

К. Ю. Ключніков, м.н.с., ORCID 0000- 0003-2465-3244

В. Г. Раздобрєєв, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992

О. І. Лещенко, м.н.с., ORCID 0000- 0003-1877-8358

Д. Г. Паламар, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ДО ПИТАННЯ ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ-ВОЛОЧІННЯ У ЗДВОСНИХ РОЛИКОВИХ ВОЛОКАХ

Анотація. У світі спостерігається великий попит на сталеві стрічкові профілі, які широко використовують у машинобудуванні, приладобудуванні та інших галузях народного господарства. В Україні виробництво стрічкових профілів вкрай обмежена. Обсяги виробництва такої продукції при потребі широкого розмірного і марочного сортаменту відносно невеликі. Створення великих спеціалізованих підприємств по виробництву стрічкових профілів в цих умовах економічно невігідно, орієнтація на імпорт цих профілів ставить в залежність від закордонних постачальників економічну і технологічну безпеку України. Для виробництва високоточних профілів застосовують різні комбінації основних формуютьорюючих і допоміжних процесів, що залежать ні, тільки від особливостей самого профілю і технічних вимог поставки, а й від величини замовленої партії і можливостей наявного обладнання. Зазначеним обумовлюється висока трудомісткість технологічного проектування.

Метою роботи є визначення граничних умов деформації в здвосних роликівих волоках, яке забезпечує стабільне протікання процесу волочіння за критерієм запасу міцності деформованого металу. Встановлено, що при розрахунку переходів волочіння стрічкових профілів при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі сталі Ст.70 з відношенням ширини до товщини більше двох максимальна величина відносного обтискання за перехід не повинна перевищувати 40-50 % при деформації без противонатяжіння, і 40 % – з натягненням. Аналітичними дослідженнями показано, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) коефіцієнт запасу, який гарантує процес деформації металу без обривання і не допускає локальних перетяжок і спотворення геометрії профілю, не вичерпуватиметься. Встановлено, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) процес деформації вихідної круглої заготовки в роликівій волоці з гладкими роликами протікатиме без перевищення допустимих значень зусилля волочіння. Визначено, що при збільшенні відносного обтискання в першій роликівій волоці, діапазон робочих обтискань в другій роликівій волоці, який впливає на стабільність протікання процесу протягання металу, зменшується.

Ключові слова: граничні умови деформації, волочіння, стрічкові профілі, здвосні роликіві волокни, обтискання.

Посилання для цитування: *Ключніков К. Ю., Раздобрєєв В. Г., Лещенко О. І., Паламар Д. Г.* До питання про визначення граничних умов процесу прокатки-

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35

«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

волочиння у здвоєних роликів волоках. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 134-148. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-134-148

Вступ. Процес прокатки-волочиння застосовується для виробництва цілої низки фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових і профілів періодичного перерізу. Цей процес, у порівнянні з волочинням у монолітних волоках дозволяє на 20-40 % зменшити енергетичні витрати, збільшити деформацію за один перехід до 40-50 %, скоротити кількість підготовчих операцій (термообробка, травлення), виключити застосування дорогих волочильних змащень. У порівнянні з холодною прокаткою профілів процес плющення в роликів волоках має більш високу технологічну гнучкість, не вимагає істотних капітальних витрат при організації виробництва точних профілів.

Разом з тим, через наявність тягового зусилля, що змінює схему напружено-деформованого стану металу у осередку деформації у бік збільшення напружень що розтягують на крайках профілю, які можуть викликати їхнє руйнування, сортамент профілів стрічкового типу, вироблених цим способом, раніше обмежувався профілями з відношенням ширини до висоти (b/h) не більше двох.

Раніш у ВОМТ ІЧМ НАНУ була розроблена технологія виробництва методом плющення прокаткою-волочинням сталеві стрічки з відношенням ширини до товщини більше 10. Однак велика кількість переходів, розробленої калібровки, ускладнює організацію виробництва стрічкових профілів широкого розмірного сортаменту, особливо при виробництві малотоннажних партій. Було визначено, що для зниження кількості переходів за рахунок використання розгінних калібрів та розробки їх оптимальних параметрів можливо знизити кількість технологічних операцій і переходів. Це, в свою чергу, дозволить збільшити відношенням ширини до товщини профілів стрічкового типу до 20, що, відповідно, знизить собівартість виробництва. Тому оцінка ефективності виробництва профілів стрічкового типу з відношенням ширини до товщини більше 10 методом волочинням в роликів волоках з використанням розгінних калібрів є актуальним і дозволить комплексно вирішувати проблему забезпечення машинобудівних і приладобудівних підприємств особливо точними профілями широкого розмірного сортаменту.

Мета роботи. Визначити граничні умови деформації в здвоєних роликів волоках, яке забезпечує стабільне протікання процесу волочиння за критерієм запасу міцності деформованого металу.

Сучасний стан розробки. Виробництво стрічки шляхом плющення профілів круглого поперечного перерізу в валках з циліндричної робочою

поверхнею не дозволяє мінімізувати діаметр заготовки і число проходів, так як в процесі деформації значна частина металу зміщується в поздовжньому напрямку і залежить від величини зміщеного об'єму металу в вертикальному напрямку, при цьому на розширення йде незначний зміщений обсяг. При цьому слід мати на увазі, що застосування валків з гладкою робочою поверхнею призводить до неконтрольованого (вільного) розширення розкату, яке залежить від багатьох чинників (діаметра заготовки, діаметра і стану робочої поверхні валків, наявність технологічної мастила, пластичності і хімічного складу металу та ін.) [1]. Відомо також, що під час гарячої прокатки-плющенні створюються такі умови пластичної деформації, при яких розширення досягає великих значень, ніж при холодній деформації.

З метою збільшення ширини, коли вільного розширення при рівномірній деформації металу по ширині в валках з гладкою бочкою недостатньо, застосовують вимушене розширення, яке є наслідком нерівномірного деформації металу по ширині. Для цього використовують так звані розгінні калібри [2].

Одним з найбільш важливих питань при калібруванні будь-якого профілю є розширення, від якого залежить заповнення калібру металом і, відповідно, отримання профілю заданої форми або отримання профілю плоского перерізу достатньої ширини з заготовки компактного перерізу. Розрізняють три види розширення: вільний, стиснуте і вимушене. При вільному розширенні метал має можливість вільно переміщатися в бік, перпендикулярну напрямку прокатки, надаючи бічній поверхні смуги опуклу або увігнуту форму в залежності від того, наскільки глибоко і рівномірно поширюється деформація по перетину профілю. При цьому плину металу в поперечному напрямку перешкоджають тільки контактні сили тертя. При рівномірній деформації бокова поверхня має плоску форму без опуклості або угнутості. Прокатка з вільним розширенням є найбільш простим випадком деформації, яка зустрічається при роботі на гладких валках або при плоских калібрах (наприклад, типу ящиківих), що мають великий запас на розширення.

При прокатці металу в калібрах визначення величини розширення значно ускладнюється. Метал, що обтискується, зустрічаючи на своєму шляху бічні стінки калібру із змінним діаметром валків, перестає підкорятися законам рівності, виведеним для випадку вільного розширення, і змушений купувати форму, утворену калібром. У подібних умовах смуга отримує невідільний, стиснуте або, нарешті, вимушене розширення. Розгінні калібри застосовуються для отримання необхідної ширини смуги, коли діаметр валків не досить великий чи немає можливості застосування заготовок великого розміру. При цьому форма таких калібрів сприяє розвитку при прокатці вимушеного розширення, в результаті чого стає можливим розширення сортаменту сортопрокатного стану без

істотних капітальних витрат. Крім того, перевагами застосування розгінних калібрів при сортовий прокатки є [3]:

- скорочення питомої енергоемності процесу, що досягає в окремих випадках 40-50 %, а також значне скорочення витрат валків і збільшення тривалості їх служби, що пояснюється відсутністю тертя об бічні стінки калібрів і зменшенням питомих контактних напружень, що діють з боку деформованого металу на робочі валки;

- скорочення витрат і парку робочих валків, обумовлене більш раціональним використанням бочки кожного з них, при цьому збільшення служби калібрів і більш раціональне розміщення їх по довжині бочки валка дозволяє скоротити число перевалок, що, в кінцевому рахунку, веде до збільшення продуктивності прокатного стану;

- усунення небезпеки утворення задирок, а, отже, і заходів, які необхідні для усунення цієї небезпеки;

- ширша можливість використання одних і тих же калібрів для отримання профілю декількох суміжних типорозмірів за рахунок переміщення верхнього робочого валка, що також обумовлює підвищення продуктивності і зниження собівартості готової металопродукції.

У нашому випадку вирішується завдання отримання профілів стрічкового типу з заготовки компактного перерізу (круглого) і тому слід розглянути деформаційні схеми, що передбачають максимальне використання вимушеного розширення. Слід зазначити, що, незважаючи на значне число досліджень, питання про поведінку металу в калібрах з обмеженим або вимушеним розширенням все ще недостатньо ясний, що надзвичайно ускладнює всі розрахунки по калібруванню, які пов'язані із заповненням калібрів.

На підставі аналізу робіт [4-7] авторами цієї роботи розроблена схема калібрування профілю стрічкового типу перетином $0,5 \times 12,0$ мм призначеного, зокрема, для виготовлення порошкового дроту, з вихідної круглої заготовки діаметром 6,0 мм [8].

Розроблена калібрування передбачає отримання стрічки за сім переходів. Перший перехід являє собою процес плющення вихідної круглої заготовки діаметром 6,0 мм з метою отримання розкату з відношенням ширини до товщини менше двох ($b/h < 2$). Другий перехід являє собою деформацію плоскою заготовки в розгінному калібрі №1 з кутом нахилу гребеня 30° . Деформація в третьому переході є розвиток другого переходу, різниця полягає в тому, що застосовуються ролики з кутом нахилу гребеня 15° (розгінний калібр №2). Деформація в четвертому, п'ятому і шостому переходах здійснюється в роликах з гладкою бочкою. Сьомий перехід являє собою деформацію в чистовому закритому калібрі. Основна технічна проблема при реалізації процесу прокатки-волочіння полягала в утриманні

смуги в лінії протягання при використанні розгінних калібрів. При зміщенні металу з осі протягання формувався несиметричний профіль, що не дозволяло забезпечити виробництво стрічки із заданою точністю геометричних розмірів.

У зв'язку з цим, для утримання смуги в розгінному калібрі було прийнято рішення про суміщення процесу площення (1-й перехід) і процесу деформації в розгінному калібрі №1 (2-й перехід) зі зменшеним впровадженням гребенів. За рахунок деформації в першій роликівій волоці (процес площення) створюється протинатягнення перед розгінним калібром (при зменшеній глибині впровадження гребенів), яке сприяє нормальному протіканню процесу деформації в останньому з утворенням симетричного профілю. Для створення протинатягнення при деформації в розгінних калібрах №1 і 2 (переходи 2 і 3 скоригованого калібрування) застосували пристрій рихтування. Величину протинатягнення, необхідну для нормального протікання процесу деформації в розгінних калібрах визначали експериментально. Після третього переходу деформація металу в переходах 4 - 8 ведеться в роликах з гладкою бочкою.

Отримання готового профілю стрічкового типу перетином 0,5x12,0 мм забезпечується деформацією металу в чистовому калібрі закритого типу. За скоригованою схемою калібрування отримання профілю перетином 0,5x12,0 мм передбачає отримання готового профілю за дев'ять переходів. При проведенні випробування розробленої технології штабу перетином 0,5x12,0 мм з дроту діаметром 6,0 мм вдалося отримати без застосування проміжної термічної обробки. Механічні властивості стрічки в нагартваному стані склали: $\sigma_T=828$ Н/мм², $\sigma_B=835$ Н/мм², $\delta_4=3,5\%$. Таким чином, запас пластичності металу практично вичерпався.

Точність отриманих розмірів стрічки, в цілому, відповідає необхідним. Так, згідно з ГОСТ 503 відхилення від ширини стрічок даного розміру повинна становити +3 мм для катаної і -0,3 мм для різаною. Фактична різноширинність отриманої стрічки складала 0,2 мм. Відхилення товщини стрічки згідно ГОСТ 503 не повинно перевищувати 0-0,05 мм, а згідно з технічними умовами на стрічку для порошкового дроту - від $\pm 0,025$ до $\pm 0,05$ мм. Фактична різнотовщинність отриманої стрічки складала 0,04 мм.

Аналіз скоригованої схеми калібрування отримання профілю стрічкового типу перетином 0,5x12.0 мм виявив такі основні недоліки:

- велика кількість переходів для отримання готового профілю;
- низка ефективність застосування роликів з гладкою бочкою при деформації металу в переходах 5-8. Показники розширення металу і відносини зміщених площ в цих переходах досить малі в порівнянні з показниками при застосуванні розгінних калібрів, в попередніх переходах.

Для усунення вище перерахованих недоліків необхідно провести

аналітичні дослідження щодо визначення граничних умов деформації в здвоєних роликів волоках, яке забезпечує стабільне протікання процесу волочіння за критерієм запасу міцності деформованого металу.

Результати досліджень. Визначальним критерієм стійкості процесу протягання є коефіцієнт запасу, який гарантує процес деформації металу без обривання і не допускає локальних перетяжок і спотворення геометрії профілю.

Процес деформації в роликів волоках здійснюється за рахунок додатка зовнішніх сил, які розтягують і противонатажіння, яке ці сили збільшує. Граничними умовами стійкості процесу, виходячи з умови пластичності, будуть:

$$\sigma_{np} < \sigma_{Ti}; \sigma_q < \sigma_{T0}, \quad (1)$$

де σ_{np} – напруга протягання, Н/мм²; σ_{Ti} – напруга плинності металу після деформації, Н/мм²; σ_q – величина противонатажіння, Н/мм²; σ_{T0} – початкова границя плинності металу, Н/мм².

Стабільна робота в граничному режимі неможлива із-за різного роду стохастичних явищ – нерівномірності властивостей металу по перетину і довжині, місцевих макро- і мікропорушень суцільності, дефектів при підготовці поверхні металу до волочіння, конструктивних особливостей всього деформуючого пристрою у момент заправки, прискорення, різної зупинки і тому подібне.

Для визначення і аналізу граничних умов волочіння в роликів волоках застосуємо рівняння, представлені в роботі [9]:

$$\sigma_{np} = 1,15\sigma_0 \left[\ln \lambda (1 + 0,72a_1 \sqrt{\ln \lambda}) + 0,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R} \left(1 + A^2 \frac{b_0^2}{h_0^2} \right)} \right] + 0,5\tau_x \left(\frac{\Delta h}{h_{cp}} \right) \cdot \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} + \sigma_v \lambda; \quad (2)$$

$$\sigma_{np} = 1,15\sigma_0 \left\{ \ln \lambda + 0,72a_1 \left[(\ln \lambda + e_{i0})^{1,5} - e_{i0}^{1,5} \right] + 0,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R} \left(1 + A^2 \frac{b_0^2}{h_0^2} \right)} \right\} + 0,5\tau_x \left(\frac{\Delta h}{h_{cp}} \right)^2 \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} + \sigma_v \lambda. \quad (3)$$

Розрахунок тягової напруги σ_{np} ведеться як для ненаклепаного – рівняння (2), так і для наклепаного металу – рівняння (3). Представлені рівняння для розрахунку тягової напруги дають високу збіжність з експериментальними даними [10].

Розраховані переходи волочіння профілів стрічкового типу з відношенням ширини до висоти більше двох для станів різних типів повинні задовольняти декількома критеріям:

1. Величина відносного обтискання за перехід не повинна перевищувати 40-50 %, оскільки при перевищенні цього діапазону значень спостерігається ефект утяжки металу (метал починає текти не у бік розширення, а у бік витягу).

На рис. 1 представлено графік зміни показника поперечної деформації

залежно від відносного обтискання за перехід при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі Ст.70 в роликівій волоці.

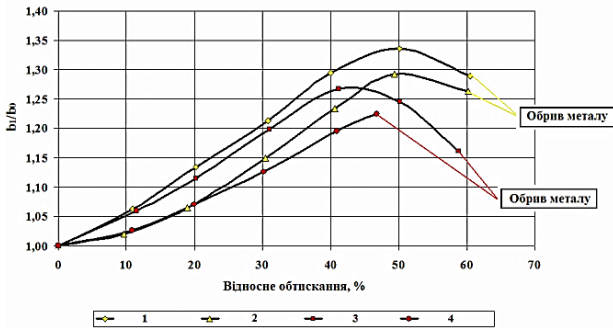


Рисунок 1 –
Зміна показника поперечної деформації залежно від відносного обтискання за перехід при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі Ст.70 в роликівій волоці.

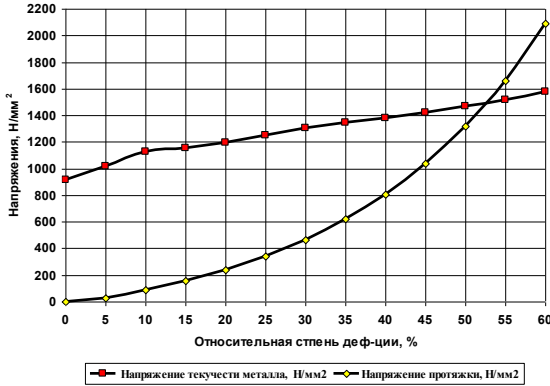
Як видно з рис. 1 при деформації нагартованого і патентованого металу без противонатяжіння (криві 1-2) зростання розширення відбувається до значення відносного обтискання за перехід, рівного 40-50 %, а при деформації нагартованого і патентованого металу з противонатяжінням (криві 3-4) до значення 40 %. Після чого спостерігається зниження зростання розширення і подальший обрив металу. У зв'язку з цим, при розрахунку переходів волочиння стрічкових профілів з відношенням ширини до товщини більше двох максимальна величина відносного обтискання за перехід не повинна перевищувати 40-50 % при деформації без противонатяжіння, і 40 % – з натягненням.

2. Коефіцієнт запасу на кожному переході волочиння має бути завжди вище за допустимий коефіцієнт запасу міцності для даного типорозміру дроту:

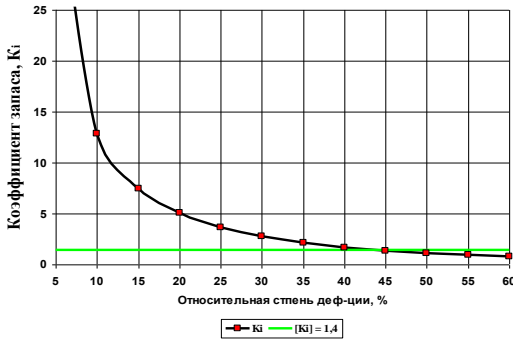
$$K_i = \frac{\sigma_{Tl}}{\sigma_{np_i}} \geq [K_i]. \quad (4)$$

Значення величин допустимого коефіцієнту запасу $[K_i]=1,4-2,0$ з врахуванням масштабного чинника ϵ в літературі [10].

На рис. 2а показана зміна напруги плинності металу і напруги протягання залежно від відносного обтискання при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі Ст.70 в роликівій волоці з гладкими роликками, а на рис. 2б представлена зміна коефіцієнта запасу залежно від відносного обтискання за перехід. Як видно з рис. 2а, при відносному обтисканні 52 % значення напруги протягання досягає значення границі плинності металу. Це свідчить про те, що досягнута гранична умова стійкості процесу протягання металу в роликівій волоці.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Зміна напруги плинності металу і напруги протягання (а) і коефіцієнта запасу залежно від відносного обтискання за перехід при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі Ст.70 в роликівій волоці.

З рис. 2б видно, що при деформації вихідної круглої заготовки коефіцієнт запасу вичерпується при значенні відносного обтискання за перехід більше 40 %. Отже можна відзначити, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) коефіцієнт запасу не вичерпуватиметься.

3. Повне тягове зусилля волочіння на кожному блоці волочильного стану не повинне перевищувати допустиме зусилля волочіння, яке є паспортною характеристикою (значення $[P_i]$ часто вказується в маркуванні волочильного стану (наприклад, UDZSA 2500/п, де 2500 – зусилля волочіння кгс; п - кратність стану):

$$P_{np_i} = \sigma_{np_i} \cdot F_i \leq [P_i]. \quad (5)$$

На рис. 3 представлена зміна повного тягового зусилля (сили) залежно від відносного обтискання за перехід при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі Ст.70 в роликівій волоці з гладкими

роликками. Як видно з рис. 3, величина тягового зусилля для даного випадку деформації перевищує допустиме зусилля волочиння для стану UDZSA 1250 при значенні відносного обтискання рівного 57 %. Допустиме значення зусилля волочиння для стану UDZSA 2500 при даному випадку деформації не перевищене на всьому діапазоні відносного обтискання за перехід.



Рисунок 3 –
Зміна тягового
зусилля при
деформації
вихідної круглої
заготівки
діаметром
3,67 мм
зі Ст.70

Отже можна сказати, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) процес деформації вихідної круглої заготівки в роликівій волоці з гладкими роликками протікатиме без перевищення допустимих значень зусилля волочиння.

4. Допустима величина противонатяжіння $[\sigma_q/\sigma_{T0}]$ на кожному переході не повинна порушувати умов стабільності $[K_i]$ з врахуванням інших чинників процесу протягання. При виведенні граничних умов протягання в роликівій волоці автори роботи [11] користувалися показниками поточного і граничного коефіцієнтів запасу у вигляді:

$$K^* = \frac{\sigma_{np}}{\sigma_{Ti}} = \frac{1}{K_i} ; [K^*] = \frac{1}{[K_i]} . \quad (6)$$

Граничні умови для протягання металу в роликівій волоці згідно з роботою [10] виглядають таким чином:

$$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{Ti}} = K^* = 1 + \frac{\lambda \frac{\sigma_{T0} - 1}{\sigma_{Ti}}}{(\lambda - 1) \cdot f \cdot ctg \alpha} \left[2 \left(1 - \lambda \frac{f \cdot ctg \alpha}{2} \right) \right] - \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{Ti}} + \frac{\sigma_q}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{Ti}} \leq [K^*] \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_q}{\sigma_{T0}} \leq 1 - \frac{\sigma_{Ti}}{\sigma_{T0}} \left\{ 1 - [K^*] + \frac{\lambda \frac{\sigma_{T0} - 1}{\sigma_{Ti}}}{(\lambda - 1) \cdot f \cdot ctg \alpha} \left[2 \left(1 - \lambda \frac{f \cdot ctg \alpha}{2} \right) \right] \right\} . \quad (8)$$

З рівняння (8) виходить, що гранична величина противонатяжіння не може досягати значень вихідної границі плинності оброблюваного металу. На рис. 4 представлений вплив відносного обтискання за перехід і

протівонатяжіння на умову стабільності процесу протягання вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм в роликівій волоці з гладкими роликками при різних значеннях протівонатяжіння.

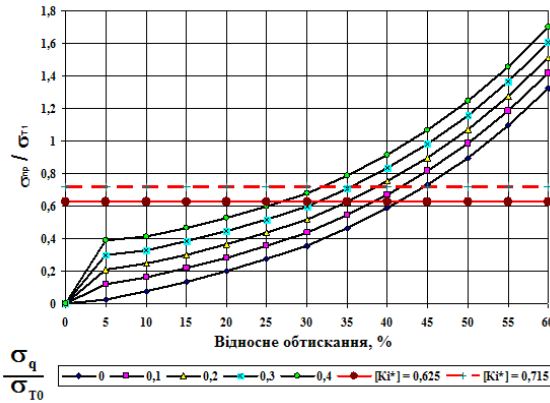


Рисунок 4 – Вплив деформації і протівонатяжіння на умову стабільності процесу протягання вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм в роликівій волоці з гладкими роликками при різних значеннях протівонатяжіння

З рис. 4, витікає, що із збільшенням значення протівонатяжіння діапазон робочих обтискань, при яких коефіцієнт запасу не вичерпується, зменшується. Так, наприклад, якщо при значенні $\sigma_q/\sigma_{T0}=0$ максимальне відносне обтискання за перехід, при якому не вичерпується коефіцієнт запасу, складає 40 %, то при значенні $\sigma_q/\sigma_{T0}=0,4$, складає 25 %.

На рис. 5 представлена схема протягання металу в здвоєних роликівих волоках. Перша роликівіа волока створює для другої роликівіа волоки регульоване протівонатяжіння, чисельно дорівнює напрузі протягання в першій роликівій волоці ($\sigma_{\text{пр},1}=\sigma_{q2}$).

Граничні умови протягання металу в здвоєних роликівих волоках, згідно з роботою [11] мають наступний вигляд:

$$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{T1}} = 1 + \frac{2 \left(\lambda_2 \frac{\sigma_{T0_2}}{\sigma_{T_2}} - 1 \right)}{(\lambda_2 - 1) f \cdot ctg \alpha_2} \left(1 - \lambda \frac{f \cdot ctg \alpha_2}{2} \right) + \frac{2 \left(\lambda_1 \frac{\sigma_{T0_1}}{\sigma_{T_1}} - \frac{\sigma_{T0_2}}{\sigma_{T_2}} \right)}{(\lambda_1 - 1) f \cdot ctg \alpha_1} \left(1 - \lambda \frac{f \cdot ctg \alpha_1}{2} \right) - \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{T1}} + \frac{\sigma_q}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{T1}} \leq [K^*] \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_q}{\sigma_{T0}} \leq 1 - \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T0}} \left\{ 1 - [K^*] \right\} - \frac{2 \left(\lambda_2 \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T0}} - \frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{T0}} \right)}{f \cdot ctg \alpha_2 (\lambda_2 - 1)} \times \left(1 - \alpha_2 \frac{f \cdot ctg \alpha_2}{2} \right) - \frac{2 \left(\lambda_1 - \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T0}} \right)}{f \cdot ctg \alpha_1 (\lambda_1 - 1)} \left(1 - \lambda_1 \frac{f \cdot ctg \alpha_1}{2} \right). \quad (10)$$

На рис. 6 представлена залежність впливу деформації в першій роликівій волоці на умову стабільності процесу протягання металу в другій роликівій волоці. З графіка витікає, що при збільшенні відносного обтискання в першій роликівій волоці, діапазон робочих обтискань в другій роликівій волоці, який впливає на стабільність протікання

процесу протягання металу, зменшується. Так, наприклад, при відносному обтисканні 5% в першій роликівій волоці, діапазон обтискань в другій роликівій волоці, при якому процес протягання металу протікає стабільно, складає від 5-40% (крива 1), то при відносному обтисканні 30% в першій роликівій волоці, діапазон обтискань в другій роликівій волоці, при якому процес протягання металу протікає стабільно, складає 5-20% (крива 6).

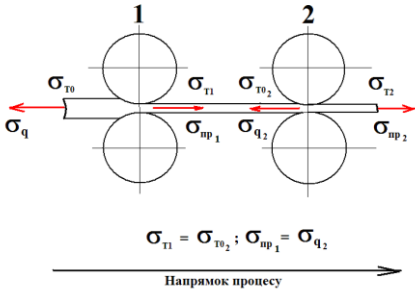
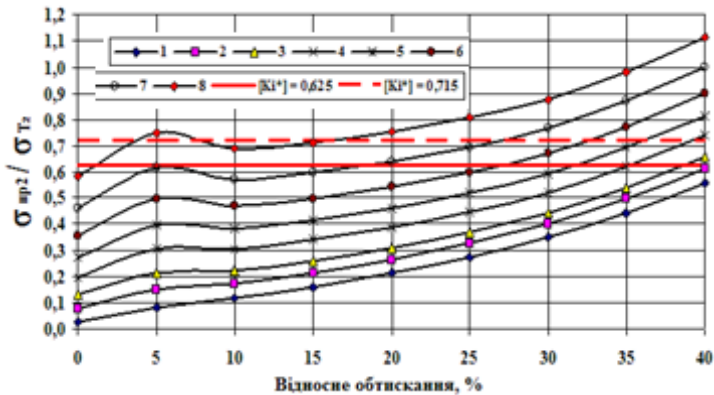


Рисунок 5 – Схема протягання металу в здвоєних роликівійх волоках.



1 – $\varepsilon_1=5\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,026$; 2 – $\varepsilon_1=10\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,078$; 3 – $\varepsilon_1=15\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,134$;
 4 – $\varepsilon_1=20\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,198$; 5 – $\varepsilon_1=25\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,272$; 6 – $\varepsilon_1=30\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,357$;
 7 – $\varepsilon_1=35\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,462$; 8 – $\varepsilon_1=40\%$, $\sigma_{q2}/\sigma_{T02}=0,586$

Рисунок 6 – Вплив деформації в першій роликівій волоці на умову стабільності процесу протягання в другій роликівій волоці.

Висновки

1. Визначені граничні умови процесу протяжки металу в здвоєних роликівійх волоках.

2. Встановлено, що при розрахунку переходів волочіння стрічкових профілів при деформації вихідної круглої заготовки діаметром 3,67 мм зі сталі Ст.70 з відношенням ширини до товщини більше двох максимальна величина відносного обтискання за перехід не повинна перевищувати 40-50 % при деформації без противонатяжіння, і 40 % – з натягненням.

3. Аналітичними дослідженнями показано, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) коефіцієнт запасу не вичерпуватиметься.

4. Встановлено, що в діапазоні робочих обтискань за перехід (5-40 %) процес деформації вихідної круглої заготовки в роликівій волоці з гладкими роликами протікатиме без перевищення допустимих значень зусилля волочіння.

5. Визначено, що при збільшенні відносного обтискання в першій роликівій волоці, діапазон робочих обтискань в другій роликівій волоці, який впливає на стабільність протікання процесу протягання металу, зменшується.

Перелік посилань

1. Владимирев Ю. В., Нижник П. П., Пуртов Ю. А. Производство плоской стальной ленты. Москва : Металлургия, 1985. 119 с.
2. Диомидов Б. Б., Литовченко Н. В. Калибровка прокатных валков. Москва : Металлургия, 1970. 312 с.
3. Илюкович Б. М., Нехаев Н. Е., Меркурьев С. Е. Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 1. Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры: справочник: под ред. Б. М. Илюковича. Днепропетровск : РВА «ДнероВАЛ», 2002. 506 с.
4. Капланов В. И., Коренко М. Г., Староста Н. В. Энергоэффективный процесс получения плоских лент в условиях мелкосортных станов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2010. № 42. С. 28-32.
5. Воробей С. А., Раздобреев В. Г., Ключников К. Ю., Лохматов А. П., Сикачина И. В., Барышева Л. П. Особенности течения и напряженного состояния металла при его деформации в процессе получения профилей ленточного типа прокаткой-волочения. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2011. Вып. 23. С. 174-184.
6. Ключников К. Ю., Воробей С. А., Лохматов А. П., Сикачина И. В., Раздобреев В. Г. Технология производства профилей ленточного типа из заготовок круглого сечения методом прокатки-волочения. *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов ДГМА*. 2013. № 1 (34). С. 207-212.
7. Ключников К. Ю., Воробей С. А., Раздобреев В. Г., Сикачина И. В. Эффективность производства особоточных фасонных профилей малых сечений в роликowych волоках из заготовок круглого сечения. *Пластическая деформация металлов: сб. трудов Международной научно-практической конференции «Пластическая деформация металлов. 2014»*. Днепропетровск, 2014. Т. 1. С. 159-163.

8. Ключников К. Ю., Раздобреев В. Г., Лещенко А. И., Паламарь Д. Г. Разработка ресурсосберегающей технологии производства профилей ленточного типа волочением в роликовых волоках с использованием разгонных калибров. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77. № 9. С. 1054-1062. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-9-1054-1062.
9. Гулько В. И., Войцеховский В. А., Григорьев А. К. Производство профилей и проволоки в роликовых волоках. Ижевск : Удмуртия, 1989. 132 с.
10. Гулько В. И., Лушников В. М., Войцеховский В. А., Петров А. И. Аналитическое и экспериментальное определение силовых характеристик процесса прокатки-волочения. *Машины, автоматы и прокатное производство: сб. науч. тр. МВТУ*. Москва : МВТУ, 1973. Вып. 4. С. 176-185.
11. Буравлев И. Б. Математические модели и алгоритмы комбинированных процессов волочения. Донецк : Редакционно-издательский отдел, 1995. 57 с.

References

1. Vladimirov Yu.V., Nizhnik P.P., PurtoV Yu.A. (1985). *Proizvodstvo plyushchenoy stal'noy lenty [Production of rolled steel straps]*. Moskva: Metallurgiya, 1985. 119. [In Russian].
2. Diomidov B.B., Litovchenko N.V. (1970). *Kalibrovka prokatnykh valkov [Calibration of rolls]*. Moskva: Metallurgiya, 1970. 312. [In Russian].
3. Ilyukovich B.M., Nekhayev N.Ye., Merkur'yev S.Ye. (2002). *Prokatka i kalibrovka. V 6 t. T. 1. Osnovy teorii kalibrovki. Kalibrovka blyumov i zagotovki, krugov i shestrigrannikov, kvadratnoy stali, provoloki i armatury: spravochnik [Rolling and calibration. Foundations of gauge theory. Calibration of blooms and workpieces, circles and hexagons, square steel, wire and fittings: reference book]*. B.M. Ilyukovich (Ed.). (Vol. 1.). Dnepropetrovsk: RVA «DneroVAL», 2002. 506. [In Russian].
4. Kaplanov V.I., Korenko M.G., Starosta N.V. (2010). Energoeffektivnyy protsess polucheniya plyushchenykh lent v usloviyakh melkosortnykh stanov [An energy-efficient process for producing crimped belts in small section mills]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPI» [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]*, 2010, 42. 28-32. [In Russian].
5. Vorobey S.A., Razdobreyev V.G., Klyuchnikov K.Yu., Lokhmatov A.P., Sikachina I.V., Barysheva L.P. (2011). Osobennosti techeniya i napryazhennogo sostoyaniya metalla pri yego deformatsii v protsesse polucheniya profiley lentochnogo tipa prokatkoy-volocheniya [Features of the flow and stress state of the metal during its deformation in the process of obtaining strip-type profiles by rolling-drawing]. *Fundamentalni i prikladni problemy chornoy metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2011, 23. 174-184. [In Russian].
6. Klyuchnikov K. Yu., Vorobey S.A., Lokhmatov A.P., Sikachina I.V., Razdobreyev V.G. (2013). Tekhnologiya proizvodniya profiley lentochnogo tipa iz zagotovok kruglogo secheniya metodom prokatki-volocheniya [The technology for the production of strip-type profiles from round blanks by rolling-drawing]. *Obrabotka materialov davlenim: sb. nauch. trudov DGMA [Material processing by pressure: Sat. scientific. works of the DSMA]*. 2013. 1 (34). 207-212. [In Russian].

7. Klyuchnikov K.YU., Vorobey S.A., Razdobreyev V.G., Sikachina I.V. (2014). Effektivnost' proizvodstva osobotochnykh fasonnykh profilye malyykh secheniy v rolikovykh volokakh iz zagotovok kruglogo secheniya [Efficiency of production of high-precision shaped profiles of small cross-sections in roller dies from workpieces of circular cross-section]. *Plasticheskaya deformatsiya metallov: sb. trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Plasticheskaya deformatsiya metallov. 2014»* [Plastic deformation of metals: collection of articles. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Plastic Deformation of Metals. 2014»]. Dnepropetrovsk, 2014. Vol. 1. (p.p. 159-163). [In Russian].
8. Klyuchnikov K.Yu., Razdobreev V.G., Leshchenko A.I., Palamar D.G. (2021). Razrabotka resursosbergayushchey tekhnologii proizvodstva profilye lentochnogo tipa volocheniym v rolikovykh volokakh s ispol'zovaniym razgonnykh kalibrov [Development of a resource-saving technology of production of strip-type profiles by drawing in roller dies using dummy passes]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2021, vol. 77, 9, 1054-1062. [In Russian]. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-9-1054-1062.
9. Gul'ko V.I., Voytsekhovskiy V.A., Grigor'yev A.K. (1989). *Proizvodstvo profilye i provoloki v rolikovykh volokakh* [Production of profiles and wire in roller trays]. Izhevsk: Udmurtiya, 1989. 132. [In Russian].
10. Gul'ko V.I., Lushnikov V.M., Voytsekhovskiy V.A., Petrov A.I. (1973). Analiticheskoye i eksperimental'noye opredeleniye silovykh kharakteristik protsessa prokatki-volocheniya [Analytical and experimental determination of the power characteristics of the rolling-drawing process]. *Mashiny, avtomaty i prokatnoye proizvodstvo: sb. nauch. tr. MVTU [Machines, automatic machines and rolling production: collection of articles. scientific. tr. MVTU]*. Moskva: MVTU, 1973. Vol. 4. 176-185. [In Russian].
11. Buravlev I.B. (1995). *Matematicheskiye modeli i algoritmy kombinirovannykh protsessov volocheniya* [Mathematical models and algorithms for combined drawing processes]. Donetsk: Redaktsiono-izdatel'skiy otdel, 1995. 57. [In Russian].

K. Yu. Klyuchnikov, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-2465-3244

V. G. Razdobreev, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992

O. I. Leshchenko, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-1877-8358

D. G. Palamar, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-9503-3248

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

BEFORE FOOD ABOUT THE DECISION OF BORDER MINES TO THE PROCESS OF ROLLING-FIBER IN BALANCED ROLLER FIBERS

Summary. There is a great demand in the world for steel strip profiles, which are widely used in mechanical engineering, instrument making and other sectors of the national economy. In Ukraine, the production of strip profiles is extremely limited. The

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*

production volumes of such products, if a wide range of sizes and brands are required, are relatively small. The creation of large specialized enterprises for the production of strip profiles in these conditions is economically unprofitable, the orientation towards the import of these profiles makes the economic and technological security of Ukraine dependent on foreign suppliers. For the production of high-precision profiles, various combinations of basic shaping and auxiliary processes are used, depending not only on the characteristics of the profile itself and the technical requirements of the supply, but also on the size of the ordered batch and the capabilities of the available equipment. This explains the high complexity of technological design.

The aim of the work is to determine the boundary conditions of deformation in double roller dies, which ensure a stable flow of the drawing process according to the criterion of the safety factor of the deformed metal. It was found that when calculating the transitions of drawing strip profiles during deformation of the initial round billet with a diameter of 3.67 mm from steel St.70 with a width to thickness ratio of more than two, the maximum value of the relative reduction per transition should not exceed 40-50 % during deformation without counter tension, and 40 % – with tension. Analytical studies have shown that in the range of working reductions per transition (5-40 %), the safety factor that guarantees the process of metal deformation without breakage and does not allow local constrictions and distortion of the profile geometry is not exhausted. It was found that in the range of working reductions per transition (5-40 %), the deformation process of the initial round billet in a roller die with smooth rollers proceeds without exceeding the permissible values of the drawing forces. It has been determined that with an increase in the relative reduction in the first roller die, the range of working reductions in the second roller die, which affects the stability of the metal drawing process, decreases.

Keywords: boundary conditions, drawing, strip profiles, twin roller dies, reductions.

For citation: *Kluychnikov K.Yu., Razdobreev V.G., Leshchenko O.I., Palamar D.G.* Do pytannya pro vyznachennya hranychnykh umov protsesu prokatky-volochinnya u zdvoynykh rolykovykh volokakh [Before food about the decision of border mines to the process of rolling-fiber in balanced roller fibers]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 134-148. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-134-148

*Стаття надійшла до редакції збірника 19.10.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*