх валків визначаються для заданого сортаменту профілів, враховуючи

особливості розміщення у верхніх валках перехідних форм штаб, що профілюються, а також максимальної висоти врізу у валки. Отримані таким чином розміри діаметрів валків і їх співвідношення зазвичай залишають постійними незалежно від форми та розмірів профілю. Конструкція робочих ривчаків валків може передбачати виконання ділянок звільнення або бути без них, що безпосередньо впливає на ефективність і якість процесу профілювання.

У валках без ділянок звільнення ( $a_n = a_b$ ) забезпечується рівномірний зазор по всій ширині ривчака в площині осьового перерізу валків. Така конструкція має певні переваги, з огляду на точність формування профілю, але зі збільшенням висоти формування смуги суттєво зростає відносно проковзування матеріалу у валках. Це призводить до значних енергетичних втрат на тертя, зниження якості поверхні профілю, а також до збільшення зносу валків. Через ці недоліки валки без ділянок звільнення обмежено застосовуються для формування профілів невеликої висоти або в разі необхідності виготовлення певних елементів перехідних форм профілю.

Виконання робочих ривчаків із ділянками (кутами) звільнення частково компенсує ці проблеми. Завдяки збільшенню проміжків у зонах із високим відносним проковзуванням між профільованою смугою та валками знижуються тертя і супутні енергетичні витрати, покращується якість поверхні профілю, а також зменшується знос робочих поверхонь валків. Така конструкція більш універсальна і дозволяє ефективно працювати з широким спектром профілів.

Нині оптимальний швидкісний режим профілювання вибирають за умовою рівності обертових швидкостей валків основних діаметрів. Цей підхід дозволяє зменшити відносно ковзання між металом і валками, що, своєю чергою, сприяє підвищенню якості формування профілю та зменшенню енергетичних втрат. Разом з

тим, для кожного конкретного випадку потрібно враховувати конструктивні особливості валків, параметри металу, що прокочується, та технологічні вимоги. Оптимізація цих параметрів дозволяє не лише знизити витрати, а й підвищити продуктивність виробничого процесу, забезпечуючи виготовлення продукції високої якості, яка відповідає сучасним стандартам і потребам ринку.

В даний час оптимальний швидкісний режим профілювання вибирають із умови рівності обертових швидкостей валків основних діаметрів:

$$i = \frac{D_{60}}{D_{н0}}, \quad (1)$$

де  $D_{во}$  і  $D_{но}$  - основні діаметри верхнього та нижнього валків відповідно.

Ця умова забезпечується передавальним відношенням у циліндричній парі шестеренного блоку, яке визначається при проектуванні та приймається рівним відношенню основних діаметрів робочих валків (рис. 2) відповідних клітей. Зазвичай це співвідношення приймають залежно від призначення стану (сортаменту профілів, що виготовляються). Для невеликих станів, що встановлюються на машинобудівних заводах, передавальне відношення часто приймають близьким одиниці. Для великих високопродуктивних станів, які встановлюються на металургійних підприємствах для масового виробництва гнутих профілів, співвідношення між основними діаметрами приймають більшим, що забезпечує:

- полегшення комплектів валків;
- створення компактної конструкції стану.

Для профілезгинальних агрегатів, встановлених на металургійних підприємствах, співвідношення між основними діаметрами становить:

- а)  $i=2,2$  (для станів 1...4x400...1500);
- б)  $i=2,333$  (для станів 2...7x80...500);
- в)  $i=2,48$  (для станів 2...6x100...600);
- г)  $i=2,5$  (для станів 1...4x50...300);
- д)  $i=1,0$  (для станів 0,5...2,5x600...1500).

При розробці калібрування валків необхідно забезпечити середню обертову швидкість на кожній наступній парі валків не меншу, ніж на попередній. Оскільки на практиці складно забезпечити точний розрахунок середньої обертової швидкості кожної пари валків, збільшення обертових швидкостей у кожній наступній парі валків виробляють послідовним збільшенням їх основних діаметрів [1]:

- для виробництва профілів невеликих поперечних перерізів із заготовок завтовшки 0,3...2,5 мм збільшують на 0,4%;
- для великих профілів збільшують на 0,1...0,4%;
- для смуг, вужчих 0,3 мм, збільшують на 0,25%.

Швидкісний режим профілювання в кожній парі валків (для загального випадку  $D_{во} > D_{но}$ ), характеризується абсолютними та відносними швидкостями окремих точок контакту смуги та валків. Обертові швидкості різних точок валків залежать від кутових швидкостей та відстані цих точок до осі обертання.

Оскільки кутові швидкості суміжних валків однієї кліти жорстко взаємопов'язані через механізми кліток, аналогічно взаємопов'язані й абсолютні та відносні швидкості точок на поверхнях валків. Ця залежність визначає розподіл швидкостей у робочому калібрі валків, який використовується для формування гнутих профілів.

#### Розподіл швидкостей у робочому калібрі валків, що призначений для профілювання гнутих профілів

Для аналізу розподілу обертових швидкостей у калібрі приймається рівність обертових швидкостей у точках основних діаметрів верхнього та нижнього валків. Позначивши величини цих швидкостей через  $v_0$ , було побудовано графіки розподілу обертових швидкостей. Як показують графіки (див. рис. 2), обертові швидкості точок нижнього валка збільшуються в стільки разів, у скільки разів його основний діаметр менший за основний діаметр верхнього валка. Ця залежність є важливим фактором при

проектуванні калібрів і виборі швидкісного режиму профілювання, оскільки впливає на якість процесу та розподіл навантаження між валками.

Встановлено, що розподіл швидкостей у калібрі не лише визначається геометрією валків, але й суттєво залежить від властивостей металу, тертя між валками та матеріалом профілю, а також технологічних параметрів процесу.

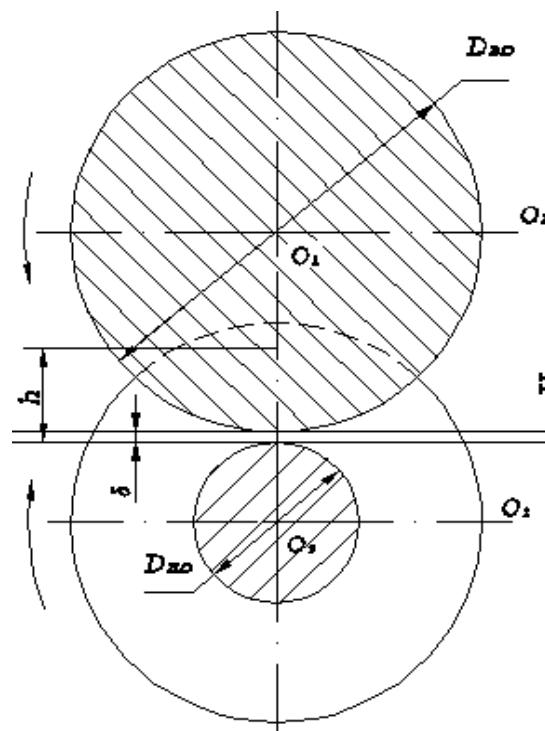


Рисунок 2 – Схема до аналізу розподілу швидкостей в осьовому перерізі валків

Нерівномірність швидкостей, яка виникає через різницю діаметрів верхнього і нижнього валків, може спричинити проковзування металу в калібрі, підвищене тертя і зношування валків, що негативно впливає на якість профілю та енергетичну ефективність процесу.

Тому для забезпечення рівномірного розподілу швидкостей і мінімізації проковзування металу у калібрі важливо враховувати співвідношення діаметрів валків, кутові швидкості обертання, тертя і конструктивні особливості робочих рівчаків. Крім того, слід застосовувати методи математичного моделювання для оптимізації швидкісного режиму, що дозволить забезпечити стабільність

процесу профілювання та отримати вироби з високими якісними характеристиками.

З аналізу графіка випливає, що обертові швидкості верхнього та нижнього валків тільки в одній точці А будуть рівними. Положення точки А за висотою визначається з подібності трикутників  $O_1AB$  та  $O_2AB$ :

$$O_2A = \left( \frac{D_{н.о}}{2} \right) + \left[ \frac{\delta}{(i+1)} \right], \quad (2)$$

де:  $\delta$  – зазор між валками;  $i$  – відношення основних діаметрів валків.

Зміни обертових швидкостей протилежних точок осевого перерізу валків залежно від співвідношення основних діаметрів та їх відстаней від основного діаметра нижнього валка визначаються такими залежностями:

$$v_H = v_0 \left[ 1 + \left( \frac{2h}{D_{н.о}} \right) \right]. \quad (3)$$

З рівнянь (3) випливає, що зі збільшенням висоти  $h$  швидкості протилежних точок верхнього валка зменшуються, а нижнього – зростають. При цьому середня швидкість у точках осевого перерізу валків визначається за залежністю:

$$v_{CP} = \frac{1}{2}(v_B + v_H) = v_0 \left[ 1 + \frac{h(i-1) + \delta}{iD_{н.о}} \right]. \quad (4)$$

Для спрощення приймаємо:

- зазор між валками однаковий по всьому периметру калібру;
- зчеплення смуги, що формується з валками, однакове у всіх точках контакту.

З аналізу формули (4) випливає, що зі збільшенням  $h$  середня швидкість ( $v_{CP}$ ) протилежних точок за висотою верхнього та нижнього валків зростає (рис. 2). Отже, зростає також швидкість заготовки, що профілюється. При  $i=1$  середня швидкість залежить від  $h$ , оскільки:

$$v_{CP} = v_0 \left( 1 + \frac{\delta}{D_{н.о}} \right). \quad (5)$$

Таким чином, у кожній точці осевого перерізу робочого калібру валки прагнуть переміщувати метал, що профілюється, зі швидкістю більшою, ніж обертова швидкість у місцях основних діаметрів.

Розміщення робочого калібру в нижньому валку з підгинанням елементів профілю від рівня основного діаметра до осі призводить до зменшення  $v_{CP}$ , оскільки величина  $h$  у своїй матиме відповідне значення. Тому при розробці калібрування валків для створення необхідного швидкісного режиму, слід враховувати вплив величини  $h$ , тобто напрямок підгинання елементів профілю.

Швидкість руху смуги, що профілюється, визначається сумарним впливом на неї верхнього та нижнього валків у місцях контакту. На вході заготовка (рис. 3) захоплюється валками у місці перетину їх максимальних діаметрів (точка А) та, переміщаючись, формується (товщиною металю можна знехтувати). При цьому переміщення окремих її елементів відбувається за складною траєкторією.

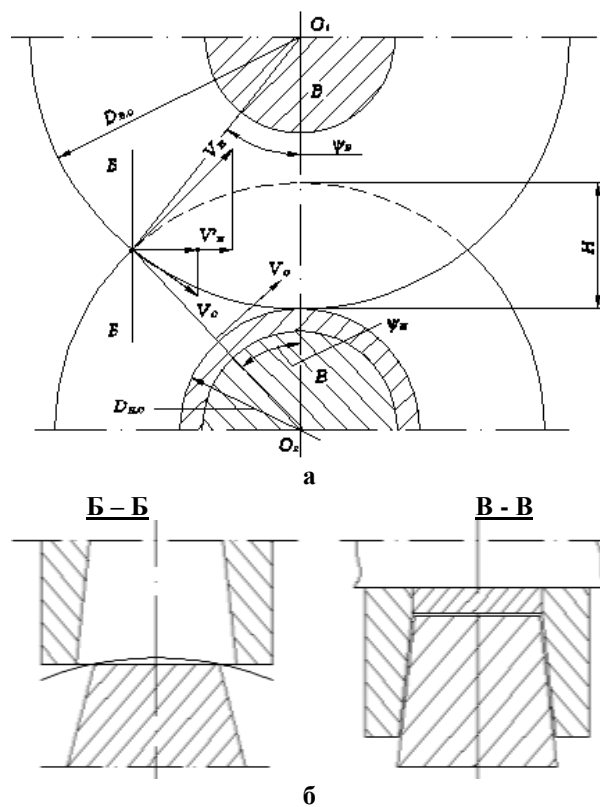


Рисунок 3 – Схеми: а – діючих швидкостей; б – місце контакту смуги з валками

Горизонтальна складова швидкості валків у точці А буде характеризувати швидкість руху заготовки. Її величина залежить від діаметрів валків (співвідношення діаметрів, висоти калібру, кутових швидкостей) і складає:

- для верхнього валка:

$$v'_B = v_0 \cos \psi_B \quad (6)$$

- для нижнього валка:

$$v'_H = v_0 \left( 1 + \frac{2H}{D_{HO}} \right) \cos \psi_H, \quad (7)$$

де:  $H$  – глибина рівчака.

Значення  $\cos P_B$  та  $\cos P_H$  визначаються із рівнянь, що складені відповідно до схеми, наведеної на рис. 3:

$$\left( \frac{D_{HO}}{2} + H \right) \cos \psi_H + i \frac{D_{HO}}{2} \cos \psi_B = \quad (8)$$

$$= \frac{D_{HO}}{2} (i+1),$$

$$\frac{iD_{HO}}{2 \sin \psi_H} = \frac{D_{HO} + 2H}{2 \sin \psi_B}, \quad (9)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (8) та (9), отримуємо:

$$\cos \psi_B = \frac{D_{HO}^2 (2i^2 - 2i + 1) - (D_{HO} + 2H)^2}{2iD_{HO}^2 (i+1)} \quad (10)$$

$$\cos \psi_H = \frac{D_{HO}^2 (2i \mp 1) + (D_{HO} + 2H)^2}{2D_{HO}^2 (D_{HO} + 2H)(i+1)}; \quad (11)$$

Після підстановки значень  $\cos P_B$  та  $\cos P_H$  у формули (6) та (7) отримуємо горизонтальні складові швидкостей:

$$v'_B = v_0 \left[ 1 - \frac{2H(D_{HO} - H)}{iD_{HO}^2 (1+i)} \right]; \quad (12)$$

$$v'_H = v_0 \left[ 1 + \frac{2H(D_{HO} + H)}{D_{HO}^2 (1+i)} \right]. \quad (13)$$

З формул (12) і (13) випливає, що горизонтальна складова швидкості нижнього валка буде більшою за

відповідну складову швидкості верхнього валка.

Якщо горизонтальна складова швидкості профілю у валках дорівнюватиме обертовій швидкості в місцях основних діаметрів валків, то горизонтальна складова швидкості верхнього валка є меншою швидкості смуги, що профілюється, а нижнього валка ( $v'_B$ ) є більшою, тобто:

$$v'_B < v_{нол} < v'_H. \quad (14)$$

Горизонтальні складові відносних швидкостей валків та профілю в момент її входу в робочий калібр становлять:

а) для верхнього валка:

$$v'_B - v_0 = -v_0 \frac{2H(D_{HO} - H)}{iD_{HO}^2 (i+1)}; \quad (15)$$

б) для нижнього валка:

$$v'_H - v_0 = v_0 \frac{2H(D_{HO} + H)}{D_{HO}^2 (i+1)}. \quad (16)$$

Як впливає з отриманих формул, у процесі профілювання верхній валок перешкоджатиме руху профілю зі швидкістю, що відповідає обертовій швидкості у місцях основних діаметрів валків. Нижній валок буде збільшувати швидкість руху профілю.

Відносна швидкість випередження нижнього валка буде завжди більшою від відносної швидкості відставання верхнього валка на величину, яка розраховується за формулою:

$$(v'_H - v_0) - (v'_B - v_0) = \frac{v_0 H}{i} \left( \frac{i-1}{i+1} + \frac{H}{D_{HO}} \right). \quad (17)$$

Як видно з формули (17), різницю між відносними швидкостями випередження профілю нижнім валком і відставання профілю від верхнього валка в точці А завжди буде додатною та, сприяючи збільшенню швидкості смуги, зростатиме зі збільшенням глибини рівчака за інших рівних умов.

При розгляді процесу профілювання гнутих профілів у точках контакту смуги з валками, розташованими між точкою А і осьовим перерізом валків (рис. 3),

виявлено низку важливих закономірностей. Заготовка переважно контактує з верхнім валком у зонах основного діаметра та прилеглих до нього заокруглень, тоді як з нижнім валком взаємодія відбувається по похилих стінках рівчака. Ця специфіка контакту суттєво впливає на розподіл швидкостей і тиску в робочому калібрі.

Швидкісні характеристики контакту:

- Верхній валок: Швидкість точок контакту на верхньому валку відрізняється від швидкості смуги як за величиною, так і за напрямком. У цих зонах спостерігається гальмівна дія валка на заготовку, що пояснюється різницею лінійних швидкостей поверхні валка та смуги.

- Нижній валок: Швидкість точок контакту нижнього валка значно перевищує швидкість руху смуги. Горизонтальні складові швидкостей у кожному перерізі нижнього валка мають вищі значення, ніж швидкість заготовки, що сприяє її прискоренню.

Розподіл тиску та сил зчеплення: Максимальні питомі тиски та сили зчеплення валків із заготовкою концентруються поблизу осьового перерізу Б–Б (рис. 3), особливо в зонах формування радіусів і мінімальних зазорів між валками. У міру віддалення від цієї зони вплив валків на смугу поступово зменшується. Застосування конструктивних рішень, таких як кути і ділянки звільнення, дозволяє знизити сили тертя в критичних ділянках, оптимізуючи швидкісний режим і зменшуючи енергетичні втрати.

Вплив конструктивних особливостей:

- Використання кутів звільнення в робочих рівчаках (наприклад, при формуванні швелерів) дозволяє зосередити основні зусилля в точках контакту з основними діаметрами верхнього і нижнього валків, а також у місцях переходу до бокових поверхонь. Це сприяє більш ефективному профілюванню та знижує негативний вплив тертя.

- При відношенні основних діаметрів верхнього і нижнього валків більше одиниці швидкість руху смуги між клітями

зростає через поступове зміщення контактних ділянок нижніх валків догори.

Практичне застосування: Теоретичні висновки підтверджені практикою профілювання [1, 3, 4, 5]. Зокрема, при виготовленні складних профілів, таких як кутик, швелер, коритний або напівкруглий профіль, можна забезпечити необхідний натяг смуги за допомогою правильного калібрування валків. Це дозволяє уникнути послідовного збільшення основних діаметрів, яке зазвичай призводить до підвищених енергетичних витрат, погіршення якості поверхні профілю та підвищеного зносу валків.

Таким чином, теоретичний аналіз розподілу швидкостей у калібрі валків при виготовленні сортових профілів (кутика, швелера, коритного, напівкруглого та ін.) показує, що в процесі профілювання:

- верхній валок перешкоджає руху смуги зі швидкістю, що дорівнює лінійній швидкості по колах основних діаметрів;

- нижній валок збільшує швидкість руху смуги.

Різниця між відносними швидкостями випередження профілю нижнім валком і відставання верхнього валка від профілю при даній схемі профілювання завжди додатна і сприяє збільшенню швидкості переміщення профілю калібру. При цьому між верхнім валком і профілем створюється зусилля  $T_t$ , що гальмує профіль. Це зусилля залежить від величини та характеру розподілу питомих тисків металу на валок, площі контакту профілю та валка, різниці лінійних швидкостей профілю та валка у місцях контакту.

При відключенні верхнього валка між ним та профілем створюється зусилля  $T_x$ , що обертає верхній валок. Це зусилля залежить від маси валка та коефіцієнта тертя у його підшипниках. Отже, при  $T_x < T_t$  вимкнення верхнього валка призведе до зменшення витрати енергії на профілювання та покращення якості готового профілю.

На невеликих станах для узгодження швидкостей руху профілю в послідовно розташованих клітях вріз калібру

передбачається, як у верхні, так і у нижні валки. При неправильно вибраних розмірах валків двох сусідніх клітей швидкість виходу заготовки з будь-якої попередньої клітей може виявитися більшою за швидкість руху заготовки в наступній клітей. У цьому випадку перед валками утворюється петля, що викликає пробуксування та злам смуги. При надмірному натягу між клітей має місце передчасне і нерівномірне зношування валків і передавальних механізмів, підвищена витрата енергії, а на поверхні профілю утворюються задири.

Травлений метал і нержавіючі сталі слід профілювати з меншою швидкістю, застосовувати мастила, підбирати відповідний матеріал валків, тому що при великих швидкостях можливе утворення задири на поверхні профілів та налипання металу на валки.

Нікелеві сплави профілюються складніше, ніж нержавіюча сталь. Тому вони повинні формуватися з застосуванням менших швидкостей, ніж нержавіюча сталь.

При безперервному процесі профілювання у стані швидкість заготівлі  $v_{заг}$  постійна. Вочевидь, що у калібрі валків є точки, у яких обертові швидкості валка і заготівлі рівні, тобто:

$$v_{заг} = \omega_B \frac{D_{кв}}{2} = \omega_H \frac{D_{кн}}{2}, \quad (18)$$

де:  $D_{кв}$  та  $D_{кн}$  - катаючі діаметри верхнього та нижнього валків, відповідно.

### Коефіцієнти тертя, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати процесу профілювання гнутих профілів

Коефіцієнт тертя, при якому валки не буксують по смугі, можна визначити з умови врівноваження сил, що діють у калібрі, тобто з умови, що сума проєкцій на горизонтальну площину сил, що діють у вертикальних площинах з боку конічних елементів нижнього валка, дорівнює сумі сил, що діють на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків (рис. 1):

$$2(T_1 \cos \beta - P_{KZ}) = T_{цв} + T_{цн}. \quad (19)$$

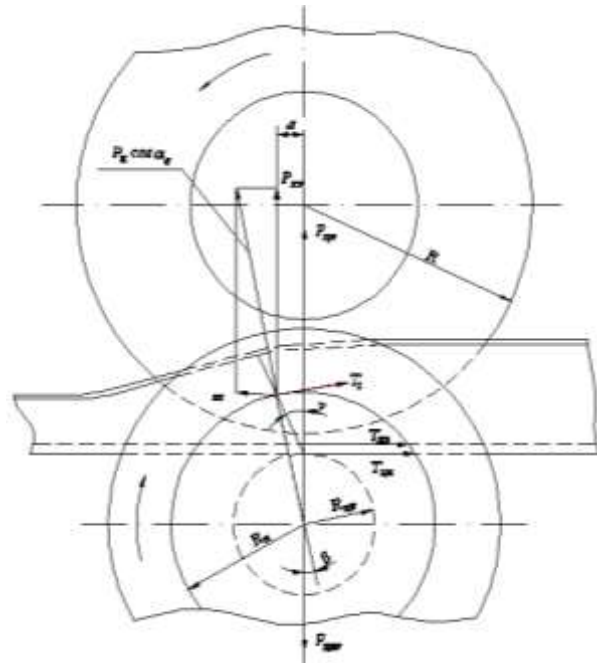


Рисунок 4 – Схема сил, що діють на смугу у вертикальній площині

Відповідно до [9]:

$$T_1 = f_k P_k \cos \gamma;$$

$$P_{KZ} = P_k \cos \alpha_c \sin \beta;$$

$$T_{цв} = f_{цв} \cdot P;$$

$$T_{цн} = f_{цн} \cdot P_{цн},$$

де:  $T_1$  – складова сили тертя від ковзання конічного елемента по полиці;  $P_{KZ}$  – сила, що виштовхує смугу з калібру;  $T_{цв}$  і  $T_{цн}$  – сили тертя на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків, відповідно;  $f_k, f_{цв}, f_{цн}$  – коефіцієнти тертя на конічних та циліндричних елементах верхнього та нижнього валків, відповідно;  $P_k$  – рівнодіюча сила тиску на конічному профільному елементі;  $P$  – сумарний тиск металу на валки;  $P_{цн}$  – зусилля, що діє з боку циліндричного елемента нижнього валка;  $\alpha_c$  – сумарний кут підгинання;  $\gamma$  – кут відхилення ділянки контакту полиці з конічним елементом від осьової площини валків;  $\beta$  – кут відхилення напрямку сили  $P_k$  від осьової площини валків.

Кут  $\beta$  пов'язаний з кутом  $\alpha_c$  залежністю:

$$\beta = 2 \arcsin \frac{x_{цн} \sin \gamma}{2R_k}, \quad (20)$$



де:  $x_{цн}$  – координата точки прикладання сили  $P_k$ ;  $R_k$  – радіус конічного елемента валка в перерізі, що проходить через точку прикладання сили  $P_k$ .

За відсутності пробуксовування [10]:  
 $f_{цв} \approx f_{цн}$ .

Тоді вираз (1) набуває вигляд:

$$\begin{aligned} 2(f_k P_k \cos \gamma \cos \beta - P_k \cos \alpha_c \sin \beta) = \\ = f_{цн} (P + P_{цн}). \end{aligned} \quad (20)$$

Звідси

$$f_{цн} = \frac{2P_k (f_k \cos \gamma \cos \beta - \cos \alpha_c \sin \beta)}{P + P_{цн}}, \quad (21)$$

Щоб сили, які діють у напрямку профілювання, були активними, має виконуватися умова:

$$\begin{aligned} f_{цн} (P + P_{цн}) + 2f_k P_k \cos \gamma \cos \beta = \\ = 2P_k \cos \alpha_c \sin \beta, \end{aligned} \quad (22)$$

Підставивши (21) до (22), отримаємо значення коефіцієнта тертя  $f'_k$ :

$$f'_k = \frac{\cos \alpha_c \sin \beta}{\cos \gamma \cos \beta} = \frac{\cos \alpha_c \operatorname{tg} \beta}{\cos \gamma}. \quad (23)$$

Аналогічний вираз знаходиться з умови рівності нулю суми проекції на вісь  $z$  сил, що діють на конічних елементах нижнього валка.

Аналіз виразу (23) показує що  $f'_k$  залежить від сумарного кута підгинання  $\alpha_c$  та кута  $\gamma$ , який, у свою чергу, залежить від режиму формування та геометричних параметрів профілю.

Формула (23) справедлива для сумарних кутів підгинання  $\alpha_c \neq 90^\circ$ . При  $\alpha_c = 90^\circ$  картина дії сил калібру значно змінюється.

Виконано розрахунок коефіцієнта тертя  $f'_k$ , виходячи з експериментальних даних, отриманих у роботі.

У випадку формування швелера 80x80x3мм з смугової сталі Ст.3 кп до  $\alpha_c = 44^\circ$  при куті підгинання за прохід:  $\alpha_n = 11^\circ$ ,  $\gamma = 18^\circ$ ,  $\beta = 4^\circ 56'$ .

а) без змащування  $P = 1670$  кГ,  $P_k = 980$  кГ,  $P_{цн} = 980$  кГ,  $f_k = 0,25$ ,  $f_{цн} = f_{цв} = 0,052$ ;

б) зі змащуванням індустриальним мастилом СУ  $P = 1600$  кГ,  $P_k = 445$  кГ,  $P_{цн} = 980$  кГ,  $f_k = 0,15$ ,  $f_{цн} = f_{цв} \approx 0,03$ .

При підстановці у формулу (3) значень  $P$ ,  $P_k$ ,  $P_{цн}$ , наведених вище, отримано:

а) без мастила  $f_{цн} = 0,06$ ;

б) зі змащенням  $f_{цн} = 0,029$ .

Відхилення розрахункових значень від експериментальних не перевищує 13,5%.

При підстановці формулу (56) значень  $\cos \alpha_c$ ,  $\operatorname{tg} \beta$ ,  $\cos \gamma$  отримано  $f'_k = 0,061$ .

Таким чином, величина  $f_k$  виявилась приблизно в 4 рази меншою, ніж величина  $f'_k$  при профілюванні без мастила.

Визначений експериментально коефіцієнт тертя ( $f \approx 0,06$ ), при якому відбувалося пробуксовування валків по смузі, відповідає залежності  $f = f'_k$ .

З наведених даних випливає, що коефіцієнт тертя можна зменшувати за допомогою високоякісних мастил приблизно в 3...4 рази у порівнянні з профілюванням без змащення. З використанням звичайних технологічних мастил він зменшується в 1,5...2 рази.

При розробці технології профілювання для забезпечення нормального (без пробуксовування) технологічного процесу необхідно (відповідно до обраного калібрування) визначити коефіцієнти тертя ( $f'_k$ ) для кожної кліти та підібрати таке мастило, яке б забезпечувало максимальний з них (або дещо більший). Якщо необхідне мастило відсутнє, слід відкоригувати калібрування за рахунок зміни кута підгинання.

### **Коефіцієнт тертя, що забезпечує отримання якісних гнутих профілів**

У роботі [11] встановлено, що під дією сил тертя в місцях контакту профільованого металу з валками виникають нормальні напруження, що розтягують  $\sigma_{zz}$ , які локалізуються в тонкому поверхневому шарі та можуть призвести до його руйнування.

Максимальні розтягувальні напруження на поверхні контакту визначаються виразом:

$$\sigma_{zz}^{\max} = 3,6f\sigma_s, \quad (24)$$

де:  $f$  – коефіцієнт тертя;  $\sigma_s$  – межа плинності металу смуги.

При формуванні сталевих профілів без спеціальних покриттів для отримання якісної поверхні має виконуватися умова

$$\sigma_{zz}^{\max} < \sigma_s.$$

З графіка (рис. 5, а) випливає, що ця умова виконується за  $f \leq 0,275$ . Разом з тим, в результаті впливу зовнішнього середовища поверхневий шар має знижені властивості міцності порівняно з основним металом. Крім того, у прямолінійних елементах, що підгинаються, в результаті формозмінення виникають розтягувальні напруження, які можуть досягати межі плинності. Тому, щоб запобігти руйнуванню поверхневого шару, необхідний у 1,8...2,5 рази більший запас міцності, що забезпечується при коефіцієнті тертя  $f=0,1$ . При профілюванні смуг з покриттям з іншого металу, що зберігає основний метал від корозії, важливо зберегти це покриття від руйнування в процесі формозмінення. Товщина покриття незначна. Так, на листи з алюмінієвих сплавів на обидві поверхні наноситься шар чистого алюмінію, товщина якого становить 2...4% від товщини листа. Він менш міцний, ніж основний метал ( $\sigma_s=3...6$  кг/мм<sup>2</sup> і  $\sigma_s=10...20$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b=9...12$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b=20...32$  кг/мм<sup>2</sup>, відповідно), показники пластичності в нього у 1,5...2,5 рази вищі.  $\sigma_T=9...12$  кг/мм<sup>2</sup>); 1 – ( $\sigma_s=15$  кг/мм<sup>2</sup>; 2 – ( $\sigma_s=13$  кг/мм<sup>2</sup>).

Для збереження покриття на поверхні контакту має виконуватися умова:

$$\sigma_{zz}^{\max} < \sigma_{\text{ВПЛ}}.$$

Визначимо коефіцієнт тертя, у якому забезпечується ця умова, для алюмінієвого металу АМг5М з  $\sigma_s=13...15$  кг/мм<sup>2</sup>.

З рис. 2, б видно, що при 0,18 напруги перевищують межу міцності покриття, що плакує. Для збереження міцності

плакуючого покриття коефіцієнт тертя повинен бути меншим за 0,18 ( $f \geq \sigma_{zz}^{\max}$ ).

Експериментальні дослідження та практика профілювання підтверджують, що використання мастил, які забезпечують коефіцієнт тертя  $f=0,1...0,16$  при формуванні профілів без металевого покриття та  $f=0,09...0,14$  з покриттям, дозволяє отримувати профілі практично без поверхневих дефектів, що викликаються дією сил тертя, тобто гарантується достатній запас міцності.

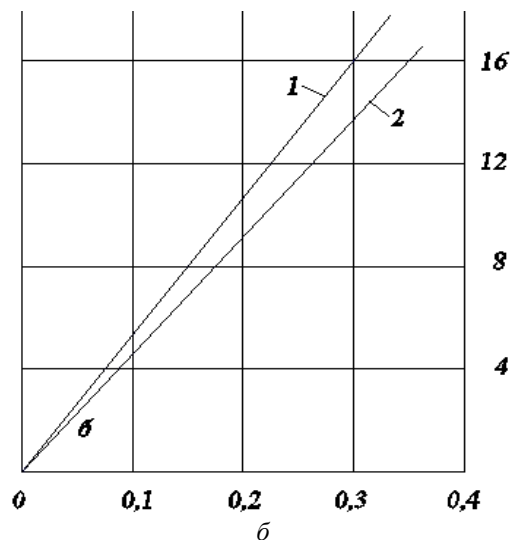
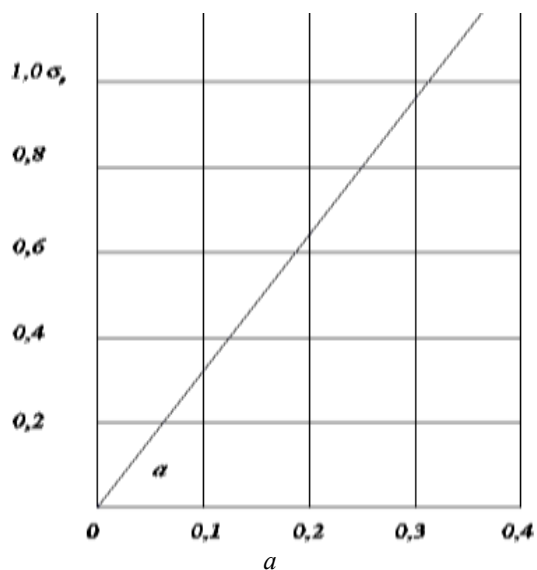


Рисунок 5 – Залежність максимального напруження ( $\sigma_{zz}^{\max}$ ) від коефіцієнта тертя для смуг алюмінієвого сплаву АМг6М з плакуючим покриттям (чистий алюміній)

Величину коефіцієнта тертя  $0,1...0,14$  при обробці робочих поверхонь профільних валків  $Ra$   $0,63...0,32$  забезпечують наступні мастильно-охолоджуючі емульсії:

1) для сталевих профілів без покриття: 5% емульсія на стандартному емульсолі (Е-1);

2) для оцинкованих профілів: 5% емульсія на основі полімеризованої бавовняної олії.

При формуванні профілів із металевим плакуючим покриттям, а також профілів з матеріалів, схильних до налипання на інструмент (нержавіючих сталей), рекомендуються наступні мастила: 1) полімеризована бавовняна олія ( $f=0,08...0,1$ ); 2) циліндричне масло № 24 «Віскозин» ( $f=0,1...0,12$ ); 3) 5% емульсія на основі пасти СП-3 ( $f\approx 0,1$ ); 4) солідол із добавкою дисульфиду молібдену ( $f=0,1$ ).

#### Висновки

Проведено аналіз технологічних елементів процесу формозміни при валковому формоутворенні, які спрямовані на визначення метрологічних підходів до оцінки стану процесу валкового формоутворення листового металу. Коефіцієнт тертя, при якому валки не буксують по смузі, можна визначити з умови врівноваження сил, що діють у калібрі, тобто з умови, що сума проєкцій на горизонтальну площину сил, що діють у вертикальних площинах з боку конічних елементів нижнього валка, дорівнює сумі сил, що діють на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків. Проведено експериментальні та модельні дослідження, спрямовані на дослідження впливу тертя на швидкісні характеристики процесу формозміни. Визначений експериментально коефіцієнт тертя ( $f\approx 0,06$ ), при якому відбувалося пробуксовування валків по смузі, відповідає залежності  $f = f'_k$ . Виконано аналіз даних щодо процесу валкового формоутворення листового металу. З отриманих даних випливає, що коефіцієнт тертя можна зменшувати за допомогою високоякісних мастил приблизно в 3...4

рази порівняно з профілюванням без змащення. З використанням звичайних технологічних мастил він зменшується у 1,5...2 рази. При розробці технології профілювання для забезпечення нормального (без пробуксовування) технологічного процесу необхідно (відповідно до обраного калібрування) визначити коефіцієнти тертя ( $f'_k$ ) для кожної кліті та підібрати таке мастило, яке б забезпечувало максимальний з них (або дещо більший). Якщо необхідне мастило відсутнє, слід відкоригувати калібрування за рахунок зміни кутів підгинання. Таким чином, можливим стає визначення технологічних засад метрологічного забезпечення процесу формоутворення листового металу.

#### Список використаних джерел

1. Закалов О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин. Тернопіль: ТДТУ, 2000. 354 с.
2. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: навчальний посібник. Хмельницький: ГУП, 2002. 151 с.
3. Кузьменко А.Г., Диха О.В. Дослідження зносоконтатної взаємодії змащених поверхонь тертя: монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 184 с.
4. Кондрачук М.В., Хабутель В.Ф., Пашечко М.І, Корбут Є.В. Трибологія. Київ: «НАУ-друк», 2009. 232 с.
5. Диха О.В., Сорокати Р.В., Бабак О.П. Розрахунки та випробування на надійність машин і конструкцій: навчальний посібник. Хмельницький: ХНУ, 2011. 151 с.
6. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: «ТНТУ ім. І. Пулюя», 2011. 322 с.
7. Диха О.В. Вузли тертя машин. Розрахунки на зносостійкість: навчальний посібник. Хмельницький: ХНУ, 2013. 147 с.

8. Рymar O.M. Вплив тертя на концентрацію напружень та міцність деталей машин. Львів: Сполон, 2022. 378 с.

9. Новицький A.B., Ружи́ло З.В., Банний O.O., Бистрий O.M., Сиволапов В.А. Надійність машин та обладнання. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання. Київ: НУБІПУ, 2023. 209 с.

## INFLUENCE OF HIGH-SPEED PROFILING MODE ON THE QUALITY OF ROLLED SHAPES

O. Yu. Sievierin, Yu. O. Pliesnetsov, S. Yu. Pliesnetsov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;  
 e-mail: [serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua)

### References

1. Zakalov O.V. Trybotekhnika i pidvyshchennia nadiinosti mashyn. Ternopil: TDTU, 2000. 354 p. [in Ukrainian]

2. Kuzmenko A.H. Metody rozrakhunkiv i vyprobuvan na znoshuvannia ta nadiinist: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: TUP, 2002. 151 p. [in Ukrainian]

3. Kuzmenko A.H., Dykha O.V. Doslidzhennia znosokontaktnoi vzaiemodii zماشchenykh poverkhon tertia: monohrafiia. Khmelnytskyi: KhNU, 2005. 184 p. [in Ukrainian]

4. Kondrachuk M.V., Khabutel V.F., Pashechko M.I., Korbut Ye.V. Trybolohiia. Kyiv: «NAU-druk», 2009. 232 p. [in Ukrainian]

5. Dykha O.V., Sorokatyi R.V., Babak O.P. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na nadiinist mashyn i konstruktsii: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: KhNU, 2011. 151 p. [in Ukrainian]

6. Zakalov O.V., Zakalov I.O. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: navchalnyi posibnyk. Ternopil: «TNTU im. I. Puliuia», 2011. 322 p. [in Ukrainian]

7. Dykha O.V. Vuzly tertia mashyn. Rozrakhunky na znosostiikist: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: KhNU, 2013. 147 p. [in Ukrainian]

8. Rymar O.M. Vplyv tertia na kontsentratsiiu napruzhen ta mitsnist detalei mashyn. Lviv: Spolom, 2022. 378 p. [in Ukrainian]

9. Novytskyi A.V., Ruzhylo Z.V., Bannyi O.O., Bystryi O.M., Syvolapov V.A. Nadiinist mashyn ta obladnannia. Otsinka ta zabezpechennia nadiinosti mashyn ta obladnannia. Kyiv: NUBIPU, 2023. 209 p. [in Ukrainian]