**УДК 621.771:621.04**

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРИ ПРОФІЛЮВННІ НА ЯКІСТЬ ГНУТИХ ПРОФІЛЕЙ

**Тришевський О.І.**
*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

*У роботі наведені результати досліджень швидкісного режиму при формуванні гнутих профілів відкритого типу, зокрема, зміни окружних швидкостей протилежних точок осьового перерізу валків залежно від співвідношення основних діаметрів і їх відстаней від основного діаметра нижнього валка. Визначено вплив різних чинників на швидкісний режим профілювання, і рекомендований їх облік при проектуванні нового обладнання і розробці калібрувань валків для загального випадку, коли діаметр верхнього валка більше діаметру нижнього. Встановлено, що розміщення робочого рівчака в нижньому валці з підгинанням елементів профілю від рівня основного діаметра до осі призводить до зменшення $v_{cp}$. Тому при розробці калібрувань валків для створення правильного швидкісного режиму слід враховувати вплив величини висоти калібру h або напрямок підгинання.*

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

## Актуальність проблеми

При виробництві гнутих профілів швидкісний режим технологічного процесу оказує суттєвий вплив на якість поверхні готових профілів, знос робочих валків, енерговитрати, величини моментів, що крутять та їх розподіл між верхнім і нижнім валками [1,2].

Для отримання якісних гнутих профілів особливу увагу слід приділяти правильній розробці калібрувань валків. Правильний вибір основних діаметрів валків, співвідношення між ними і правильне розташування калібру в валках мають велике значення для забезпечення оптимального швидкісного режиму профілювання. [3-5]. Від нього істотно залежать якість профілів, енергетичні втрати на тертя, знос робочих валків, стоншення металу і т. і.

В зв'язку з цим дослідження впливу окремих технологічних та конструктивних факторів, від яких залежить швидкісний режим при формуванні гнутих профілів в валках профілезгинальних станів, є актуальними і важливими для поліпшення якості і підвищення конкурентоспроможності цієї продукції в ринкових умовах.

## Аналіз останніх досліджень

Основні діаметри нижніх валків приймають мінімальних розмірів з умов міцності валу і профільних шайб. Основні діаметри верхніх валків визначають при проектуванні стану для заданого сортаменту профілів з урахуванням розміщення в верхніх валках перехідних форм профільованих смуг максимальної висоти. Отримані таким чином розміри діаметрів валків і їх співвідношення зберігають постійними незалежно від форми і розмірів профілю [2,5,6,7].

Робочі рівчаки валків профілезгинальних станів можуть виконуватися з кутами або ділянками звільнення і без них. У конструкції рівчаків без кутів звільнення забезпечується рівномірний зазор по всій ширині рівчака в площині осьового перерізу валків. При цьому зі збільшенням висоти формування профільованої смуги значно збільшується її відносне ковзання в валках, енергетичні втрати на тертя, погіршується якість профілю і т. п. З огляду на це дана конструкція рівчаків не отримала широкого поширення і застосовується для виробництва профілів невеликої висоти, коли потрібно відформувати певні елементи перехідних форм профілю, і в деяких інших випадках.

Виконання робочих рівчаків з ділянками або кутами звільнення частково зменшує зазначені недоліки внаслідок збільшення зазорів в місцях з великим відносним ковзанням між профільованої смугою і валками [6,7].

**Мета досліджень**

Метою дослідження є розгляд різноманітних технологічних факторів які потрібно ураховувати при розробці технології і виробництва нових типів профілів для створення більш раціонального швидкісного режиму формоутворення та поліпшення якості готової продукції.

Для досягнення поставленої мети потрібно розглянути розподіл швидкостей в робочому калібрі одного з найбільш поширених типів сортових відкритих профілів – швелеру, встановити як вони змінюються на верхньому та нижньому валках, вивести математичні залежності для визначення окружних швидкостей точок металу та їх горизонтальних складових по місту контакту верхнього та нижнього валки з металом смуги, проаналізувати отримані залежності та рекомендувати, як зменшити вплив різниці швидкостей верхнього та нижнього валків на якість профілів.

**Результати досліджень**

Оптимальний швидкісний режим профілювання вибирають з умови рівності окружних швидкостей пари валків в місцях основних діаметрів. Ця умова забезпечується спеціально підібраним передавальним відношенням циліндричної пари шестеренній кліті, яке визначається при проектуванні стану і приймається рівним відношенню основних діаметрів робочих валків (рис.1) відповідних клітей, тобто

$$i = \frac{D_{в.о.}}{D_{н.о.}} \qquad (1)$$

де $D_{в.о}$ и $D_{н.о}$ - основні діаметри верхнього і нижнього валків.

Зазвичай це співвідношення приймають в залежності від призначення стану, тобто від сортаменту профілів, виготовляються. Для невеликих станів, що встановлюються на машинобудівних заводах, передавальне відношення часто приймають близьким або рівним одиниці.

Для великих високопродуктивних станів, що встановлюються на металургійних заводах, співвідношення між основними діаметрами приймають значно більшим для полегшення валків, створення компактної конструкції стану, економії металу профільних шайб і т. і. Так, для профілезгинальних агрегатів, встановлених на ПАТ «Запоріжсталь»,

передавальні відносини між валками всіх клітей агрегатів 1 ÷ 4 × 400 ÷ 1500 і 2 ÷ 7 × 80 ÷ 500 відповідно прийняті 2,2 і 2,333.

При розробці калібрувань валків перехідні форми і їх взаємне розташування повинні бути такі, щоб середня окружна швидкість на кожній наступній парі валків була не меншою, ніж на попередньому. Так як практично дуже важко зробити правильний розрахунок, то збільшення окружних швидкостей кожної наступної пари валків виконують послідовним збільшенням основних діаметрів. На великих профілезгинальних станах ПАТ «Запоріжсталь» передбачено збільшення основних діаметрів валків на 0,2%.

Для визначення впливу різних чинників на швидкісний режим профілювання, їх врахування при проектуванні нового обладнання і розробці калібрувань валків розглянемо швидкісний режим для загального випадку, коли $D_{в.о.} > D_{н.о.}$.

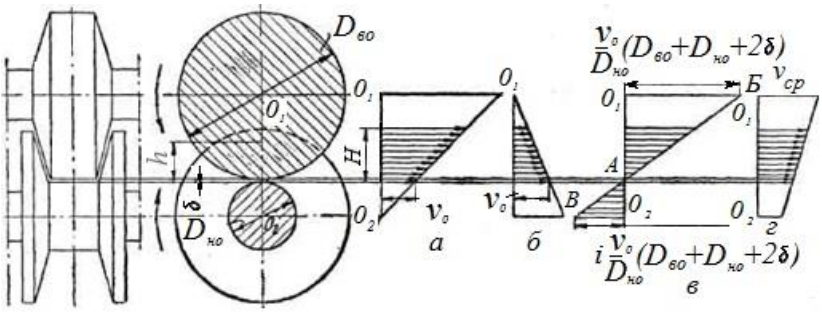


**Рис.1. Розподіл швидкостей в осьовому перерізі валків: *а* - окружних швидкостей на робочій ділянці нижнього валка; *б* - те ж, верхнього валка; *в* - відносних швидкостей точок нижнього валка щодо точок верхнього валка, що лежать на одному рівні; *г* - середніх швидкостей протилежних точок верхнього і нижнього валків**

Швидкісний режим профілювання смуги в кожній парі валків характеризується абсолютними і відносними швидкостями окремих точок контакту смуги і валків. Окружні швидкості різних точок валків будуть залежати від кутових швидкостей і відстані цих точок до осі обертання. Так як кутові швидкості суміжних валків однієї кліті жорстко взаємопов'язані через шестеренну кліть, то також взаємопов'язані абсолютні і відносні швидкості їх точок.

Розглянемо розподіл швидкостей в робочому калібрі валків, призначеному для профілювання швелерних профілів. Прийнявши рівність окружних швидкостей в місцях основних діаметрів верхнього і нижнього валків і позначивши їх величини через $v_0$,, побудуємо графіки розподілу окружних швидкостей для обох валків. З графіків, наведених на рис. 1, випливає, що окружні швидкості валків в радіальному напрямку збільшуються різному. Причому для нижнього валка це збільшення більше у стільки разів, у скільки разів основний його діаметр менше основного діаметру верхнього валка.

На підставі цих двох графіків складаємо третій графік (рис. 1, *в*). З графіка випливає, що окружні швидкості верхнього і нижнього валків тільки в одній точці А дорівнюватимуть. Положення точки А по висоті легко визначається з подібності трикутників $O_1АБ$ і $O_2AB$:

$$O_2A = \frac{D_{н.о.}}{2} + \frac{\delta}{i+1} \quad (2)$$

де $\delta$ - величина зазору між валками; $i$ - відношення основних діаметрів валків.

Зміни окружних швидкостей протилежних точок осьового перерізу валків залежно від співвідношення основних діаметрів і їх відстаней від основного діаметра нижнього валка визначається наступними залежностями:

$$v_в = v_0\left[1 - \frac{2(h-\delta)}{iD_{н.о.}}\right]; \quad (3)$$

$$v_н = v_н\left(1 + \frac{2h}{D_{н.о.}}\right); \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) випливає, що зі збільшенням висоти $h$ швидкості протилежних точок верхнього валка зменшуються, а нижнього зростають. При цьому середня швидкість в цих точках осьового перерізу валків

$$v_{ср} = \tfrac{1}{2}\left(v_в + v_н\right) = v_0\left[1 + \frac{h(i-1)+\delta}{iD_{н.о.}}\right]. \quad (5)$$

Для спрощення приймемо, що зазори між валками однакові по всьому периметру перетину і зчеплення смуги, що формується, з валками однаково в усіх точках їх контакту.

З аналізу формули (5) випливає, що при збільшенні $i$ і $h$ середня швидкість $v_{ср}$ протилежних точок по висоті верхнього і нижнього валків зростає (рис.1, *г*). Отже, зростає і швидкість профільованої смуги. При $i = 1$ середня швидкість не залежить від $h$, так як в цьому випадку

$$v_{ср} = v_0\left(1 + \frac{\delta}{D_{н.о.}}\right) \quad (6)$$

Таким чином, в кожній точці осьового перерізу робочого калібру валки прагнуть перемістити профільований метал зі швидкістю $v_{ср}$, в загальному випадку більшою, ніж окружна швидкість в місцях основних діаметрів.

Розміщення робочого рівчака в нижньому валці з підгинанням елементів профілю від рівня основного діаметра до осі призводить до зменшення $v_{ср}$, так як величина $h$ при цьому буде мати негативне значення. Тому при розробці калібрувань валків для створення правильного швидкісного режиму слід враховувати вплив величини $h$ або напрямок підгинання.

Швидкість руху профільованої смуги визначається сумарним впливом на неї верхнього і нижнього валків в місцях їх контакту. На вході заготовки у валки (рис. 2) вона захоплюється ними в місці перетину їх максимальних діаметрів (точка $A$) і, переміщаючись, відформовується (для простоти міркувань товщиною металу нехтуємо). При цьому переміщення окремих її елементів відбувається по складній траєкторії. Горизонтальна складова швидкості валків в точці $A$ буде в деякій мірі характеризувати швидкість руху смуги. Її величина залежить від діаметрів валків, їх співвідношення, висоти калібру, кутових швидкостей і становить

для верхнього валка

$$v_в^{'} = v_0 \cos\alpha_в; \tag{7}$$

для нижнього валка

$$v_н^{'} = v_0\left(1+\frac{2H}{D_{н.о.}}\right)\cos\alpha_н, \tag{8}$$

де $H$ - глибина рівчака.

Значення cos $\alpha_в$ і cos $\alpha_н$ визначаємо з рівнянь, складених відповідно до схеми, наведеної на рис.2.

$$\left(\frac{D_{н.о.}}{2}+H\right)\cos\alpha_н + i\frac{D_{н.о.}}{2}\cos\alpha_в = \frac{D_{н.о.}}{2}(i+1); \tag{9}$$

$$\frac{iD_{н.о.}}{2\sin\alpha_н} = \frac{D_{н.о.}+2H}{2\sin\alpha_в}. \tag{10}$$

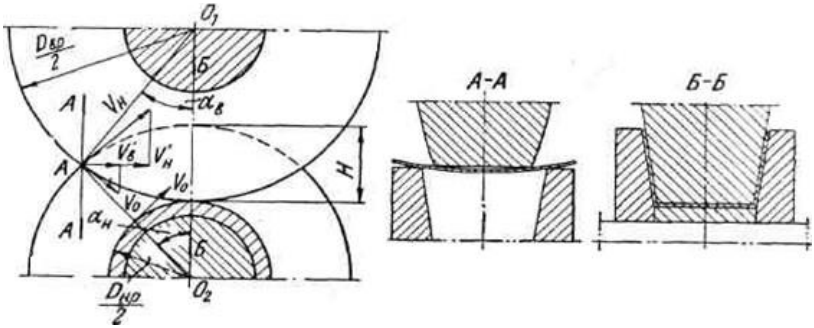


**Рис.2. Схема діючих швидкостей і місць контакту смуги з валками**

Вирішуючи спільно рівняння (9) і (10), отримуємо

$$\cos\alpha_в = \frac{D_{н.о.}^2(2i^2-2i+1)-\left(D_{н.о.}+2H\right)^2}{2iD_{н.о.}^2(i+1)}; \tag{11}$$

$$\cos\alpha_н = \frac{\left(D_{н.о.}+2H\right)^2+D_{н.о.}^2(2i+1)}{2D_{н.о.}\left(D_{н.о.}+2H\right)(i+1)}. \tag{12}$$

Після підстановки значень cos $\alpha_в$ і cos $\alpha_н$ в формули (7) і (8) вираження для горизонтальних складових швидкостей приймуть такий вигляд:

$$v_в^{'} = v_0\left[1-\frac{2H\left(D_{н.о.}-H\right)}{iD_{н.о.}^2(i+1)}\right]; \tag{13}$$

$$v_в^{'} = v_0\left[1+\frac{2H\left(D_{н.о.}+H\right)}{iD_{н.о.}^2(i+1)}\right]. \tag{14}$$

Формули (13) і (14) підтверджують, що горизонтальна складова швидкості нижнього валка буде більше відповідної складової швидкості верхнього валка. Якщо горизонтальна складова швидкості смуги в валках буде дорівнювати окружної

швидкості в місцях основних діаметрів валків, то горизонтальна складова швидкості верхнього валка $v'_в$ менше швидкості профільованої смуги, а нижнього більше, тобто

$$v_в^{'} \le v_{пол} \le v_н^{'}. \tag{15}$$

Горизонтальні складові відносних швидкостей валків і смуги в момент її входу в робочий рівчак складуть:

для верхнього валка

$$v_в^{'} - v_0 = -v_0 \frac{2H\left(D_{н.о.} - H\right)}{iD_{н.о.}^2\left(i+1\right)}; \tag{16}$$

для нижнього валка

$$v_н^{'} - v_0 = v_0 \frac{2H\left(D_{н.о.} + H\right)}{iD_{н.о.}^2\left(i+1\right)}. \tag{17}$$

Як випливає з отриманих формул, в процесі профілювання верхній валок буде перешкоджати руху смуги зі швидкістю, відповідної окружної швидкості в місцях основних діаметрів. Нижній валок, навпаки, буде збільшувати швидкість її руху.

Відносна швидкість випередження нижнього валка буде завжди більше відносної швидкості відставання верхнього на величину

$$\left(v_н^{'} - v_0\right) - \left(v_в^{'} - v_0\right) = \frac{v_0 H}{i}\left[\frac{i-1}{i+1} + \frac{H}{D_{н.о.}}\right]. \tag{18}$$

Аналіз формули (18) показує, що різниця між відносними швидкостями випередження смуги нижнім валком і відставання смуги від верхнього валка, в точці *А* завжди буде відбуватися при даній схемі профілювання і, сприяючи збільшенню швидкості смуги, буде зростати зі збільшенням глибини рівчака при інших рівних умовах.

При розгляді інших місць контакту смуги з валками, розташованих в проміжку між точкою *А* і осьовим перерізом валків (див. рис. 2), необхідно враховувати, що смуга головним чином стикається з верхнім валком по ділянці основного діаметра і прилеглим до нього місцях заокруглень, а з нижнім валком - по похилих стінок рівчака.

Швидкості точок контакту на верхньому валку незначно відрізняються від швидкості руху смуги як за напрямком, так і за величиною. Для нижнього валка відміна швидкостей буде більшій, причому горизонтальні складові швидкостей в кожному перетині перевищуватимуть швидкість смуги.

Швидкість руху профільованої смуги визначається сумарною дією на неї всіх контактних ділянок верхнього і нижнього валків.

Максимальні питомі тиски, а отже, і сили зчеплення валків з смугою зосереджені головним чином поблизу їх осьового перерізу *Б-Б* (див. рис. 2). Вони виникають при відформуванні радіусів в місцях вигину смуги при мінімальних зазорах між валками. У міру віддалення від осьового перерізу вплив на смугу з боку валків буде зменшуватися. Застосування кутів і ділянок звільнення забезпечує зменшення сил тертя, головним чином на окремих ділянках, поблизу осьового перерізу валків і внаслідок цього сприяє створенню оптимального швидкісного режиму з мінімальними енергетичними втратами. Так, застосування кутів звільнення в робочих рівчаках для формування швелерних профілів призводить до зосередження зусиль, що визначають рух металу, для верхнього валка на

контактних ділянках, розташованих в місцях основних діаметрів і в місцях переходу до бічних поверхонь, а для нижнього валка - по ділянці основного діаметра і на похилих стінках.

З аналізу калібрувань валків станів з відношенням основних діаметрів більше одиниці і розглянутого вище швидкісного режиму профілювання слідує, що швидкість смуги від кліті до кліті буде зростати внаслідок поступового переміщення контактних ділянок нижніх валків вгору.

Розглянуті теоретичні висновки підтверджені рядом дослідницьких робіт, проведених на станах ПАТ «Запоріжсталь». Швидкісний режим на цих станах при поштучному виробництві швелерних, кутових та інших профілів характеризується послідовним збільшенням швидкостей руху смуг по ходу профілювання.

Слід зазначити, що при отриманні складних профілів можна забезпечити натяг смуги правильним калібруванням валків, не вдаючись до послідовного збільшення основних діаметрів, яке призводить до додаткових енергетичних втрат на тертя, погіршення якості профілю, підвищеного зносу валків і іншим дефектам. З наведеного аналізу випливає, що для створення оптимального режиму профілювання на станах з співвідношенням основних діаметрів валків більше одиниці при виробництві ряду профілів не потрібно послідовне збільшення основних діаметрів (по клітям) внаслідок створення гарантованого натягу смуг послідовним збільшенням висоти смуги, що формується. Це дозволяє більш широко уніфікувати профільні шайби, спростити їх виготовлення, знизити енергетичні втрати на тертя, полегшити настройку стану, поліпшити якість продукції, знизити знос валків і т. і.

**Висновки**

1. При профілюванні ряду профілів (швелерів, куточків і ін.) в валках без послідовного збільшення основних діаметрів і їх співвідношенні більше одиниці відбувається послідовне зростання швидкостей від кліті до кліті внаслідок поступового переміщення контактних ділянок нижніх валків вгору.
2. Послідовне збільшення основних діаметрів валків слід застосовувати тільки тоді, коли їх співвідношення дорівнює або незначно відрізняється від одиниці, а також для станів, що встановлюються на металургійних заводах, в тих випадках коли елементи робочих калібрів розташовуються в нижньому валці з підгинанням вниз від рівня основного діаметра до осі цього валка.
3. Застосування кутів або ділянок звільнення дозволяє поліпшити якість профілю, зменшити знос валків і енергетичні втрати на тертя між валками і профільованим металом.
4. Оптимальний швидкісний режим профілювання можна створити раціональним розміщенням робочих рівчаків в валках і контактних ділянок в певних місцях рівчаків.
5. Для ряду профілів, одержуваних на станах з співвідношенням основних діаметрів валків більше одиниці, не потрібно послідовного збільшення основних діаметрів для створення натягу смуг. Це дозволяє більш широко уніфікувати профільні шайби, спростити їх виготовлення, знизити енергетичні втрати на тертя, полегшити настройку стану, поліпшити якість продукції і т. і.

**Список використаних джерел**

1. Тришевский О.И. Особенности формообразования, скоростной режим и деформированное состояние металла при валковой формовке несимметричных профил

периодическими гофрами. / О.И.Тришевский, А.Г. Крюк, О.Ю.Клочко // Сборник научных трудов ХНТУСГ „Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – Харьков: ХНТУСГ, 2010. – С.218-223.

2. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 с.

3.Филимонов С.В. Формообразование в роликах профилегибочных станков тонкостенных многоэлементных гнутых профилей с элементами жёсткости. // Дис. …докт. техн. наук : 05.02.09 /Филимонов Сергей Вячеславович; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва – Самара, 2017. – 469 с.

4. Тришевский О.И. Гнутые профили проката / О.И.Тришевский, В.В. Клепанда, Ф.И. Скоков. – Киев.: Гостехиздат УССР, 1962.412 с.

5. Формообразование гнутых профилей: теория и практика. Сборник научных трудов под научн. Ред. докт техн. наук, профессора В.И, Филимонова.– Ульяновск: УлГТУ, 2011.– 166 с.

6. Плеснецов С.Ю. Усовершенствование технологии валковой формовки гнутых профилей с элементами изгиба до $180^0$. // Дис. … канд. техн. наук : 05.03.05 / Плеснецов Сергей Юрьевич; Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» – Харків, 2016. – 225 с.

7. Докторов М. Е., Докторова Н. М., Докторов С. Е. К вопросу улучшения условий формообразования гнутых профилей в валках // Металл и литье Украины. – 2012. – No 9. – С. 20-28.

**Аннотация**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ НА КАЧЕСТВО ГНУТІХ ПРОФИЛЕЙ

**Тришевский О.И.**

*В работе приведены результаты исследований скоростного режима при формировании гнутых профилей открытого типа, в частности, изменения окружных скоростей противоположных точек осевого сечения валков в зависимости от соотношения основных диаметров и их расстояний от основного диаметра нижнего валка. Определено влияние различных факторов на скоростной режим профилирования, и рекомендован их учет при проектировании нового оборудования и разработке калибровок валков для общего случая, когда диаметр верхнего валка больше диаметра нижнего. Установлено, что размещение рабочего ручья в нижнем валке с подгибанием элементов профиля от уровня основного диаметра к оси приводит к уменьшению $v_{ср}$. Поэтому при разработке калибровок валков для создания правильного скоростного режима следует учитывать влияние величины высоты калибра h или направление подгибки.*

***Ключевые слова:*** *скоростной режим, калибровка валков, основной диаметр, рабочий валок, профилегибочный стан, качество профилей, энергосиловые параметры.*

**Abstract**

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SPEED MODE AT PROFILING FOR THE QUALITY OF BEND PROFILES

**O. Trishevskiy**

*The paper presents the results of studies of the speed regime when forming open-type bent profiles, in particular, changes in peripheral speeds of opposite points of the axial section of the rolls depending on the ratio of the main diameters and their distances from the main diameter of the lower roll. The influence of various factors on the profiling speed mode is determined, and their consideration is recommended when designing new equipment and developing roll calibrations for the general case when the diameter of the upper roll is larger than the diameter of the lower. It is set that placing of working brook in a lower roller with tucking in of profile elements from the level of basic diameter to the axis results in reduction of middle circuitous speed. Therefore, when developing roll calibrations to create the correct speed regime, the influence of the caliber height h or the direction of bending should be taken into account.*

***Keywords:*** *high-speed mode, roll calibration, main diameter, work roll, roll forming mill, quality of profiles, power parameters.*