

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Квітка Наталія Юріївна

УДК 621.774.35

**ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ
УДОСКОНАЛЕНИХ ДЕФОРМАЦІЙНО – ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ
БЕЗПЕРЕРВНОЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ БЕЗОПРАВОЧНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ**

Спеціальність 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор **Балакін Валерій Федорович**, професор кафедри якості, стандартизації та сертифікації Національної металургійної академії України, м. Дніпро.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Приходько Ігор Юрійович**, завідувач відділу процесів та машин обробки металів тиском Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро;
- кандидат технічних наук **Степаненко Олександр Миколайович**, головний інженер Українського інституту по проектуванню металургійних заводів, м. Дніпро.

Захист відбудеться **«08» квітня 2021** року о **11⁰⁰** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий **«02» березня 2021** року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03,
доктор технічних наук, професор

Л.В.Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Безперервна безопрарочна поздовжня прокатка в багатоклітвових станах є невід'ємною складовою технологічних процесів на трубопрокатних агрегатах з виробництва гарячедеформованих безшовних труб. Аналіз літературних джерел виявив, що всі відомі математичні моделі прокатки труб без оправки мають наступні недоліки. *По-перше*, вони не адаптовані до дослідження процесу прокатки в трирадіусних овальних калібрах. *По-друге*, хоча в найновіших розробках припущення про прямокутну форму контактної поверхні валка із заготовкою та про паралельність нейтральної лінії та осі прокатки частково прибрані, площа контактної поверхні обчислюється доволі приблизно через те, що заготовка на вході в калібр i -тої кліті вважається круглою з радіусом, що дорівнює середньому радіусу попереднього калібру. Таке припущення скорочує розрахункову площу контактної поверхні в зоні випередження i , навпаки, збільшує розрахункову площу контактної поверхні в зоні відставання, що обумовлює похибку в розрахунках швидкісних параметрів прокатки. *По-третє*, в усіх відомих моделях середній радіус калібру визначають за наближеними формулами, що обумовлює суттєву похибку в визначенні деформаційних та швидкісних параметрів прокатки. *По-четверте*, в існуючих методиках при визначенні питомих контактних напруг використовують *емпіричні* або *теоретичні* значення коефіцієнту підпору, метод визначення котрих на даний момент не є достатньо точним та потребує удосконалення. *По-п'яте*, всі існуючі на даний час математичні моделі орієнтовані на аналіз процесів прокатки труб без оправки в станах з *індивідуальним* приводом валків. Процес прокатки в станах з *диференційно-груповим* приводом валків вивчається на основі низки припущень, які істотно спотворюють реальну картину кінематичної взаємодії між клітями в стані з диференційно-груповим приводом валків.

Недосконалість відомих підходів призводять до неточностей у розрахунку деформаційно-швидкісних параметрів прокатки, що, в свою чергу, знижує точність та якість готової продукції. Актуальність теми дисертації ґрунтується на тому, що підвищення точності розрахунку швидкісних та енергосилових параметрів прокатки, яке має призвести до підвищення якості готової продукції за такими ознаками, як точність розмірів, зниження поперечної різностінності та підвищення якості поверхні, потребує удосконалення методики розрахунку геометричних параметрів калібрів (в тому числі – багаторадіусних) та її імплементації в загальну математичну модель прокатки труб без оправки, визначення параметрів контактної поверхні за умов прокатки *овальних* заготовок в *овальних* калібрах (як одно-, так і багаторадіусних), розробки методу визначення *дійсної* форми нейтральної лінії, удосконалення методу визначення коефіцієнтів підпору та розробки сучасного варіанта математичної моделі безперервної прокатки труб без оправки, адаптованого на аналіз умов деформації в станах з диференційно-груповим приводом валків.

Вирішення означених вище задач має сприяти підвищенню точності труб і забезпечить можливість розширення сортаменту продукції за рахунок підвищення достовірності математичних моделей процесів безперервної безопрарочної прокатки труб що, в свою чергу, дозволить вибирати ефективні деформаційно-швидкісні режими прокатки.

Таким чином, робота, що спрямована на теоретичне обґрунтування і впровадження удосконалених деформаційно-швидкісних режимів безперервної безоправочної поздовжньої прокатки труб шляхом урахування таких чинників, як тип калібру, реальна форма та положення нейтральної лінії в осередку деформування, тип привода валків, точне значення величини середнього радіуса калібру та ін., які забезпечують підвищення точності розрахунку деформаційних, кінематичних, енергосилових параметрів процесу, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані у відповідності до Національної програми розвитку гірничо-металургійного комплексу України до 2010 року, затвердженій Кабінетом Міністрів України 11.03.96 р., та скорегованих в 1999 та 2000 роках, а також відповідно тематиці держбюджетної науководослідної роботи НМетАУ (Г102Г14073). Також виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами наукових досліджень Інституту розвитку ПАТ «Інтерпайп НТЗ», ЦЗЛ ПАТ «Дніпропетровський трубний завод» та Українського інституту інформаційних технологій (договори на створення науково-технічної продукції № 173 від 21.02.2005 р. та № 728 від 11.04.2008 р.). Авторка дисертації була виконавцем цих робіт.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування, розробка та впровадження удосконалених деформаційно-швидкісних режимів безперервної безоправочної прокатки труб, що забезпечують підвищення ефективності технології за рахунок підвищення точності та розширення сортаменту продукції.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- дослідити взаємозв'язок параметрів деформації заготовки (відносне обтиснення по діаметру, показник поширення) і параметрів калібрів валків (овальність, середній діаметр, висота, ширина та ін.);
- уточнити метод аналітичного визначення площі контакту металу з валком при деформації овальних заготовок в овальних калібрах;
- розвинути метод аналітичного визначення форми нейтральної лінії на контактної поверхні;
- удосконалити метод визначення критеріїв процесу деформації, що визначають величину коефіцієнта підпору при прокатці труб в калібрах та підвищити точність розрахунків енергосилових параметрів процесу;
- розробити і перевірити на практиці методику оптимізації (з точки зору підвищення точності та якості труб) параметрів одно– і багаторадіусних калібрів.

Предмет дослідження. Закономірності впливу деформаційно-швидкісних параметрів виготовлення гарячедеформованих труб на станах безперервної безоправочної поздовжньої прокатки на умови формування поперечної різностінності та енергосилові параметри формозміни.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на закономірностях теорії пластичності і теорії обробки металів тиском. Лабораторні та промислові дослідження виконані з використанням сучасного обладнання та вимірювальних приладів, підданих метрологічній повірці. Під час проведення досліджень використані методи математичного моделювання технологічних процесів із застосуванням обчис-

лювальної техніки та сучасних програмних продуктів; результати експериментальних досліджень опрацьовані з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна. Наукову новизну мають наведені нижче результати теоретичних та експериментальних досліджень.

1. Отримав розвиток метод проектування системи калібрів для безперервної поздовжньої прокатки труб без оправки.

Розробка відрізняється тим, що встановлено взаємозв'язок параметрів деформації заготовки (відносне обтиснення по діаметру, показник поширення) і геометричних параметрів калібрів валків (овальність λ , середній діаметр D_{cp} , висота, ширина та ін.) у вигляді систем рівнянь, конкретний вигляд котрих залежить від типу калібрів (одно-, чи багаторадіусні); величина D_{cp} **вперше** визначається шляхом використання підходів диференціальної геометрії. Розробка дозволила зменшити наведену при редукуванні поперечну різностінність труб, усунути гранеутворення товстостінних труб та зменшити відхилення середньої товщини стінки труб від номіналу.

2. Набув розвитку метод аналітичного визначення параметрів контактної поверхні та величини катаючого радіуса при поздовжній прокатці в калібрах.

Розробка відрізняється врахуванням зміни довжини осередку деформації по периметру калібру та визначенням форми нейтральної лінії на контактній поверхні як такої, що не є паралельною осі прокатки; при цьому **вперше** запропоновано оригінальний метод визначення параметрів контактної поверхні при деформації *овальних* заготовок в овальних калібрах, що підвищило точність розрахунків геометричних та, як наслідок, – кінематичних і енергосилових параметрів прокатки.

3. Розроблено новий метод визначення енергосилових параметрів деформації в калібрах для аналізу прокатки труб без оправки з використанням критеріїв – аналогів процесів прокатки профільних заготовок в калібрах і простої прокатки штаб.

Особливістю розробки є те, що запропоновано новий критерій – аналог радіуса валка при простій прокатці – середній радіус кривизни контактної поверхні при прокатці труб в калібрах; розроблено аналітичну методику визначення цієї величини. Для визначення енергосилових параметрів *безоправочної прокатки труб в калібрах* запропоновано оригінальне апроксимуюче рівняння зв'язку межі плинності з параметрами формозміни. Це дозволило підвищити точність розрахунку енергосилових параметрів прокатки.

4. Розроблено нові принципи побудови профілю трирадіусних калібрів.

Розробка відрізняється від існуючих тим, що в ній передбачено одночасне варіювання показником поширення та овальністю калібру, що дозволяє зменшити наведену при редукуванні поперечну різностінність труб, усунути гранеутворення товстостінних труб та зменшити відхилення середньої товщини стінки труб від номіналу.

Практичну цінність дисертаційної роботи становлять такі основні її результати:

– вдосконалено методики визначення деформаційних (патент України № 82972), кінематичних (патент України № 82971) та енергосилових (патент України № 75304) параметрів безперервної поздовжньої прокатки труб без оправки, що дозволило оптимізувати калібровки валків та швидкісні режими прокатки і, як наслідок, – підви-

щити точність, покращити якість та розширити сортамент труб, що виготовляють на промислових ТПА 30-102, ТПА 350 та ТПА 80 без заміни основного обладнання;

- вперше запропоновано математичну модель безперервної прокатки труб без оправки в станах з диференційно-груповим приводом валків, що складається з рівнянь зв'язку зміни товщини стінки заготовки, рівнянь силової рівноваги заготовки та рівнянь сталості секундних об'ємів в кожній i -тій клітці безперервного i -клітьового стану, котра у явному вигляді включає кутові швидкості обертання основного та допоміжного двигунів;

- запропонована методика визначення форми останнього калібру безперервного стану з урахуванням пружної деформації труб (патент України № 82972), що дозволяє зменшити відхилення середнього діаметру труб від номіналу;

- розроблена методика побудови профілю валків у випусках калібрів, завдяки чому усуваються відомі вади поверхні готової продукції (риски, зморшки і т.п.);

- запропоновано методику обчислення енергосилових параметрів прокатки, в якій застосовуються нові формули для розрахунку коефіцієнта підпора та визначення механічних властивостей металів при пластичній деформації (патент України № 75304); використання методики дозволяє обґрунтувати можливість поширення сортаменту та зміни кінематичних параметрів прокатки на існуючих ТПА без зміни потужності проводу редуційного (калібрувального) стану.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи апробовані і впроваджені: на всьому сортаменті труб, що виготовляють в умовах калібрувального стану ТПА 350 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб» та редуційного стану ТПА 80 ПАТ «Дніпропетровський трубний завод»; на товстостінній частині сортаменту ($D_t/S_t \leq 10$) редуційного та калібрувального станів ТПА 30-102 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб». Впровадження результатів досліджень дозволило розширити сортамент, підвищити точність геометричних розмірів труб та знизити невиробничі втрати металу (акт ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб» від 12.08.2020 р. та акт ПАТ «Дніпропетровський трубний завод» від 24.06.2020 р.).

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використані ідеї співавторів. Усі принципові теоретичні та експериментальні результати, наведені в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто автором. Особистий внесок здобувача у публікаціях із співавторами полягає в наступному: [2] – визначення основних шляхів підвищення ефективності процесів виробництва у зв'язку зі зміною потреб ринку щодо якості гарячедеформованих труб; [3, 4] – розробка структури і алгоритму реалізації математичної моделі прокатки труб в станах з диференційно-груповим приводом валків; [9] – обґрунтування шляхів уточнення методики визначення геометричних параметрів контактної поверхні металу з валком; [13, 14, 16] – розробка рекомендацій щодо удосконалення методик розрахунку деформаційних режимів безперервної безоправочної прокатки; [6, 8, 12] – розробка і реалізація математичної моделі для вибору оптимальних геометричних параметрів калібрів; [10] – обґрунтування математичної форми рівняння для апроксимації зв'язку межі плинності з параметрами формозміни; [11] – розробка теоретичного підґрунтя удосконалення методики розрахунку швидкісних режимів прокатки труб; [5] – обґрунтування математичної форми рівняння для апроксимації зв'язку коефіцієнта підпора з параметрами формозміни.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації викладені в доповідях та обговорені на: Молодіжному науково-технічному форумі «Інтерпайп – 2004» (Дніпропетровськ, 2004 р.); Міжнародній конференції «Iron & Steel Technology» (Клівленд, Огайо, США, 2006 р.); V Міжнародній конференції «Прогрессивная техника и технология – 2005» (Севастополь, 2005 р.); Молодіжному науково-технічному форумі «Інтерпайп – 2005» (Дніпропетровськ, 2005 р.); Міжнародній конференції «New Developments in Long and Forged Products Proceedings» (Вінтер Парк, Колорадо, США, 2006 р.); об'єднаному науковому семінарі кафедр технологічного проектування і якості, стандартизації та сертифікації НМетАУ (Дніпропетровськ, 2005, 2006 рр.); розширеному науковому он-лайн семінарі кафедри технологічного проектування НМетАУ (2020 р.), розширеному науковому он-лайн семінарі (2020 р.).

Публікації. Матеріали дисертації викладено в 16 публікаціях (зокрема без співавторів – 3 публікації), серед яких: 1 колективна монографія, 8 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав; 3 патенти України на винаходи, 3 тези доповідей та 1 публікація (навчальний посібник), що додатково відображає матеріали дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків по роботі, списку зі 231 використаного джерела і 3 додатків. Загальний обсяг становить 220 сторінок, у тому числі, основного тексту 136 сторінок, 76 рисунків та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі представлена загальна характеристика роботи: обґрунтовано актуальність теми, наведено мету, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, показано взаємозв'язок роботи з науковими програмами, висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів і їх впровадження у виробництво, охарактеризовано особистий внесок здобувачки, наведено перелік публікацій за темою роботи й дані про апробацію отриманих результатів.

У першому розділі наведено аналіз загальної структури математичних моделей безперервної поздовжньої прокатки труб без оправки (БППТБО), показані загальні недоліки існуючих моделей і обґрунтовано актуальність їх усунення.

Відзначено, що значний внесок у створення основ і розвиток теорії БППТБО, дослідження і широке впровадження цього процесу ОМТ в технологічні схеми виробництва безшовних і зварних труб зробили О.А. Шевченко, С.І. Борисов, П.Т. Ємельяненко, О.П. Чекмарьов, О.І. Целіков, В.П. Анісіфоров, Г.І. Гуляєв, Я.Л. Ваткін, В.М. Друян, В.М. Данченко, В.В. Швейкін, Ю.М. Матвеев, А.З. Глейберг, Г.Я. Гун, В.Л. Колмогоров, Ю.І. Блінов, В.В. Єріклінцев, Ю.Г. Гуляєв, Є.І. Шифрін, В.У. Григоренко, В.А. Юргеленас, В.П. Рукобратський, А.І. Довгаль, О.Г. Ратнер, Г.Ш. Лебідь, А.К. Зимін, Ф. Нойманн, П. Грюнер, Дж. Блейр, А. Тшаска, Х. Біллер та інші.

Виходячи з аналізу літературних джерел можна зробити такі узагальнення відносно характеру зв'язку параметрів процесів БППТБО. Параметри прокатки Π_i в одній, i - тій кліті, пов'язані між собою системою *трьох* рівнянь: рівнянням, що характеризує зміну товщини стінки $S_i = S_i(\Pi_i)$; рівнянням рівноваги об'єму металу, що деформується під дією прикладених до нього зусиль $\Sigma X_i(\Pi_i) = 0$; рівнянням сталос-

ті секундних обсягів V_i при безперервній прокатці $V_i(\Pi_i) = const$. Для випадку деформації в N клітках всі параметри деформації в стані пов'язані між собою системою $3N$ рівнянь, що є математичною моделлю процесу, –

$$\{S_i = S_i(\Pi_i); \Sigma X_i(\Pi_i) = 0; V_i(\Pi_i) = const. \quad (i = 1, 2, \dots, N-1, N). \quad (1)$$

В залежності від особливостей конкретного технологічного процесу прокатки труб без оправки вихідні (призначені) параметри та параметри, що підлягають визначенню (параметри відгуку), змінюються. Загальною умовою вирішення задачі розрахунку параметрів процесу прокатки є рівність сукупної кількості невідомих параметрів відгуку K числу рівнянь, що є математичною моделлю процесу; тобто обов'язковим є виконання умови $K = 3N$.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити наступні висновки відносно сучасних проблем математичного моделювання процесів БПТБО та актуальності їх вирішення. Всі відомі математичні моделі прокатки труб без оправки адаптовані до вивчення процесу прокатки в *однорадіусних* овальних калібрах, тому задача розробки методу розрахунку параметрів *багаторадіусних* калібрів та його імплементації в загальну математичну модель процесу БПТБО є актуальною. Питання визначення параметрів контактної поверхні за умов прокатки *овальних* заготовок в *овальних* калібрах (як одно-, так і багаторадіусних) до теперішнього часу не вирішено; розв'язання цієї задачі має практичне значення. При сучасних жорстких вимогах до точності труб по діаметру є актуальним питання розробки методу *точного* розрахунку середнього діаметра калібру R_{kcp} . Існуючі методи визначення дійсної форми нейтральної лінії потребують удосконалення. Методика визначення питомих контактних напруг p_{cp} та коефіцієнтів підпору n_{σ} через використання критеріїв-аналогів є перспективною, але відомі критерії-аналогі для співставлення умов простої прокатки та прокатки труб без оправки позбавлені фізичного сенсу і методи їх визначення потребують удосконалення.

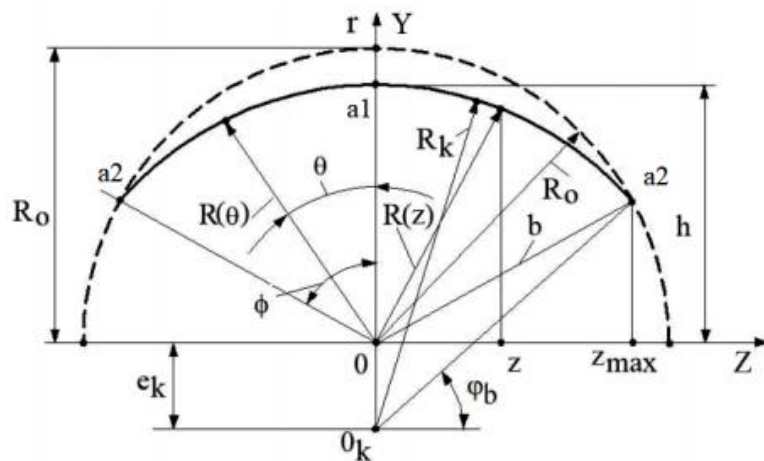


Рис. 1

ричними параметрами калібрів.

Визначення середнього радіусу калібру. На рис. 1 наведено схему деформації заготовки (пунктир) в тривалковому ($n = 3$) однорадіусному овальному калібрі (ліворуч застосована циліндрична система координат, праворуч – прямокутна). За визначенням, якщо $L_{a_1 a_2}$ – довжина дуги $a_1 a_2$ калібру (рис. 1), середній радіус калібру при розрахунках відносної деформації по периметру ε дорівнює

Існуючі математичні моделі не призначені для аналізу умов деформації в станах з диференційно-груповим приводом валків, тому є практична потреба в розробці сучасного варіанта моделі прокатки труб без оправки, адаптованого на визначення параметрів прокатки саме в таких станах.

У другому розділі викладено розробки, що стосуються визначення співвідношень між геомет-

$$R_{cp\Pi} = L_{a1a2}/2\pi. \quad (2)$$

Використовуючи відомі з курсу диференційної геометрії формули для маємо:

$$R_{cp\Pi C} = \frac{1}{\phi} \int_0^\phi \sqrt{[R(\theta)]^2 + \left\{ \frac{d}{d\theta} [R(\theta)] \right\}^2} d\theta; R_{cp\Pi D} = \frac{1}{\phi} \int_0^{z_{\max}} \sqrt{1 + \left\{ \frac{d}{dz} \sqrt{[R(z)]^2 - z^2} \right\}^2} dz; \quad (3)$$

відповідно для циліндричної та прямокутної систем координат.

Співвідношення в однорадіусному калібрі. При безоправочній прокатці в однорадіусних овальних калібрах (рис. 2) наведена поперечна різностінність труб B_i значною мірою залежить від показника поширення $\delta b = (b - h_j)/(b_j - h)$ (тут b , b_j , h , h_j – ширина і висота поточного та попереднього калібрів) та овальності $\lambda_k = b/h$. Величини середнього діаметру попереднього калібру D_{cpj} , b_j , h_j , δb , λ_k відносного обтиснення по діаметру $\varepsilon = (D_{cpj} - D_{cp})/D_{cpj}$, кутів ϕ та ϕ_b (рис. 2) поєднані співвідношенням

$$D_{cpj}(1 - \varepsilon) - C(\lambda_k, \delta b)B(\lambda_k) \cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[A(\lambda_k) + \sqrt{1 - [A(\lambda_k)]^2 \sin^2 \phi} - A(\lambda_k) \cos \phi \right] \cdot \sin \phi_b \right\} = 0, \quad (4)$$

$$\text{де } A(\lambda_k) = (\lambda_k^2 - 1)/(\lambda_k + 1 - 2\lambda_k \sin \phi_b); B(\lambda_k) = (\lambda_k^2 + 1 - 2\lambda_k \sin \phi_b)/[(1 - \lambda_k \sin \phi_b)\phi_b];$$

$$C(\lambda_k, \delta b) = (\delta b b_j + h_j)/(\delta b + \lambda_k)$$

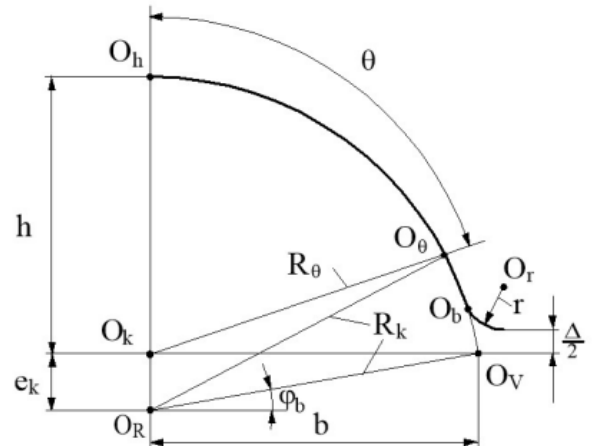


Рис. 2

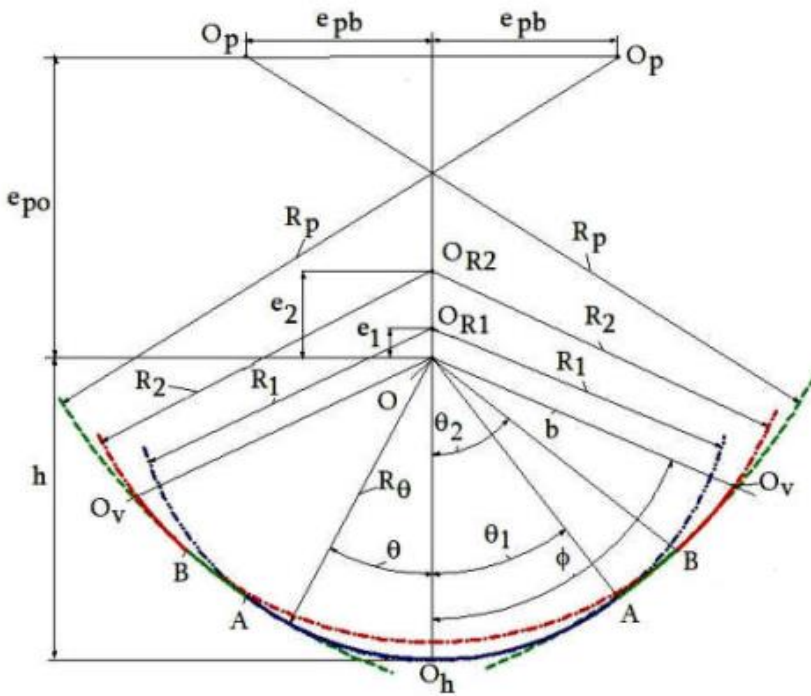


Рис. 3

Величини D_{cpj} , b_j , h_j , δb , ε , ϕ та ϕ_b є відомими і рівняння (4) містить одну невідому – λ_k . Обчисливши λ_k як корінь рівняння (4), послідовно визначають $h = C(\lambda_k, \delta b)$, $b = h\lambda_k$, $R_k = \frac{h\phi}{2} B(\lambda_k)$ та $e_k = \frac{h}{2} A(\lambda_k) B(\lambda_k)$. Таким чином, якщо ε та δb є заданими величинами, вони однозначно визначають овальність калібру λ_k , його висоту h , ширину b , радіус R_k та ексцентриситет

e_k .

Співвідношення в трирадіусному калібрі. Запропоновано методику розрахунку параметрів трирадіусних овальних калібрів, при використанні якої з'являється можливість одночасно незалежно призначати як величину показника поширення δb , так і величину овальності калібру λ_k . Відповідно запропонованій методиці при розрахунках параметрів основної ділянки $O_n A B O_v$ поточного калібру треба обчислити 13 параметрів, які пов'язані між собою системою 13 рівнянь. При цьому (на відміну від відомих методик) запропоновано зняти обмеження $e_1 > 0$ (рис. 3), що дозволяє значно зменшити величини показника δb та овальності калібру λ_k при незмінному відносному обтисненні по діаметру. Розрахунки та експерименти свідчать про те, що проектуючи трирадіусні калібри з використанням запропонованої методики, можна суттєво (в 1,9...2,2 рази) знизити рівень наведеної під час прокатки без оправки відносної різностінності готових труб, тобто підвищити їх точність.

Параметри калібру в зоні галтелі.

Фактична ширину калібру b_f (рис. 4)

дорівнює $b_f = R_{kw} / \cos\left(\arcsin \frac{\Delta}{2R_{kw}}\right)$, де

$R_{kw} = \overline{O_k O_w}$. Для визначення геометричних параметрів в зонах галтелей запропоновано емпіричні умови $b_f \approx h_j$; $r_n = (2,2 \dots 2,5) \Delta$, для реалізації яких треба використовувати калібри з радіусом r_n , який є більшим за радіус r (рис. 4). Параметри зони галтелі таких калібрів, включаючи величину r_n , мають визначатися з системи дев'яти рівнянь. При використанні запропонованих калібрів тенденція до затікання деформованого металу в зазор Δ між ребордами валків та утворення дефектів на зовнішній поверхні труб зменшується.

Удосконалення методики визначення геометричних параметрів контактної поверхні. В існуючих методиках розрахунку параметрів контактної поверхні в осередку деформації не враховується теча металу в тангенціальному напрямку – зміною величини R_{0b} в процесі деформації нехтують, приймаючи припущення $\delta b_x = 0$ (рис. 5). Задамо найпростіший – лінійний – закон зміни величини поширення вздовж осі прокатки $O_k X$ відповідно до логічної умови

$$[R_{xb}(x, z)]_i = \begin{cases} R_{0i} & \text{якщо } x > L_{0i} \\ b_i - (b_i - h_{i-1}) \frac{x}{L_{0i}} & \text{якщо } x \leq L_{0i} \end{cases}; \quad (5)$$

$$[R_{xb}(x, z)]_i = \begin{cases} R_{0i} & \text{якщо } R_{0i} > [R_{xb}(x, z)]_i \\ [R_{xb}(x, z)]_i & \text{якщо } R_{0i} \leq [R_{xb}(x, z)]_i \end{cases}, \quad (6)$$

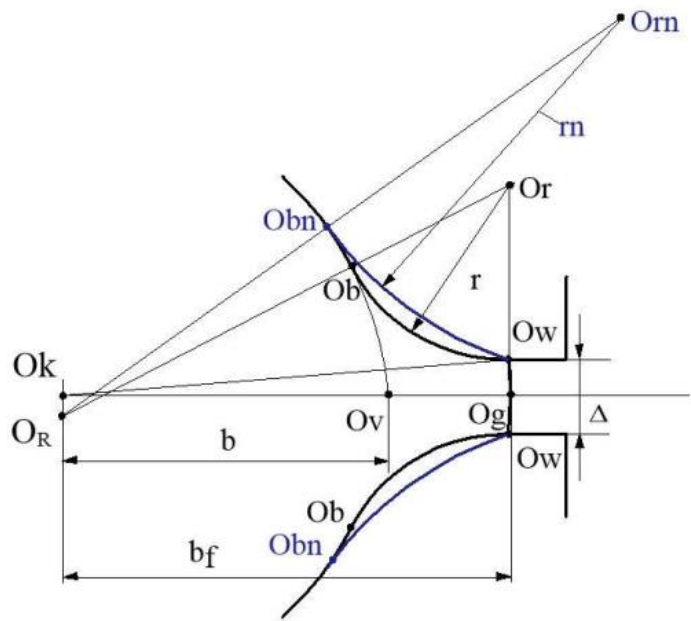


Рис. 4

де $R_{0i} = R_{k(i-1)}(z_{\max} - z)$ – закон зміни радіусу заготовки по її периметру в системі координат поточного калібру на вході в осередок деформації поточної кліти; $R_{k(i-1)}(z)$ – закон зміни радіусу калібру попередньої кліти по його периметру в системі координат попереднього калібру; $L_{0i} = L_{xi}(0)$ – довжина осередку деформації по вершині калібру; $z_{\max} = b \sin \phi$.

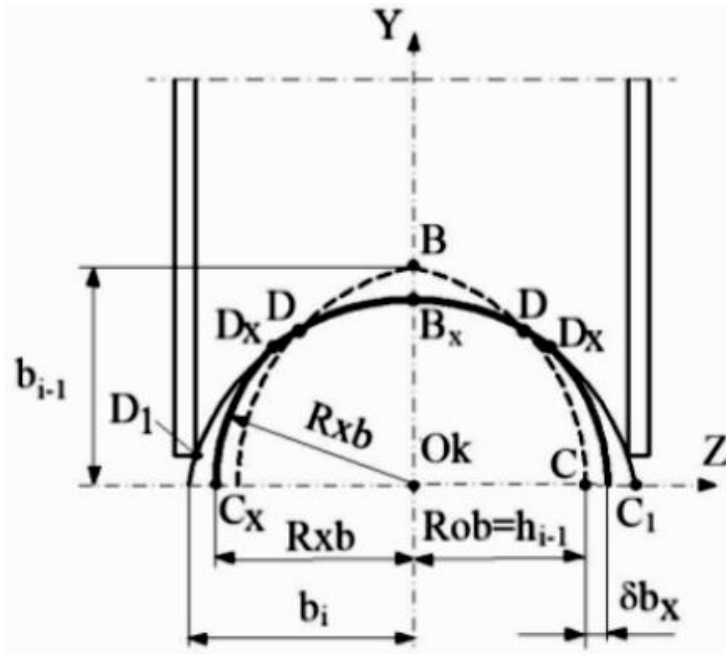


Рис. 5

Вираз (5) регламентує умову, відповідно до якої за межами осередку деформації формозміна заготовки не відбувається. Вираз (6) регламентує умову, відповідно до котрої на вході в осередок деформації відбувається площення заготовки без зменшення її периметра. Очевидно, що відповідно до прийнятих умов (5)-(6) незалежно від форми утворюючої зовнішньої поверхні заготовки до прокатки утворююча зовнішньої поверхні заготовки після прокатки співпадає з формою калібру $R_{ki}(z)$. Довжина контакту $l_d = L_x(z)$ визначиться як корінь рівняння

$$L_x(z) = \sqrt{[R_b(z)]^2 - \left(R_u - \sqrt{\{R_{xb}[L_x(z), z]\}^2 - z^2} \right)^2},$$

а горизонтальна проекція площини контакту становить величину $F_{gor} = 2 \int_0^{z_{\max}} L_x(z) dz$.

У третьому розділі дано теоретичне обґрунтування удосконаленої методики визначення катаючого радіусу валків. Реальна нейтральна лінія (РНЛ) у разі поздовжньої прокатки у калібрах є просторовою кривою $y_n = y_n[x_n(x), z]$ (рис. 7). Швидкість прокатки $v_m = R_{kat} \omega_B$ (тут ω_B – кутова швидкість обертання валків, рад./с) визначиться величиною катаючого радіуса R_{kat} , яка пов'язана з величиною аплікати нейтральної точки $x_n(z_n) = 0$ умовою

$$R_{kat} = R_u - \sqrt{[R_z(z_n)]^2 - z_n^2}. \quad (7)$$

У разі припущення, відповідно до якого площина, що розділяє контактну поверхню на зони випередження і відставання, є паралельна площині симетрії калібру XOY , умовна нейтральна лінія (УНЛ) – це просторова крива, паралельна площині XOY (рис. 6). Аплікату z_{ny} точки перетину умовної нейтральної лінії з площиною центрів валків YOZ назовемо умовною нейтральною точкою; відповідно умовним катаючим радіусом назовемо величину, обчислену з рівняння (7) при $z_n = z_{ny}$. Швидкість відносного ковзання металу по поверхні валка становить величину

$$\Delta v = v_x - v_{bz}, \quad (8)$$

де $v_x = v_m \frac{\mu_x}{\mu_\Sigma} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R_{bz}}\right)^2}$; $\mu_x = \mu_x(R_{mхр})$ – витяжка вздовж осередку деформації; μ_Σ – сумарна витяжка; $R_{mхр} = R_{mхр}(x)$ – середній радіус заготовки у конкретному діаметральному перетині осередку деформації з абсцисою x ; $R_{bz} = R_u - \sqrt{R_u^2 - z^2}$ – закон зміни величини радіуса валка по ширині калібру.

Дотичні контактні напруги τ_k мають напрямок, протилежний напрямку швидкості Δv . Тому у зоні випередження, де $\Delta v > 0$, елементарні сили тертя $dT^+ = \tau_k dF^+$, прикладені до заготовки, спрямовані *проти ходу* прокатки. У зоні відставання, де $\Delta v < 0$, елементарні сили тертя $dT^- = \tau_k dF^-$, прикладені до заготовки, спрямовані *в напрямку* ходу прокатки. Очевидно, що горизонтальна проекція dP_x елементарних сил нормального тиску $dP = p dF$ спрямована *проти ходу*

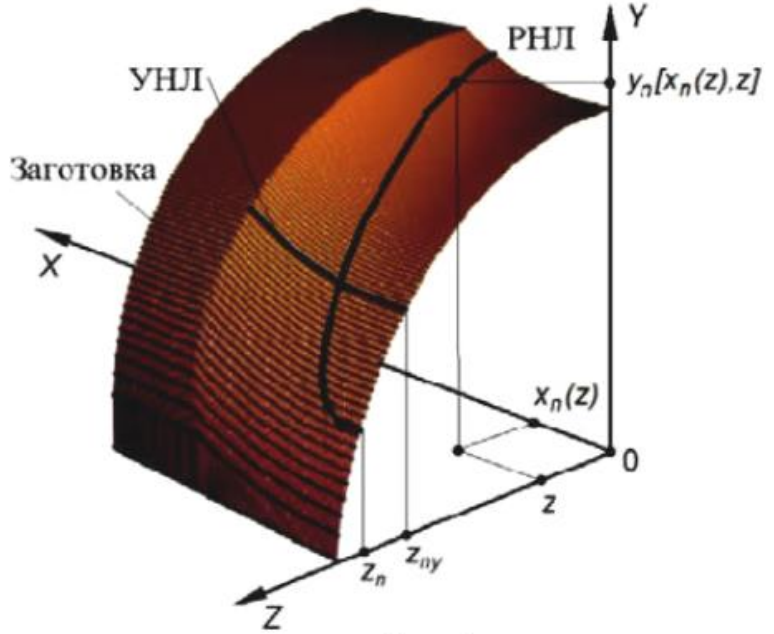


Рис. 6

прокатки по всій контактній поверхні F . Умова рівноваги заготовки під дією сил, прикладених до неї по всій контактній поверхні $F_\Sigma = F^+ + F^-$ у напрямку осі прокатки OX , запишеться наступним чином

$$T^+ - T^- + P_x + Q = 0, \quad (9)$$

де $T^+ = \iint_{(F^+)} \tau_k n_{\tau x} dF^+$; $T^- = \iint_{(F^-)} \tau_k n_{\tau x} dF^-$; $P_x = \iint_{(F_\Sigma)} p n_{px} dF$; $n_{\tau x}$, n_{px} – спрямівні косинуси

проекцій на вісь OX елементарних сил dT^+ , dT^- та dP відповідно; Q – зовнішнє осьове зусилля, прикладене до заготовки.

Для розрахунку R_{katy} значення T^+ і T^- у рівнянні (9) визначаються так:

$$T^+ = 2nfp_{cp} \int_0^{z_{ny}} \frac{l_d}{\Phi} dz; \quad (10) \quad T^- = 2nfp_{cp} \int_{z_{ny}}^{z_{max}} \frac{l_d}{\Phi} dz, \quad (11)$$

де $\Phi = \cos\left(\arctan \frac{dy_0}{dz}\right)$; $y_0 = y_0(z)$ – рівняння профілю калібру.

Підставляючи вирази (10)-(11) у рівняння (9), вирішуємо його відносно z_{ny} і за рівнянням (7) розраховуємо R_{katy} .

Для розрахунку реального катаючого радіуса R_{kat} значення доданків T^+ і T^- у

рівнянні (9) обчислюють наступним чином:

$$T^+ = 2nfp_{cp} \int_0^{z_n} \frac{x_n(z, z_n)}{\Phi} dz; \quad (12.1)$$

$$T^- = 2nfp_{cp} \int_0^{z_{\max}} \frac{l_d - x_n(z, z_n)}{\Phi} dz. \quad (12.2)$$

Функція $x_n(z, z_n)$ визначиться як корінь рівняння (8) за умови $\Delta v = 0$. Використовуючи це рішення у рівняннях (12.1-2), вирішуємо рівняння силової рівноваги (9) відносно аплікати нейтральної точки z_n і за рівнянням (7) розраховуємо реальний катаючий радіус валка R_{kat} .

Порівняння розрахункових значень R_{kat} та R_{katy} дозволило отримати апроксимуючу залежність

$$U_{kat} = \frac{R_{kat}}{R_{katy}} = 1 + (\lambda_k - 1) \cdot (0,3216\bar{T} + 0,739) \cdot (\bar{D}_u)^{0,1856\bar{T} - 0,3659}, \quad (13)$$

де $\bar{T} = S_0/D_0$; $\bar{R}_u = D_u/D_0$; S_0 , D_0 , D_u – стінка, діаметр заготовки до обтиснення та ідеальний діаметр валків.

Таким чином, якщо розраховано умовний катаючий радіус R_{katy} , його величину можна скоригувати відповідно умові

$$R_{kat} = U_{kat} R_{katy}. \quad (14)$$

Для перевірки цього ствердження було здійснено порівняльні розрахунки, з результатів котрих випливає, що використання формули (14) призводить до похибки в розрахунках числа обертів основного (N_G) і допоміжного (N_V) двигунів стана з диференційно-груповим приводом валків, що не перевищують $\pm 0,5\%$ від значень цих величин, які були розраховані через точні значення R_{kat} . З огляду на те, що варіант з використанням формули (14) значно прискорює процедуру розрахунку величини R_{kat} практично без збитку для точності визначення кінематичних параметрів прокатки, його рекомендовано для використання в промислових умовах.

У **четвертому розділі** наведено розробки, спрямовані на удосконалення методів визначення енергосилових параметрів редукування труб. Абсолютне значення середнього контактного питомого напруження p_{cp} для процесу прокатки труб без опра-вки зв'язане з параметрами деформації відомим рівнянням

$$p_{cp} = n_\sigma \beta \sigma_T (1 - Z) \left(\frac{S_0}{D_0} + \frac{S_1}{D_1} \right), \quad (15)$$

де D_1 , S_1 – діаметр і стінка труби після деформації; n_σ – коефіцієнт підпору; σ_T – межа плинності матеріалу, що деформується; Z – середній коефіцієнт пластичного натягу; β – коефіцієнт Лоде, що при осесиметричній деформації дорівнює одиниці.

Визначення коефіцієнту підпору. Для існуючих методик обчислення n_σ є певні обмеження щодо їх використання. Для визначення енергосилових параметрів гвинтової та поздовжньої прокатки труб *на оправці* досить часто використовують методику, що базується на співставленні процесу простої прокатки штаби та конкретного процесу прокатки труб за рахунок використання *критеріїв – аналогів* геометричних параметрів цих процесів. При простій прокатці штаби геометричними характеристи-

здовжній прокатці в калібрі за формулою $\bar{L} = 2L_{dcp} / (D_{0cp} + D_{1cp})$. Порахувавши значення критеріїв – аналогів \bar{R} і \bar{L} як функції параметрів калібру, можна визначити величину коефіцієнта підпору при заданій величині середнього коефіцієнта зовнішнього контактного тертя f . Для цієї мети можна використовувати відомі графіки, але при проведенні конкретних розрахунків дані, представлені на графіках, необхідно описати апроксимуючою залежністю.

Апроксимуюче рівняння для коефіцієнта підпору. Використовуючи відомий алгоритм статистичної обробки емпіричних даних, отримали апроксимуюче рівняння для обчислення універсального коефіцієнту підпору $n'_{\sigma u} = n_{\sigma u}(f, \varepsilon, \bar{R}, \bar{L})$:

$$n'_{\sigma u} = G_o \cdot \begin{cases} (1 + f\bar{L}) + (\bar{L} - 1)k & \text{якщо } \bar{L} \geq 1 \\ \left[\Psi \ln \frac{1}{\bar{L}} + \Psi \bar{L} - (\Psi - 1) \right] (1 + f\bar{L}) & \text{якщо } \bar{L} < 1 \end{cases}; \quad (19.1)$$

$$n'_{\sigma u} = \begin{cases} n'_{\sigma u} & \text{якщо } n'_{\sigma u} < 2,856 \\ 2,856 & \text{якщо } n'_{\sigma u} \geq 2,856 \end{cases}, \quad (19.2)$$

де $G_o = 0,04 \ln \bar{R} + 0,82$; $k = k_1 \ln \frac{\bar{R}}{10} + k_2$; $k_1 = -249,87 f^3 + 204 f^2 - 54,18 f + 4,75$;

$k_2 = -2,65 f^2 + 2,17 f - 0,39$; $\Psi = 0,0002 \bar{R}^2 - 0,0176 \bar{R} + 1,1733$.

Помилка апроксимації розрахункових значень коефіцієнта підпору $n_{\sigma u}$ рівнянням (19) лежить в межах $(-12 \dots + 15)\%$, що цілком прийнятно для інженерних розрахунків.

Апроксимуюче рівняння для межі плинності деформованого матеріалу. При ОМТ в гарячому стані межа плинності σ_T металу в основному залежить від: температури t^o , ступеня ε та швидкості u деформації. Зазвичай залежності $\sigma_T = \sigma_T(u, \varepsilon, t^o)$ надають у вигляді графіків. Для використання в практичних розрахунках запропоновано графічні дані апроксимувати немонотонним рівнянням наступного виду

$$\sigma_T = \begin{cases} [n_1 (1 - \varepsilon^{n_2})]^{\varepsilon - \varepsilon_{\max}} \cdot m_1 (u_o + u)^{m_2 + m_3 t^o} \cdot \exp(m_4 t^o) & \text{якщо } \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \\ [1 + n_3 (\varepsilon - \varepsilon_{\max})] \cdot m_1 (u_o + u)^{m_2 + m_3 t^o} \cdot \exp(m_4 t^o) & \text{якщо } \varepsilon > \varepsilon_{\max} \end{cases}, \text{ МПа}, \quad (20)$$

де ε_{\max} , u_o , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , n_1 , n_2 , n_3 – емпіричні коефіцієнти, що обчислюють методом колокації.

У п'ятому розділі наведено дані про промислову апробацію та впровадження результатів теоретичних досліджень.

Параметри прокатки в станах з диференційно – груповим приводом. Для цього випадку закон розподілу чисел оборотів валків по клітям стану залежить від чисел обертів основного (N_G) і допоміжного (N_V) двигунів та передатних відношень від головного (w_i^G) і допоміжного (w_i^V) двигунів відповідно до залежності

$$n_{Bi} = \frac{N_G}{w_i^G} + \frac{N_V}{w_i^V}. \quad (21)$$

В якості законів зв'язків $S_i = S_i(\Pi_i)$ в системі рівнянь (1) використовували N рівнянь Ю.Г. Гуляєва

$$\Delta S_i = \left[0,5781 + 0,0493\bar{T}_j - 4,152\bar{T}_j^2 - 4,541\bar{T}_j^3 - 0,81Z_i(1 + Z_i) \right] \varepsilon_i S_j, \quad (22.1)$$

В якості законів зв'язків $Z_i = Z_i(n_{Bi})$ використовуємо N рівнянь рівноваги (10), що були перетворені після відповідних підстановок до виду

$$\begin{aligned} T_i^+ - T_i^- + P_{xi} + Q_i = f_i \int_0^{(z_{ny})_i} \left(\frac{l_d}{\Phi} \right)_i dz - f_i \int_{(z_{ny})_i}^{z_{\max}} \left(\frac{l_d}{\Phi} \right)_i dz + (F_{vert})_i + \\ + \frac{[Z_{nj}S_j(2R_{cpj} - S_j) - Z_{ni}S_i(2R_{cpi} - S_i)]\pi}{4n \left(\frac{S}{D} \right)_{cpi} n'_{oui} \left(1 - \frac{Z_{nj} + Z_{ni}}{2} \right)} = 0. \end{aligned} \quad (22.2)$$

Коефіцієнт підпору n'_{oui} в (22.2) розраховується відповідно до формул (19,1-2), R_{cpi} , R_{cpj} - за формулою (3). Закон сталості секундних обсягів при безперервній прокатці $V_i(\Pi_i) = const$ в системі рівнянь (1) перетворюється у N рівнянь виду

$$2\pi(U_{kat})_i \left\langle R_{ui} - \frac{R_z}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{(z_{ny})_i}{y_0[(z_{ny})_i]} \right\}^2}} \right\rangle n_{Bi} - \frac{\xi S_0(D_0 - S_0)}{S_i(2R_{cpi} - S_i)} v_0 = 0, \quad (22.3)$$

де $\xi = 6 \cdot 10^4$ - коефіцієнт приведення розмірностей, сек. · мм · м · об./хв.

Функція $(U_{kat})_i$ розраховується за рівнянням (13). Таким чином, маємо систему $3N$ рівнянь (22.1-3) з $K=3N$ невідомими величинами: $N-1$ невідомих стінок S_i (тут $i=1 \dots N-1$), $N-1$ невідомих коефіцієнтів пластичного натягу Z_{ni} (тут $i=1 \dots N-1$), N невідомих аплікат умовних нейтральних радіусів $(z_{ny})_i$ (тут $i=1 \dots N$) та невідомі числа обертів N_G та N_V двигунів. Визначивши невідомі, на заключному етапі розраховуємо енергосилові параметри прокатки: зусилля $P_i = 2(p_{cp})_i(F_{gor})_i$; момент в кліті $M_i = 2f_i(p_{cp})_i(M_i^- - M_i^+)$; потужність в кліті $W_i = \omega_{Bi}M_i/\eta_D$ (тут η_D - к.к.д. редуктора); загальну потужність $W_\Sigma = \sum_{i=1}^N W_i$. Тестування моделі здійснювали шляхом порівняння результатів розрахункових значень потужності прокатки W_Σ з експериментальними даними W_Σ^E . Розбіжність між величинами W_Σ та середніми значеннями W_Σ^E в сталому процесі прокатки не перевищувала $\pm 4\%$.

Промислова апробація трирадіусних овальних калібрів нової форми. Використо-

вуючи систему тринадцяти рівнянь для обчислення параметрів основної ділянки трирадіусного овального калібру та систему дев'яти рівнянь для обчислення параметрів овального калібру в зоні реборд валків, було розраховано параметри базової калібровки валків для редукування труб за маршрутом $\emptyset 119 \rightarrow \emptyset 42,4$ мм в промислових умовах редуційного стану ТПА 30-102 (система калібрів ААА). В табл. 1 наведені експериментальні дані про середню загальну потужність прокатки W_{cp}^E , загальну поперечну різностінність труб B_t^E , наведену при редуванні поперечну різностінність труб $B_{\Sigma N}^E$ та середню товщину стінки S_t^E прокатаних труб при прокатці труб за маршрутом $119 \times 7,5 \rightarrow 42,4 \times 6$ мм з використанням цехової системи калібрів (АЛА) та запропонованої системи калібрів (ААА). Числа обертів двигунів N_G та N_V розраховували відповідно цехової методики (варіант I) та з системи рівнянь (22.1-3) (варіант II).

По кожній з трьох позицій табл. 1 було виготовлено 15 труб. Було встановлено наступне: при використанні запропонованої системи калібрів ААА та нового швидкісного режиму II відхилення $\Delta S = S_{tcp} - S_m$ середньої товщини стінки труби S_{tcp} від номіналу ($S_m = 6$ мм) зменшується на 24%, а поперечна різностінність труб B_t зменшується майже на 23%. Також встановлено, що при використанні цехової системи калібрів АЛА незалежно від швидкісного режиму прокатки на 60% обстежених труб (18 штук) спостерігали 4-6 паралельних осі труби смужок рябизни, які погіршували товарний вигляд труб; при використанні запропонованої системи калібрів ААА цей дефект на трубах був відсутнім.

Таблиця 1. Розрахункові та експериментальні параметри прокатки

| | | W_{Σ} , кВт | W_{Σ}^E , кВт | B_t , % | $B_{\Sigma N}$, % | $B_{\Sigma N}^E$, % | S_{cpt} , мм | ΔS , мм |
|-----|----|--------------------|----------------------|-----------|--------------------|----------------------|----------------|-----------------|
| АЛА | I | 1030 | 1046 | 16,31 | 7,45 | 7,84 | 5,79 | -0,21 |
| | II | 1024 | 1041 | 16,22 | 7,43 | 7,81 | 5,84 | -0,16 |
| ААА | II | 1011 | 1022 | 12,45 | 3,91 | 4,03 | 5,84 | -0,16 |

Калібри типу ААА запропоновані до використання в промислових умовах нормаллю ТОВ «Нико Тьюб» 10-7-18; використання цих калібрів разом з методикою розрахунку кінематичних параметрів прокатки дозволило усунути гранеутворення при прокатці товстостінних труб і призвело до зменшення відхилень середньої товщини стінки труб від номіналу на 12 ... 28% в залежності від сортаменту.

Аналіз параметрів калібрування труб великих діаметрів. Калібрування труб великих діаметрів ($D_t = 219 \dots 426$ мм) має деякі особливості у порівнянні з іншими процесами прокатки труб без оправки: загальна відносна деформація по діаметру ε_{Σ} не перевищує 5%, а часткова деформація в кліті ε_i не перевищує 2%. Розглянемо математичну модель процесу калібрування труб в безперервному стані з груповим приводом валків. Задані: S_0 , D_0 , D_t ; $\varepsilon_i = \varepsilon_i(i)$, n_{Bi} , ідеальний радіус валків останньої кліті R_{uN} , число клітей N , відсутність міжклітьових натягів (підпорів)

$Z_{zi} = Z_{ni} = 0$. Потрібно визначити: S_t , R_{ui} ($i=1 \dots N-1$); швидкість прокатки на вході в стан v_0 , енергосилові параметри прокатки (P_i , M_i , W_t , W_Σ). При такій постановці маємо систему з N рівнянь (22.1-3), що включає N невідомих стінок S_i ($i=1 \dots N$), N невідомих значень аплікат умовних нейтральних точок (z_{ny}) _{i} ($i=1 \dots N$), $N-1$ значень ідеальних радіусів валків R_{ui} ($i=1 \dots N-1$) та швидкість прокатки на вході в стан v_0 . Тестування моделі здійснювали шляхом порівняння результатів розрахунків

потужності прокатки W_Σ з експериментальними даними для випадку прокатки труб з різною товщиною стінки S_t за маршрутом $\text{Ø}338 \text{ мм} \rightarrow \text{Ø}325 \text{ мм}$ в умовах 5-клітьового стану ТПА-350. Розбіжність між розрахунковими та реальними значеннями W_Σ при використанні моделі, що пропонується не перевищує $\pm 10\%$, що дозволило використати цю модель при розробці режимів прокатки в разі розширення сортаменту ТПА-350 до $D_t \times S_t = 355 \times 50 \text{ мм}$ без зміни потужності двигуна (400 кВт). В результаті було запропоновано ступінчастий режим зміни сумарного абсолютного обтиску по діаметру (рис. 8), який було успішно запроваджено в промислових умовах.

Удосконалення методики вибору параметрів калібру останньої кліті. Аби забезпечити підвищення якості труб внаслідок зменшення розбіжності між заданими (d_{tx}) та фактичними величинами діаметра в холодному стані запропоновано наступну формулу для визначення середнього діаметру останнього в напрямку ходи прокатки калібру

$$D_{cpN} = \left(1 + \alpha_t \cdot t_N^o - \frac{\sigma_{TN}}{E_N} \right) \cdot d_{tx}, \quad (23)$$

де α_t - коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу труби, $1/^\circ\text{C}$; t_N^o - температура матеріалу труби в останньому в напрямку ходи прокатки калібрі, $^\circ\text{C}$; σ_{TN} , E_N - межа плинності та модуль пружності матеріалу труби при деформації в останньому в напрямку ходи прокатки калібрі, МПа.

Запропоновану методику визначення D_{cpN} використано при розробці нових калібрів калібрувального стану ТПА-350, при використанні котрих відхилення діаметра готових труб від номіналу зменшилося на 8...12% в залежності від сортаменту.

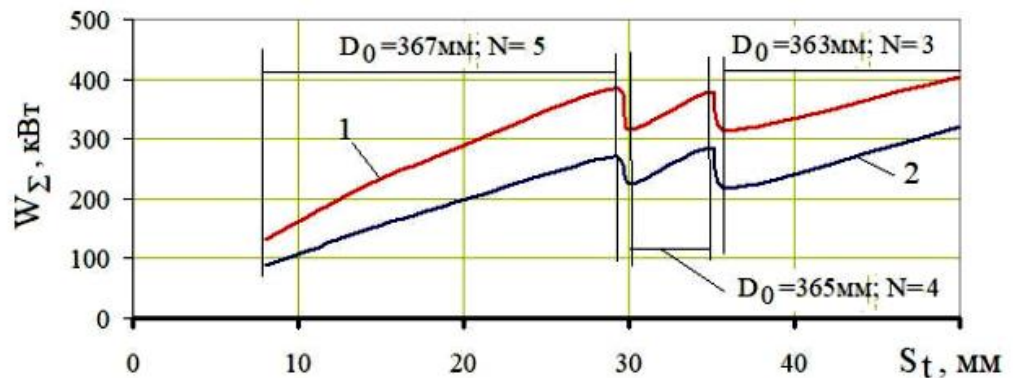


Рис. 8. Розрахункові значення потужності прокатки W_Σ під час калібрування труб діаметром $D_t = 355 \text{ мм}$ в залежності від товщини стінки труби S_t з використанням ступінчастого режиму деформації: 1 – матеріал легована сталь 30ХГСА; 2 – матеріал вуглецева сталь 20

Методику захищено патентом України [12].

Удосконалення методики проектування систем однорадіусних калібрів. Багатьма дослідженнями доведено, що однією з основних умов виготовлення труб з високими показниками точності і якості є забезпечення збігу гранично заданих (ε_{Zi}) та фактичних (ε_{Fi}) значень часткових відносних обтиснень по діаметру в клітках безперервного стану. При існуючих емпіричних методиках визначення параметрів калібрів має місце розбіжність між заданими та фактичними величинами відносних часткових обтиснень, тобто $\varepsilon_{Zi}/\varepsilon_{Fi} \neq 1$. Система рівнянь (3)-(4) описує зв'язок геометричних параметрів в однорадіусному овальному калібрі, що забезпечують виконання умови $\varepsilon_{Zi}/\varepsilon_{Fi} = 1$, тому було розраховано нові параметри базової системи калібрів для виготовлення труб за маршрутом $\varnothing 92\text{мм} \rightarrow \varnothing 30\text{мм}$ в умовах 30-клітьового редуційного стану ТПА-80. При використанні цехової системи калібрів при заданих величинах ε_{Zi} задані величини середніх діаметрів калібрів $D_{Zcpi} = D_{Zcpj}(1 - \varepsilon_{Zi})$ не збігаються з фактичними величинами середніх діаметрів калібрів D_{Fcpj} . В передостанній клітці ($i = 29$) відносна розбіжність між середніми ді-

аметрами $\Delta D_{cpi} = \left(\frac{D_{Fcpj}}{D_{Zcpi}} - 1 \right) \cdot 100\%$ становить $\Delta D_{cpi} = -0,493\%$, в наслідок чого в

останній клітці стану ($i = 30$) зміна середнього діаметра заготовки не здійснюється і середній діаметр готової труби є на 0,493% меншим за потрібний середній діаметр (табл. 2).

Таблиця 2. Задані та фактичні параметри прокатки труби за маршрутом $\varnothing 92\text{мм} \rightarrow \varnothing 30\text{мм}$ (останні дві клітці стану)

| i | $\varepsilon_{Zi}, \%$ | $D_{Zcpi}, \text{мм}$ | $b_i, \text{мм}$ | $h_i, \text{мм}$ | λ_{ki} | $\varepsilon_{Fi}, \%$ | $D_{Fcpj}, \text{мм}$ | $\Delta D_{cpi}, \%$ |
|------------------|------------------------|-----------------------|------------------|------------------|----------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| 29 | 1,014 | 30,240 | 15,162 | 14,982 | 1,012 | 0,991 | 30,091 | -0,493 |
| 30 | 0 | 30,240 | 15,120 | 15,120 | 1,000 | -0,46 | 30,240 | - |
| 29 ^{*)} | 1,014 | 30,240 | 15,240 | 15,047 | 1,013 | 1,014 | 30,240 | 0 |
| 30 ^{*)} | 0 | 30,240 | 15,120 | 15,120 | 1,000 | -0,46 | 30,240 | 0 |

Примітка: ^{*)} - скорегована система калібрів

Тому, в разі, якщо допуск на відхилення середнього діаметра становить $\pm 0,5\%$, при використанні цехової системи калібрів є високий ризик отримати браковану трубу за ознакою “діаметр в мінус”. В разі використання запропонованої системи калібрів величина розбіжності ΔD_{cpi} дорівнює нулю. Скорегована система калібрів впроваджена в промислових умовах на редуційному стані ТПА-80, її застосування дозволило на 3,2–4,5% (в залежності від сортаменту) зменшити відбракіровку труб.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове рішення науково-технічної задачі, яка полягає в теоретичному обґрунтуванні, розробці та впровадженні удосконалених деформаційно-швидкісних режимів безперервної поздовжньої прокатки

труб без оправки, що забезпечують підвищення ефективності технології за рахунок забезпечення потрібної точності і якості поверхні продукції.

1. На основі аналізу науково-технічної літератури і патентних джерел показано, що дослідження, спрямовані на теоретичне обґрунтування, розробку та впровадження раціональних деформаційно-швидкісних режимів безперервної поздовжньої прокатки труб без оправки, що забезпечують підвищення ефективності технології за рахунок підвищення точності і якості поверхні продукції, є актуальними.

2. На підставі проведених досліджень зв'язку геометричних параметрів одно– та багаторадіусних калібрів по всьому їх периметру, включно зону галтелі, обґрунтовано метод проектування, в якому поперечна різностінність готових труб є критерієм оптимізації параметрів калібру.

3. Запропонована та апробована методика визначення параметрів прокатки в калібрах, в якій використовується *реальна* (а не у вигляді прямокутника) форма контактної поверхні, яка розраховується з урахуванням тангенціальної течії металу в осередку деформації; це дозволило підвищити достовірність розрахунків кінематичних та енергосилових параметрів прокатки.

4. Розроблено узагальнену методику розрахунку катаючого радіуса, засновану на аналізі *реальної* форми нейтральної лінії в осередку деформації за умови силової рівноваги заготовки під дією прикладених до неї сил; встановлено, що можуть бути *чотири* характерних (типових) положення нейтральної лінії на поверхні контакту валків і металу, а величина може перевищувати максимальний радіус валка (радіус валка в перерізі реборди). Все це дозволило підвищити достовірність розрахунку кінематичних параметрів прокатки в промислових умовах, що, в свою чергу, підвищило точність готових труб (зменшило відхилення товщини стінки готових труб від номіналу).

5. Розроблено загальну методику розрахунку зусилля, моменту та потужності поздовжньої прокатки труб без оправки в дво– та тривалкових одно– та трирадiусних калібрах, що базується на використанні запропонованих критеріїв – аналогів процесів простої поздовжньої прокатки штаб та поздовжньої прокатки труб без оправки; надані приклади конкретних розрахунків.

6. Запропоновані немонотонні апроксимуючі функції для визначення межі плинності та універсального коефіцієнту підпора, використання яких підвищує точність розрахунків енергосилових параметрів прокатки при одночасному спрощенні процедури виконання розрахунків; запропоновано спосіб визначення емпіричних коефіцієнтів в апроксимуючому рівнянні $\sigma_T = \sigma_T(u, \varepsilon, t^o)$, який значно зменшує обсяг необхідних для апроксимації експериментальних даних.

7. Вперше показано, що метод обчислення величини середнього радіуса калібру і значення цієї величини залежать від того, для визначення якого параметра прокатки (витяжки або відносної зміни периметра) шукана величина буде використовуватися, що підвищує точність розрахунку деформаційних і кінематичних параметрів процесу поздовжньої прокатки в калібрах.

8. Отримала розвиток методика визначення параметрів останнього калібру безперервного стану: запропоновано спосіб визначення середнього радіусу останнього

калібру, який передбачає необхідність враховувати пружну "віддачу" труби після виходу з останньої кліти.

9. Запропоновані методики розрахунку геометричних та визначення кінематичних і енергосилових параметрів деформації труб без оправки із застосуванням одного трирадіусних, дво- та тривалкових овальних калібрів апробовані і впроваджені в виробництво. Впровадження трирадіусних калібрів в умовах ТПА 30-102 дозволило усунути гранеутворення при прокатці товстостінних труб і призвело до зменшення відхилень середньої товщини стінки труб від номіналу на 12 ... 28% в залежності від сортаменту. Використання ступінчастого режиму зміни деформації при виготовленні труб Ø339 мм та Ø355 мм дозволило розширити сортамент калібрувального стана ТПА-350 без підвищення потужності приводу, тобто без заходів модернізації обладнання. При використанні на ТПА-350 однорадіусних калібрів останніх клітей, що розраховані відповідно способу, відхилення діаметра готових труб від номіналу зменшилося на 8...12% в залежності від сортаменту. Застосування в умовах 30-клітьового редуційного стана ТПА-80 нової однорадіусної калібровки дозволило на 3,2–4,5% (в залежності від сортаменту) зменшити відбраківку труб за наявності поверхневих дефектів. Результати роботи використані на кафедрі технологічного проектування НМетАУ при читанні лекцій по курсу «Моделювання процесів обробки металів тиском в технологічних об'єктах» (розділ «Редукування труб»), а також при виконанні студентами дипломних проектів і магістерських робіт.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПУБЛІКАЦІЯХ:

Коллективна монографія:

1. **Kvitka N.Y.** Selection of optimal form of roll caliber for plugless continuous longitudinal tube rolling. *Erbe der europäischen wissenschaft: Monografische Reihe "Europäische wissenschaft"*. Karlsruhe: NetAchatAV, 2020. Buch 2, Teil 3. P. 37-52. URL: <https://www.sworld.com.ua/simpge2/sge2-03.pdf>.

Статті у фахових виданнях України та інших держав:

2. Друян В.М., Чукмасов С.А., Гуляева (**Квитка**) **Н.Ю.** Повышение эксплуатационных характеристик стальных труб. *Теория и практика металлургии*. 2001. №6. С. 32-40.

3. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., **Квитка Н.Ю.** Теоретический анализ параметров непрерывной продольной безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом. *Теория и практика металлургии*. 2007. № 4-5. С. 115-124.

4. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Лозовой В.И., **Квитка Н.Ю.** и др. Анализ условий безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Нікополь, 2008. Том 11. С. 92-100.

5. Шифрин Е.И., Балакин В.Ф., **Квитка Н.Ю.** Аппроксимирующее уравнение для определения коэффициента подпора при продольной прокатке полосы. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. №2. С. 3-9.

6. **Квітка Н.Ю.**, Шифрін Є.І, Гуляев Ю.Г. Методика вибору раціональної форми трирадіусного калібру валка для безоправочної безперервної поздовжньої прокатки труб. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2020. № 2(1356). С. 25-33.

7. **Квітка Н.Ю.** Методика визначення кінематичних параметрів поздовжнього прокатування у калібрах. *Метал та лиття України*. 2020. vol. 28, №3 (322). С. 83-89.

8. **Kvitka N., Koriaka N.** Roll calibers for plugless rolling of pipes. *ITA Tube Journal*. July 2020. No 1. P. 24-28.

9. Шифрін Є.І., **Квітка Н.Ю.** Методика визначення параметрів осередку деформації при поздовжній прокатці труб в калібрах. *Теорія і практика металургії*. 2019. №3. С. 30-35.

Патенти України:

10. Спосіб дослідження опору деформації твердих матеріалів / А.І. Козловський, Ю.Г. Гуляєв, Є.І. Шифрін, Н.О. Максимова-Гуляєва, **Н.Ю. Квітка** та ін.: пат. 75304 Україна: МПК (2006) G01N 3/00. №а200505812; заявл. 13.06.2005; опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3. 12 с.

11. Спосіб безперервної безопрочної поздовжньої прокатки труб в багатоклітьовому стані / Ю.Г.Гуляєв, Є.І. Шифрін, Б.Г. Павловський, **Н.Ю. Квітка**, Л.Я. Пахомова: пат. 82971 Україна: МПК (2006) B21B 17/00, B21B 37/46, B21B 27/02; заявл. 20.08.2007; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10. 7 с.

12. Спосіб безопрочної безперервної поздовжньої прокатки труб в багатоклітьовому стані / Ю.Г.Гуляєв, Б.Г. Павловський, **Н.Ю. Квітка**, Л.Я. Пахомова: пат. 82972 Україна: МПК (2006) B21B 17/00, B21B 27/02; заявл. 20.08.2007; опубл. 26.05.2008, Бюл. №10. 4 с.

Тези доповідей міжнародних науково-технічних конференцій:

13. Gulyayev G.I., Gulyayev Yu.G., Shyfrin Ye.I., **Kvitka N.Yu.**, Darragh C.V. Optimization of the Roll Design Parameters and Deformation Schedules in the Continuous Plugless Tube Rolling Process. *Iron & Steel Technology Conference Proceedings (AISTech'06), Vol. II*. Cleveland (Ohio, USA), 2006. P. 179–186.

14. Gulyayev G.I., Gulyayev Yu.G., Shyfrin Ye.I., **Kvitka N.Yu.**, Darragh C.V. The Procedure of Determination of a Maximum Rolling Pressure in the Continuous Plugless Tube Rolling Process. *International Conference of New Developments in Long and Forged Products Proceedings*. Winter Park, Colorado (USA), 2006. P. 127-132.

15. **Квітка Н.Ю.** Определение среднего радиуса калибра при продольной прокатке. *Science, society, education: topical issues and development prospects* : Abstracts of the 5th International scientific and practical conference SPC Sci-conf.com.ua. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 245-251. URL: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/04/SCIENCE-SOCIETY-EDUCATION_TOPICAL-ISSUES-AND-DEVELOPMENT-PROSPECTS_12-14.04.20.pdf.

Навчальний посібник:

16. Гуляєв Ю.Г., Николаєнко Ю.М., **Квітка Н.Ю.** Технологічні процеси обробки металів тиском. Частина X : Навч. посібник. Дніпро : НМетАУ, 2020. 52 с.

АНОТАЦІЯ

Квітка Н.Ю. Теоретичне обґрунтування та впровадження удосконалених деформаційно-швидкісних режимів безперервної поздовжньої безопрочної прокатки труб - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціа-

льністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2020.

Дисертація спрямована на нове рішення науково-технічної задачі, яка полягає в теоретичному обґрунтуванні, розробці та впровадженні удосконалених деформаційно-швидкісних режимів безперервної поздовжньої прокатки труб без оправки, що забезпечують підвищення ефективності технології за рахунок виготовлення трубної продукції з жорсткими характеристиками точності та якості, зменшення її металоемності, розширення сортаменту діючих агрегатів.

Для удосконалення деформаційно-швидкісних режимів на безперервних станах безоправочної поздовжньої прокатки труб з різними типами проводу валків розроблено теоретичні методи дослідження процесів формозміни, які враховують комплексний вплив на технологічні можливості станів, точність діаметру й товщини стінки труб таких факторів, як реологічні властивості матеріалу, що деформується, форма калібрів, кількість валків у робочій кліті, кількість клітей задіяних в процесі формозміни, пружна деформація валків та інших. За результатами проведених досліджень розроблено раціональні калібрування валків, режими деформації та побудовано таблиці прокатки для безперервних редуційних та калібрувальних станів з різними типами приводу валків, що забезпечило розширення сортаменту і підвищення якості та точності труб до рівня сучасних вимог споживачів.

Розроблено рекомендації щодо створення удосконалених технологічних процесів калібрування і редукування труб для станів, які тривалий час перебувають в експлуатації і не можуть успішно конкурувати з сучасними трубопрокатними агрегатами.

Ключові слова: виготовлення труб, безперервна безопрочно поздовжня прокатка, енергосилові параметри, кінематичні параметри, геометричні параметри калібру, різностінність готових труб.

ABSTRACT

Theoretical substantiation and implementation of the improved deformation - speed regimes of continuous longitudinal plugless rolling of pipes – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for a PhD degree in technical sciences in specialty 05.03.05 - Processes and machines for metal forming. – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is aimed at a new solution of scientific and technical problem, which consists in theoretical substantiation, development, and implementation of improved deformation - speed regimes of continuous longitudinal rolling of pipes without mandrel, which increases technology efficiency by the means of manufacturing pipe products with rigid characteristics of accuracy and quality, expanding the production range of existing technological units.

To improve the deformation - speed regimes of continuous mills of longitudinal rolling of pipes without mandrel with different types of engine drives theoretical methods were developed for studying the processes of deformation, which take into account the complex impact on the technological capabilities of mills, accuracy of pipe diameter and wall thickness, shape of calibers, number of rolls in the working stand, number of stands involved in the process of metal forming, elastic deformation of rolls and other criterion.

Based on the results of the research, rational calibrations of rolls, deformation modes, and rolling tables for longitudinal reduction and calibration mills with different types of engine drives were developed, which expanded the range and improved the quality and accuracy of pipes to meet modern consumer requirements.

Recommendations for the creation of advanced technological processes for calibration and reduction of pipes for mills that have been in operation for a long period of time and cannot successfully compete with modern pipe rolling units have been developed.

Keywords: pipe production, continuous longitudinal rolling without mandrel, power parameters, kinematic parameters, geometric parameters of caliber, wall thickness variation of pipes.

АННОТАЦИЯ

Квитка Н.Ю. Теоретическое обоснование и внедрение усовершенствованных деформационно-скоростных режимов непрерывной продольной безоправочной прокатки труб - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением. – Национальная металлургическая академия Украины, Днепро, 2020.

Диссертация направлена на новое решение научно-технической задачи, которая состоит в теоретическом обосновании, разработке и внедрении усовершенствованных деформационно-скоростных режимов непрерывной продольной прокатки труб без оправки, которые обеспечивают повышение эффективности технологии за счёт изготовления трубной продукции с высокими характеристиками точности и качества, уменьшения её металлоёмкости, расширения сортамента действующих агрегатов.

Для усовершенствования деформационно-скоростных режимов на непрерывных станах безоправочной продольной прокатки труб с различными типами привода валков разработаны теоретические методы исследования процессов формоизменения, которые учитывают комплексное воздействие на технологические возможности станов, точность диаметра и толщину стенки труб таких факторов, как реологические свойства деформируемого материала, форма калибров, количество валков в рабочей клетки, количество клетей, задействованных в процессе формоизменения, упругая деформация валков и других. По результатам проведенных исследований разработаны рациональные калибровки валков, режимы деформации и построены таблицы прокатки для непрерывных редуцированных и калибровочных станов с разными типами привода валков, что обеспечило расширение сортамента, повышение качества и точности труб до уровня современных требований потребителей .

Разработаны рекомендации по созданию усовершенствованных технологических процессов калибрования и редуцирования труб на станах, которые длительное время находятся в эксплуатации и не могут успешно конкурировать с современными трубопрокатными агрегатами.

Ключевые слова: изготовление труб, непрерывная безоправочная продольная прокатка, энергосиловые параметры, кинематические параметры, геометрические параметры калибра, разностенность готовых труб.