

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

**Шифрін Євген Ісайович**

УДК 621.774.35

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕРЕРВНОЇ  
БЕЗОПРАВНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОГО  
ВРАХУВАННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ЗУМОВЛЮЮТЬ ЇХ ЯКІСТЬ**

05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор **Гуляєв Юрій Геннадійович**, науковий консультант ТОВ «Інтерпайп Нико Тьюб», м. Дніпро.

Офіційні опоненти:

- Член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор **Мазур Валерій Леонідович**, головний науковий співробітник Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ;
- 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;
- Доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Огінський Йосип Кузьмич**, завідувач кафедри металургійного обладнання Запорізької державної металургійної академії, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться «02» жовтня 2018 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.084.02 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

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

Автореферат розісланий “14” серпня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д08.084.02,  
д.т.н., професор

Т.М.Миронова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Безперервна безоправочна поздовжня прокатка (ББПП) у багатоклітьових станах є невід'ємною складовою технологічних процесів на більшості трубопрокатних агрегатів (ТПА) з виробництва гарячедеформованих безшовних труб. В Україні тривалий час перебувають в експлуатації 13 безперервних редуційних і калібрувальних станів, що здійснюють заключну технологічну операцію гарячого переділу на семи ТПА, які виготовляють гарячекатані безшовні труби з вуглецевих, низьколегованих та високолегованих сталей. У Східній Європі в експлуатації знаходиться більше 27 безперервних редуційних і калібрувальних станів у складі 17 ТПА, три з яких введені до експлуатації відносно недавно. Окрім цього, у складі устаткування відділень термічної обробки труб також широко використовують 3...5-клітьові калібрувальні стани.

Підвищення ефективності виробництва труб пов'язане з вирішенням проблем, які виникають з розширенням сортаменту продукції як за розмірами, так і за марочним складом сталей, підвищенням вимог до точності геометричних параметрів та до зменшення невиробничих витрат металу на стадії виготовлення, особливо на ТПА, які давно введені в експлуатацію.

До цього часу низка важливих питань, які визначають можливості підвищення ефективності процесів безоправочної поздовжньої прокатки труб, досліджені в недостатній мірі (або зовсім не досліджені).

Відомі методи розрахунку деформаційно-швидкісних режимів стаціонарних процесів безоправочної прокатки у безперервних станах базуються на послідовному аналізі умов формозміни у кожній клітці окремо. Досі розв'язання рівнянь, в системі, розробка якої ґрунтувалась би на комплексному зв'язку параметрів деформації у всіх клітках стана, відсутні. У відомих дослідженнях вивчення нестаціонарних процесів безоправочної прокатки у безперервних станах обмежуються лише аналізом стадії заповнення стана металом, що прокатується. Відсутні розробки щодо вивчення особливостей процесу безоправочної формозміни труб безперервною прокаткою із пробуксуванням валків по поверхні металу у клітках стана. Не проводилися дослідження процесу ББПП при температурних режимах, які характерні для калібрування труб з малими частинними деформаціями після термічної обробки, тобто при умові, коли пружна деформація труби по діаметру стає сумарною з частинними обтисненнями по клітках. Врахування цих факторів сприяє підвищенню досконалості математичних моделей та достовірності результатів досліджень, що, в решті решт, дозволяє обирати найбільш ефективні деформаційно-швидкісні параметри прокатки для підвищення точності труб та забезпечення можливості розширення сортаменту продукції на діючих станах.

Таким чином, робота, спрямована на розвиток теорії та технологій ББПП на основі комплексного врахування ряду факторів, що впливають на точність гарячедеформованих труб та їхню якість, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами та планами.** Виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами наукових досліджень Інституту розвитку ПАТ «Інтерпайп НТЗ», Науково-дослідного і проектно-технологічного трубного інституту (науково-дослідні роботи ДР №0117U006742 «Розробка, експертиза та реєстрація технічних умов ТУ 24.2-05393116-546:2016 «Труби обсадні та муфти до них. Різьбове з'єднання UPJ-M. Параметри та розміри. «Інтерпайп НТЗ» та ДР №0117U006741 «Розробка, експертиза та узгодження технічних умов та змін до них»). Робота «Інтерпайп Ніко Тьюб»), Національної Металургійної академії України (науково-дослідні роботи ДР №0115U003175 «Закономірності структуроутворення металевих матеріалів, що відбуваються під впливом складних факторів кристалізації та високоенергетичних обробок на газові пори та неметалеві включення» та ДР №0117U005159 «Розробка та впровадження методики розрахунку та планування витрат металу при виробництві поковок вільним куванням в умовах ТОВ «Дніпропрес сталь»).

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розробка теорії безперервної безоправочної деформації труб на основі комплексного врахування факторів процесу та розробка нових і удосконалення діючих технологій прокатки труб на станах різних типів для отримання готової продукції з підвищеними характеристиками щодо точності, якості та сортаменту.

**Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні задачі:**

1. Установити закономірності утворення та причини відхилень товщини стінки в процесі деформації труб на станах ББПП різних типів і на основі цього удосконалити метод теоретичного визначення величини зміни середньої товщини стінки заготовки під час безоправочного обтиснення труб по діаметру.

2. Дослідити фактори, що сприяють зовнішній та внутрішній овалізації гарячедеформованих труб та визначити закономірності їхнього впливу на різностінність, розвинути метод аналітичного вивчення закономірностей формування поперечної різностінності труб під час ББПП.

3. Вивчити закономірності формозміни металу та особливості його розподілу по клітях під час ББПП труб на станах різних типів, виконати аналіз особливостей взаємозв'язку деформаційно-швидкісних параметрів у кожній клітці стана в багатоклітьовому безперервному стані з врахуванням можливості пробуксування валків по поверхні металу на сталій та несталій стадіях процесу.

4. Дослідити взаємозв'язки параметрів деформації заготовки і калібрування інструменту для різних технологій нарізання калібрів на валках станів безперервної безоправочної прокатки, удосконалити методи аналітичного визначення площі контакту металу з валком, розробити калібрування прокатного інструменту і режими прокатки, що забезпечують отримання труб відповідно до вимог сучасних стандартів.

Дослідити процес формозміни металу під час ББПП з врахуванням впливу пружної деформації труб по діаметру за зниженими температурами, а також дослідити вплив розроблених технологій прокатки на структуру та фізико-механічні властивості металу труб із різних сталей.

**Об'єкт дослідження.** Технологічні процеси виготовлення гарячедеформованих труб на станах ББПП різних типів.

**Предмет дослідження.** Закономірності впливу деформаційно-швидкісних параметрів виготовлення гарячедеформованих труб на станах ББПП на умови формування діаметра, товщини стінки, поперечної і поздовжньої 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 обчислювальної 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. Отримали розвиток методи теоретичного дослідження закономірних взаємозв'язків комплексу кінематичних, деформаційних та енергосилових параметрів формозміни металу у послідовних клітках багатоклітьового стана в сталих та несталих режимах безперервної безоправочної прокатки з врахуванням деформації в міжклітьових проміжках.**

Розробка відрізняється тим, що деформація металу в клітках і міжклітьових проміжках стана враховується у єдиній цілісній системі. Це дозволило розробити уточнену математичну модель процесу безперервної безоправочної прокатки, яка пов'язує відносну тонкостінність труби, швидкість обертання валків, коефіцієнти випередження (відставання), коефіцієнти пластичного натягу, умови контактної взаємодії та механічні властивості матеріалу у кожній клітці з усіма клітками стана з врахуванням можливості пробуксування валків по поверхні металу і, як наслідок, визначає умови стабілізації діаметра і товщини стінки труби, а також дозволяє обґрунтувати використання математичних моделей для станів ББПП з різними типами приводу.

**2. Вперше на основі теоретичних та експериментальних досліджень визначено закономірності впливу показника розширення на різностінність труб для різних умов формозміни під час ББПП.**

Особливістю розробки є те, що в результаті реалізації математичної моделі та проведених експериментальних досліджень встановлено переважний вплив показників розширення металу по клітках стана на поперечну різностінність труб. Використання закону розподілу показників розширення по клітках як вихідного параметра для розрахунку калібрування валків дозволило визначити раціональну форму калібрів з мінімізацією обтиснення металу у вершинах калібрів і схеми розміщення калібрів по клітках, що дало можливість суттєво підвищити точність труб.

**3. Набув розвитку метод розрахунку деформаційних і кінематичних параметрів процесу безперервної безоправочної прокатки труб з врахуванням пружної деформації.**

Розробка відрізняється врахуванням пружної деформації труб при зниженій до 550...700°C температурі (у разі калібрування після операції термічної обробки), а також в чистових клітках редуційних станів при температурі кінця прокатки 750...900°C. Це дозволило більш обґрунтовано призначати режими деформації, заощаджувати енергоресурси та визначати калібрування валків для забезпечення підвищеної точності труб.

**4. Вперше встановлено закономірні взаємозв'язки параметрів деформуючого інструменту у разі індивідуального та групового нарізання калібрів із технологічними характеристиками процесу гарячої безперервної безоправочної прокатки (відносної деформації по діаметру і показнику розширення), а також формою калібру (висота, ширина, овальність) із врахуванням дестабілізуючого впливу останніх на зміну діаметра і товщину стінки труб.**

Розробка відрізняється врахуванням взаємного впливу зазначених факторів на точність труб. Це дозволило на базі запропонованої математичної моделі розробити методи розрахунку параметрів калібрування валків для станів безперервної безоправочної прокатки у залежності від технології нарізання калібрів і дало можливість стабілізувати діаметр та мінімізувати різностінність труб.

**5. Вперше для несталого режиму звільнення безперервного безоправочного прокатного стана визначено залежність появи «пікових» сил прокатки від параметрів налаштування процесу.**

Розробка відрізняється тим, що досліджено несталий процес звільнення стана, а не тільки процес його заповнення металом, в результаті чого встановлено, що у ряді випадків з'являються умови для появи «пікових» зусиль прокатки, які більші, ніж у процесі заповнення стана. Це дозволило запропонувати обґрунтовані рекомендації щодо розширення сортаменту станів з врахуванням реальних умов процесу.

**6. Набув розвитку метод розрахунку довжини контактної поверхні, площі контакту металу з калібром і катаючого діаметра в осередку деформації під час ББПП труб.**

Розробка відрізняється тим, що під час визначення даних параметрів враховується зміна величини радіального обтиснення заготовки по периметру калібру, яка залежить від ряду факторів, у тому числі від реологічних властивостей матеріалу та наявності пружної деформації; це дозволило підвищити точність розрахунку площі контактної поверхні та катаючого діаметра, що, в свою чергу, підвищило точність розрахунку енергосилових параметрів прокатки та калібрувань валків.

**Практичну цінність** дисертаційної роботи становлять такі основні її результати:

– виявлено нові закономірності процесу ББПП труб, які мають універсальний характер і можуть бути застосовані для аналізу процесу

деформації на діючих калібрувальних і редуційних станах різних типів для оптимізації параметрів, розширення сортаменту, підвищення точності та зниження металоємності продукції;

- обґрунтовано нові принципи розрахунку таблиць поздовжньої безоправочної прокатки труб, в яких параметри калібрувань валків обирають в залежності від заданих показників розширення, частинних деформацій по діаметру та технології нарізання калібрів (патенти України №73440 і №77136 отримані автором);

- визначено граничні величини середніх по стану значень коефіцієнтів пластичного натягу, при яких прокатка здійснюється без пробуксування валків по поверхні металу;

- обґрунтовано та розроблено рекомендації щодо зменшення довжини потовщених кінців і кінцевої обрізі труб у разі редукування (згідно з умовами ТПА 30-102 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб»);

- теоретично обґрунтовано можливості розширення сортаменту ТПА 30-102 у бік типорозмірів більш товстостінних труб (до  $S_t \leq 14,0$  мм) завдяки врахуванню «пікових» зусиль в несталіх стадіях процесу деформації металу труб під час ББПП;

- визначено вплив пружної деформації труби по діаметру під час калібрування труб при знижених температурах після термічної обробки, а також в чистових клітках редуційних станів на деформаційні та енергосилові параметри процесу і обґрунтування необхідності врахування їх у визначенні параметрів калібрів.

Результати роботи апробовано і впроваджено для всього сортаменту прокатаних труб в умовах калібрувального і редуційного станів ТПА 30-102, калібрувального стана ТПА 350 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» і редуційного стана ТПА 140 ПАТ «Інтерпайп НТЗ». Впровадження результатів досліджень дозволило розширити сортамент, підвищити точність геометричних розмірів труб та знизити невиробничі втрати металу (акт ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» від 17.07.2017 р. та висновок ПАТ «Інтерпайп НТЗ» від 28.08.2017 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: [1-3, 24, 25] – узагальнення особливостей конструкцій станів повздовжньої безоправочної прокатки; [4-6, 47] – особливості технології прокатки на редуційних та калібрувальних станах різних типів; [3, 7, 8] – визначення основних шляхів підвищення ефективності процесів виробництва труб; [9, 10] – класифікація діючих стандартів якості на труби; [11-13] – узагальнення потреб ринку щодо якості гарячедеформованих труб; [14-16] – узагальнення шляхів удосконалення деформаційних процесів повздовжньої безоправочної прокатки труб; [17] – обґрунтування фізичного змісту зміни середньої товщини стінки труб; [18-20] – розробка і реалізація математичної моделі зміни середньої товщини стінки; [21, 22] – аналіз розмірностей рівняння

енергетичного балансу і обґрунтування фізичної суті безрозмірного критерію  $F_f$ ; [23-25] – аналіз сучасних та перспективних потреб споживачів труб; [26-28] – розробка уточненої методики визначення площі контакту металу з валком; [26, 29] – обґрунтування взаємозв'язку параметрів прокатки у разі індивідуального нарізання калібрів на валках; [7, 28] – обґрунтування взаємозв'язку параметрів прокатки у разі нарізуванні калібрів на валках у зібраному стані; [30-32] – розробка рекомендацій щодо удосконалення методик розрахунку деформаційних режимів безперервної безопрочної прокатки; [18, 33, 34] – розробка і реалізація математичної моделі для: оцінка впливу технології виготовлення калібрів на параметри формозміни труб; вибору оптимальних деформаційних параметрів прокатки; [35, 36] – розробка та реалізація математичної моделі безперервної прокатки труб з врахуванням можливості пробуксування валків по поверхні металу; [26, 34, 37] – розробка і реалізація математичної моделі формування поперечної різностінності труб; [38-40] – обґрунтування математичної форми рівняння для апроксимації зв'язку дійсного напруження текучості з параметрами формозміни; [22, 41, 42] – обґрунтування оптимальної форми калібру валків; [33,43] – обґрунтування і розробка способу дослідження опору деформації твердого тіла; [44-46] – розробка практичних рекомендацій щодо зниження потовщених кінців труб під час калібрування; [47, 48] – розробка та впровадження удосконалених режимів прокатки труб; [14, 49, 50, 51] – розробка математичних моделей для розрахунку швидкісних та енергетичних параметрів процесу безопрочної прокатки труб.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в доповідях матеріали дисертації обговорені на: 46-й Міжнародній конференції «Material science & Technology 2004» (Новий Орлеан, Луїзіана, США, 2004 р.); Міжнародній конференції «Material science & Technology» (Пітсбург, Пенсільванія, США, 2005 р.); Молодіжному науково-технічному форумі «Інтерпайп – 2004» (Дніпропетровськ, 2004 р.); Молодіжному науково-технічному форумі «Інтерпайп – 2005» (Дніпропетровськ, 2005 р.); Міжнародній конференції з технології обробки сталі «AISTech'06» (Клівленд, Огайо, США, 2006 р.); Міжнародній конференції «Матеріали і технологія» (Спліт, Хорватія, 2009 р.); X Міжнародному Конгресі прокатників (Липецьк, Росія, 2015 р.); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Пластична деформація металів». НМетАУ (Дніпро, Україна, 2017 р.); Придніпровському науковому семінарі кафедри ОМТ НМетАУ і прокатних відділів Інституту чорної металургії НАНУ (Дніпропетровськ, 2005, 2006, 2017 рр.).

**Публікації.** Матеріали дисертації викладено у 51 наукових роботах, серед них: 2 монографії, 33 статті у спеціалізованих виданнях, з яких 13 закордонних (зокрема без співавторів – 6 статей). За матеріалами дисертації отримано 8 патентів України на винаходи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків по роботі, списку зі 179 використаних джерел і 19



додатків. Загальний обсяг становить 318 сторінок, у тому числі, основного тексту – 262 сторінки, який містить 45 рисунків, 9 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність зазначеної наукової проблеми, показано взаємозв'язок роботи з науковими програмами, наведені мета і задачі дослідження, розглянуто об'єкт і предмет дослідження, а також використані методи дослідження, викладено наукову новизну, практичну цінність результатів та їх апробацію і впровадження у виробництво.

У першому розділі наведено аналіз характерних особливостей ББПП труб, викладено детальну класифікацію трубних станів безоправочної поздовжньої прокатки, здійснено аналіз основних параметрів калібрів за їхньою формою.

Проаналізовано процеси зміни середньої товщини стінки, формування поперечної різностінності, а також особливості розрахунку швидкісного режиму та енергосилових параметрів процесу деформації труб у багатоклітьових безоправочних станах поздовжньої прокатки у разі сталих та несталих стадій процесу.

Відзначено, що сучасні теорія і практика ББПП труб базуються, в основному, на роботах вітчизняних вчених: О.І. Целікова, О.П. Чекмарьова, П.Т. Ємельяненка, О.А. Шевченка, Ф.А. Данилова, А.З. Глейберга, В.Ф. Балакіна, Г.І. Гуляєва, В.П. Анісіфорова, В.В. Швейкіна, Ю.М. Матвєєва, Я.Л. Ваткіна, В.М. Видріна, Г.Я. Гуна, В.Л. Колмогорова, Ю.І. Блінова, П.М. Івшина, С.І. Краєва, Ю.Г. Гуляєва та інших, а також зарубіжних дослідників: У. Роддера, Р. Раймонді, А. Буджіні, Х. Біллера, Дж. Блейра, Ф. Нойманна, Д. Ганке та інших.

В результаті виконаного огляду встановлено, що повністю уникнути наведення поперечної різностінності на трубах під час калібрування та редукування труб в калібрах будь-якого типу неможливо. Тому актуальною є проблема вибору оптимальних параметрів формозміни, за яких різностінність буде мінімальною при заданих умовах деформації. Також у жодній з відомих моделей не був врахований вплив способу виготовлення профілю калібру («індивідуально» або «у зібраному стані») на поперечну різностінність труб, наведену в процесі редукування. Вирішення задачі про визначення кінематичних і енергосилових параметрів деформації труб для станів ББПП у відомих математичних моделях здійснюється шляхом послідовного аналізу умов формозміни в кожній клітці окремо. Рішення, які базуються на зв'язку параметрів деформації у всіх клітках стана в єдину систему рівнянь, відсутні. Також відсутні рішення щодо визначення параметрів деформації труб в станах ББПП, які дозволяють враховувати можливість пробуксування валків по поверхні металу. Існуючі математичні моделі процесу заповнення безперервного стана прокатаним металом базуються на внесенні певних припущень у моделі стаціонарного процесу і не розглядають взаємозв'язок параметрів формозміни у вигляді єдиної системи рівнянь, яка описує процес

безперервної прокатки. Обґрунтовано необхідність визначення комплексу раціональних параметрів деформації при ББПП, який враховує максимально можливу кількість чинників, що впливають на стабільність процесу формозміни.

У другому розділі представлено математичну модель зміна середньої товщини стінки труби в процесі ББПП, яка враховує вплив трьох основних чинників: відносної тонкостінності ( $\bar{T}$ ), коефіцієнта пластичного натягу ( $Z$ ), частинних деформацій по діаметру ( $\varepsilon$ ) у поєднанні з коефіцієнтом тертя ( $f$ ), довжиною осередку деформації ( $L$ ) та реологічними властивостями деформованого металу.

При ББПП точність труб характеризується поперечною різностінністю, основною причиною утворення якої є асиметричне навантаження деформованої заготовки, що призводить до нерівномірної по периметру труби сумарної радіальної деформації.

Для визначення варіаційного рівняння енергетичного балансу використовуємо відоме рівняння І.Я. Тарновського та ін. із розподілу радіальних переміщень  $U_r$  по товщині стінки заготовки, що деформується:

$$U_r = \frac{1}{r} \left[ \frac{a(r_n^2 - r^2)}{2} r_n \Delta r_n \right], \quad (1)$$

де  $r_n$ ,  $r$ ,  $\Delta r_n$  – зовнішній радіус, радіальна координата точки поперечного перерізу та радіальне обтиснення заготовки;

$a$  – постійний коефіцієнт, що характеризує нерівномірність радіальної деформації по товщині стінки заготовки, який підлягає визначенню у ході розв'язання задачі.

Згідно з рівнянням (1) визначаємо компоненти тензора деформацій  $T_e$ , що задовольняють умовам нестислості деформованого матеріалу. При цьому інтенсивність зсувних деформацій у зоні формозміни визначиться

$$\Gamma = \frac{1}{r^2} \sqrt{(r^4 + r_n^4) a^2 + 4(r_n - ar_n) r_n^2 \Delta r_n}. \quad (2)$$

Робота деформації  $A_D = 4\pi r_n \Delta r_n \int_0^l p_k dz$ , що здійснюється нормальними напруженнями  $p_k$  на контактні деформуючого інструменту та заготовки, визначиться відповідно до рівняння балансу

$$A_D = A_F + A_f - A_N, \quad (3)$$

де  $A_F = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_{r_b} T \cdot \Gamma \cdot r dz dr d\theta$  – робота формозміни заготовки;

$A_f = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^l \tau_k r_n U_{zk} dz d\theta$  – робота напружень контактної поверхні  $\tau_k$ ;

$U_{zk} = az$  – осьове переміщення точок контактної поверхні вздовж осі  $Oz$ ;

$$A_N = 2 \int_0^{r_n} \int_{r_b} \sigma_n U_{zr} r dr d\theta - \text{робота зовнішніх напружень } \sigma_n;$$

$U_{zr} = al$  – переміщення торця заготовки вздовж осі  $Oz$ .

Виходячи з умови мінімізації повної роботи деформації  $A_D$ , визначається значення постійного коефіцієнта  $a$  з рівняння

$$\frac{\partial}{\partial a} (A_F + A_f - A_N) = 0. \quad (4)$$

Напруження  $p_k$ , перпендикулярне до контактної поверхні, дорівнює

$$p_k = \frac{4S_0 (\mu \sqrt{a^2 - a\varepsilon + \varepsilon^2} + \tau_s)}{D_0} (-Z). \quad (5)$$

Поточне по периметру калібру значення довжини осередку деформації  $L_\theta$  можна визначити з виразу (рис. 1)

$$L_\theta = \sqrt{R_b(\theta)^2 - R_k(\theta)^2}, \quad (6)$$

де  $R_b(\theta) = R_u - r_\theta \cos \theta$  – поточна по периметру калібру величина радіуса валка;

$\Delta r_h(\theta) = r_0 \cos \theta_0 - r_\theta \cos \theta$  – поточна по периметру калібру висотна деформація заготовки;

$R_u$  – ідеальний радіус валка;

$r_\theta$  – поточний радіус калібру;

$r_0$  – поточний по периметру радіус заготовки.

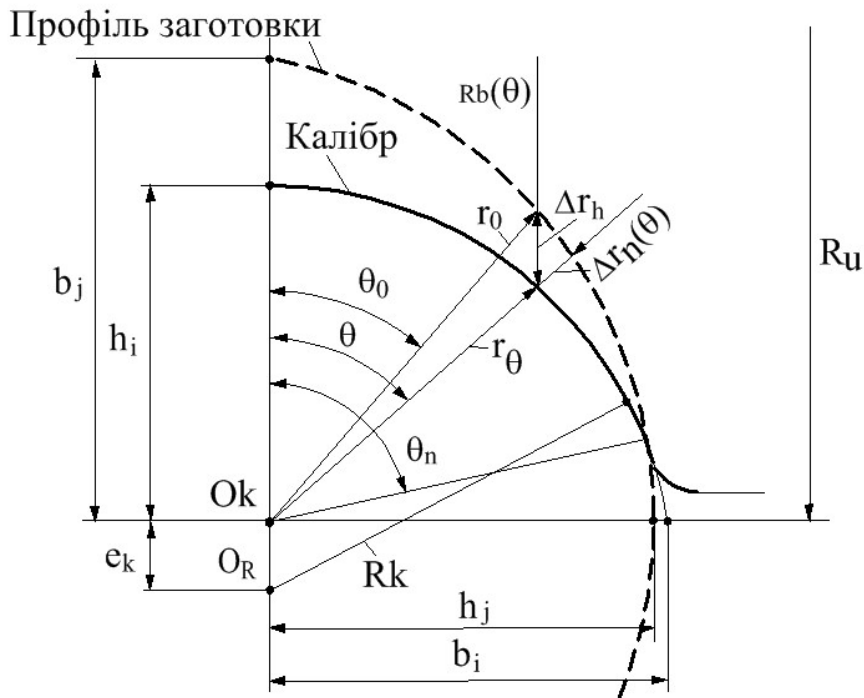


Рис. 1. Схема до точного визначення довжини осередку деформації

Середня довжина осередку деформації визначиться як

$$L = \beta \int_0^{\theta_n} L_0 d\theta, \quad (7)$$

де  $\theta_n$  – кут, що визначає положення перерізу, у якому припиняється обтиснення заготовки.

Повна контактна поверхня визначається згідно з виразом:

$$F_{II} = 2\beta \cdot r_n \cdot \sqrt{\frac{2\beta r_n \varepsilon R_h}{\sin \beta}}. \quad (8)$$

Після проведення відповідних перетворень отримаємо кінцеве рівняння для визначення показника нерівномірності деформації  $a_\varepsilon = \frac{a}{\varepsilon}$ :

$$\begin{aligned} & \int_{1-2\bar{T}_0}^1 \frac{\partial}{\partial a_\varepsilon} \left( \mu \varepsilon \bar{\Gamma}^2 + \tau_s \bar{\Gamma} \right) \cdot \bar{r} d\bar{r} + \\ & + \frac{\partial}{\partial a_\varepsilon} \left[ \left( 2\mu \varepsilon \sqrt{a_\varepsilon^2 - a_\varepsilon + 1} + \tau_s \right) \left( -Z \bar{T}_0 a_\varepsilon F_f \right) \right] - \\ & - 2Z \int_{1-2\bar{T}_0}^1 \left\{ \left( \mu \varepsilon \bar{\Gamma} + \tau_s \right) + a_\varepsilon \left[ \frac{\partial}{\partial a_\varepsilon} \left( \mu \varepsilon \bar{\Gamma} \right) \right] \right\} \cdot \bar{r} d\bar{r} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\bar{T}_0 = \frac{S_0}{D_0} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{r_b}{r_n} \right)$  – показник тонкостінності заготовки;

$$D_0 = 2r_n; \quad \bar{\Gamma} = \sqrt{3a_\varepsilon^2 + \frac{a_\varepsilon^2 - 4a_\varepsilon + 4}{(\bar{r})^4}}; \quad \bar{r} = \frac{r}{r_n}; \quad A = \sqrt{a_\varepsilon \left( \mu \varepsilon - 1 \right) + 1};$$

$F_f = f \cdot \bar{L}$  – узагальнена характеристика (показник) відносного обтиснення по діаметру, умов контактної тертя та співвідношення розмірів валків і заготовки;

$$\bar{L} = \frac{L}{r_n} = \Omega \sqrt{\pi \varepsilon R_h}; \quad \bar{R}_h = \frac{R_h}{r_n}; \quad \Omega = 1 \text{ (для } N_b = 2); \quad \Omega = 0,877 \text{ (для } N_b = 3).$$

На рис. 2 та 3 показано характер впливу коефіцієнта тертя  $f$  та коефіцієнта пластичного натягу  $Z$  на частинну відносну зміну товщини стінки

$$\Delta \bar{S}_1 = \frac{\Delta S_0}{\Delta D} \quad (\text{тут } \Delta D = 2\Delta r_n) \quad \text{у разі деформації без натягу. Одержані}$$

розрахункові залежності відповідають відомим експериментальним даним, згідно з якими при  $Z > Z_L \approx 0,5$  (тут  $Z_L$  – критичний коефіцієнт пластичного натягу) прокатка заготовки з вуглецевої сталі, незалежно від показника тонкостінності  $\bar{T}_0$ , має супроводжуватися потоншенням стінки.

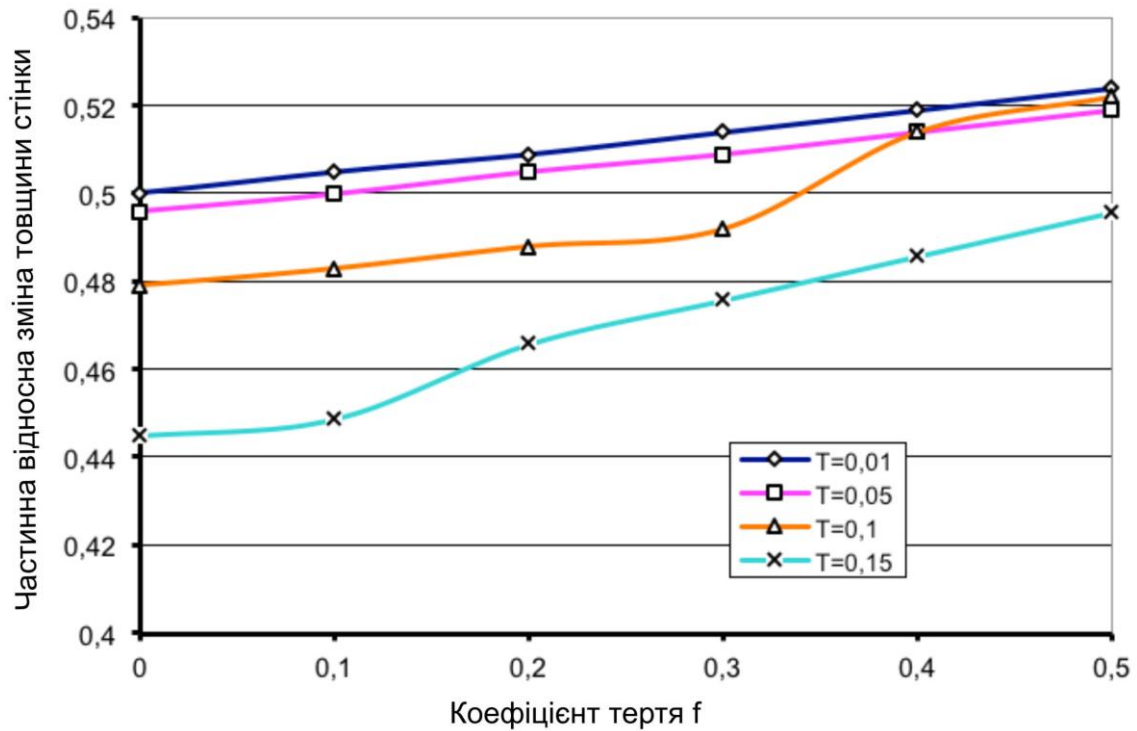


Рис. 2. Вплив коефіцієнта тертя  $f$  на частинну зміну товщини стінки  $\Delta S_1$  у разі прокатки заготовок з різними показниками тонкостінності ( $Z=0$ ;  $\bar{L}=0,618$ ;  $\mu=1$ ;  $\tau_s=0$ )

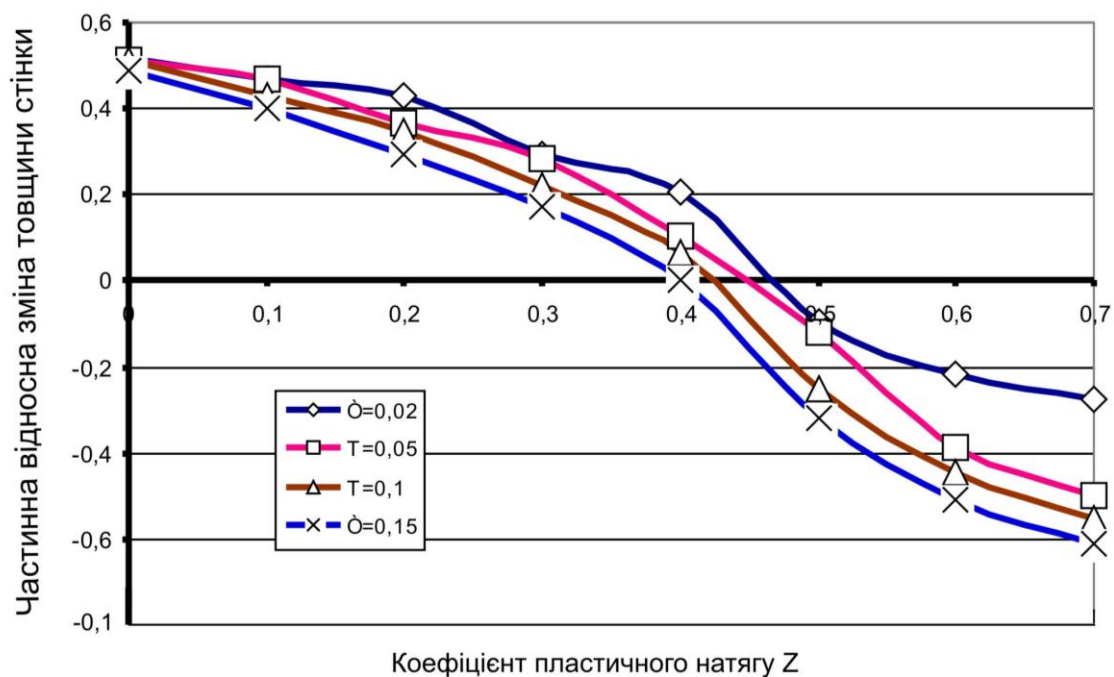


Рис. 3. Вплив коефіцієнта пластичного натягу  $Z$  на частинну зміну товщини стінки  $\Delta S_1$  у разі прокатки заготовок з різними показниками тонкостінності ( $f=0,4$ ;  $\bar{L}=0,618$ ;  $\mu=1$ ;  $\tau_s=0$ )

Відомо, що  $\Delta \bar{S}_2 = \frac{\Delta S_0}{S_0} = \frac{1 - a_\varepsilon \left( \frac{r_n}{r_b} \right)^2}{1 - 2\bar{T}_0}$ . При  $\Delta S_0 = 0$  критичне значення

коефіцієнта  $a_\varepsilon = a_{\varepsilon K}$ , що відповідає умові відсутності зміни товщини стінки, дорівнює

$$a_{\varepsilon K} = \frac{1}{1 - \bar{T}_{0K}}. \quad (10)$$

В результаті отримаємо закон зв'язку критичних параметрів деформації  $\bar{T}_{0K} - Z_K - F_{fK}$ , за яким зміна середньої товщини стінки заготовки  $S_0$  не відбувається.

У третьому розділі представлено математичну модель, яка враховує вплив натягу, кількості валків та форми калібру, частинної деформації, коефіцієнта тертя, реологічних властивостей деформованого металу та способу нарізання калібрів на рівень поперечної різностінності готових труб при БПП.

Виходячи з розподілу радіальних переміщень по товщині стінки деформованої заготовки (1) і враховуючи, що реально радіальні переміщення є змінними по периметру калібру, а функція  $U_r = U_r(r, \theta)$  має бути симетричною відносно вершини калібру валків ( $\theta = 0$ ), задаємо закон розподілу радіальних переміщень

$$U_r(r, \theta) = \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{a_1 (r_n^2 - r^2)}{2} + \frac{a_2 (r_n^4 - r^4)}{4r^2} \sin^2 \theta - r_n \Delta r_n(\theta) \right], \quad (11)$$

де  $a_1, a_2$  – постійні коефіцієнти, що характеризують нерівномірність радіальної деформації по периметру калібру і підлягають визначенню у ході розв'язання задачі.

Звідси закон зміни товщини стінки  $\Delta S(\theta) = U_r|_{r=r_n} - U_r|_{r=r_b}$  по периметру калібру

$$\Delta S(\theta) = \frac{-1}{r_b} \cdot \left[ \frac{a_1 (r_n^2 - r_b^2)}{2} + \frac{a_2 (r_n^4 - r_b^4)}{4r_b^2} \sin^2 \theta - (r_n - r_b) \Delta r_n(\theta) \right]. \quad (12)$$

У обчисленні коефіцієнтів  $a_1$  та  $a_2$ , що визначають характер зміни товщини стінки по периметру калібру, задовольняємо умову мінімізації повної роботи деформації  $A_D$ .

Модель також має відповідати експериментально встановленому факту існування цілком визначеного співвідношення  $\frac{S_0}{D_0} = \bar{T}_{0K1}$ , при якому не відбувається зміна товщини стінки заготовки  $S_0$  ( $\theta = 0$ ) у вершині калібру. Запис цієї умови має вигляд

$$\frac{1}{r_b} \left[ \frac{a_1 (r_n^2 - r_b^2)}{2} - (r_n - r_b) \Delta r_{nb} \right] = 0, \text{ звідки } a_1 = \frac{2\Delta r_{nb}}{(1 - \bar{T}_{0K1})D_0}, \quad (13)$$

де  $\Delta r_{nb} = \Delta r_n$  ( $\theta = 0$ ) – обчислення по радіусу у вершині калібру.

Деформація у калібрі з порядковим номером  $i$  характеризується сімома величинами  $(h_i, b_i, \lambda_i, D_j, D_i, \varepsilon_i, \delta b_i)$ . У розрахунку параметрів калібрів послідовно за ходом прокатки від  $i=1$  (перша кліть безперервного стана) до  $i=N$  (остання кліть безперервного стана) значення  $D_j$  у калібрі з порядковим номером  $i$  та розподіл частинних деформацій по клітях безперервного стана  $\varepsilon_i$  відомі. Спочатку задаємо величини показників розширення у всіх клітях стана  $\delta b_i$ . Для визначення чотирьох невідомих сталих величин  $(h_i, b_i, \lambda_i, D_i)$ , які характеризують деформацію в калібрі з порядковим номером  $i$ , використовуємо співвідношення, що пов'язують параметри, які розглядаються

$$D_i = D_j \left( 1 - \varepsilon_i \right); \lambda_i = \frac{b_i}{h_i}; \delta b_i = \frac{b_i - h_j}{b_j - h_i}; D_i = D_j \left( 1 - \varepsilon_i \right); b_i, \lambda_i, D_j, \varepsilon_i, h_j, b_j. \quad (14)$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, визначаємо чотири невідомі величини, що характеризують умови формозміни у калібрі з порядковим номером  $i$ .

На рис. 4 представлено розрахункові значення величини відносної поперечної різностінності  $B_t$  для труб, прокатаних в одній кліті.

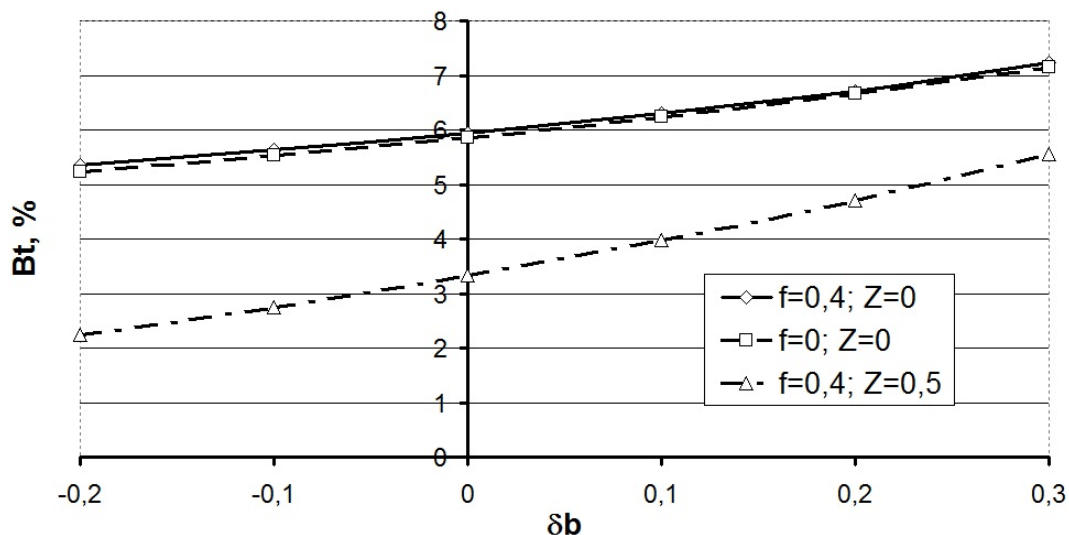


Рис. 4. Залежність відносної поперечної різностінності труби  $B_t$  від показника розширення  $\delta b$ , коефіцієнта пластичного натягу  $Z$  та коефіцієнта тертя  $f$  ( $\varepsilon=0,05$ )

З наведених даних випливає, що показник розширення  $\delta b$  та коефіцієнт пластичного натягу  $Z$  суттєво впливають на кінцеву точність труб. На підставі цього висновку було здійснено корекцію заводських режимів деформації. В таблиці 1 наведено заводські параметри прокатки та розрахункові значення відносної поперечної різностінності  $B_{ti}$  по клітях під час прокатки труби 219,1x25,0 мм. Як видно з наведених даних, в заводських умовах використовується калібрування, при якому  $\delta b_i = 22...25\%$ . При цьому  $B_{t6} = 1,51\%$ .

Таблиця 1

## Заводські параметри прокатки (труба 219,1x25,0 мм)

$i$	$D_{cpi}$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$b_i$ , мм	$h_i$ , мм	$\delta b_i$ , %	$\lambda_i$	$R_{ki}$ , мм	$e_{ki}$ , мм	$B_{ti}$ , %
	230		115	115					0
1	227,93	0,9004	115,40	113,15	21,62	1,0199	115,42	2,27	1,36
2	225,61	1,0161	113,90	112,20	23,44	1,0152	113,91	1,71	1,26
3	223,76	0,8213	112,75	111,40	22,00	1,0121	112,76	1,36	1,31
4	222,47	0,5761	111,85	110,90	24,32	1,0086	111,85	0,95	1,24
5	221,46	0,4535	111,25	110,45	25,00	1,0072	111,25	0,80	1,32
6	221,46	0,0000	111,25	110,45	–	1,0072	111,25	0,80	1,51

Для зменшення поперечної різностінності  $B_{ti}$  було запропоновано зменшити величину  $\delta b_i$  в перших трьох клітках до 0...5%, що в поєднанні з раціональним розподілом обтиснень  $\varepsilon_i$  зменшило розрахунковий показник  $B_{t6}$  до величини 0,13% (таблиця 2). Розрахункові дані підтверджено результатами промислових випробувань.

Таблиця 2

Параметри прокатки труби 219,1x25,0 мм, скореговані за показниками розширення  $\delta b_i$  та обтиснення  $\varepsilon_i$ 

$i$	$D_{cpi}$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$b_i$ , мм	$h_i$ , мм	$\delta b_i$ , %	$\lambda_i$	$R_{ki}$ , мм	$e_{ki}$ , мм	$B_{ti}$ , %
	230		115	115					0
1	228,37	0,7087	115,07	113,68	5,00	1,0122	115,07	1,39	1,01
2	225,61	1,2077	113,77	112,26	3,00	1,0134	113,78	1,52	0,57
3	224,21	0,6214	112,26	112,02	0,00	1,0022	112,26	0,24	0,75
4	222,47	0,7761	112,59	110,47	32,00	1,0192	112,61	2,15	0,43
5	221,50	0,4360	110,75	110,75	15,48	1,0000	110,75	0,00	0,13
6	221,50	0,0000	110,75	110,75	–	1,0000	110,75	0,00	0,13

В процесі промислових випробувань було встановлено, що у разі використання традиційних однорадіусних овальних калібрувань (див. рис. 1), прокатка при  $\delta b_i < 0$  є неможливою через утворення дефектів (підрізів) на зовнішній поверхні труб. Для забезпечення можливості прокатки труб при  $\delta b_i = -0,25...0$  і більш ефективного зменшення поперечної різностінності  $B_{ti}$  було розроблено принципово новий тип калібрування – дворадіусне овальне калібрування (рис. 5), яке успішно апробовано в умовах редуційного та калібрувального станів ТПА 30-102 ВАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб».



Узагальнюючи результати порівняння показників точності труб різних типорозмірів, прокатаних на редукційному і калібрувальному станах, можна зробити висновок, що у разі використання запропонованих калібрувань спостерігається зниження відносної поперечної різностінності труб  $B_t$  (зафіксовані значення відносного зниження різностінності знаходяться в межах 1,12...2,45).

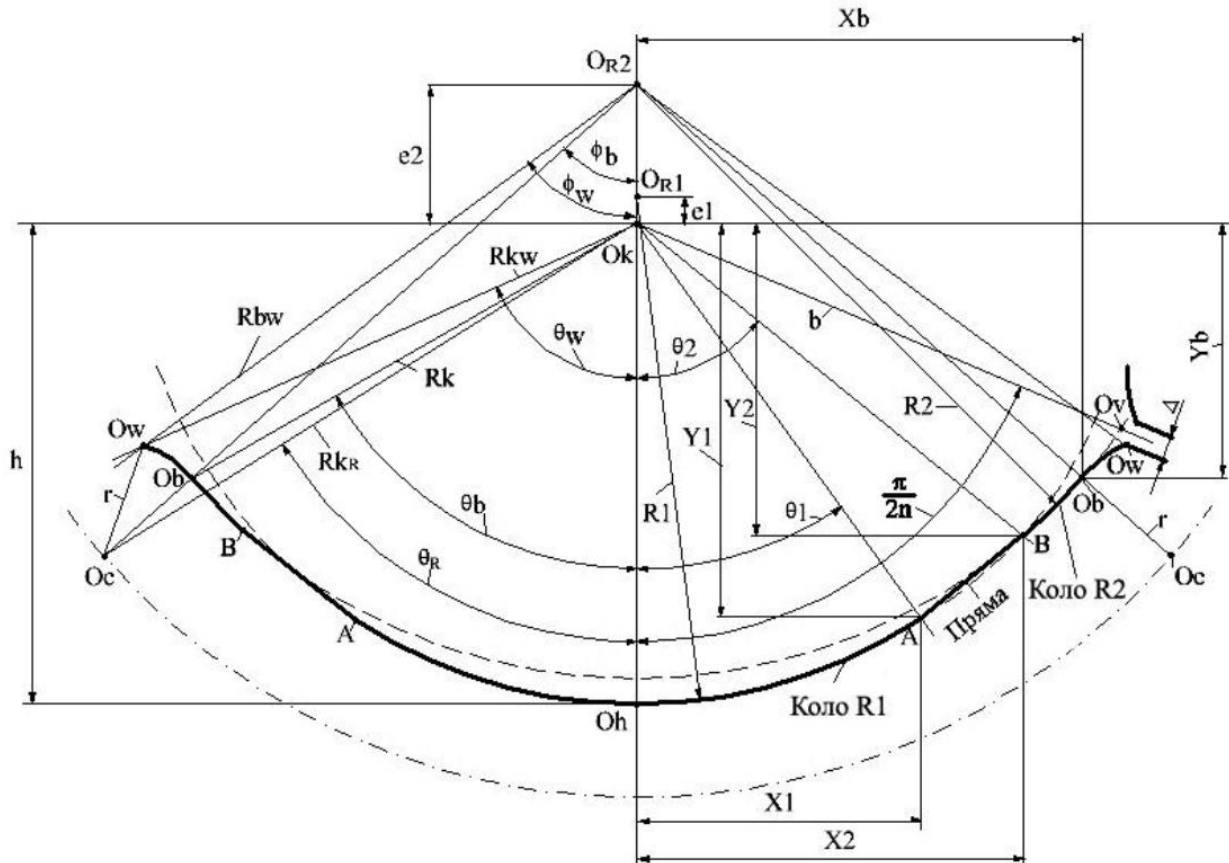


Рис. 5. Дворадіусний овальний калібр

Особливо слід відзначити високу ефективність використання запропонованого методу для розрахунку таблиць прокатки товстостінних труб. Так, наприклад, під час виготовлення труб розміром 57x11...12 мм із заготовок 117x9...12 мм із використанням запропонованої таблиці прокатки їхня абсолютна поперечна різностінність приблизно у 2,0..2,5 рази нижча (0,8-1,0 мм проти 1,8-2,4 мм), ніж у труб, виготовлених за заводською таблицею прокатки (рис. 6).

Результати промислових випробувань є основою для впровадження у виробництво нових калібрувань валків.

У четвертому розділі запропоновано математичні моделі стаціонарного і нестаціонарного процесів безправочної прокатки труб, де визначення параметрів формозміни (катаючих діаметрів, міжклітьових натягів, змінень товщини стінки по клітях) здійснюється шляхом розв'язання системи рівнянь, які описують умови, що відповідають одночасній деформації заготовки в усіх клітях безперервного стана.

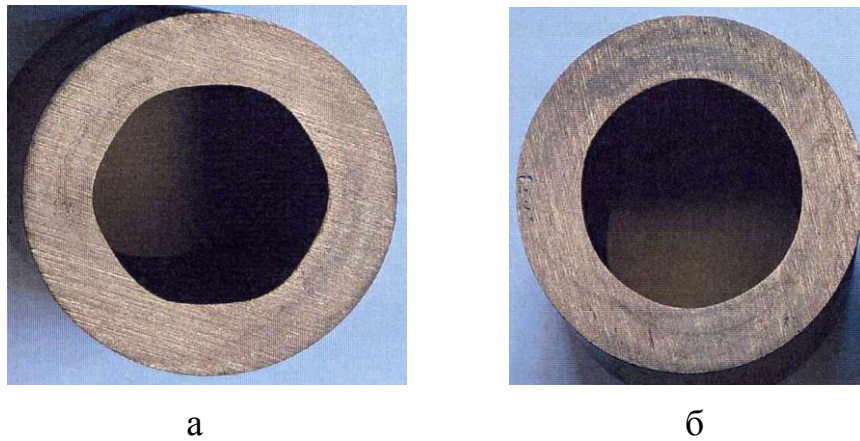


Рис. 6. Перетини труб  $x=57 \times 11$  мм, виготовлених з використанням заводської (а) та розробленої (б) таблиць прокатки

Відома відносно невелика кількість теоретичних досліджень з вивчення нестационарних процесів безопрочної прокатки труб, до того ж усі вони виконані лише для аналізу процесу заповнення безперервного стана прокатаним металом.

Разом із тим, практика показує, що максимальні (пікові) значення тиску металу на валок, моменту та потужності прокатки мають місце на несталих стадіях прокатки як в процесі заповнення, так і в процесі вивільнення стана.

Метою розрахунку є визначення швидкості обертання валків  $n_B$  у кожній кліті стана, яка забезпечує отримання труби необхідного розміру ( $D_t \times S_t$ ) із заготовки заданого розміру ( $D_0 \times S_0$ ) при заданій швидкості прокатки заготовки  $V_0$  на вході до першої кліті або заданій швидкості труби  $V_t$  на виході з останньої кліті багатоклітьового стана БПП.

При заданих значеннях швидкості та геометричних параметрів труби на вході та виході із стана визначаємо  $D_i = D_0 \cdot \prod_{w=1}^i (1 - \varepsilon_w)$ ;  $w=1, 2, \dots, j, i$  та

$V_{Bi} = \frac{\pi \cdot D_{Bi} \cdot n_{Bi}}{\xi}$ , де  $D_{Bi}$  – поточне по периметру калібру значення діаметра

валка. Після перетворень отримаємо

$$n_{Bi} = \frac{V_0 \cdot S_0 \cdot (D_0 - S_0) \cdot \xi}{\pi \cdot S_i \cdot (D_i - S_i) \cdot \left[ \frac{D_{ui} - D_i \cdot \cos \alpha_i \cdot K_i^+}{\xi} \right]} \quad (15)$$

Рівняння (15), загальна кількість яких дорівнює кількості клітей безперервного стана  $N$ , при заданій товщині стінки готової труби  $S_t$  включають  $2N - 1$  невідомих величин, а саме:  $N - 1$  товщину стінки  $S_i$  та  $N$  коефіцієнтів випередження  $K_i^+$ . Для визначення невідомих використовуємо два рівняння.

Перше рівняння є залежністю, що пов'язує середні величини товщини стінки – початкової  $S_j$  та кінцевої  $S_i$  – з параметрами формозміни у кліті з

порядковим номером  $i$ . Як таку залежність використовуємо перетворену формулу О.А. Шевченка – В.А. Юргеленаса

$$\frac{S_i}{S_j} = 1 + \varphi_{0i} \cdot \frac{2Z_{cp_i} \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] + \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] \right) + \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right]}{Z_{cp_i} \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] - \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] \right) - \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right]} + \frac{1}{2} \left[ \varphi_{0i} \cdot \frac{2Z_{cp_i} \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] + \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] \right) + \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right]}{Z_{cp_i} \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] - \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right] \right) - \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j} \right]} \right]^2, \quad (16)$$

$$\text{де } \varphi_{0i} = \ln \frac{D_i - S_i}{D_j - S_j}; \quad T_{0i} = \left( \frac{S_j}{D_j} + \frac{S_i}{D_i} \right)^K.$$

Як друге рівняння, що пов'язує невідомі з параметрами прокатки, використовуємо рівняння рівноваги об'єму металу в осередку деформації під дією прикладених до нього сил

$$\Sigma \bar{x} = -P_{zx} + P_{nx} - P_{px} - P_{tx}^+ + P_{tx}^- = 0, \quad (17)$$

де  $P_{zx}$ ,  $P_{nx}$  – проекції на вісь прокатування (вісь  $\bar{x}$ ) зусиль, ініційованих напруженнями заднього та переднього натягів відповідно;

$P_{px}$  – проекція на вісь прокатування зусилля, яке є рівнодіючою нормальних контактних напружень  $p$ ;

$P_{tx}^+$ ,  $P_{tx}^-$  – проекції на вісь прокатування зусиль, які є рівнодіючими напружень контактної тертя  $t$  в зонах випередження та відставання відповідно.

Після відповідних перетворень отримаємо

$$\begin{aligned} \Sigma \bar{x} = & Z_{nj} \cdot K_{ff} \cdot S_j \cdot \left( \left[ \frac{D_j - S_j}{D_i} \right] - \left[ \frac{D_j - S_j}{D_i} \right] \right) - Z_{ni} \cdot K_{fi} \cdot S_i \cdot \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] + \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] \right) \\ & + \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] + \sqrt{S_j D_j} \right) n_{ti} \cdot K_{fcp_i} \cdot \frac{S_i \cdot D_j}{D_i} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2Z_{nj}}{3} + \frac{Z_{ni}}{3} \right) \right] \\ & \cdot \left[ \frac{cp}{pi} + \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] + \sqrt{S_j D_j} \right) \cdot K_i^+ - 1 \right] f_i \cdot A_{ii}^{cp} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Розв'язуючи (18) відносно величини  $Z_{ni}$  для  $K_{ff} = K_{fi} = K_{fcp_i}$ , отримаємо рівняння рівноваги у вигляді рівності

$$Z_{ni} = \frac{n_{ti} \cdot \frac{D_j}{D_i} \cdot \left( 1 - \frac{2Z_{nj}}{3} \right) \cdot \left[ \frac{cp}{pi} + \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] + \sqrt{S_j D_j} \right) \cdot K_i^+ - 1 \right] f_i A_{ii}^{cp} + Z_{nj} \cdot \frac{S_j}{S_i} \cdot \left( \left[ \frac{D_j - S_j}{D_i} \right] - \left[ \frac{D_j - S_j}{D_i} \right] \right)}{n_{ti} \cdot \frac{D_j}{3D_i} \cdot \left[ \frac{cp}{pi} + \left( \left[ \frac{D_i - S_i}{D_j} \right] + \sqrt{S_j D_j} \right) \cdot K_i^+ - 1 \right] f_i A_{ii}^{cp} + \frac{D_i - S_i}{2L_i + \sqrt{S_j D_j}}}. \quad (19)$$

Таким чином, для  $N$ -клітьового стану отримали математичну модель процесу у вигляді системи з  $N$  рівнянь (18) і  $N$  рівнянь (19)

$$\frac{S_1}{S_0} = 1 + \varphi_{01} \cdot \frac{Z_{n1} \left( \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] + \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] \right) + \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right]}{Z_{cp1} \left( \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] - \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] \right) - \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right]} + \frac{1}{2} \left[ \varphi_{01} \cdot \frac{Z_{n1} \left( \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] + \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] \right) + \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right]}{Z_{cp1} \left( \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] - \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right] \right) - \left[ \frac{D_1 - S_1}{D_0} \right]} \right]^2;$$

$$Z_{n1} = \frac{n_{t1} \cdot \frac{D_0}{D_1} \cdot \left[ \left( \frac{cp}{p1} + \left( K_1^+ - 1 \right) f_1 A_{t1}^{cp} \right)^{-} \right]}{n_{t1} \cdot \frac{D_0}{3D_1} \cdot \left[ \frac{cp}{p1} + \left( K_1^+ - 1 \right) f_1 A_{t1}^{cp} \right]^{\sim} + \frac{D_1 - S_1}{2L_1 + \sqrt{S_0 D_0}}};$$

$$\frac{S_i}{S_j} = 1 + \varphi_{0i} \cdot \frac{2Z_{cp_i} \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right) \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right)}{Z_{cp_i} \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right) \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right)} + \frac{1}{2} \left[ \varphi_{0i} \cdot \frac{2Z_{cp_i} \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right) \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right)}{Z_{cp_i} \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right) \left( \left( \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right)^{-} \right)} \right]^2;$$

$$Z_{ni} = \frac{n_{ti} \cdot \frac{D_j}{D_i} \cdot \left( 1 - \frac{2Z_{nj}}{3} \right) \cdot \left[ \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right]^{\sim} + Z_{nj} \cdot \frac{S_j}{S_i} \cdot \left( \frac{cp}{L_i + \sqrt{S_j D_j}} \right)^{-}}{n_{ti} \cdot \frac{D_j}{3D_i} \cdot \left[ \frac{cp}{p_i} + \left( K_i^+ - 1 \right) f_i A_{ti}^{cp} \right]^{\sim} + \frac{D_i - S_i}{2L_i + \sqrt{S_j D_j}}};$$

$$\frac{S_N}{S_{N-1}} = 1 + \varphi_{0N} \cdot \frac{\left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-} \left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-}}{\left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-} \left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-}} + \frac{1}{2} \left[ \varphi_{0i} \cdot \frac{\left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-} \left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-}}{\left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-} \left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-}} \right]^2$$

$$Z_{nN} = \frac{\frac{n_{tN} D_{N-1}}{D_N} \left( 1 - \frac{2 \left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-}}{3} \right) \left[ \frac{cp}{p_N} + \left( K_N^+ - 1 \right) f_N A_{tN}^{cp} \right]^{\sim} + \frac{\left( \frac{cp}{p_{N-1}} + \left( K_{N-1}^+ - 1 \right) f_{N-1} A_{t_{N-1}}^{cp} \right)^{-} S_{N-1} \left( \frac{cp}{L_N + \sqrt{S_{N-1} D_{N-1}}} \right)^{-}}{S_N \left( \frac{cp}{L_N + \sqrt{S_{N-1} D_{N-1}}} \right)^{-}}}{\frac{n_{tN} D_{N-1}}{3D_N} \left[ \frac{cp}{p_N} + \left( K_N^+ - 1 \right) f_N A_{tN}^{cp} \right]^{\sim} + \frac{D_N - S_N}{2L_N + \sqrt{S_{N-1} D_{N-1}}}}}. \quad (20)$$

Із системи  $2N$  рівнянь визначаємо  $2N$  невідомих величин, значення решти величин, які є невідомими, задаємо, виходячи з технологічних особливостей перебігу процесу прокатки.

У розрахунках використовували значення емпіричних коефіцієнтів  $n_1, n_2, \varepsilon_{\max}, m_1, m_2, m_3, m_4$ , які були отримані в дослідженні опору деформації сталевих зразків на розтягування і стиснення згідно з методом, захищеним патентом України № 75304.

Співставленням розрахункових та емпіричних значень зусиль, які діють на валки 5-клітьового калібрувального стана з двовалковими клітями ( $N=5; N_b=2$ ), у разі прокатки труб за маршрутом  $340 \times 15,8 \rightarrow 325 \times 16,0$  мм доведено, що розбіжність між фактичними та розрахунковими значеннями тиску металу на валок стана знаходиться у межах  $(-4,4...+2,3)\%$ , що підтверджує відповідність розробленої математичної моделі реальному процесу прокатки труб.

Аналогічний результат отримано у порівнянні розрахункових та емпіричних значень зусиль, що діють на валки 12-клітьового калібрувального стана з тривалковими клітями ( $N=12; N_b=3$ ) у разі прокатки труб за

маршрутом 117x11,7→89x13,0 мм. Розбіг між фактичними і розрахунковими значеннями тиску металу на валок стана знаходиться у межах (-5,9...+5,4%), що можна вважати цілком прийнятним для практичних розрахунків.

Під пробуксуванням валків по поверхні заготовки в  $i$ -тій кліті безперервного стана розуміємо таку кінематичну картину в осередку деформації  $i$ -тої кліті, при якій лінійна швидкість поверхні валка по всьому периметру калібру є меншою за осьову швидкість руху заготовки (а), або перевищує осьову швидкість руху заготовки (б). Варіант (а) відповідає умові наявності в осередку деформації суцільної зони випередження (пробуксування назад), варіант (б) відповідає наявності в осередку деформації суцільної зони відставання (пробуксування вперед).

Очевидно, що пробуксування назад характеризуватиметься такою сукупністю параметрів процесу:

$$\begin{cases} K_{i,n}^+ = 1 \\ \theta_{ni} = \beta_i \\ D_{ki} > D_{ui} \end{cases} \quad (21)$$

У разі пробуксування вперед має місце така сукупність параметрів процесу

$$\begin{cases} K_{i,n}^+ = 0 \\ \theta_{ni} = 0 \\ D_{ki} < D_{bi} \end{cases} \quad (22)$$

У разі прокатки без пробуксування:

– величина коефіцієнта випередження  $K_{in}^+$  знаходиться в межах  $0 \leq K_{i,n}^+ \leq 1$  та розраховується, залежно від вирішуваної задачі, за наведеними вище моделями;

– нейтральний кут  $\theta_{ni}$  набуває значень у межах  $0 \leq \theta_i \leq \beta_i$  і під час звільнення стана дорівнює

$$\theta_{ni} = \beta_i K_{in}^+ = \arccos \left[ \frac{D_{ui}}{D_i} - \frac{V_{t,n} \cdot S_{N,n} \cdot \left( \Phi_t - S_{N,n} \right) \cdot \xi}{\pi \cdot S_{i,n} \cdot D_i \cdot n_{Bi} \cdot \left( \Phi_i - S_{i,n} \right)} \right], \quad (23)$$

а під час заповнення стана становить

$$\theta_{ni} = \beta_i K_{in}^+ = \arccos \left[ \frac{D_{ui}}{D_i} - \frac{V_{0,n} \cdot S_0 \cdot \left( \Phi_0 - S_0 \right) \cdot \xi}{\pi \cdot S_{i,n} \cdot D_i \cdot n_{Bi} \cdot \left( \Phi_i - S_{i,n} \right)} \right]; \quad (24)$$

– катаючий діаметр  $D_{ki}$  дорівнює  $D_{ki} = D_{ui} - D_i \cos \theta_{ni}$  і знаходиться у межах  $D_{bi} \leq D_{ki} \leq D_{ui}$ .

Таким чином, для узагальненого опису несталих стадій процесу з врахуванням можливості здійснення прокатки як без пробуксування валків по поверхні металу, так і в режимах пробуксування валків вперед або назад,

формули в системах для визначення потрібних величин зазнають зміни відповідно до наявності додаткових умов (21-24).

Виробництво високоміцних та корозійностійких труб за вітчизняними та міжнародними стандартами зумовлює необхідність термічної обробки їх на заключній стадії процесу виробництва. Для отримання потрібних геометричних розмірів труб після термічної обробки їх необхідно піддавати калібруванню в стані з 3...5 клітями. У цьому випадку величина сумарної деформації труби по діаметру становить близько  $m_{\Sigma} = 0,8...1,2\%$  при частинних деформаціях  $m_i = 0,1...0,5\%$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ , де  $N$  – порядковий номер кліті за ходом калібрування). За таких незначних обтиснень пружна деформація труби по діаметру є сумарною з пластичною деформацією.

Опір пластичній деформації  $K_f$  матеріалу труби у разі формозміни в гарячому стані за конкретної температури  $t^o$ , швидкості  $u$  і ступеню деформації  $\varepsilon$  визначаємо, використовуючи апроксимуюче рівняння

$$K_f = \left[ 1 - \varepsilon^{n_2} \right]^{\varepsilon - \varepsilon_{\max}} \cdot n_3 \cdot u^{n_4 + n_5 t^o} \cdot \exp \left( n_6 t^o \right), \quad (25)$$

де  $n_1, n_2, \varepsilon_{\max}, n_3, n_4, n_5, n_6$  – емпіричні коефіцієнти, які визначають за методом, захищеним Патентом України № 75304.

Значення модуля пружності матеріалу труби у залежності від температури деформації можна визначити за рівнянням, що апроксимує експериментальні дані, наведені у відомих довідкових джерелах

$$E = \left[ a_1 + a_2 t^o \right] t^o + a_3, \quad (26)$$

де  $a_1, a_2, a_3$  – емпіричні коефіцієнти.

В результаті перетворень отримаємо рівняння, що пов'язує величину пружної деформації  $\varepsilon_y$  з конкретними параметрами формозміни та фізичними властивостями деформованого тіла

$$\varepsilon_y = \frac{\left[ 1 - \varepsilon^{n_2} \right]^{\varepsilon - \varepsilon_{\max}} \cdot n_3 \cdot u^{n_4 + n_5 t^o} \cdot \exp \left( n_6 t^o \right)}{\left[ a_1 + a_2 t^o \right] t^o + a_3}. \quad (27)$$

На рис. 7 показано розраховану за рівнянням (35) залежність пружної деформації  $\varepsilon_y$  (%) від температури  $t^o$  ( $^o C$ ) та швидкості  $u$  ( $\text{сек}^{-1}$ ) деформації для сталі 30ХГСА при  $\varepsilon = 0,03$  ( $n_1 = 5,489$ ;  $n_2 = 0,213$ ;  $n_3 = 3446,714$ ;  $n_4 = 9,777 \cdot 10^{-2}$ ;  $n_5 = 5,56485 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_6 = -3,35011 \cdot 10^{-3}$ ;  $\varepsilon_{\max} = 0,3$ ;  $a_1 = 23,9$ ;  $a_2 = -0,1$ ;  $a_3 = 190790$ ).

Реальні швидкості і температури деформації, які у разі безоправочного калібрування труб у відділеннях термічної обробки дорівнюють  $u = 0,1...1,0 \text{ сек}^{-1}$  і  $t^o = 550...700 \text{ } ^o C$ , є сумарними з частинними деформаціями  $m_i$  труб по діаметру. Сказане також стосується останніх (чистових) клітей калібрувальних і редуційних станів, що працюють в лініях ТПА (тут  $u = 0,5...20 \text{ сек}^{-1}$ ,  $t^o = 780...950 \text{ } ^o C$ ,  $m_i = 0,2...0,5\%$ ).

На підставі аналізу цих розрахунків можна зробити висновок, що врахування пружної деформації труби по діаметру суттєво змінює картину розподілу частинних деформацій по клітках: підвищуються розрахункові значення тиску металу на валки, моменти та потужності прокатки, розрахункові значення середніх діаметрів останніх (чистових) калібрів зменшуються на величину, яка становить 0,16...2,4% від діаметра труби, що є суттєвим для отримання готових труб із допуском по зовнішньому діаметру в межах  $\pm 0,3...0,5\%$ .

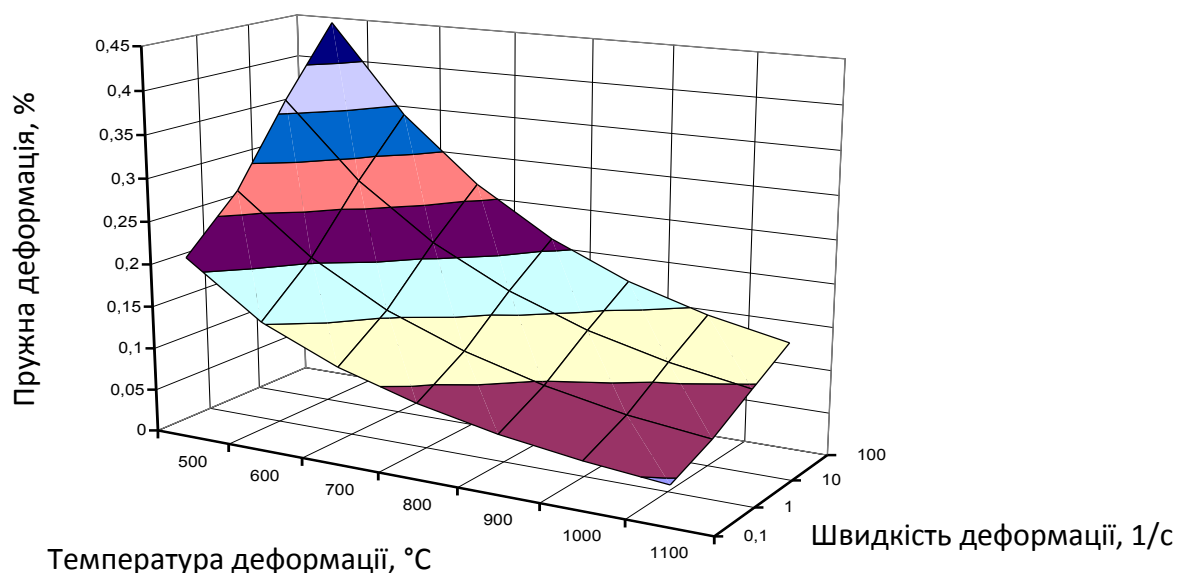


Рис. 7. Залежність  $\varepsilon_y = f(\theta, u)$  для сталі 30ХГСА

З метою визначення впливу запропонованих режимів деформації у разі ББПП на якість труб, були проведені порівняльні дослідження мікроструктури та тонкої структури труб, виготовлених за заводською технологією на ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб».

Металографічний аналіз труб, отриманих за існуючою технологією, показав, що в зонах з максимальною товщиною стінки труби, де деформаційні напруження максимальні, іноді виникають мікротріщини. Дослідження мікроструктури поблизу цих тріщин виявило різнозернистість (рис. 8 а, б). У разі використання запропонованої технології ББПП із суттєвим зменшенням різностінності мікротріщини відсутні.

Дослідження мікроструктури сталей 20, 35ХГСА, 08Х18Н10Т показало достатньо високий рівень структурної однорідності по товщині стінки та діаметру труб. У 1,5...2 рази зменшилися середні розміри зерен фериту та перліту (сталі 20 та 35ХГСА), а також аустеніту (08Х18Н10Т) у порівнянні з трубами, отриманими за заводською технологією.

Вивчення тонкої структури металу труб після калібрування на прикладі аустенітної сталі показало неоднорідний розподіл щільності дислокацій на різних ділянках по периметру труб, отриманих за діючою технологією ББПП: у зоні максимальної товщини стінки труби вона практично на порядок більша аніж у зоні мінімальної товщини стінки труби. Встановлено також, що в зонах з

більшою товщиною стінки формуються комірки субструктури суттєво неоднакових розмірів (рис. 8 в).

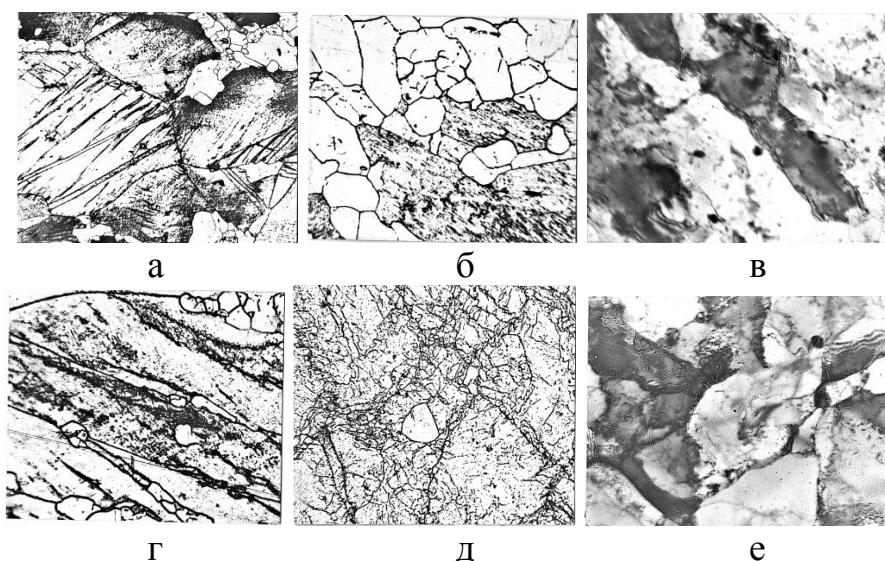


Рис. 8. Мікроструктура і тонка структура сталі 08X18H10T на різних ділянках по периметру труби, отриманої за існуючою технологією (а-в) та запропонованою технологією (г-е); а, б, г, д –  $\times 250$ ; в, е –  $\times 1000$

Дослідження аналогічних процесів в умовах виробництва труб за запропонованою технологією, показало, що по товщині стінки та периметру труб процеси гарячого наклепування та динамічного відновлення структури відбуваються більш рівномірно (рис. 8 г, д). Активний розвиток динамічної полігонізації в трубах із сталі 08X18H10T призвів до формування однорідної полігональної субструктури з рівномірним розподілом розмірів комірок (рис. 8 е), що зазвичай сприяє підвищенню рівня та стабільності фізико-механічних характеристик металу труб.

Перевагою запропонованої технології ББПП є забезпечення стабільних поліпшених механічних властивостей завдяки формуванню по товщині стінки та діаметру труби полігональної субструктури в межах однакових за розміром зерен.

**У п'ятому розділі** викладено результати практичної апробації теоретичних досліджень та практичне впровадження їх на станах поздовжньої безоправочної прокатки в умовах ТПА 30-102 і ТПА 350 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб» і ТПА 140 ВАТ «Інтерпайп НТЗ».

На підставі результатів розрахунків, приведених у розділі 3, було зроблено два практичних висновки щодо розробки нової, відмінної від раніше прийнятої, концепції побудови розрахункових таблиць прокатки у разі ББПП труб. По-перше, під час розробки таблиць прокатки для конкретних типорозмірів труб доцільно спочатку задавати значення показників розширення  $\delta b_i$  в клітях безперервного стана, а овальність  $\lambda_i$  калібрів визначати як функцію від величин частинних деформацій  $\varepsilon_i$  та  $\delta b_i$ . По-друге, величину



овальності  $\lambda_i$  необхідно визначати залежно від технології виготовлення калібрів.

Промислові експерименти з апробації запропонованого методу розрахунку таблиць прокатки (калібрувань валків) здійснювали для станів з тривалковими клітями і калібрами, що нарізують у зібраному стані в умовах 24-клітьового редуційного і 12-клітьового калібрувального станів ТПА 30-102 прокатного цеху ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» та 22-клітьового редуційного і 12-клітьового калібрувального станів ТПА 140 ТПЦ №5 ВАТ «Інтерпайп НТЗ», а також для 5-клітьового калібрувального стана з двовалковими клітями та індивідуально нарізуваними калібрами ТПА 350 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб».

На підставі зроблених вище висновків про доцільність зниження величини  $\delta b_i$ , а також з врахуванням того, що на ТПА 30-102 виробляють як відносно тонкостінні ( $\frac{S_t}{D_t} < 0,1$ ), так і відносно товстостінні ( $\frac{S_t}{D_t} > 0,1$ ) труби, було запропоновано два режими розподілу показників розширення по клітках редуційного стана.

В порівнянні параметрів точності труб у разі прокатки труб на редуційному стані за маршрутом  $D_0 \times S_0 \rightarrow D_t \times S_t = 117,0 \times 3,50 \rightarrow 48,3 \times 3,25$  мм (стандарт DIN 2440) із використанням цехових таблиць прокатки і таблиць прокатки, розрахованих згідно з запропонованим методом, впливає, що за показниками відносної поперечної різностінності і овальності труби, виготовлені з використанням запропонованого калібрування валків, є більш точними, ніж труби, виготовлені з використанням цехових калібрувань. Фактичний розбіг значень товщини стінки (абсолютна поперечна різностінність  $\Delta S_t = S_{t \max} - S_{t \min}$ ) для труб, виготовлених з використанням запропонованого калібрування, у середньому, на 25% менший, ніж для труб, виготовлених з використанням цехового калібрування валків; величина  $M_{B_t}$  математичного очікування (середнього значення) відносної поперечної різностінності  $B_t$  труб, виготовлених з використанням запропонованого калібрування, в 1,46 рази менша, ніж труб, виготовлених з використанням цехового калібрування ( $M_{B_t}'' = 9,6\%$  мм проти  $M_{B_t}' = 14,1\%$ ).

Для запропонованого базового калібрування на ТПА 140 вибрали режим розподілу показників розширення  $\delta b_i$  по клітках стана, при якому величина  $\delta b_i$  в клітках середньої групи знаходиться у межах  $\delta b_i = 6,8 \dots 15,4\%$  (на відміну від  $\delta b_i = 10,8 \dots 19,7\%$  у цеховій калібрівці валків). Виходячи зі встановленого факту щодо позитивного впливу попередньої овалізації заготовок на зниження поперечної різностінності труб, було також запропоновано таке розташування клітей, яке забезпечує додаткову овалізацію (без деформації по діаметру) в клітках головної групи стана.

Промислова апробація запропонованих калібрувань показала, що точність труб, виготовлених із використанням їх, за показниками відносної поперечної різностінності і овальності перевершує точність труб, виготовлених з

використанням цехового калібрування валків. Зафіксовані в ході порівнювальних експериментальних прокаток значення відносного зниження величини  $M_{B_t}$  коливаються у межах  $\overline{M}_{B_t} = 1,10 \dots 1,45$ ).

Нові режими деформації і калібрування валків пройшли успішну апробацію у виробничих умовах ТПА 350. Так, наприклад, під час прокатки дослідно-промислової партії обсадних труб за стандартом API Spec. 5CT номінальним розміром 244,48x11,99 мм (заготовка 255x12 мм, матеріал – сталь 32Г2, об'єм партії 1415,4 т) було зафіксовано зниження фактичного витратного коефіцієнта металу на 3,4% по відношенню до величини, що має місце у виробництві труб того ж сортаменту з використанням цехової таблиці прокатки.

У зв'язку з необхідністю опанування виробництва муфтової заготовки (труб розміром  $D_t \times S_t = 57 \dots 114 \times 8,5 \dots 18,0$  мм з відношенням товщини стінки до зовнішнього діаметра, що дорівнює  $\frac{S_t}{D_t} = 0,15 \dots 0,25$ ), для виробництва

різбових з'єднань типу UPJ в умовах ТОВ «Інтерпайп Ніко Тюб» виникла потреба у розширенні сортаменту труб, що виробляють на ТПА 30-102 з безперервним станом, у бік більш товстих стінок (до  $S_t = 18$  мм).

Виходячи з того, що за проектом обладнання ТПА 30-102 (у тому числі – редуційний та калібрувальний стани) було розраховано на виготовлення труб з товщиною стінки не більше 8,0 мм, розширення номенклатури продукції потребувало оцінювання можливості її виготовлення без ризику несправностей обладнання та ушкодження елементів приводу. Для вирішення цієї технічної задачі були розраховані граничні (пікові) значення тиску металу на валки і моменти прокатки у разі виготовлення муфтової заготовки з використанням 24-клітьового редуційного та 12-клітьового калібрувального станів. Метою розрахунків був вибір такого деформаційно-швидкісного режиму прокатування, за якого граничні значення тиску ( $P_{\max}$ ) і момента ( $M_{\max}$ ) не перевищать припустимих, при умовах безпечної експлуатації обладнання, значень: граничний тиск має не перевищувати 118 КН; граничний момент – не перевищувати 19,6 КН·м.

Розрахунки пікових навантажень на валки виконували згідно з розробленими моделями, наведеними у розділі 4.

В результаті були рекомендовані до впровадження і прийняті для практичного використання такі параметри можливого для виготовлення на ТПА 30-102 сортаменту муфтової заготовки: для труб діаметром  $D_t = 57,0$  мм, що виробляють з використанням редуційного стана, максимальна товщина стінки має не перевищувати величини  $S_t = 8,5$  мм; для труб діаметром  $D_t = 73,0 \dots 114,1$  мм, які виробляють з використанням калібрувального стана, максимальна товщина стінки має не перевищувати величини  $S_t = 14,0$  мм.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено теоретичні узагальнення і нові рішення науково-технічної проблеми, які полягають у розвитку теорії і технологій виготовлення труб на станах безоправочної поздовжньої прокатки різних конструкцій, у науковому обґрунтуванні нових методів комплексного визначення параметрів деформації з врахуванням впливу стадій процесу, типів калібрів, температури деформації, реологічних властивостей матеріалу, у розробленні та впровадженні раціональних деформаційно-швидкісних режимів, що забезпечують зростання ефективності процесу за рахунок розширення сортаменту продукції, підвищення точності геометричних розмірів і зниження витрат металу.

1. На основі аналізу науково-технічної літератури показано, що дослідження, спрямовані на теоретичне обґрунтування, розробка і впровадження удосконалених деформаційно-швидкісних режимів ББПП труб, що забезпечують зростання ефективності технології за рахунок підвищення точності і розширення сортаменту продукції, є актуальними.

2. Розроблено математичну модель, що описує закономірності взаємозв'язку параметрів деформації (відносне обтиснення по діаметру, показник розширення) і калібрування інструменту (середній діаметр калібру, його висота, ширина, овальність) для різних технологій нарізання калібрів (індивідуальне нарізання на кожному валку і одночасне нарізання на валках, встановлених у кліть).

На базі встановлених закономірностей обґрунтовано ефективність способів ББПП труб, в яких режими деформації встановлюють залежно від технології нарізання калібрів (патент України №73440 і патент України №77138).

3. Розроблено математичну модель ББПП труб в багатоклітьовому стані з індивідуальним приводом валків, яка встановлює взаємозв'язок параметрів в кожній  $i$ -тій кліті стана (швидкості обертання валків  $n_{bi}$ , коефіцієнтів випередження  $K_i^+$ , коефіцієнтів переднього пластичного натягу  $Z_{ni}$ , товщини стінок  $S_i$ ) з врахуванням можливості пробуксування валків по поверхні металу в сталих та несталих стадіях процесу.

Це дозволило підвищити достовірність розрахункових даних про швидкісні режими безперервної прокатки і визначити граничні значення середніх по стану значень коефіцієнтів пластичного натягу  $Z_{cp}$ , при яких прокатка здійснюється без пробуксування валків по поверхні металу.

Використання розробленої математичної моделі дало можливість теоретично обґрунтувати розширення сортаменту ТПА 30-102 до типорозмірів труб з товщиною стінки, що в 1,2...1,75 рази перевищує проектні значення.

4. Удосконалено метод аналізу закономірностей формування поперечної різностінності труб при ББПП, що дозволило розробити математичну модель, результати реалізації якої показали, що можливим шляхом зниження наведеної поперечної різностінності труб є використання калібрувань валків з параметрами, розрахованими за методом, в якому, як початково заданий

параметр використовується закон розподілу показників розширення  $\delta b_i$  по клітках стана.

У разі використання таблиць прокатки, розрахованих з використанням запропонованого методу, відносна поперечна різностінність труб знижується (залежно від типорозміру прокатаних труб) в 1,12...2,45 рази на ТПА 30-102 та в 1,10...1,45 рази на ТПА 140; відносне зниження витратного коефіцієнта металу на ТПА 350 становить 3,4%.

5. Удосконалено метод аналітичного визначення величини зміна середньої товщини стінки заготовки  $\Delta S$  під час безоправочного обтиснення труб по діаметру. Використання удосконаленого методу визначення величини  $\Delta S$  дозволило підвищити достовірність прогнозованого з використанням розроблених математичних моделей рівня відносної поперечної різностінності труб  $B_t$ .

6. Удосконалено метод аналітичного визначення довжини осередку деформації  $L$  та площі контакту металу з валком  $F_n$ , що дозволило розробити математичну модель для розрахунку тиску металу на валки  $P_i$  та моменту прокатки  $M_i$  з достатнім для практичного використання рівнем адекватності реальному процесу.

7. Визначено нові закономірності процесу безоправочної поздовжньої прокатки труб, які мають універсальний характер і можуть бути використані для дослідження процесу деформації труб із різних матеріалів на діючих калібрувальних та редуційних станах різних типів при різних температурах та частинних деформаціях з метою визначення раціональних параметрів процесу, розширення сортаменту, підвищення точності і зниження металоємності труб.

8. Результати роботи апробовано та впроваджено на сортаменті прокатаних труб в умовах калібрувального та редуційного станів ТПА 30-102 та калібрувального стана ТПА 350 ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб» та редуційного стана ТПА 140 ВАТ «Інтерпайп НТЗ».

9. На базі отриманих фактичних результатів з підвищення точності труб та зниження витратного коефіцієнта металу від впровадження розробки нових та удосконалених відомих закономірностей процесу безоправочної поздовжньої прокатки для станів різних типів можна зробити обґрунтований прогноз, що на діючих ТПА можна реально підвищити точність труб по діаметру, овальності та товщині стінки до рівня сучасних вимог споживачів та покращити металовикористання на 6...8 кг/т.

### **Основний зміст дисертації опублікований у роботах:**

1. Гуляев Ю.Г. Стальные трубы. Изготовление, применение, сортамент. Справочник / Ю.Г. Гуляев, В.М. Друян, Е.И. Шифрин. – Днепропетровск: Днепр-Вал, 2002. – 350 с.

2. Gulyayev Yu.G. The modern trends of development of the pipe and tube industry / Yu.G. Gulyayev, Ye.I. Shyfrin, Ilija Mamuzic, D.Yu. Garmashev, N.A. Maximova // Metalurgija. – 2010. – № 3(49). – P. 187-190.

3. Гуляев Ю.Г. Актуальные проблемы и тенденции развития трубного производства / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Коряка // Черные металлы. – 2010. – №3. – С.8-13.

4. Шифрин Е.И. Анализ параметров продольной безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом / Е.И. Шифрин // Сталь. – 2008. – № 3. – С.62-65.

5. Гуляев Ю.Г. Математическая модель процесса непрерывной безоправочной продольной прокатки труб в стане с индивидуальным приводом / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.Ю. Квитка // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 3. – С. 66-74.

6. Гуляев Ю.Г. Теоретический анализ параметров непрерывной продольной безоправочной прокатки труб на станах с дифференциально-групповым приводом / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.Ю. Квитка // Теория и практика металлургии. – 2007 – № 4-5. – С. 115-123.

7. Патент 77136 Україна МПК (2006) В21В 17/14 Спосіб прокатки труб у багатоклітьовому редуційному стані. А.І. Козловський, Ю.Г. Гуляев, Є.І. Шифрін та ін. Бюл. № 10 – 4с.

8. Шифрин Е.И. Основные проблемы повышения эффективности производства труб / Е.И. Шифрин // В сб. «Сучасні проблеми металургії». Наукові вісті.– Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ. – 2005. – С. 372-374.

9. Козловский А.И. Повышение эффективности производства труб / А.И. Козловский, Е.И. Шифрин, Ю.Г. Гуляев // В сб. трудов международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании». – Варна, Болгария. – 2005. – С.78-80.

10. Шифрин Е.И. Состояние и основные направления развития трубного производства России /Е.И. Шифрин // В сб. «Сучасні проблеми металургії». Наукові вісті. Том 11. – Нікополь. – 2008. – С. 228-235.

11. Клачков А.А. Текущее состояние российской трубной отрасли. Развитие ПАО «ТМК» – ведущего производителя труб / А.А. Клачков, Е.И. Шифрин, И.И. Лубе // Труды X Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. – М.: Ваш формат, 2015. – С. 26-35.

12. Кузнецов Е.Д. О проблеме повышения точности бесшовных труб, изготавливаемых на ОАО «НТЗ» / Е.Д. Кузнецов, Е.И. Шифрин, В.Л. Мережко, А.П. Тимощенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 30-34.

13. Гуляев Ю.Г. Актуальные проблемы и тенденции развития трубного производства. / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Коряка // Металлургический компас. – 2009. – №11. – С.27-32.

14. Гуляев Ю.Г. Анализ условий энергопотребления при горячей прокатке труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, М.А. Гроденский и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 22-24

15. Сокуренок В.П. Пути снижения расходных коэффициентов металла при производстве горячедеформированных труб за счет управления точностью прокатки в цехах ОАО «НТЗ» / В.П. Сокуренок, В.М. Фридман, Е.И. Шифрин,

Ю.А. Гасис и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 5. – С. 44-52.

16. Козловский А.И. Некоторые проблемы повышения эффективности производства труб / А.И. Козловский, Е.И. Шифрин, Ю.Г. Гуляев // *Теория и практика металлургии*. – 2004. – № 5. – С. 38-41.

17. Gulyaev G.I. The Mathematical Model of Formation of the cross-sectional Wall Thickness Nonuniformity during Longitudinal Plugless Tube Rolling. / G.I. Gulyaev, Yu.G. Gulyaev, Ye.I. Shyfrin, N.Y. Kvitka, K. Sawamiphakdi // *Material science & Technology Conference Proceedings, AIST/TMS*. – Pittsburgh, Pa. – 2005. – P.15-25.

18. Гуляев Ю.Г. Анализ изменения средней толщины стенки при продольной безоправочной прокатке труб с натяжением и контактным трением / Ю.Г. Гуляев, Г.И. Гуляев, В.М. Друян, Е.И. Шифрин и др. // *Теория и практика металлургии*. – 2004. – № 2. – С. 30-36.

19. Гуляев Ю.Г. Математическая модель изменения средней толщины стенки при безоправочной прокатке труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, С.А. Чукмасов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 5. – С. 38-43.

20. Гуляев Ю.Г. Расчет изменения средней толщины стенки при продольной безоправочной прокатке труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин // *Теория и практика металлургии*. – 2017. – № 1–2. – С.114-119.

21. Гуляев Ю.Г. Математическая модель непрерывной безоправочной продольной прокатки труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.Ю. Квитка // *Теория и практика металлургии*. – 2006. – №6. – С.63-70.

22. Gulyaev G.I. Optimization of the Roll Design Parameters and Deformation Schedules in the Continuous, Plugless Tube Rolling Process. / G.I. Gulyaev, Ye.I. Shyfrin, Yu.G. Gulyaev, N.Y. Kvitka, C.V. Darragh// *Iron & Steel Technology Conference Proceedings. AISTTech. 2006. Cleveland, Ohio, USA*. – Vol. I. – May 1–4, 2006. – P. 179-186,

23. Козловский А.И. Трубная промышленность Украины. Краткий анализ рынка трубной продукции / А.И. Козловский, Е.И. Шифрин // В кн. *Металургійна наука підприємствам Придніпров'я. Збірник наукових праць. «Системні технології»* – Дніпропетровськ, – 2004. – С.89-94.

24. Шифрин Е.И. Развитие способов горячей прокатки труб / Е.И. Шифрин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 41-47.

25. Шифрин Е.И. Развитие способов горячей прокатки труб / Е.И. Шифрин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – №2. – С. 50-55.

26. Gulyaev G.I. Procedure for the Determination of a Maximum Rolling Pressure in the Continuous Plugless Tube Rolling Process. / G.I. Gulyaev, Ye.I. Shyfrin, Yu.G. Gulyaev, N.Y. Kvitka, C.V. Darragh // *The International Conference on New Developments in Long and Forged Products: Metallurgy and Applications. Winter Park, Colorado, USA*. – June 4–7, 2006. – P. 127-132.

27. Патент 73440 Україна МПК (2005) B21B 17/14. Спосіб безправочної безперервної поздовжньої прокатки труб у багатоклітьовому стані. А.І. Козловський, Ю.Г. Гуляев, Є.І. Шифрін та ін. Бюл. № 7–8 с.

28. Патент 77138 Україна МПК (2006) B21B 17/14 Спосіб безперервної безправочної поздовжньої прокатки труб у багатоклітьовому стані. А.І. Козловський, Ю.Г. Гуляев, Є.І. Шифрін та ін. Бюл. № 10 – 5с.

29. Гуляев Ю.Г. Анализ условий безправочной прокатки труб на станах с дифференциально–групповым приводом / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, В.И. Лозовой и др. / В сб. «Сучасні проблеми металургії». Наукові вісті. – Том 11. – Нікополь. – 2008. – С. 92–100.

30. Шифрин Е.И. Методика расчета энергосиловых параметров непрерывной безправочной прокатки труб /Е.И. Шифрин // Сталь. – 2007. – №1. – С.60-61.

31. Марченко Л.Г. Математическая модель процесса непрерывной безправочной продольной прокатки труб / Л.Г. Марченко, Е.И. Шифрин, Ю.Г. Гуляев // Сталь. – 2007. – № 8. – С.84-87.

32. Гуляев Ю.Г. К вопросу теоретического обоснования межклетьевого натяжения – подпора при непрерывной прокатке / Ю.Г. Гуляев, Г.И Гуляев, В.Н. Данченко, Е.И. Шифрин // Сталь. – 2011. – № 4. – С. 50-52.

33. Патент 75304 Україна МПК (2006) G01N 3/00 Спосіб визначення опору деформації твердих матеріалів. А.І. Козловський, Ю.Г. Гуляев, Є.І. Шифрін та ін. Заявл. 13.06.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюл. №3. – 12 с.

34. Патент 82971 Україна МПК (2008) B21B 17/00 Спосіб безперервної безправочної поздовжньої прокатки труб у багатоклітьовому стані. Ю.Г.Гуляев, Є.І.Шифрін, Б.Г.Павловський та ін. Бюл. № 10 – 10с.

35. Gulyayev Yu.G. A Mathematical Model for the Stationary Process of Rolling of Tubes on A'Continuous Mill. «Materials and technology». / Yu.G. Gulyayev, Ye.I. Shyfrin, Ilija Mamuzic. – 2009 – № 2(42). – P. 63-67.

36. Gulyayev Yu.G. Perfection Of Processes Of Seamless Steel Tubes Production. / Yu.G. Gulyayev, Ye.I. Shyfrin, Ilija Mamuzic, M. Bursak, D.Yu. Garmashev// Metalurgija. – 2011. – № 4(50). – P.285-288.

37. Шифрин Е.И. Теоретический анализ условий формирования поперечной разностенности труб при продольной безправочной прокатке. /Е.И. Шифрин, Н.Ю. Квитка, С.А. Чукмасов, Н.В. Гопайца // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 6. – С. 25-31.

38. Гуляев Ю.Г. Методика расчета параметров безправочной прокатки труб с учетом упругой деформации / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Максимова-Гуляева, Н.Ю. Квитка // Металлург. – 2008. – № 3. – С. 62-65.

39. Гуляев Ю.Г. Влияние упругой деформации по диаметру труб (упругой отдачи) на расчет параметров калибровки валков в непрерывных станах безправочной прокатки труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – № 4. – С.30-33.

40. Gulyaev G.I. Analysis of Variation of the Mean Wall Thickness in Stretch Reduced Tubes. / G.I. Gulyaev, Y.G. Gulyaev, Ye.I. Shyfrin, N.Y. Kvitka,

K. Sawamiphakdi// Material Science & Technology 2004 Conference Proceedings. New Orleans, Louisiana, USA. – September 26–29, 2004. – Vol. I – P. 257-273.

41. Gulyayev Yu.G. Method of calculating the speed regime for continuous pipe rolling. / Yu.G. Gulyayev, Ye.I. Shyfrin// Metallurgist. – 2014. – Vol. 57. – P. 904-910.

42. Gulyaev Yuriy. Optimization of the roll pass design for continuous longitudinal tube rolling. /Yuuiy Gulyev, Yevgeny Shifrin, Nataliia Koriaka// ITATube Journal. – 2017. – № 4. – P. 16-21.

43. Гуляев Ю.Г. Сопоставление результатов решения различными методами задачи об осадке плоской полосы шероховатыми плитами. /Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов, Е.И. Шифрин и др.// В сб. «Сучасні проблеми металургії». Наукові вісті.– Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ. – 2005. – С. 110-113.

44. Гуляев Ю.Г. Повышение эффективности процесса редуцирования за счет уменьшения длины утолщенных концов и концевой обрезки труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин // «Пластическая деформация металлов», Коллективная монография под редакцией проф. Я.В. Фролова. – Днепр: Акцент ПП, 2017. – С.172–178. – 290 С.

45. Ващенко А.К. Применение режима падающих обжатий при калибровке труб на многоклетьевом редуциционно-калибровочном стане / А.К. Ващенко, Е.И. Шифрин, А.В. Белая, и др. // Черная металлургия. Ин-т Черметинформация. Вып. НТИ. – 1984. – № 22 (978). – С. 54-55.

46. Шифрин Е.И. Разработка математической модели стационарного процесса прокатки труб в непрерывном редуциционном стане / Е.И. Шифрин, Ю.Г. Гуляев / Сборник трудов Международной конференции «Трубы – Украина 2007». – Днепропетровск, 2007. – С.21-30.

47. Шифрин Е.И. Развитие технологий производства бесшовных горячедеформированных труб на ТПА с непрерывными станами на заводах Группы ТМК. /Е.И. Шифрин, И.И. Лубе // Труды X Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. – М.: Ваш формат. – 2015. – С.159-166.

48. Гуляев Ю.Г. Расчет усилия и момента при непрерывной продольной безоправочной прокатке труб / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, С.А. Чукмасов и др. // Теория и практика металлургии. – 2006. – № 3. – С.91-95.

49. Шифрин Е.И. Методика расчета скоростного режима при непрерывной прокатке труб / Е.И. Шифрин, Ю.Г. Гуляев // Металлург. – 2013. – № 10. – С. 51-55.

50. Гуляев Ю.Г. Методика расчета параметров безоправочной прокатки труб. /Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Н.А. Максимова-Гуляева, Н.Ю. Квитка // Теория и практика металлургии. – 2008. – № 1. – С. 46-48.

51. Гуляев Ю.Г. Интерпретация метода баланса работ при определении силовых параметров прокатки. /Ю.Г.Гуляев, Е.И.Шифрин, Я.В.Фролов, О.А.Ремез// Вісник НТУ «ХП», Серія: Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: «ХП», 2017, - № 43(1265). – С. 72-85.



## АНОТАЦІЯ

*Шифрін Є.І. Розвиток теорії та технологій безперервної безоправочної прокатки на основі комплексного врахування факторів, що зумовлюють їх якість. – Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05. – Процеси та машини обробки тиском. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2018.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми, що полягає в розробленні теорії та технології, яка включає комплекс раціональних параметрів процесу безперервного безоправочної поздовжньої прокатки труб на станах різних типів шляхом теоретичних та експериментальних досліджень процесу формозміни металу з врахуванням максимально кількості факторів, які впливають на стабільність процесу деформації. Це дозволяє одержувати трубну продукцію з жорсткими характеристиками точності та якості, зменшуючи її металоємність, розширювати сортамент діючих агрегатів.

Для розрахунку раціональних калібрувань валків та режимів деформації на безперервних станах безоправочної поздовжньої прокатки труб різних типів розроблено теоретичні методи дослідження процесів формозміни, які враховують комплексний вплив на технологічні можливості станів, точність діаметру й товщини стінки труб, структуру металу, а також на витрати металу таких факторів, як реологічні властивості матеріалу, технологія нарізання калібрів, кількість валків у робочій клітці, кількість клітей та їхній взаємний вплив на процес, тип руху, наявність нестационарних і стаціонарної стадій процесу, пробуксування валків по металу, пружної деформації та інших. За результатами проведених досліджень розроблено раціональні калібрування валків, режими деформації та побудовано таблиці прокатки для поздовжніх безоправочних станів різних типів, що забезпечує 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.

Досліджено вплив поперечної різностінності на макроструктуру, мікроструктуру и тонку структуру труб із різних сталей. Встановлено, що підвищення точності труб по товщині стінки та діаметру поліпшує структурні характеристики металу та зменшує вірогідність утворення дефектів.

Ключові слова: безперервна безоправочна поздовжня прокатка, пружна деформація, різностінність, формозміна, структура металу труб.

## АННОТАЦИЯ

*Шифрин Е.И. Развитие теории и технологий непрерывной безоправочной прокатки на основе комплексного учета факторов, влияющих на их качество. – Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05. – Процессы и машины обработки давлением. – Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2018.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы, которая заключается в разработке теории и технологии, процесса непрерывной продольной безоправочной прокатки труб на станах различного типа, путем теоретических и экспериментальных исследований процесса формоизменения металла с учетом максимально возможного количества факторов, влияющих на стабильность процесса деформации, что дает возможность получения трубной продукции с ужесточенными характеристиками точности и качества, расширения сортамента действующих агрегатов и снижения металлоемкости.

В результате проведенного теоретического анализа и экспериментальных исследований установлено влияние упругой деформации при пластической деформации трубы из разных сталей в процессе непрерывной безоправочной прокатки, что особенно важно для моделирования процесса при пониженных температурах и малых скоростях деформации.

Получил дальнейшее развитие метод аналитического определения величины изменения средней толщины стенки заготовки при безоправочном обжатии по диаметру. Усовершенствованный метод позволяет с высокой степенью достоверности анализировать характер влияния и уровень воздействия степени деформации, тонкостенности заготовки, параметров контактного взаимодействия (коэффициент трения), внешнего воздействия (коэффициент пластического натяжения) и механических свойств деформируемого материала на изменение средней толщины стенки и прогнозировать уровень относительной поперечной разностенности.

Уточнена методика аналитического определения площади контакта.

Экспериментально исследовано влияние поперечной разностенности на макроструктуру, микроструктуру и тонкую структуру труб из различных сталей. Установлено, что повышение точности труб по толщине стенки и диаметру улучшает структурные характеристики металла и снижает вероятность образования дефектов.

Ключевые слова: непрерывная продольная безоправочная прокатка, упругая деформация, разностенность, формоизменение, структура металла труб.

**ABSTRACT**

*Shyfrin Ye.I. The development of the scientific fundamentals and technologies of continuous plugless rolling on the basis of the complex due regard for the factors influencing the accuracy of the hot–deformed tubes. – Manuscript.*

Thesis for competition of the scientific degree of the doctor in engineering sciences in the specialty 05.03.05. – Processes and machines for plastic metal forming. – The National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

The thesis is aimed at the solution of important scientific and technical problem, which consists in development of the complex of rational parameters for the process of continuous lengthwise plugless tube rolling in the mills of different type by the way of theoretical and experimental investigations of the process of metal form changing taking into account the maximum possible number of factors influencing the stability of deformation process, what allows obtaining of tube products with strict characteristics of accuracy and quality, expanding the range of working assemblies and decreasing the metal content.

The methods of analytic research in the form changing had been developed for calculating the rational roll pass designs and schedules of deformation in different type continuous mills of the lengthwise plugless rolling. Presented methods take into account the influence on technological potentialities of mills, on accuracy of diameter and tube wall thickness as well as metal expenditure on the part of such factors as technology of grooves cutting, number of rolls in the working stand, number of stands and their interaction on the process, type of motion, presence of non–stationary and stationary stages of the process, skidding of rolls on metal and so on. Results of investigations, which had been carried out served for development of the basis for creation of the rational roll pass designs, schedules of deformation and constructing the tables of rolling for lengthwise plugless mills of different types, what ensures assortment expanding and raising the competition capacity of tubes.

Recommendations have been developed as to creation of the improved technological processes of grooving and reducing tubes for mills, which had been in exploitation for a long time and are not in the position to compete with modern tube rolling assemblies.

The key words: continuous lengthwise plugless rolling, elastic deformation, tube wall thickness deviation, form changing, microstructure