

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МІЩЕНКО ОЛЕКСІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.774.36

Розвиток наукових основ методу прогнозування кінцевої поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрохідній холодній прокатці для забезпечення регламентованої точності

Спеціальність 05.03.05
"Процеси та машини обробки тиском"

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Григоренко Володимир Устинович доктор
технічних наук, професор

Дніпро – 2018

АНОТАЦІЯ

Міщенко О.В. Розвиток наукових основ методу прогнозування кінцевої поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрохідній холодній прокатці для забезпечення регламентованої точності. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертації наведені теоретичний аналіз і нове розв'язання науково-прикладної задачі, що полягає у розвитку наукових основ, створенні та впровадженні розвиненого методу прогнозування поперечної різностінності труб при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану для забезпечення регламентованої точності та мінімізації витрат металу.

Аналіз літературних джерел показав, що не існує аналітичного методу прогнозування поперечної різностінності труб при холодній багатопрохідній прокатці труб зі сплавів на основі титану, особливістю якої є те, що процес виконують так, що деформація відбувається в основному на оправці. На практиці застосовують дані, що отримані в результаті багаторічного досвіду.

Для прогнозування зміни ексцентричної різностінності при багатопрохідній прокатці труб регламентованої точності потрібно мати аналітичний метод прогнозування, який інтегровано до загального комплексу розрахунку режимів деформації. Такий метод дозволить на етапі розробки багатопрохідного маршруту аналізувати різностінність та приймати рішення про застосування заготовки з певною різностінністю для виробництва труб.

Показано, на основі отриманих в роботі експериментальних даних та літературного огляду, що при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану у разі застосування заготовки отриманої після стану поперечно-гвинтової прокатки поперечна різностінність має ексцентричний характер, а симетрична складова незначна.

Обґрунтована і розроблена в роботі методика досліджень для вирішення поставленої науково-практичної задачі складається з:

- аналітичного опису механізму зменшення ексцентричної різностінності;
- розрахункового аналізу деформування різнотовщинних зразків між трьома плитами в умовах, близьких до деформацій на станах ХПТ та ХПТР за допомогою програми скінченно-елементного моделювання;
- лабораторного експерименту по обтисненню двох зразків різної товщини між трьома плитами з розмірами та параметрами деформування ідентичними розрахунковому аналізу;
- прямих експериментальних дослідженнях зміни поперечної різностінності по довжині зони обтиску стінки робочого конуса промислових станів ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32 та ХПТР 15-30;
- розвитку методу прогнозування остаточної поперечної різностінності при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану на базі використання результатів виконаних досліджень.

З аналітичного опису механізму зміни різностінності показано, що у разі обтисків товстої і тонкої стінок у вершинах калібрів станів холодної прокатки товста стінка отримує більший обтиск по причині більшого наклепу тонкої стінки, що приводить до зменшення поперечної різностінності труб.

Для одержання виразів, що описують процес зміни поперечної різностінності при деформуванні протилежних товстої і тонкої стінок у вершинах калібрів був застосований розрахунковий аналіз на базі скінченно-елементного моделювання. Одержано математичний вираз, що враховує початкове значення поперечної різностінності, величини деформації та параметри наклепу металу.

Цей вираз покладено в основу аналітичних розрахунків при прогнозуванні поперечної різностінності після деформування в станах холодної прокатки труб.

Проведений лабораторний експеримент, при ідентичних з розрахунковим аналізом параметрах деформування, показав адаптивність отриманого аналітичного методу для визначення поперечної різностінності прокатаних труб.

Результати проведених прямих експериментальних досліджень зміни поперечної різностінності по довжині зони обтиску стінки робочого конуса промислових станів ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32 та ХПТР 15-30 показали, що вони близькі до тих, що були одержані при розрахунковому аналізі та при лабораторному експерименті. Це показало, що висунуті теоретичні положення і результати розрахункового аналізу по зменшенню ексцентричної різностінності підтверджуються на практиці.

Отримані вирази, що аналітично описують зміну поперечної різностінності по довжині зони обтиску стінки з урахуванням початкового значення поперечної різностінності, величини деформації та параметрів наклепу металу, покладені в основу залежності, що описує зміну поперечної різностінності для умов багатопрхідної прокатки.

На базі одержаних результатів розроблено програмний продукт «ХПТ, ХПТР прогноз різностінності», що дозволяє визначати значення остаточної поперечної різностінності після кожного проходу на станах ХПТ, ХПТР при багатопрхідній прокатці та оцінювати і при необхідності корегувати деформаційні параметри і одержувати прогнозовані геометричні параметри труб зі сплавів на основі титану.

Це дозволяє проектувати остаточну поперечну різностінність труб в технології виробництва труб зі сплавів на основі титану та мінімізувати витрати металу, енергозатрати та трудомісткість.

Результати проведених наукових досліджень, що стосуються прогнозування зміни поперечної різностінності при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану, впроваджені та застосовуються для виробництва труб за стандартами DIN 17849, DIN 17850, DIN 17861, ОСТ1.90065, AMS 4946С та ін., при проектуванні технологій прокатки на станах ХПТ та ХПТР підприємством ТОВ «ВСМПО ТИТАН УКРАЇНА» та дають можливість зменшити час налаштування технології (акт від 12.04.2015 р.) та використовуються викладачами кафедри теорії, технології і автоматизації металургійних процесів при підготовці та викладанні навчальних курсів лекцій з

дисциплін: «Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском»; «Технологічні процеси трубного виробництва» для студентів напряму 6.050401 та спеціальності 7.05040104 «Обробка металів тиском», а також при виконанні студентами дипломних проектів, випускних робіт бакалаврів і курсових науково-дослідних робіт (довідка від 10.04.2016 р.).

Ключові слова: холодна прокатка, ХПТ, ХПТР, труби, титан, прогнозування різностінності.

Mishchenko O.V. Development of the scientific fundamentals of the method for predicting the finite cross wall thickness deviation for tubes of alloys on the base of titanium at the many-pass cold rolling for ensuring the regulated accuracy. Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for competition of the scientific degree of the candidate in engineering sciences (Physician Doctor) in the specialty 05.03.05 “Processes and machines of metal forming”. – The National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, 2017.

Thesis presents the theoretical analysis and a new solution of the scientific and applied problem, which consists in development of scientific fundamentals, creation and introduction of the developed method for predicting the cross wall thickness deviation of tubes at the cold rolling of tubes of alloys on the base of titanium for securing the regulated accuracy and minimizing metal consumption

Analysis of the literary sources showed that there is not any analytical method for predicting the cross wall thickness deviation at the cold many-pass rolling of tubes of alloys on the base of titanium. The particularity of this kind of rolling consists in the fact that the process of rolling is performed in such way that deformation takes place in the main notion the mandrel. In practice, we have to do with data obtained as a result of many-year experience.

For predicting the change of eccentric wall thickness deviation at the many-pass rolling of tubes with the necessary regulated accuracy, it is necessary to have a flexible analytical method of prediction integrated into the general complex of calculations for determining the schedules of deformation. Already on the stage of

developing the many-pass route, such method will allow analysing the wall thickness deviation and making decision as to using the billet with a certain wall thickness deviation for manufacturing tubes.

Basing on experimental data obtained in the work, it was showed that at the cold rolling of alloys on the base of titanium, in the case of using the billet got after the cross-screw rolling mill the cross wall thickness deviation has eccentric character, and symmetrical component is insignificant.

The procedure of investigation for solution of the stated scientific and practical problem, which is substantiated and developed in the present work, includes the following:

- analytical description of the mechanism of decreasing the eccentric wall thickness deviation;
- design-basis (calculating) analysis of deforming by means of programs of the finite element simulation;
- laboratory experiment in reduction of two samples of different thickness between 3 plates with dimensions and parameters of deforming identical to design-basis (calculating) analysis;
- direct experimental investigations of the change of the cross wall thickness deviation along the length of zone of reducing the wall of the working cone in industrial mills CTR-75, CTR-55, CTR-32 and CTRR 15-30;
- development of prediction of the finite cross wall thickness deviation at the cold rolling of tubes of alloys on the base of titanium using results of investigations carried out by the author.

The analytical description showed that in the case of reducing the thick and the thin wall at the tops of grooves in the cold rolling mills the thick wall gets greater reduction because of the greater hardening of the thin wall what leads to decreasing the cross wall thickness deviation in tubes to be rolled.

The potentialities of design-basis analysis on the base of finite element simulation have been used for obtaining expressions, which describe the process of changing the cross wall thickness deviation while deforming opposite thick and thin

walls at the tops of grooves. The mathematical expression had been obtained taking into account the initial value of the cross wall thickness deviation, value of deformation and parameters of metal hardening. This expression had been assumed as a basis for analytical calculations while predicting the cross wall thickness deviation after deforming in the mills of the cold tube rolling.

The laboratory experiment, which had been carried out with the parameters of deforming identical to design–basis analysis, showed the adequacy of the obtained analytical apparatus for determination of the wall thickness deviation in tubes to be rolled.

The results of the direct experimental investigations carried out in the work as to changing the cross wall thickness deviation along the length of zone of reducing the wall of the working cone in industrial mills CTR–75, CTR–55, CTR–32 and CTRR 15–30, were identical to those obtained by the way of design–basis analysis and laboratory experiment. It shows that the advanced theoretical statements and results of the design–basis analysis as to decreasing the eccentric wall thickness deviation are corroborated in practice.

The obtained expressions, which describe analytically the change of the wall thickness deviation along the length of zone of reducing the wall and take into account the initial value of the cross wall thickness deviation, the value of deformation and parameters of metal hardening, are assumed as the basis of dependence describing the change of the wall thickness deviation for conditions of the many–pass rolling.

The obtained results served as the basis for developing the program “CTR, CTRR prediction of the wall thickness deviation, which allows determining the value of the finite cross wall thickness deviation after each pass in mills CTR, CTRR at the many–pass rolling, assessing and, in the case of need, correcting parameters of deformation at the cold rolling of tubes of alloys on the base of titanium and obtaining the predicted geometrical parameters of tubes.

This allows predicting residual cross wall thickness deviation in technology of manufacturing tubes of alloys on the base of titanium and minimizing metal consumption, energy expenditures and labor content.

Results of the scientific investigations concerning prediction of the change of the cross wall thickness deviation at the cold rolling of tubes of alloys on the base of titanium have been implemented by the “VSMPO TITAN UKRANE” to be introduced into existing technology of developing the routes for manufacturing tubes. (Act from the 12.04.2015). They are also used by teachers in the department of “Theory, Technology and Automation of Metallurgical Processes” while preparing and teaching the lectural courses from branches of science “Theoretical investigations of metal forming processes”; “Technological processes of tube manufacturing” and carrying out the diploma projects, graduating works for students bachelors and the course scientific and research works (certificate from the 10.04.2016).

Key words: cold rolling, CTR mills, CTRR mills, tubes, titanium, prediction of wall thickness deviation.

Список публікацій здобувача

1. Міщенко О.В. Дослідження зміни різностінності при прокатці тонкостінних труб на станах ХПТР / О.В. Міщенко, С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко // Системні технології. – Дніпропетровськ. НМетАУ, 2010. – 5(70) . – С. 37-46.
2. Міщенко О.В. До пояснення механізму зменшення поперечної різностінності труб при холодній прокатці на оправці / О.В. Міщенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2011. – №3(28). – С.216-219.
3. Мищенко А.В. Экспериментальное исследование закономерностей снижения поперечной разностенности труб при холодной деформации на оправке / А.В. Мищенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2013. – №4(37) . – С.172-176.
4. Мищенко А.В. Результаты данных компьютерного моделирования и эксперимента по изменению эксцентричной разнотолщинности при холодной деформации на оправке / А.В.Мищенко, В.У. Григоренко, А. Стефанек // Пластическая деформация металлов: сб. научн. трудов в 2-х томах. Днепропетровск : Акцепт ПП. – 2014. – Т. 2. – С. 295-299.

5. Міщенко О.В. Порівняльний аналіз режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву титана VT1 та сталі 20 і X18H9T / О.В. Міщенко, І.В. Маркевич, Г.Г. Кожухар, В.У. Григоренко // Теорія і практика металургії. – Дніпропетровськ, 2014.

6. Міщенко О.В. Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана на станах холодной прокатки / О.В. Міщенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2016. – №1(42). – С.199-202.

7. Henryk Dyja Development of forecasting method of change of transverse variation in wall thickness in case of cold rolling of pipes made of titanium alloys / Henryk Dyja, Vladimir Grigorenko, Oleksii Mishchenko // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipro, 2017 – No.1 – P.80-83.

8. Мищенко А.В. Исследования изменения разностенности по длине рабочего конуса на станах холодной прокатки труб роликами / А.В. Мищенко В.У. Григоренко, Х.Дья и др. // XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – 2013. – Volume 1. – 401-404 pp.

9. Пилипенко С.В. До питання холодної прокатки труб з підвищеними вимогами до точності геометричних розмірів / С.В. Пилипенко, О.В. Міщенко // X Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 6-13 июня 2014г., Варна, Болгария С. 125-129.

Матеріали дисертаційної роботи були представлені і обговорювалися на:
XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE Ченстохова, (Польща, м. Ченстохова, 2013 р.), X Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 6-13 июня 2014г., Варна, Болгария, Придніпровському науковому семінарі "Обробка металів тиском" (м. Дніпропетровськ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 р.р.)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ПРОГНОЗУВАННЮ ОСТАТОЧНОЇ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ЗІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ НА СТАНАХ ХПТ ТА ХПТР.....	20
1.1 Вимоги до поперечної різностінності труб-заготовок та готових труб зі сплавів на основі титану.....	20
1.2. Аналіз робіт із прогнозування зменшення поперечної різностінності труб при прокатці в калібрах.....	25
Висновки по розділу.....	36
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІЗНОТОВЩИНОСТІ.....	37
2.1 Обґрунтування і розробка методики розрахункового аналізу зміни поперечної різностінності при деформуванні на оправці.....	37
2.2 Обґрунтування і розробка методики лабораторного експериментального дослідження для апробації результатів розрахункового аналізу.....	47
2.3 Обґрунтування і розробка методики розрахункового аналізу зменшення поперечної різностінності зразків з різним початковим значенням різностінності 20%, 15%, 10% та 5%.....	51
2.4 Обґрунтування і розробка методики дослідження зміни поперечної різностінності труб зі сплаву на основі титану при прокатці на станах ХПТ.....	53
2.5 Обґрунтування і розробка методики дослідження зміни поперечної різностінності труб зі сплаву на основі титану при прокатці на стані ХПТР.....	55
Висновки по розділу.....	56
РОЗДІЛ 3. РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ВІДНОСНО ЗМІНИ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ПРИ ПРОКАТЦІ В КАЛІБРАХ НА ОПРАВЦІ ДЛЯ УМОВ ПРОКАТКИ НА СТАНАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ..	57
3.1 Розробка теоретичного пояснення механізму зменшення поперечної ексцентричної різностінності при прокатці на оправці.....	57

3.2 Розрахунковий аналіз деформування двох зразків різної товщини в умовах близьких до деформації на станах холодної прокатки труб.....	65
3.3 Експериментальні лабораторні дослідження з підтвердження механізму зменшення ексцентричної різностінності для апробації розрахункового аналізу.....	69
3.4 Дослідження зміни різнотовщинності при розрахунковому аналізі деформації зразків з різною початковою різнотовщинністю.....	77
3.5 Розрахунковий порівняльний аналіз особливостей режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву на основі титану, сталі 20 та сталі Х18Н9Т.....	90
Висновки по розділу.....	95
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕКСЦЕНТРИЧНОЇ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ ТРУБИ НА ОПРАВЦІ.....	98
4.1 Експериментальні промислові дослідження зменшення поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану по довжині робочого конуса при прокатці на станах ХПТ.....	98
4.2 Експериментальні промислові дослідження зміни поперечної різностінності по довжині робочого конуса на стані ХПТР 15-30 при прокатці труб зі сплаву на основі титану.....	105
4.3 Порівняння результатів по зменшенню ексцентричної поперечної різностінності при розрахунковому аналізі, лабораторних та експериментальних дослідженнях.....	109
Висновки по розділу.....	111
РОЗДІЛ 5. РОЗВИТОК МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ПРИ БАГАТОПРОХІДНІЙ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	112
5.1 Розвиток методу прогнозування поперечної різностінності труб для холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану.....	112

	12
Висновки по розділу.....	118
ВИСНОВКИ	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ.....	132

ВСТУП

Все більше сучасних замовлень на виробництвах по холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану виконуються за Європейськими або Американськими стандартами якості (EN, ASTM). Ці труби застосовуються для атомної промисловості, в теплообмінниках, в турбінних установках та паропроводах, у літакобудуванні для гідросистем, у паливних системах та багатьох інших галузях точного машинобудування та енергетики.

Дотримання регламентованої точності по поперечній різностінності труб є більш проблематичним, ніж точність по діаметру при виготовленні труб.

Саме важливість одержання геометричних розмірів стінки труби в межах сучасних допусків становить важливі науково-технічні задачі по прогнозуванню зменшення поперечної різностінності на стані холодної прокатки та відповідно від стана до стана, оскільки технологія виготовлення включає декілька послідовних прокаток на станах холодної прокатки труб (стани ХПТ, КРВ) та на станах холодної прокатки труб роликми (стани ХПТР).

Через застарілі технології виробництва та обладнання, основний показник якості труб – точність труб по поперечній різностінності, важко втримати в межах нових стандартів. Така ситуація веде до підвищення витрат металу на виготовлення продукції.

Таким чином, робота, направлена на розробку методу прогнозування остаточної поперечної різностінності на станах холодної прокатки труб, займає важливе місце в розвитку технологій і є актуальною.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні високоточні холоднодеформовані труби зі сплавів на основі титану широко використовуються у відповідальних механізмах новітнього машинобудування та енергетики.

Для одержання таких труб необхідно при виробництві проводити декілька прокаток на станах ХПТ, ХПТР [1]. Таку технологію виробництва холоднодеформованих труб називають багатопрхідною. В умовах багатопрхідної холодної прокатки труб відбувається зменшення початкової поперечної різностінності труб.

Поперечна різностінність труб є найбільш важливим показником точності [2] на виробництві, оскільки великий об'єм труб зі сплавів на основі титану одержують з заготовки, що має велику поперечну різностінність. При цьому, в основному, підвищені витрати металу пов'язані з одержанням труб з великим рівнем поперечної різностінності, що виходить за поле допусків. Оскільки вартість виготовлення труб зі сплаву на основі титану велика, важливим питанням постає можливість прогнозувати рівень поперечної різностінності, яку можна одержати після багатопрхідної прокатки.

Для прогнозування поперечної різностінності труб існують методи тільки для однопрхідної прокатки, які мають певні недоліки. Наприклад, у методі прогнозування остаточної поперечної різностінності труб Хаустова Г.Й [3]. розробленого для прокатки труб з вуглецевих марок сталей враховується лише відношення діаметрів труби до та після деформації у прокатному стані, тобто обтиск по діаметру. Цей метод надано для умов прокатки вуглецевих труб, коли в робочому конусі виконують перед прокаткою на оправці достатньо глибоке редукування. А при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану редукування роблять мінімально можливим для забезпечення якості внутрішньої поверхні труб, а деформацію здійснюють в основному на оправці.

Таким чином, існуючі методи прогнозування розроблено для умов прокатки на одному стані і з великою зоною редукування. Це призводить до

одержання труб з високою поперечною різностінністю та застосуванням додаткових операцій по її усуненню.

Важливо мати розвинений метод прогнозування зміни поперечної різностінності при багатопрхідній прокатці, яка відбувається більшою мірою на оправці. Це потрібно для проектування технологій холодної прокатки труб, які забезпечують одержання прогнозованої поперечної різностінності труб при мінімальних втратах металу та енергоресурсів.

Отже, робота спрямована на розвиток наукових основ методу прогнозування остаточної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрхідній холодній прокатці для одержання труб необхідної точності, є актуальною.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з науково-дослідними роботами кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані в рамках програми і відповідної тематики державної бюджетної науково-дослідної роботи кафедри обробки металів тиском НМетАУ: ДР № 0112U000641. Автор був виконавцем цієї роботи.

Мета і задача дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування і створення розвинутого методу прогнозування остаточної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану для умов багатопрхідної холодної прокатки, що забезпечує необхідну точність труб.

Для досягнення поставленої мети визначені такі задачі:

- 1) проаналізувати поточний стан досліджень механізму зменшення поперечної різностінності труб для умов холодної прокатки;
- 2) провести аналітичні дослідження механізму зменшення поперечної ексцентричної різностінності при холодній прокатці на оправці для виявлення особливостей деформування на оправці;
- 3) провести розрахунковий аналіз по дослідженню формування поперечної різнотовщинності зразків та виконати аналогічні лабораторні експериментальні дослідження в умовах аналогічних до деформацій на станах

ХПТ, ХПТР і підтвердити правильності прийнятих допущень та аналітичних досліджень;

4) одержати експериментальні промислові дані на станах ХПТ та ХПТР щодо зміні поперечної різностінності по довжині робочого конуса при прокатці труб зі сплавів на основі титану з великою початковою різностінністю;

5) розвинути метод прогнозування остаточної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану для умов багатопрохідної холодної прокатки на станах ХПТ та ХПТР.

6) впровадити результати досліджень у промисловості і в навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Процес холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану.

Предмет дослідження. Закономірності зменшення поперечної ексцентричної різностінності при прокатці на оправці на станах холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз базується на використанні наукових положень по обробці металів тиском. Експериментальні дослідження проводилися у лабораторних умовах та на виробництві із застосуванням сучасних методик та обладнання.

Наукова новизна. Наукову новизну мають наведені нижче результати теоретичних і експериментальних досліджень, що одержані в дисертації.

1. Розвинуто відомості про закономірності зменшення початкової ексцентричної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при деформуванні на оправці в зоні обтиснення стінки для умов холодної прокатки.

Відмінність полягає в урахуванні для холодного деформування на оправці труб з великою початковою поперечною ексцентричною різностінністю інтенсивності зміцнення металу в процесі деформації протилежних тонкої та товстої стінки, що приводить до більшого обтиску товстої стінки, ніж тонкої і, як наслідок, зменшення поперечної різностінності труб.

Це покладено в основу розробки методу прогнозування остаточної поперечної різностінності готових труб зі сплавів на основі титану для забезпечення регламентованої точності при виробництві із застосуванням холодної прокатки на станах ХПТ та ХПТР.

2 Вперше із застосуванням розрахункового аналізу одержано залежність остаточної ексцентричної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану від сумарної деформації та інтенсивності наклепу для умов обтиснення стінки на оправці при холодній прокатці труб.

Такі дані були одержані вперше.

Це дозволило одержати розрахунковий аналітичний апарат для визначення остаточної поперечної різностінності готових труб зі сплавів на основі титану в залежності від сумарної деформації та від інтенсивності зміцнення металу при виробництві труб із застосуванням холодної прокатки.

3 Вперше одержані експериментальні закономірності відносно інтенсивності зміни поперечної різностінності труб при холодній прокатці на станах ХПТ та ХПТР по довжині зони обтиснення стінки при деформуванні труб зі сплавів на основі титану.

Такі дані були одержані вперше.

Дані підтвердили розроблені теоретичні положення та результати розрахункового аналізу.

4 Розвинуто метод прогнозування остаточної поперечної різностінності при холодній багатопрохідній прокатці труб зі сплавів на основі титану для умов деформації на станах холодної прокатки труб.

Відмінність полягає у тому, що у розрахунках враховується залежність, яка описує закономірність зменшення різностінності в залежності від інтенсивності зміцнення сплаву на основі титану та обтиснення по стінці. Закономірності одержані із застосуванням розрахункового аналізу при конкретних параметрах холодної деформації при кожному проході на станах ХПТ та ХПТР у багатопрохідному маршруті виробництва.

Комплексний підхід до вирішення задачі дозволив розвинути метод прогнозування остаточної поперечної різностінності труб для багатопрхідної прокатки з урахуванням параметрів деформації. Це дозволяє проектувати остаточно поперечну різностінність в технології виробництва труб зі сплавів на основі титану та мінімізувати витрати металу, енерговитрати та трудомісткість.

Практичне значення одержаних результатів. Виконані дослідження дозволяють:

- розраховувати, за допомогою розвиненого методу, остаточно поперечну різностінність труб при багатопрхідній технології прокатки на станах ХПТ, ХПТР для прокатки конкретних сплавів на основі титану та режимів деформування;
- розробляти та корегувати маршрути прокатки із застосуванням станів ХПТ та ХПТР для забезпечення регламентованої поперечної різностінності труб;
- застосовувати результати роботи в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Всі результати досліджень, представлені в дисертаційній роботі, базуються на результатах теоретичної та експериментальної роботи, проведеної особисто автором. У дисертаційній роботі не використані ідеї співавторів.

Особистий внесок здобувача відображений у публікаціях в спеціалізованих фахових збірниках, які відповідають переліку ДАК України, і полягає в тому, що здобувач: [4] – одержав залежності по зміні різностінності під час прокатки на промисловому стані ХПТР; [5] – розробив аналітичний опис механізму зменшення ексцентричної різностінності при холодній прокатці на оправці; [6] – розвинув пояснення механізму зменшення ексцентричної різностінності труб для умов холодної прокатки на оправці, [7] – одержав додаткові відомості про механізм та кількісні параметри зміни поперечної різностінності при прокатці на оправці, [8] – проаналізував залежності, одержані з розрахункового аналізу стосовно зменшення різнотовщинності при деформуванні зразків зі сплаву на основі титану; [9] – виконав порівняльний

аналіз режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву на основі титану та сталей; [10] – розвинув метод прогнозування зміни різностінності при холодній прокатці на оправці, [11] – розвинув метод прогнозування різностінності при багатопрохідній холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану, [12] – одержав залежності зміни різностінності на оправці та проаналізував механізм зміни різностінності на станах ХПТР

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені і обговорювалися на: XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE Ченстохова, (Польща, м. Ченстохова, 2013 р.), X Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 6-13 июня 2014г., Варна, Болгария, Придніпровському науковому семінарі "Обробка металів тиском" (м. Дніпропетровськ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 р.р.)

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображено у дев'яти публікаціях, з яких: 6 статей опубліковано у спеціалізованих виданнях згідно переліку ДАК України, в тому числі, одну статтю видано у виданні, що включено до міжнародних науко-метричних баз; 1 стаття в додаткових виданнях; дві тези доповідей.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ПРОГНОЗУВАННЮ ОСТАТОЧНОЇ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ЗІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ НА СТАНАХ ХПТ ТА ХПТР

1.1 Вимоги до поперечної різностінності труб-заготовок та готових труб зі сплавів на основі титану

Заготовкою для виробництва прецизійних труб зі сплавів на основі титану є гарячекатана або гарячепресована труба-заготовка. Труби-заготовки постачають без механічної обробки, в термообробленому стані, з протравленою поверхнею.

Найпоширенішими стандартами, за якими заготовка поставляється на підприємство, є ТУ 1-5-126, ТУ 1-5-353, ТУ 1-5-107, ТУ 1-5-421, ТУ 1-805-050, ГОСТ 19807 та ГОСТ 21945-76 (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Граничні відхилення для трубної заготовки за ГОСТом 21945-76 [13]

Зовнішній діаметр, мм	Допуски по зовнішньому діаметру, %		Товщина стілки, мм	Допуски по товщині стілки, %	
	звичайної якості	підвищеної якості		звичайної якості	підвищеної якості
від 83 до 180	+1.0 -2.0	+1.0 -1.8	Від 6 до 15	+15,0 -17,0	±12,5
від 194 до 325	+1.0 -2.0	+0.8 -1.8			
від 351 до 480	±1.5	+1.0 -1.2	Від 15	±15,0	

Якість готових труб контролюється стандартами та технічними вимогами з меншим полем допуску. У сучасній машинобудівній галузі з'являються все

більш високі вимоги до геометричних параметрів труб та до механічних властивостей труб. Це пов'язано з сучасним тенденціям машинобудування – зменшенням маси готових виробів при зберіганні або навіть підвищенні механічних властивостей. Такі труби дозволяють економити паливо, зменшувати розміри виробів та підвищують технічні характеристики виробів.

Всі ці вимоги значно впливають не тільки на процес виготовлення таких виробів як літаки, теплообмінники та інше, але і на процеси виготовлення труб. Ще десять років тому найпопулярнішим стандартом для виготовлення труб зі сплавів на основі титану був ASTM B338 (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2.

Граничні відхилення по точності труб за ASTM B 338 [14]

Зовнішній діаметр, дюйм(мм)	Відхилення по діаметру, дюйм(мм)	Відхилення по товщині стінки, %
До 1 (25,4), включно	$\pm 0,004$ ($\pm 0,102$)	± 10
1 до 1 $\frac{1}{2}$ (25,4 до 38,1), включно	$\pm 0,005$ ($\pm 0,127$)	± 10
1 $\frac{1}{2}$ до 2 (38,1 до 50,8), включно	$\pm 0,006$ ($\pm 0,152$)	± 10
2 до 2 $\frac{1}{2}$ (50,8 до 63,5), включно	$\pm 0,007$ ($\pm 0,178$)	± 10
2 $\frac{1}{2}$ до 3 $\frac{1}{2}$ (63,5 до 88,9), включно	$\pm 0,010$ ($\pm 0,254$)	± 10

В останні роки більш затребуваними є труби, що виготовлені за стандартами з більш високими вимогами до точності – AMS 4943, AMS 4944, AMS 4945, AMS 4946C (таблиця 1.3).

Тобто, у сучасному портфелі замовлень переважають такі, де є потреба у виготовленні продукції більшої точності. У більшості сучасних стандартів труби мають жорсткі допуски в абсолютних величинах. Якщо допуск на поперечну різностінність труб вказано у відносній величині, він не перевищує 5%.

Усі труби з номінальним зовнішнім діаметром 1,50 дюйма (38,10 мм) і менше повинні мати товщину стінки не менше 95% від номінальної товщини.

Тобто найбільше відхилення по товщині стінки у таких трубах становить $\pm 2,5\%$. Для одержання таких труб, як правило, потрібна високоякісна заготовка, сучасна технологія та обладнання, яке дозволяє виготовляти такі вироби.

Актуальним і затребуваним на сьогодні є стандарт AMS 4946 C [15], що стосується прецизійних труб відповідального призначення зі сплавів на основі титану (табл. 1.3-1.4.). В цьому стандарті поперечна різностінність регламентується допусками по зовнішньому та внутрішньому діаметру труби.

Таблиця 1.3

Вимоги до зовнішнього діаметру труб, які виготовляються за стандартом AMS 4946 C на прецизійні холоднодеформовані труби зі сплавів на основі титану

Номинальний зовнішній діаметр, мм	Допуск плюс, мм	Допуск мінус. мм
от 2,36 до 4,75 включно	0,05	0,00
більше 4,75 до 12,67 включно	0,08	0,00
більше 12,67 до 19,02 включно	0,10	0,00
більше 19,02 до 25,37 включно	0,10	0,025
більше 25,37 до 38,07 включно	0,10	0,05
більше 38,07 до 50,77 включно	0,13	0,05

Таблиця 1.4

Вимоги до внутрішнього діаметру труб, які виготовляються за стандартом AMS 4946 C на прецизійні холоднодеформовані труби зі сплавів на основі титану

Номинальний внутрішній діаметр, мм	Допуск плюс, мм	Допуск мінус. мм
до 8,59 включно	0,038	0,038
більше 8,59 до 11,40 включно	0,05	0,05
більше 11,40 до 17,09 включно	0,064	0,064
більше 17,09 до 22,86 включно	0,08	0,08
більше 22,86 і більше	0,10	0,10

На виробництві труб зі сплавів на основі титану застосовуються стани ХПТ застарілих конструкцій, за допомогою яких одержують труби з точністю $\pm 10\%$. Сучасні стани ХПТ, які виготовляє завод «Електростальський завод важкого машинобудування» [16], дозволяють одержати точність по товщині стінки у межах $\pm 6-10\%$. За теперішньою технологією цих показників недостатньо для одержання труб з високими вимогами щодо точності геометричних розмірів. Для усунення цього недоліку для остаточних проходів на виробництві застосовуються стани ХПТР. Це призводить до додаткової операції і, відповідно, підвищує собівартість продукції.

Стани КРВ від Німецького концерну «SMS Meer» мають гарантовані показники точності по товщині стінки в межах $\pm 5\%$ та при сучасних технологіях дозволяють одержувати труби з набагато меншою поперечною різностінністю. Технічні характеристики даних станів дозволяють одержати необхідну продукцію з меншим застосуванням допоміжних операцій та, як наслідок, меншими витратами металу. Строк поставки та налаштування одного стану становить від 18 до 24 місяців. Для заміни усіх станів в найкоротший термін потрібно витратити від 5 до 7 років. У цей час більша частина виробництва не буде виробляти продукцію. За такою стратегією окупність модернізації та вихід на прибутковість підприємства може зайняти більше 10 років.

На сучасних виробництвах труб зі сплавів на основі титану проблеми пов'язані з точністю труб можна поділити на дві категорії, це:

1. Проблема прокатки труб-заготовок з високим початковим рівнем поперечної різностінності, одержаним після прошивки на поперечно-гвинтовому стані. Найбільш суттєвими є відхилення по товщині стінки гільзи, тобто поперечна різностінність. Подальша розкатка таких гільз в труби-заготовки на безперервних або автоматичних станах не дозволяє істотно знизити різностінність.

За заводською статистикою середня різностінність труб після трубопрокатних установок становить 15-20%. Одержання труб-заготовок з

показниками точності до 10% призводить до значного підвищення витратного коефіцієнта металу з 1,2 до 1,6 або навіть більше.

Процес пресування дозволяє одержувати труби-заготовки з високою точністю по товщині стінки та діаметру. Граничні відхилення при такому процесі не перевищують 8%.

Широкому використанню пресованих труб-заготовок перешкоджає більш висока, у порівнянні з гарячою прокаткою, вартість переділу (що пов'язано з експлуатацією складного устаткування і більш високим витратним коефіцієнтом металу, який становить 1,2-1,30) на яку впливають такі чинники:

- пресування проходить з утворенням прес-залишку, що знижує процент виходу придатного;
- низька швидкість пресування і, як наслідок, невелика продуктивність процесу;
- низька стійкість інструменту під час роботи і, як наслідок – високі витрати на інструмент та питомі витрати процесу.

Ці та інші фактори збільшують вартість такої заготовки у порівнянні з прокатаною на агрегатах поперечно-гвинтової прокатки. Різниця у ціні залежить від марки сплаву та може досягати 50%. Слід зазначити, що труби-заготовки для виробництва холоднодеформованих труб є дуже дорогими. Тому збільшення витрат металу навіть на 50 кілограмів на тонну готових труб може значно вплинути на вартість виготовлених труб.

2. Проблема точності готових труб, які ми одержуємо після прокатки на станах ХПТ.

При застосуванні станів ХПТ старих конструкцій, для забезпечення достатньої точності по геометричним параметрам, на виробництвах застосовують стани холодної прокатки труб роликami, які дозволяють також зменшити різностінність прокатуваних труб.

Введення такої додаткової прокатки негативно впливає на цінову сторону собівартості продукції, підвищуються затрати на переробку, а також циклічність виробництва і час, необхідний для одержання виробів.

1.2. Аналіз робіт із прогнозування зменшення поперечної різностінності труб при прокатці в калібрах

Хаустов Г.Й. у своїй роботі [3], спрямованій на дослідження поперечної різностінності при холодній прокатці труб в калібрах, проводить дослідження для прокатки на стані ХПТ-55. Умовою для зменшення різностінності автор вважає течію металу в зоні редукування. Під дією зовнішніх сил у радіальній площині течія металу починається здебільш інтенсивно у тонкій стінці труби. Автор спрямував свою роботу на зону редукування і не брав до уваги зону обтиснення стінки.

На базі експериментальних даних при прокатці вуглецевих труб, Хаустовим Г.Й. [3] була запропонована залежність для прогнозування відносної різностінності R_{Σ} :

$$R_{\Sigma} = R_0 \left(0,1 + 0,9 \frac{d}{d_0} \right) + R_n \quad (1.1)$$

де R_0 – сумарна початкова різностінність, %;

R_n – наведена різностінність після прокатки на стані ХПТ;

d_0 – початкове значення діаметра прокатуваної труби;

d – фінальне значення діаметра прокатуваної труби.

Були розглянуті дослідження по механізму формування поперечної різностінності при волочінні на короткій оправці [17, 18]. Автором була розроблена математична модель процесу деформування труби, що має ексцентричну різностінність. У моделі, для спрощення, було замінено аналіз реальних умов формозміни на процес сумісного протягування штаб різної початкової товщини між двома похилими плитами при наявності між штабами додаткової жорсткої, утримуваної від осьового переміщення плити.

Так автор, базуючись на вільному переміщенні середньої плити в вертикальному напрямку, пропонує теорію по прогнозуванню різностінності, та

приводить формулу для волочіння:

$$R_T = \frac{4e}{H-d \cdot \cos\varphi}, \quad (1.2)$$

де e – величина вигинання плити;

H – діаметр волоки;

d – діаметр оправки;

$\cos\varphi$ – кут нахилу оправки при деформуванні.

У роботі [19] було розглянуто механізм зменшення поперечної різностінності в зоні редукування (рис. 1.1 та рис. 1.2). Методом скінченно-елементного моделювання було показано, що при редукуванні труби з великою початковою поперечною різностінністю пластична деформація почнеться там, де товщина стінки є найменшою.

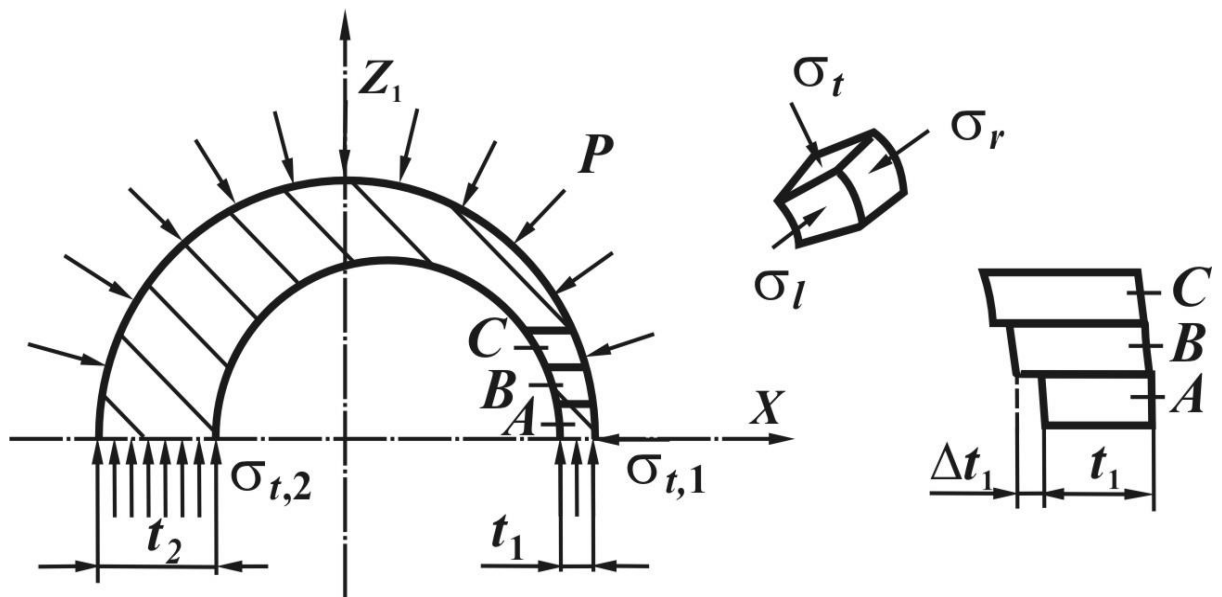


Рис.1.1 – Схема пояснення до механізму зменшення різностінності при редукуванні труби на стані холодної прокатки труб [19]

З умови рівноваги півкільця добуток нормальних тангенціальних напружень на товщину стінки має бути однаковим. Для рівноваги тангенціальні напруження в тонкій частині повинні бути більшими, ніж у товстій. При однакових поздовжніх напруженнях, пластична деформація почнеться там, де

різниця між максимальним і мінімальним напруженням більше, тобто в перерізі з меншою товщиною стінки. Для підтвердження було використано моделювання, а саме, метод скінчених елементів.

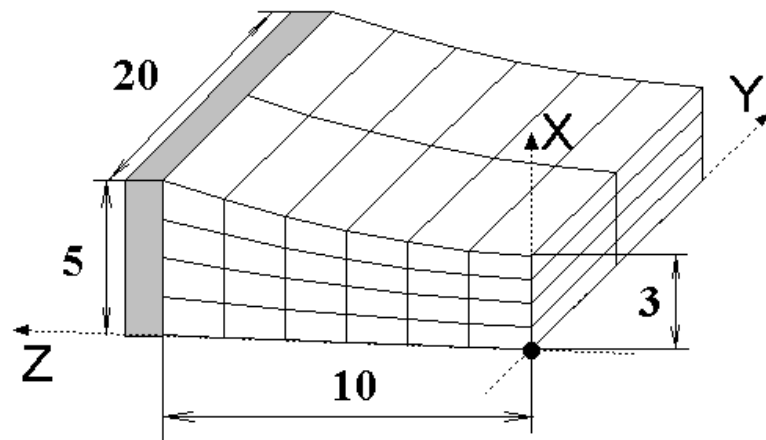


Рис.1.2 – Параметри зразка [19]

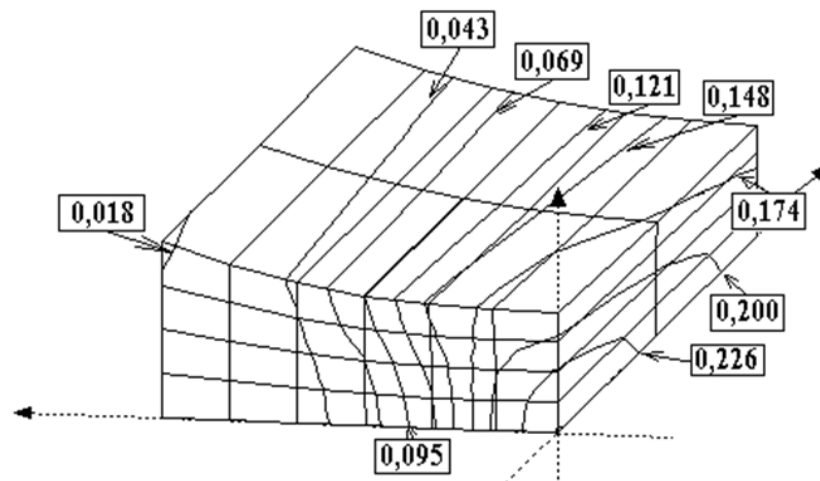


Рис.1.3 – Результати моделювання [19]:

цифри – значення інтенсивності деформації

Моделювання показало, що у випадку, коли зміцнення тонкої частини елемента труби невелике, подальша деформація буде продовжувати локалізуватися в цій ділянці елемента. Якщо ж зміцнення велике, то відбувається істотне зміцнення тонкої ділянки елемента ще до того, як його товщина помітно збільшиться. При цьому деформація починає поширюватися на елементи з більшою товщиною.

Роботи по дослідженню зменшення ексцентричної різностінності проводилися для умов безперервної гарячої прокатки на оправці [20]. Автори описують основний вид різностінності, який важко піддається зменшенню при гарячій прокатці – це ексцентрична різностінність. Показано, що товста стінка повинна одержувати більшу деформацію, ніж тонка стінка труби (рис. 1.4).

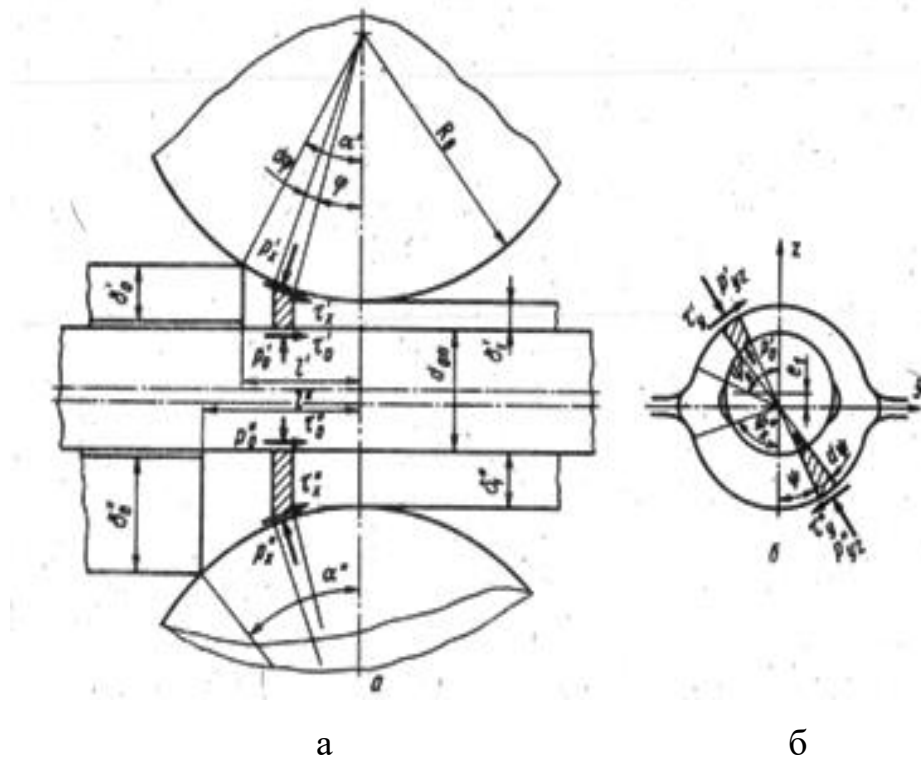


Рис.1.4 – Осередок деформації при продольній прокатці труб з ексцентричною різностінністю на циліндричній оправці [20]:

а – поздовжній переріз

б – поперечний переріз

Авторами була розроблена математична модель, що описує рівновагу сил, які діють на валки в вертикальній площині:

$$\bar{p}[F'_r + f'(F'_{в.от} - F'_{в.оп})] = \bar{p}''[F''_r + f''(F''_{в.от} - F''_{в.оп})] \quad (1.3)$$

де: \bar{p} , \bar{p}'' – середній контактний тиск; f' , f'' – коефіцієнти тертя; F'_r , F''_r – горизонтальні проекції контактної поверхні труби з валком; $F'_{в.оп}$, $F''_{в.оп}$ – вертикальні проекції контактної поверхні в зоні випередження в верхній і нижній частині осередку деформації; $F'_{в.от}$, $F''_{в.от}$ – вертикальні проекції контактної поверхні в зоні відставання в верхній і нижній частині осередку деформації.

Показано, що для максимального зменшення різностінності, деформації при гарячій прокатці повинні становити від 60% по товщині стінки.

Також було показано, що при великій початковій різностінності інтенсивне її падіння відбувається при деформаціях 20%. Подальше падіння різностінності не таке стрімке, але також вносить свій вклад у процес зменшення різностінності.

До недоліків даного методу належить те, що він використовувався для вуглецевих труб та не враховував деформацію по товщині стінки, матеріал прокатуваних труб та інші важливі фактори. Тобто, при застосуванні запропонованої залежності при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану він буде давати результати з похибкою.

Автори іншої роботи [21] досліджували холодну прокатку труб з вуглецевих сталей на стані ХПТ-55. У даному дослідженні було приділено значної уваги зоні редукування. Під час проведення серії експериментів автори штучно збільшили зону редукування та прокатали декілька труб за такою методикою.

Під час досліджень експериментально установили, що при редуванні з деформаціями по діаметру більш 25% відбувається стрімке падіння різностінності (зони 1-4) за рахунок падіння її ексцентричної складової (рис. 1.5), а симетрична складова різностінності залишається практично незмінною.

В ході даного дослідження було встановлено, що максимально можливе зменшення поперечної різностінності становить 50%, однак це дослідження виконано для специфічної калібровки інструмента з великою зоною редукування.

У сплавів на основі титану є певна особливість при деформуванні. При деформації труби в зоні редукування, довжина якої перевищує 15 мм, відбувається утворення складок на внутрішній поверхні труби. Цей дефект прокатки складно прибрати за допомогою допоміжних операцій і, як наслідок, це приводить до підвищеної витрати металу та збільшення витрат на переробку. Тому штучне збільшення зони редукування не застосовується під час прокатки труб зі сплавів на основі титану.

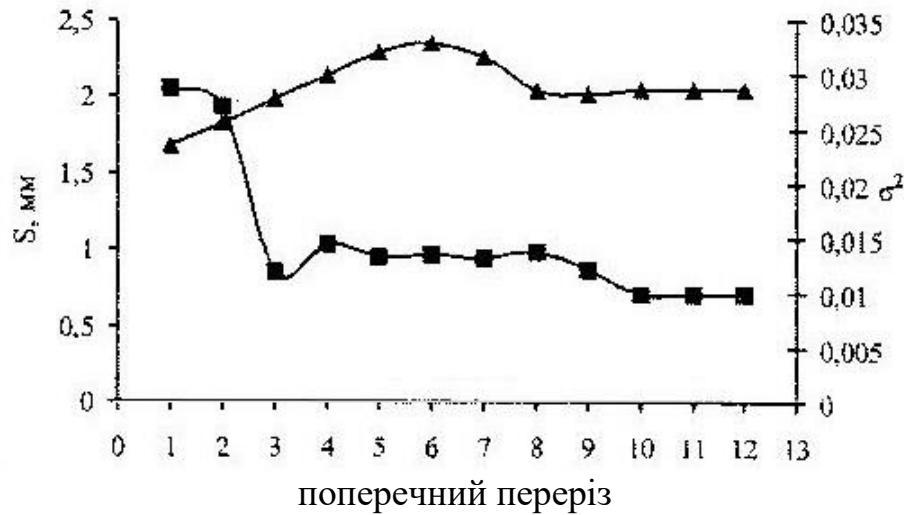


Рис. 1.5 – Графік зміни різностінності вздовж першої частини зони деформації на стані ХПТ при прокатці вуглецевої сталі з штучно збільшеною зоною редукування[21]:

S – середня товщина стінки; σ^2 – дисперсія; \blacktriangle – середнє значення стінки;
 \blacksquare – дисперсія

Автори роботи [22] дослідили рівень поперечної різностінності на станах ХПТР 4-15 та ХПТР 15-30. Величини поперечної різностінності труб, прокатаних на станах, показано в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Статистичні характеристики відхилень товщини стінки труб, прокатаних на стані ХПТР

Розмір труб, мм	Тип стана ХПТР	Товщина стінки, мм			Відносна різностінність	Дисперсія сумарна	Коефіцієнт варіації, %	
		Мін.	Макс.	Середня			Сумарний	Ексцентриситет
7x0,3	4-15	0,3	0,312	0,306	3,92	0,0001	0,9	0,4
17x1,7	15-30	1,66	1,74	1,7	4,71	0,00057	1,4	1,32
25x1,2	15-30	1,13	1,45	1,31	24,43	0,01007	7,6	6,5
7x0,3	15-30	0,32	0,36	0,34	11,76	0,00017	3,9	3,7

З таблиці 1.5 видно, що на стані ХПТР відносна різностінність труб після прокатки знаходиться у досить великому проміжку величин. Вона може також зменшуватися і підвищуватися. Велика розбіжність в показниках різностінності труб (див. табл. 1.5) обумовлюється багатьма факторами, які на неї впливають. Це величина початкової різностінності, величина подачі, величина розвалки, довжина калібруючої ділянки, кількість подвійних рухів за хвилину та інше.

Дослідження, які проводилися для труб з невеликим рівнем початкової різностінності [23] для станів холодної прокатки труб роликками дають інформацію про те, що абсолютна різностінність може зменшуватися дуже незначно по довжині робочого конуса (рис. 1.6).

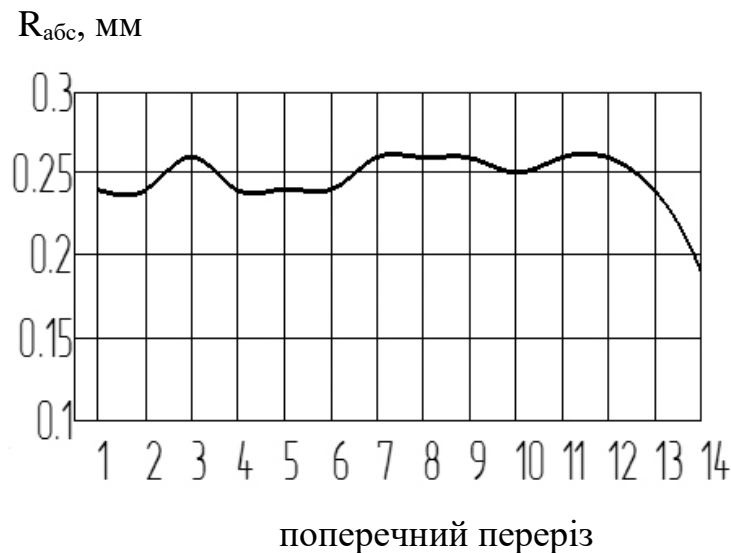


Рисунок 1.6 – Графік зміни величини абсолютної різностінності труб по довжині робочого конуса стану ХПТР 60-120 в результаті прокатки особливотонкостінних труб з невеликою початковою різностінністю (119,1x4,1→114,3x3,05) [22].

Заміри, проведені в дослідженні [23] (таблиця 1.6), показують також, що відносна різностінність труб, прокатаних на стані ХПТР, в деяких випадках (для особливо тонкостінних труб) навіть збільшується, але при цьому абсолютна різностінність зменшується. Це пояснюється тим, що при деформації особливо

тонкостінних труб абсолютна різностінність зменшується в меншій мірі ніж стінка труби.

Таблиця 1.6

Характеристики відхилень товщини стінки труб, прокатаних на стані ХПТР

Тип стана	Маршрут прокатки	Поперечна різностінність до прокатки		Поперечна різностінність після прокатки	
		мм	%	мм	%
ХПТР 30-60	41x1,7-39x1,1	0,09	5	0,078	7
ХПТР 15-30	25x1-23x0,3	0,1	9	0,02	5
ХПТР 15-30	23x0,8-23x0,3	0,07	9	0,05	11

Дослідження зміни різностінності по довжині робочого конуса для сплавів на основі титану проводилися також іншими науковцями [24].

Було досліджено процес зміни поперечної різностінності при прокатці на стані ХПТ-32 за маршрутом $25 \times 2,8 \rightarrow 15,1 \times 2,4$ мм з попередньо заданим рівнем розвалки.

Автор пропонує залежності які базуються на результатах дослідження і може бути застосовані для розрахунку рівня різностінності із запропонованим рівнем розподілу деформацій.

Однак, у цих дослідженнях автори дають лише розподіл зменшення різностінності уздовж конуса деформації (рис. 1.7).

Також, було розглянуто роботи [25] по прокатці багат шарових штаб з різних матеріалів. В основному дослідження було спрямовано на одержання моделі осередку деформації, необхідного для розрахунку плакірування. В дослідженні описано, що першими в результаті деформації усієї штаби починає обтискатися менш твердий прошарок і після набуття певного наклепу починає

деформуватися твердіший прошарок. У дослідженні описана побудова теорії деформування штаби з трьома несиметричними шарами (рис 1.7).

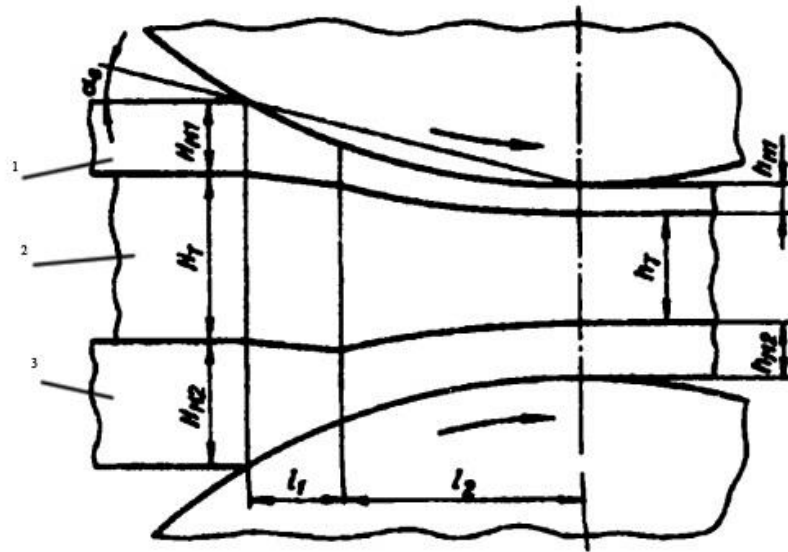


Рис. 1.7 – Модель осередку деформації штаби з трьох прошарків сплав+сталь+сплав [25]:

1 та 3– прошарки зі сплаву; 2– прошарок зі сталі; H_{M1} – висота тонкої штаби зі сплаву до прокатки; H_{M2} – висота товстої штаби зі сплаву до прокатки; H_T – висота середньої штаби зі сталі до прокатки; h_{M1} – висота тонкої штаби зі сплаву після прокатки; h_{M2} – висота товстої штаби зі сплаву після прокатки; h_T – висота середньої штаби зі сталі після прокатки

Автори [25] проводили серію експериментів з прокаткою штаб сплав+сталь+сплав, яка підтвердила адекватність запропонованої моделі деформації.

На базі аналізу літературного огляду заплановано вирішити поставлені у дисертаційній роботі задачі наступним чином – проведення розрахункового аналізу, проведення лабораторних досліджень, проведення досліджень на виробництві. Для більшої наочності були визначені напрямки роботи та представлено у вигляді блок-схеми (рис. 1.8).

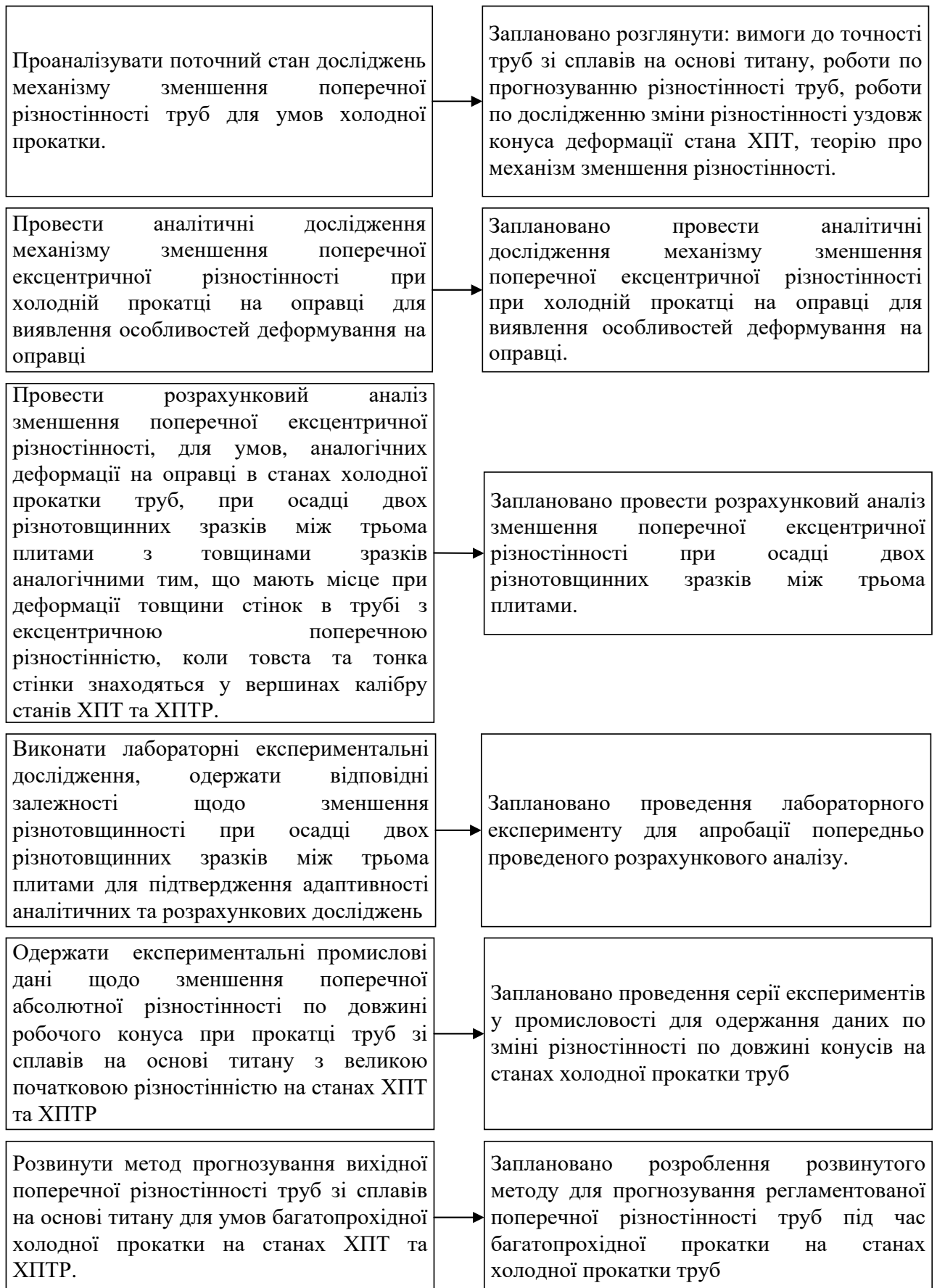


Рис.1.8 – Блок-схема планування досліджень необхідних для завершення роботи

Сформулюємо послідовну структуру методики дослідження де кожний наступний етап базується на результатах попереднього дослідження. Для більшого уточнення розглянемо структуру дослідження у вигляді блок-схеми (рис 1.9).

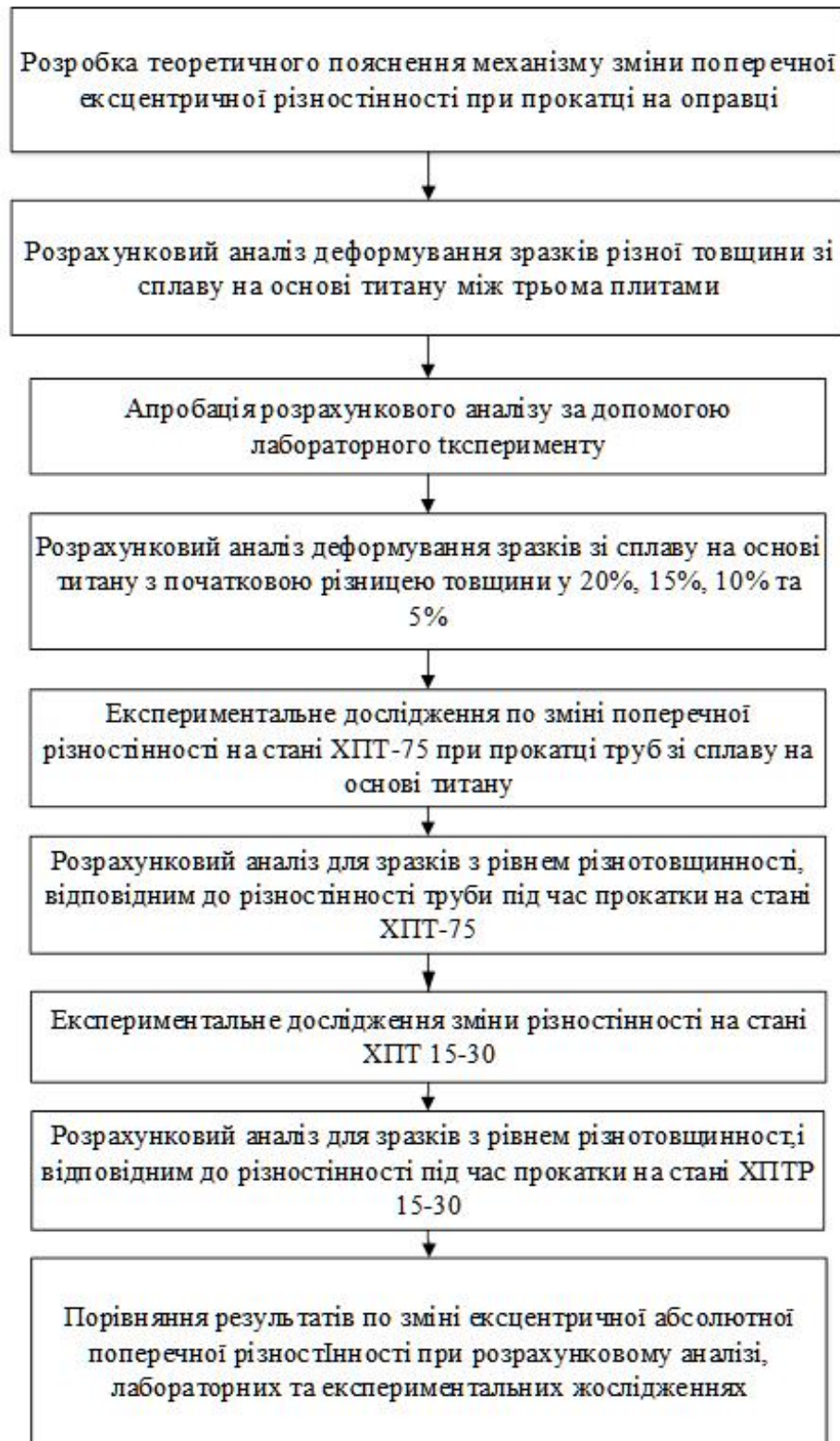


Рис. 1.9 – Блок-схема запланованого дослідження

Висновки по розділу I

1. У роботах по холодній прокатці труб надано недостатньої уваги механізму зменшення ексцентричної різностінності уздовж робочого конуса при прокатці на оправці. Більшість досліджень спрямовані на дослідження точності в партії труб або продольної або поперечної різностінності вже прокатаних труб. Є розробки по механізму зменшення поперечної різностінності у зоні редукування. Такі методики не дають змоги дослідити процеси, які відбуваються при деформуванні безпосередньо на оправці.

2. Аналіз робіт, спрямованих на розробку механізму зменшення поперечної різностінності, показав їх спрямованість на дослідження лише у зоні редукування. Для сплавів на основі титану зону редукування роблять мінімально можливою і майже всю деформацію виконують на оправці. Тому постає науково–практична задача по вивченню механізму зміни різностінності при деформації на оправці та розробці розвиненого методу прогнозування різностінності для умов холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РІЗНОТОВЩИННОСТІ

2.1 Обґрунтування і розробка методики розрахункового аналізу зміни поперечної різностінності при деформуванні на оправці

При розробці технологій та обладнання обробки металів тиском вирішуються такі задачі, як: визначення сил, що діють на інструмент, розподілення напружень по об'єму металу, що деформується, визначення умов, які необхідно створити, щоб забезпечити потрібну форму продукту, регламентовану точність по геометричним розмірам та інше [26].

В наш час все більше застосовують комп'ютерні технології, що дозволяють виконувати розрахунковий аналіз напруженого та деформованого стану металу.

Перевагою таких методик є можливість одержати результати для об'ємних задач на відміну від вирішень так званих «плоских задач».

В існуючих методах розрахунку тривимірної задачі пластичної деформації задача інтегрування системи диференціальних рівнянь була замінена рівнозначною задачею, яка полягає у знаходженні функції, що дає найменше значення інтеграла при розрахунках. У механіці суцільних середовищ цей інтеграл виражає енергію деформації або пропорційну їй величину [27,28]. Задачі такого плану називаються варіаційними, відповідні до них рівняння також називають варіаційними і виводять на основі енергетичних принципів. Тобто деформації обчислюють, базуючись на принципах мінімуму роботи.

Варіаційні методи на відміну від метода вирішення приблизних рівнянь рівноваги і пластичності та методу робіт дозволяють визначити не тільки повне та питоме зусилля, а також розподіл напружень і деформації по об'єму тіла. Також можливо обчислити форму тіла після деформації з урахуванням нерівномірності деформування [29].

Процес деформації труби відбувається за допомогою валків (рис. 2.1), які мають рівчак перемінного перерізу [30] та конусної оправки. Комбінація

перемінних значень діаметрів рівчака калібру та оправки по довжині робочого конуса дозволяє одержувати в однакових перерізах потрібне співвідношення деформації по діаметру і товщині стінки.

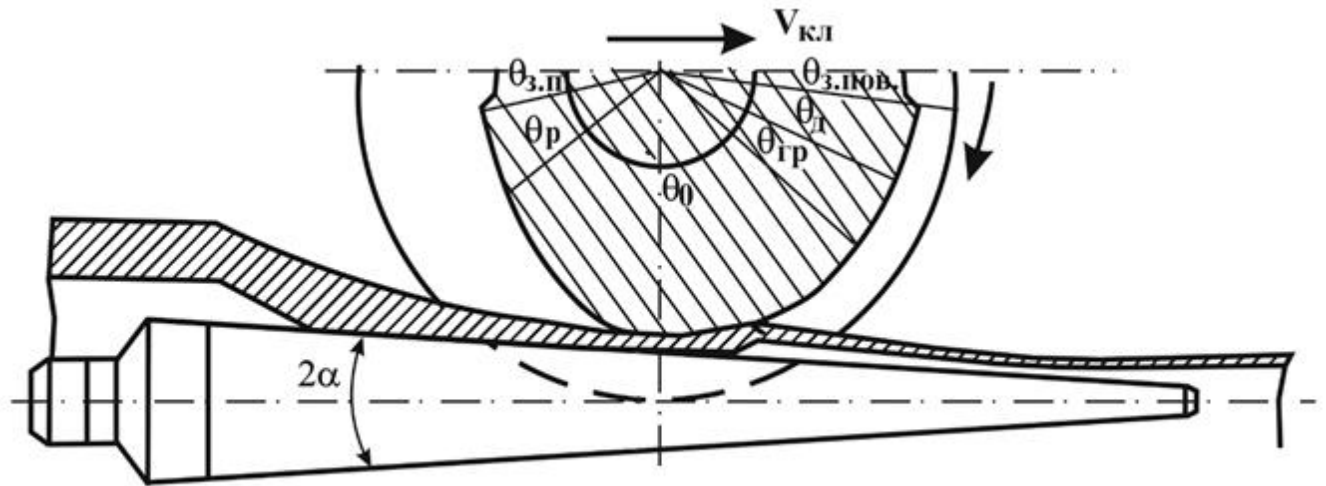


Рис. 2.1 – Схема процесу холодної періодичної валкової прокатки на стані ХПТ[30]:

- $V_{\text{кл}}$ – напрямок руху кліті;
- $\theta_{\text{з.п.}}$ – кут зеву повороту;
- $\theta_{\text{р}}$ – кут зони редукування;
- θ_{θ} – кут зони обтиснення стінки;
- $\theta_{\text{гр}}$ – кут предоздоблювальної зони;
- $\theta_{\text{д}}$ – кут зони калібровки діаметру;
- $\theta_{\text{з.пов.}}$ – кут зони зеву повороту;
- 2α – конусність оправки.

Розглянемо конус деформації на станах холодної прокатки труб [30]. Він має декілька характерних зон, як то: зона редукування, зона обтиснення стінки, зона калібровки труби по товщині стінки і зона калібровки труби по діаметру (рис. 2.2). Сучасні режими деформування потребують правильного розподілу обтиснень для кожної з вище зазначених зон, оскільки при цьому зменшуються максимальне зусилля прокатки та процес відбувається більш стабільно.

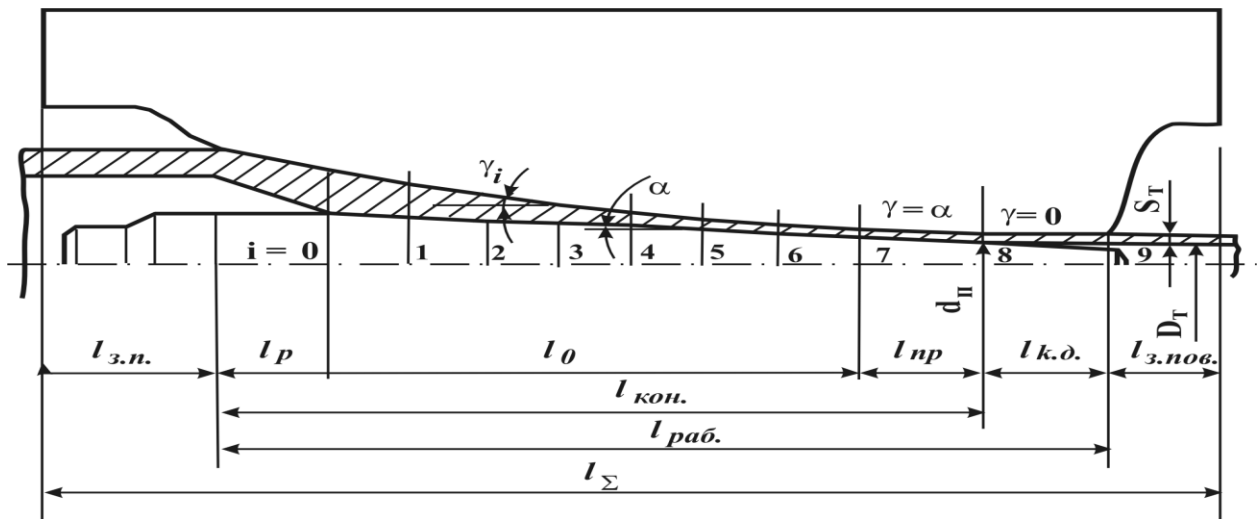


Рис. 2.2 – Конус деформації стана холодної прокатки труб[30]:

$l_{з.п.}$ – довжина зеву подачі; l_p – зона редукування; l_0 – зона обтиснення стінки; $l_{пр}$ – зона передобробки; $l_{к.д.}$ – калібрування діаметра; $l_{з.пов.}$ – довжина зеву повороту; $l_{кон.}$ – довжина конічної частини оправки; $l_{роб.}$ – довжина робочої зони; l_{Σ} – довжина оправки; D_T – діаметр готової труби; S_T – стінка готової труби

У сучасних технологіях виробництва труб зі сплавів на основі титану зона редукування робиться мінімально можливою для уникнення утворення дефектів на внутрішній поверхні труб. Ця технологічна особливість обґрунтована тим, що в разі виникнення дефектів на внутрішній поверхні труби їх видалення потребуватиме значної кількості додаткових операцій та підвищених витрат металу.

Отже, більш важливою у виробництві труб зі сплавів на основі титану стає зона обтиснення стінки, в якій відбувається деформація стінки труби-заготовки на оправці.

У поперечному перерізі (рис. 2.3) рівчака калібру біля вершини калібру розташована зона, створена частинами двох кіл, а біля зазору між калібрами розташовані зони, створені колом оправки і лініями випусків калібрів.

Під час прокатки труби виконують обтиснення труби між калібром та оправкою та поворот труби з оправкою навколо її вісі в зонах зеву повороту [30, 31]. Це дає змогу ділянкам, які припадають на випуска та у вершину калібру, замінювати одна одну і одержувати деформацію.

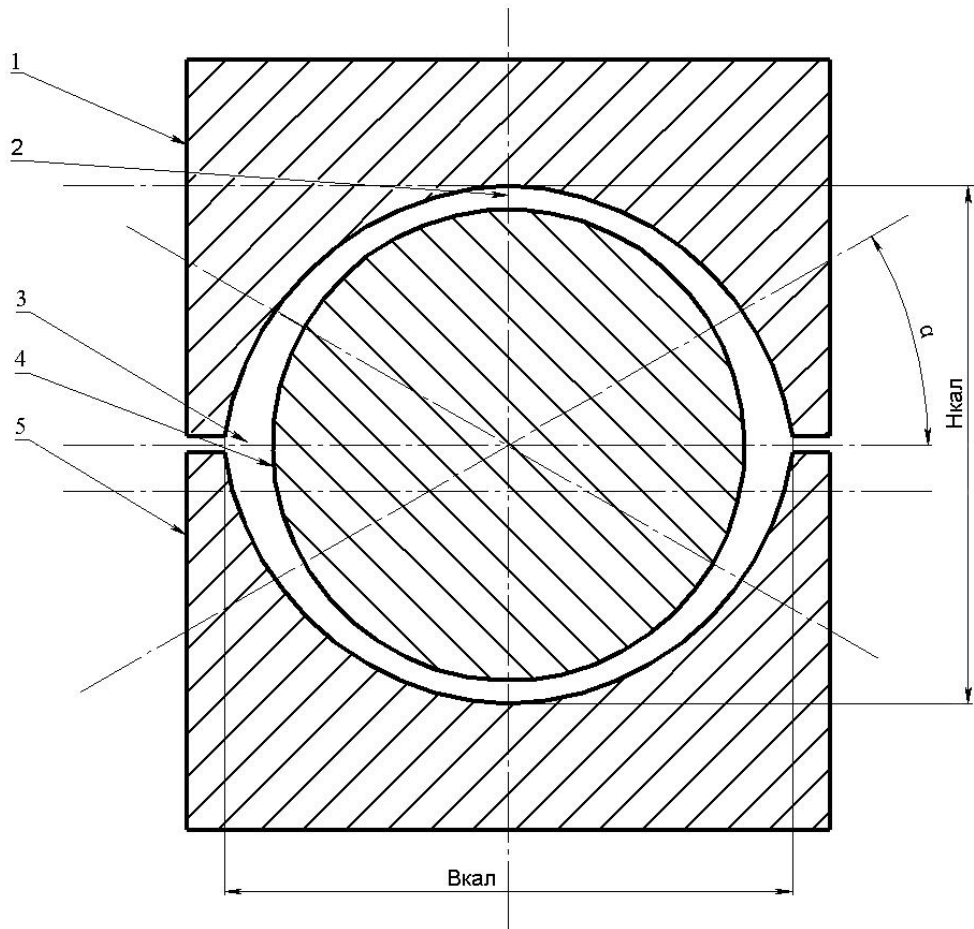


Рис. 2.3 – Форма поперечного перерізу рівчачка калібру та труби у перерізі робочого конуса на початку зони обтиснення стінки в миттєвому осередку деформації:

1 – верхній калібр; 2 – зона вершини калібру; 3 – зона випусків; 4 – оправка; 5 – нижній калібр; α – кут випуску; $H_{\text{кал}}$ – висота калібру; $V_{\text{кал}}$ – ширина калібру.

Труби-заготовки, які прокатують на станах ХПТ, мають поперечну різностінність. Відомо, що поперечна різностінність труб складається з ексцентричної та симетричної складових [1, 22].

Проведені автором вимірювання товщини стінки у 8 точках поперечного перерізу робочого конуса труб зі сплаву ПТ-1М при прокатці за маршрутом 63x8,5→38x4,5мм на стані ХПТ-75 показали, що основною різностінністю у труб-заготовок є ексцентрична складова, а симетрична складова є незначною (рис. 2.4, рис.2.5).

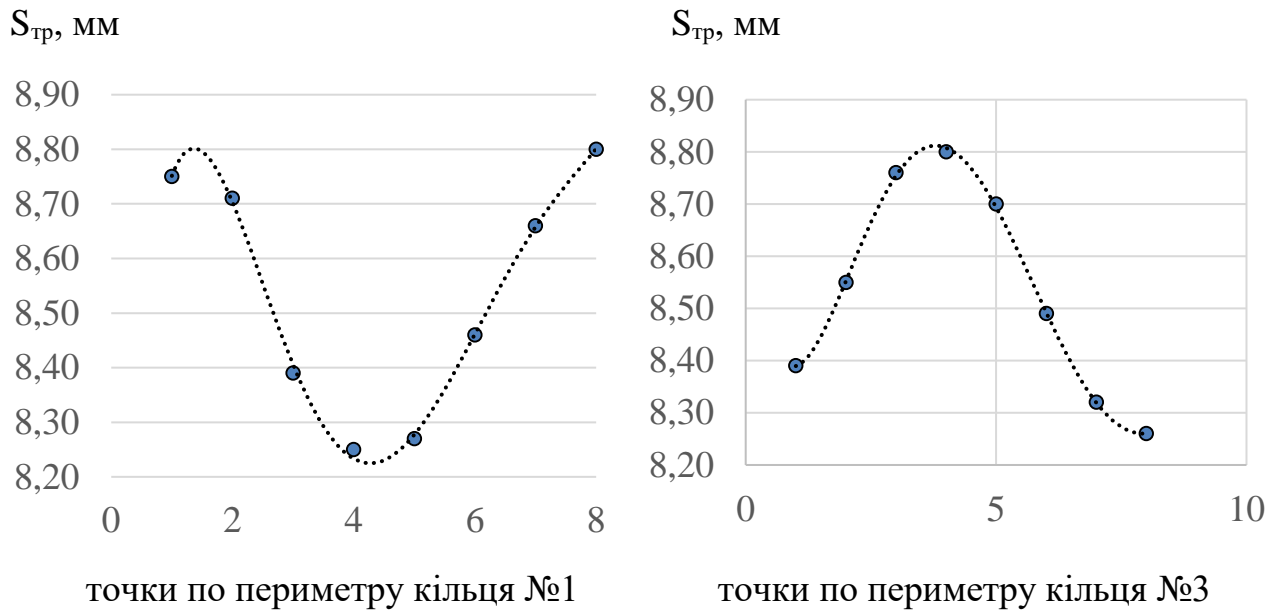


Рис. 2.4 – Результати вимірів поперечної різностінності по перерізам на початку зони обтиснення стінки робочого конуса при прокатці труб зі сплаву на основі титану при прокатці за маршрутом 63x8,5→38x4,5мм

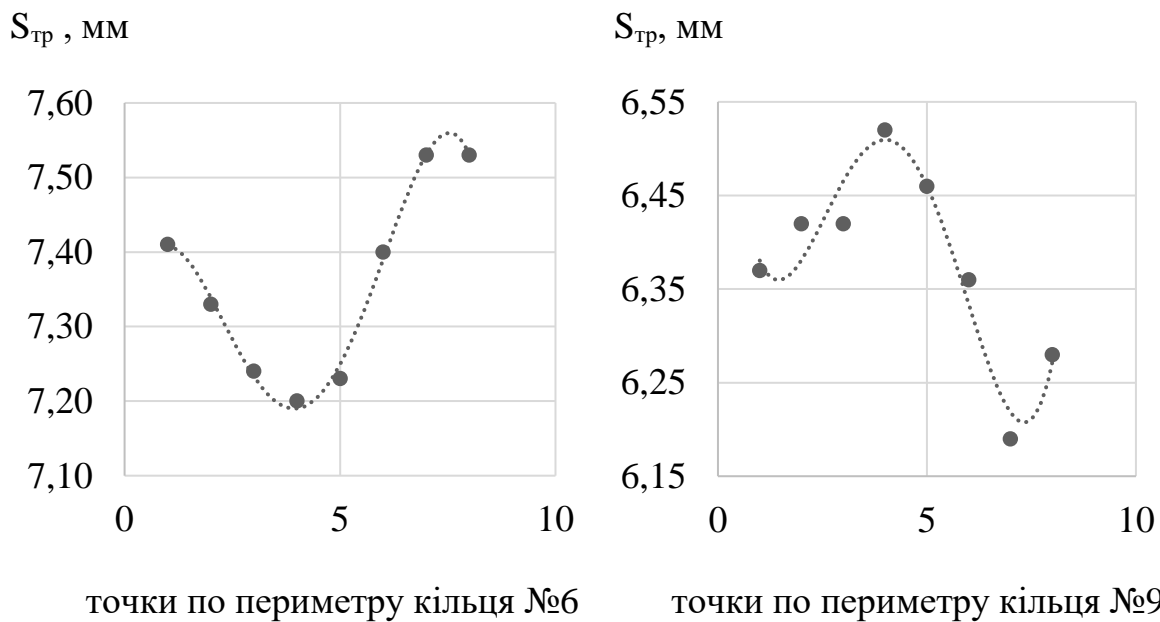


Рис. 2.5 – Результати вимірів поперечної різностінності по перерізам зони калібрування робочого конуса при прокатці труб зі сплаву на основі титану при прокатці за маршрутом 63x8,5→38x4,5мм

Ексцентрична різностінність труб характерна тим, що товста і тонка стінка знаходяться у протилежних поперечних перерізах труби (рис. 2.6).

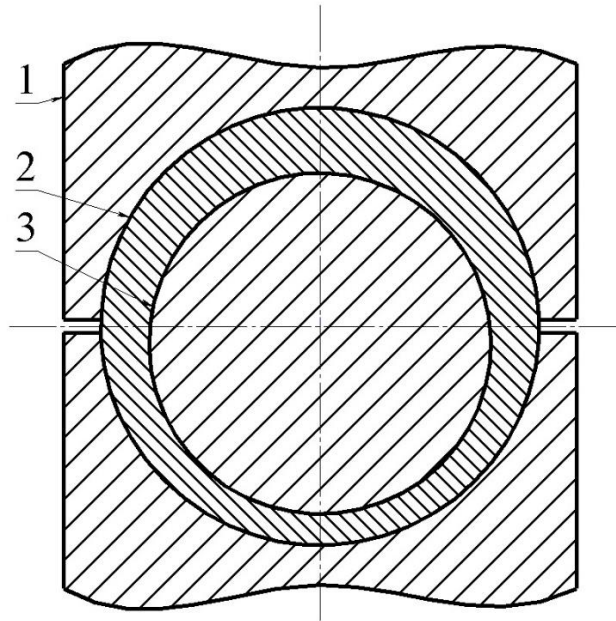


Рис. 2.6 – Поперечний переріз труби з ексцентричною різностінністю орієнтований товстою і тонкою стінкою по вершинам калібру:

- 1 – калібр;
- 2 – труба;
- 3 – оправка.

При прокатці на стані ХПТ виконують поворот труби перед зворотнім ходом (при найбільш розповсюдженій схемі прокатки) або перед прямим та зворотним ходом (у процесі з подвійною подачею та поворотом, що зараз набуває розповсюдження).

Коли товста та тонка стінки поперечного перерізу труби знаходяться у зонах вершини верхнього та нижнього калібрів стана ХПТ, їх деформація має відбуватися на різну величину.

В процесі холодної прокатки труб кожний переріз робочого конусу деформується n разів. Число n називається дрібністю деформації [32].

Дрібність деформації розраховується за формулою:

$$n = \frac{3l_{\text{обж}}}{m(1+2\mu_{\Sigma})} \quad (2.1)$$

$l_{\text{обж}}$ – довжина робочої частини оправки; m – величина подачі; μ_{Σ} – сумарна витяжка при прокатці.

Для створення інструмента аналізу запропонована модель деформації зразків різної товщини між трьома плитами (рис.2.7). За основу планування геометрії осередку деформації та, відповідно, вибору зразків для досліджень взято процес холодної прокатки труби за маршрутом $63 \times 8,5 \text{ мм} \rightarrow 38 \times 4,5 \text{ мм}$.

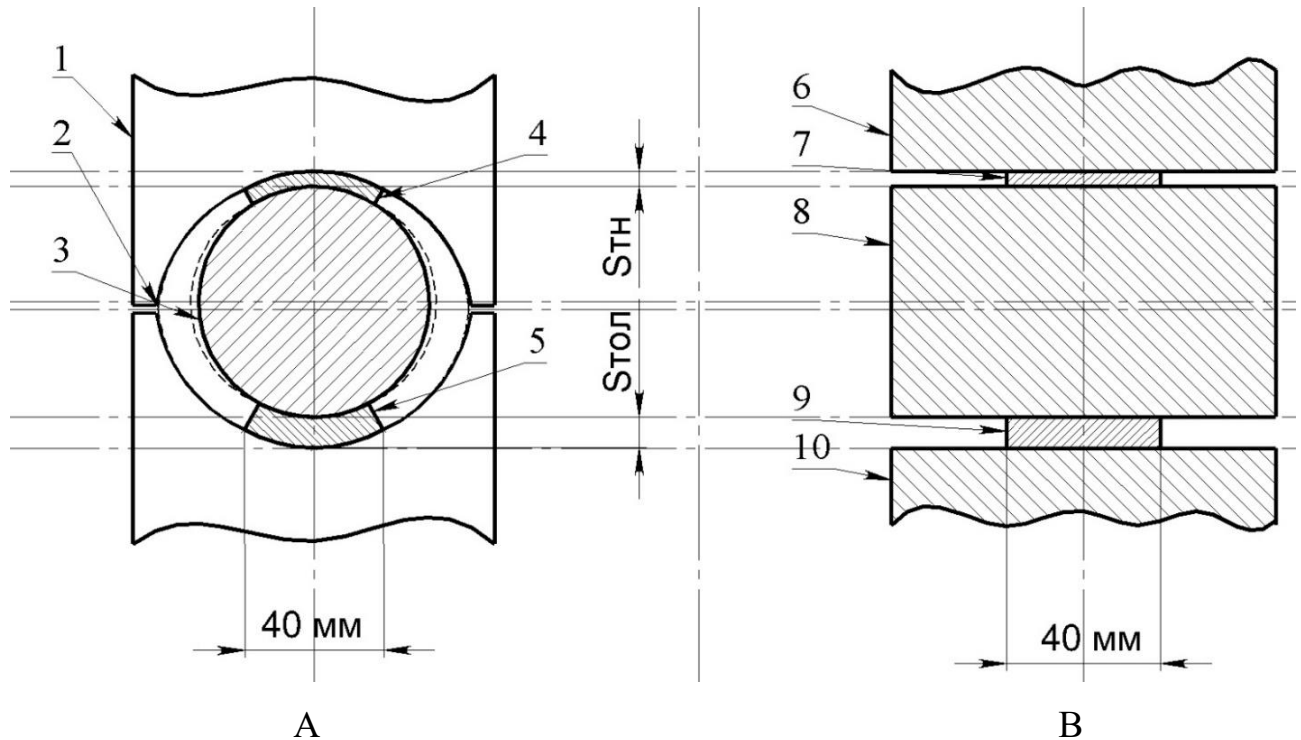


Рис.2.7– Схема для вибору зразків:

А – поперечний переріз труби на оправці з виділеною зоною контакту металу труби та інструмента; В – зразки з геометричними розмірами для проведення експериментів та моделювань; $S_{тон}$ – тонка стінка; $S_{тов}$ – товста стінка; 1 – верхній калібр; 2 – контори труби; 3 – оправка; 4 – тонка частина труби (сегмент); 5 – товста частина труби (сегмент); 6 – верхня плита; 7 – тонкий плоский зразок; 8 – плита-оправка; 9 – товстий зразок; 10 – нижня плита.

Прокатка труби за таким маршрутом є одним з циклів (перекатів) існуючого багатопрохідного маршруту прокатки труб зі сплавів на основі титану.

Маршрут прокатки має три перекати, а саме:

$87 \times 12,5 \text{ мм} \rightarrow 63 \times 8,5 \text{ мм}$ на стані ХПТ-90;

$63 \times 8,5 \text{ мм} \rightarrow 38 \times 4,5 \text{ мм}$ на стані ХПТ-75;

38x4,5 мм → 25,4x2,41 мм на стані ХПТ-55.

Для дослідження було прийнято, що тонка і товста стінка розташовані в зонах, близьких до вершин верхнього та нижнього калібрів (рис. 2.6 А). Тобто враховані саме активні зони деформування осередку деформації. Деформація у випусках не розглядається.

В процесі зближення контуру калібру та оправки при досліджуваній схемі А (рис 2.7) з секторами де знаходяться стінки труби різної товщини, у разі зближення верхнього та нижнього калібрів деформація по товщині буде зменшуватися від вершини до випусків, з тієї причини, що калібр очерчено колом більшого радіусу, ніж поперечний переріз оправки. Це приведе до неточності у процесі розрахункового аналізу. Тому прийняли спрощений процес (рис. 2.7 В) – замінили два сектори з різною товщиною зразків, що деформуються на оправці, на плоскі зразки.

Для розрахунків була застосована програма скінчених елементів Forge3D®, розроблена CEMEF, Ecole des Mines de Paris. Дослідження по частині роботи, які стосуються чисельного моделювання, були виконані в співпраці з колегами-співробітниками інституту Politechnika Czestochowska (м.Ченстохова, Польща) [8,11], який володіє ліцензією на програмний комплекс Forge3D.

Forge3D – один з найпопулярніших програмних продуктів, призначений для математичного моделювання процесів обробки металів тиском (в гарячому та холодному стані) та термічної обробки. Продукт представляє собою програмне забезпечення, яке розроблено у науковому колективі.

Використання програмного продукту в дослідницькій діяльності дозволяє значно економити матеріальні ресурси та час дослідника, оскільки надає можливість перевіряти, розроблювати нові та оптимізувати існуючі технології. Програмний комплекс широко використовується в світі як у навчальних закладах [33-36], так і на виробництвах для проведення розрахунків, це свідчить про високий рівень довіри до результатів програмного комплексу.

Розрахунки в Forge3D® базуються на варіаційному принципі Лагранжа [33, 34], функціонал якого сформульований, як:

$$I = \frac{1}{2} \int_V \sigma_s \dot{\varepsilon}_j dV + \int_V \sigma \dot{\varepsilon}_Q dV - \int_F \sigma_\tau u_\tau dF, \quad (2.2)$$

де $\sigma_s(\varepsilon_i, \varepsilon_j, t)$ – залежність напруження плинину σ_s від інтенсивності швидкості деформації ε_i , інтенсивності деформації ε_j і температури t ; V – об'єм металу; σ_τ та u_τ – напруження тертя і швидкість ковзання металу по інструменту; F – поверхня контакту металу з інструментом.

Залежність $\sigma_s(\varepsilon_i, \varepsilon_j, t)$, що характеризує матеріал, вибирається та вноситься до програмного комплексу з вбудованого марочника сталей та сплавів, за літературними даними [38] або за результатами пластометричних випробувань.

Для розрахункового аналізу прийняті зразки з геометричними розмірами 10x8,5x40 міліметрів та 10x7x40 міліметрів, які відповідають геометричним розмірам порції металу в миттєвому осередку деформації на перших перерізах зони обтиснення стінки (рис. 2.7). В стані ХПТ для маршруту прокатки 63x8,5мм→38x4,5мм.

Початкові та граничні умови для розрахункового аналізу були задані згідно реального процесу холодної прокатки труб та були такими:

А) Вплив температурно-швидкісних параметрів на напруження плинину усіх матеріалів задіяних при розрахунку описує рівняння наведене в роботі [33]:

$$\sigma_\tau = A e^{a_1 T} T^{a_9} \varepsilon^{a_2} e^{\frac{a_4}{\dot{\varepsilon}}} (1 + \varepsilon)^{a_5} T^{a_7} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \varepsilon^{a_8} T \quad (2.3)$$

де ε - інтенсивність деформації; $\dot{\varepsilon}$ - інтенсивність швидкості деформації; T - температура; $A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_7, a_8, a_9$ - коефіцієнти регресії вибраного матеріалу.

В) Коефіцієнт тертя задавався відповідно умов холодної прокатки труб.

Тертя в програмному комплексі визначається за залежностями:

$$\sigma_{\tau} = f \sigma_n \text{ при } f \sigma_n < \frac{f_{\sigma} \sigma_T}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \text{ при } f \sigma_n > \frac{f_{\sigma} \sigma_T}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

де σ_{τ} – напруження тертя; f_{σ} – показник тертя; σ_n – нормальні напруження; σ_T – напруження плинину.

С) Швидкість руху деформуючого інструмента була прийнята та задана до програми згідно з технічними характеристиками преса, на якому проводилися експерименти з осадження зразків між трьома плитами. Швидкість переміщення верхньої плити преса була рівною 4 мм/с. Ця величина близька до швидкості зведення поверхонь контакту верхнього та нижнього валків у станах холодної прокатки труб [39, 40, 41, 42].

Д) Геометричні розміри зразків для розрахункового аналізу задавали згідно з розмірами миттєвого осередку деформації реального процесу – 8,5x10x40мм та 7x10x40мм. Висоту середньої плити прийняли близькою до середнього діаметра оправки стану ХПТ за досліджуваним маршрутом.

Е) Початок координат розташовано в площині нижньої пластини. Вісь Y спрямована проти ходу деформування.

Ф) «Сандвіч» повинен одержати загальну абсолютну деформацію у 10 мм по висоті.

Г) Початкова температура інструмента та зразків – 20°C.

Рівняння теплопровідності, за яким програмний комплекс проводить розрахунок зміни температури під час процесу, має загальний вигляд:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_{def}, \quad (2.6)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності; q_{def} – тепло, що виділяється при деформації.

Граничні умови при розрахунку температури мають вигляд:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_c) + \varepsilon_r * \sigma_r(T^4 - T_0^4), \quad (2.7)$$

де n – вектор, ортогональний до поверхні; T_0 – температура навколишнього середовища або інструменту; σ_r – константа Больцмана; ε_r – ступінь чорноти поверхні; h_c – коефіцієнт теплопередачі.

Для розрахункового аналізу була застосовано трьохвимірну модель. Це дало можливість максимально точно дослідити плин та формозміну металу.

Побудова математичної моделі для розрахункового аналізу за допомогою програмного комплексу Forge3D має наступний алгоритм:

1. Побудова тривимірної моделі задачі, за допомогою CAD систем або вбудованими інструментами комплексу, з усіма необхідними об'єктами для розрахунку.

2. Нанесення тривимірної сітки на об'єкти, які деформуються.

3. Вибір матеріалу дослідження з існуючого довідника програмного комплексу або створення нового відповідно до його реологічних властивостей та внесення коефіцієнтів регресії до формул (2.3) згідно літературних даних [38] чи пластометричних випробувань.

4. Завдання кінематичних характеристик для усіх рухомих частин моделі. На цьому етапі задаються швидкості руху та ступені деформації.

5. Задаються температурні умови задачі у вигляді початкової температури усіх об'єктів розрахунку.

Після внесення всіх необхідних даних до програмного продукту, проводиться розрахунок та обробка одержаного масиву даних.

2.2 Обґрунтування і розробка методики лабораторного експериментального дослідження для апробації результатів розрахункового аналізу

В науковій діяльності, яка пов'язана з моделюванням, виділяють п'ять етапів дослідження: 1) постановка задачі; 2) побудова моделі; 3) пошук рішення;

4) перевірка моделі на адекватність та оцінка результату; 5) впровадження результату [26, 43].

Для дотримання точності одержаних результатів, мета яких – забезпечити надійність одержуваного рішення й домогтися його впровадження, було заплановано та проведено лабораторний експеримент у повній відповідності до проведеного розрахункового аналізу з застосуванням програми скінченно-елементного моделювання.

Для розрахункового аналізу та лабораторного експерименту по апробації одержаних виразів за допомогою осадження різновтовщинних зразків між трьома плитами, розміри зразків будуть становити для товстого і тонкого зразків відповідно $S_{\text{тов}}=8,5$ мм, $S_{\text{тн}}=7$ мм. Довжина миттєвого осередку деформації, для обраного маршруту, при прокатці на стані холодної прокатки становить від 5 мм до 15 мм, а ширина зони, яка знаходиться у вершинах калібру і контактує одночасно з оправкою і валками, становить близько 40 мм (рис. 2.2).

З цих даних, для серії експериментів, були виготовлені зразки з геометричними розмірами $10 \times 8,5 \times 40$ мм та $10 \times 7 \times 40$ мм, які відповідають геометричним розмірам порції металу в миттєвому осередку деформації при холодній прокатці труб на оправці.

Такі розміри зразків дозволяють провести деформування різновтовщинних зразків в масштабі та умовах близьких до прокатки на оправці. Точність геометричних розмірів зразків при виготовленні контролювалась за допомогою сучасного мікрометра, який дозволяє проводити заміри до тисячної долі міліметра, та пройшов перевірку на точність.

Як деформуючий інструмент, прийнято три плити зі сталі 40ХН [44, 45] з геометричними розмірами $100 \times 150 \times 25$ мм (рис. 2.7).

Плити виготовляли на фрезерному верстаті партією. Це дозволило одержати високу точність геометричних розмірів та високу рівність і попарну паралельність поверхонь. Деформуючу поверхню кожної з плит для одержання

шорсткості поверхні аналогічної шорсткості поверхні деформуючого інструменту стана ХПТ, шліфували на плоскошліфувальному верстаті ЗД725. А саме, шорсткість дорівнювала шорсткості поверхні рівчака калібру стана ХПТ($\sqrt{Rz40}$). Таким чином була врахована подібність процесу виготовлення інструмента для експериментів з осадження різновтовщинних зразків між трьома плитами до інструменту станів холодній прокатки труб.

Вибір верстата обумовлений його високою продуктивністю та можливістю одержувати вироби з точністю до тисячної долі міліметра.

Прокатка труб зі сплавів на основі титану проводиться за одною з двох технологій [46,47]:

- А) з попереднім нанесенням на заготовку сольового покриття;
- Б) з подачею мастила або емульсії в осередок деформації.

Це дозволяє одержувати високу якість поверхні та унеможливити налипання металу на деформуючий інструмент. Для виключення ефекту налипання металу на поверхню плит під час експерименту було використано високоякісне мастило, подібного за своїми технічними характеристиками (в'язкість та коефіцієнт тертя) до використовуваної в промисловості емульсійної суміші. Це дало змогу привести тертя на контакті поверхонь між зразками та деформуючими плитами до рівня, подібного тому, що має місце при холодній прокатці труб з емульсіями та мастилами.

Після кожного ступеня деформації на гідравлічному пресі із зразків та інструмента знімався попередній шар мастила та наносився новий для запобігання погіршень якості мастильного шару і потрапляння до нього часток металу або іншого бруду.

Під час деформування зразки та інструмент були розташовані один відносно одного так, як показано на рис. 2.7 (Б), утворюючи так званий «сендвіч».

На першу плиту, яка слугувала деформуючим інструментом, точно у центрі, було покладено зразок зі сплаву на основі титану, зверху накрито плитою, яка

виконувала роль оправки. Далі, точно у центрі плити-оправки був розміщений другий зразок зі сплаву на основі титану. Зверху конструкція накривалася верхньою плитою.

Проміжна плита-оправка була незафіксованою та не мала жодних запобіжників. Тож вона могла вільно переміщуватися під час деформування. Оскільки плита була незафіксованою, було неможливо задати деформування кожного окремого зразка, а лише деформувати одночасно всю конструкцію, тобто тонкий та товстий зразок.

Деформування проводили «дрібно».

За планом експерименту деформування зразків зупинялося після одержання загальної деформації в один міліметр. Таким чином задавалася дрібність деформації, яка притаманна процесу на станах холодної прокатки труб.

Дрібність деформації – в процесі холодної прокатки труб, кількість деформувань, котру кожний перетин металу робочого конусу одержує при проходженні всієї довжини робочого конусу.

Під час деформування зразки зі сплаву на основі титану не одержували навантажень, які могли б розігріти їх до високої температури, для утворення альфованого прошарку на поверхні, тому вони не піддавалися термічній обробці у проміжках між обтисненнями і зберігали рівень зміцнення металу, як і було заплановано.

Для більшої наглядності представимо структуру дослідження розрахункового аналізу та лабораторного експерименту по його адаптації у вигляді логічної блок-схеми (рис 2.8).



Рис. 2.8 – Блок-схема проведення процесу розрахункового аналізу та лабораторного експерименту з його апробації

2.3. Обґрунтування і розробка методики розрахункового аналізу зменшення поперечної різностінності зразків з різним початковим значенням різностінності 20%, 15%, 10% та 5%

Розрахунковий аналіз проводиться з метою виявлення кількісних характеристик впливу величини початкової поперечної ексцентричної різностінності на її зменшення в процесі деформації.

На базі раніше описаної методики було розроблено та заплановано проведення розрахункового аналізу для випадків деформування зразків з різним рівнем різностінності, а саме, різностінність становила 20%, 15%, 10% та 5%.

Початкові та граничні умови для розрахункового аналізу були задані такими, як зазначено нижче:

А) Реологічні параметри усіх матеріалів, застосованих у моделюваннях, були описані рівнянням (2.3), а коефіцієнти задані згідно літературних даних [38].

Б) Коефіцієнт тертя прийнято згідно з умовами холодної прокатки труб.

В) Швидкість руху деформуючого інструмента була прийнята 4 мм/с.

Г) Геометричні розміри зразків, використаних в розрахунковому аналізі, задавалися згідно з розмірами миттєвого осередку деформації реального процесу. Базова товщина стінки, від якої велися розрахунки, становила 8,5мм.

$$S_{1.min} = S_H - \left(\frac{S_H}{100} \cdot 20\right) \quad (2.8)$$

$$S_{1.max} = S_H + \left(\frac{S_H}{100} \cdot 20\right) \quad (2.9)$$

$$S_{2.min} = S_H - \left(\frac{S_H}{100} \cdot 15\right) \quad (2.10)$$

$$S_{2.max} = S_H + \left(\frac{S_H}{100} \cdot 15\right) \quad (2.11)$$

$$S_{3.min} = S_H - \left(\frac{S_H}{100} \cdot 10\right) \quad (2.12)$$

$$S_{3.max} = S_H + \left(\frac{S_H}{100} \cdot 10\right) \quad (2.13)$$

$$S_{4.min} = S_H - \left(\frac{S_H}{100} \cdot 5\right) \quad (2.14)$$

$$S_{4.max} = S_H + \left(\frac{S_H}{100} \cdot 5\right) \quad (2.15)$$

Згідно з розрахунками, висоти зразків становили:

- для різновтовщинності $\pm 20\%$ – 9,35 мм і 7,65 мм;
- для різновтовщинності $\pm 15\%$ – 9,14мм і 7.86 мм;
- для різновтовщинності $\pm 10\%$ – 8,93мм і 8,08мм;
- для різновтовщинності $\pm 5\%$ – 8,71 мм і 8,29 мм.

Д) Висоту середньої плити прийняли рівною 25мм.

Е) Початок координат розташовано в площині нижньої пластини.

Ж) «Сендвіч» повинен одержати загальну деформацію 10 мм по висоті.

З) Температура початку процесу дорівнює 20 °С.

2.4. Обґрунтування і розробка методики дослідження зміни поперечної різностінності труб зі сплаву на основі титану при прокатці на станах ХПТ

Для одержання даних щодо зменшення ексцентричної різностінності було заплановано відібрати робочі конуси з труб зі сплаву на основі титану при прокатці за маршрутом 63x8,5мм→38x4,5мм.

Прокатка виконувалася на стані ХПТ-75 [1, 48, 49] за класичною схемою прокатки, тобто подача та поворот проводилися у крайніх положеннях кліті.

Деформаційні параметри прокатки:

1. Коефіцієнт витяжки $\mu=3.07$
2. Абсолютна деформація по діаметру $\Delta D=25\text{мм}$
3. Абсолютна деформація по товщині стінки $\Delta S=4\text{ мм}$
4. Відносна деформація по діаметру $\varepsilon_D=39,7\%$
5. Відносна деформація по товщині стінки $\varepsilon_S=47,1\%$
6. Подача $m=3\text{ мм}$
7. Сумарна деформація по площі поперечного перерізу $\varepsilon_\Sigma=67,5\%$

8. Лінійне зміщення $m\mu=9,27\text{мм}$

Для проведення досліджень зі зменшення ексцентричної поперечної різностінності уздовж конуса деформації під час потокової прокатки на стані, було зупинено процес та витягнуто трубу зі стана з так званим «конусом деформації» [51].

Конус було заплановано відокремити від основної частки труби та розрізати його (рис. 2.9) на кільця з мірними довжинами за допомогою стрічкопильного верстата по металу Pilous ARG 105 Mobil.

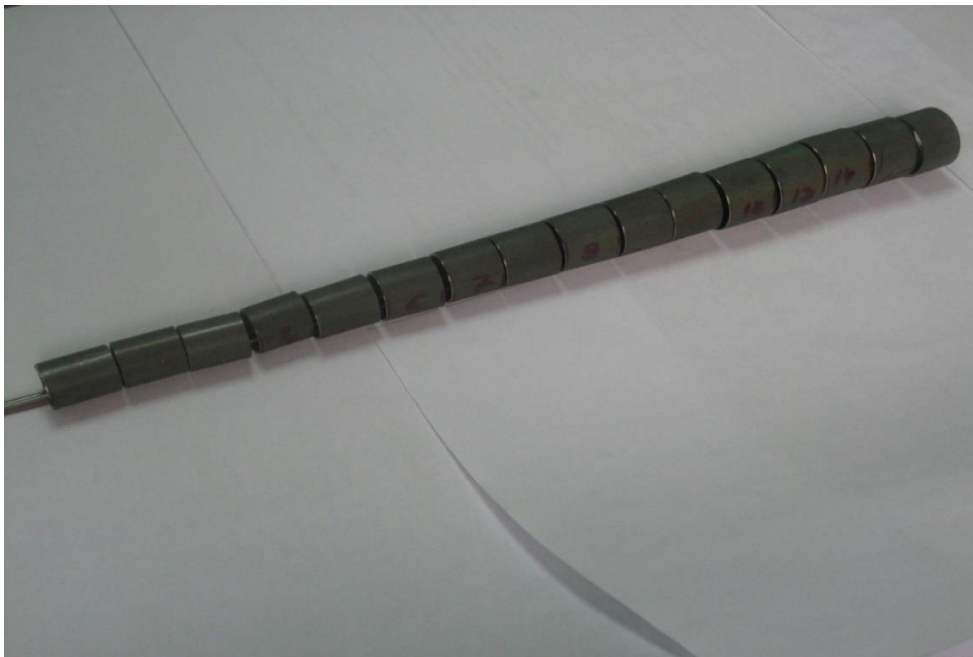


Рис. 2.9 – Частина конусу деформації труби зі сплаву на основі титану ПТ-1М, одержаний при прокатці на стані ХПТ-55, та розрізаний на патрубки для проведення вимірів товщини стінки

Даний верстат був вибраний з причини значних переваг, а саме:

- висока геометрична точність різання (відхилення до 0,05 мм);
- висока якість поверхні різку, чистота оброблюваної поверхні;
- мала ширина різку до 0,5 мм (за рахунок конструкції, верстат забезпечує гасіння вібрацій);

– відсутність оплавлення краю деталей і ефекту загартування торця матеріалу, що розрізається (за рахунок застосування системи охолодження інструменту);

– висока перпендикулярність розрізу до осі труби.

Застосування цього верстата дозволить одержати зразки високої якості для проведення досліджень і знівелювати недоліки, які можуть виникнути на зразках при використанні пил маятникового типу – «Радіак».

Кожний з конусів (рис. 2.9) був розрізаний на певну кількість перерізів. Кожний переріз був промаркований по периметру перерізу у 8 положеннях. У цих точках була заміряна товщина стінки за допомогою трубного мікрометра і одержані дані занесені у таблицю.

2.5 Обґрунтування і розробка методики дослідження зміни поперечної різностінності труб зі сплаву на основі титану при прокатці на стані ХПТР

Для одержання даних щодо зміни різностінності по довжині робочого конуса була запланована прокатка партії труб зі сплаву на основі титану за маршрутом $28 \times 3,2 \rightarrow 25,4 \times 2,65 \text{ мм}$.

Труби були прокатані на стані ХПТР 15-30 за класичною схемою [52].
Подача та поворот проводилися у передньому положенні кліті.

Деформаційні параметри прокатки:

1. Коефіцієнт витяжки $\mu_{\Sigma}=1,32$.
2. Абсолютна деформація по діаметру $\Delta D=2,6 \text{ мм}$.
3. Абсолютна деформація по товщині стінки $\Delta S=0,55 \text{ мм}$.
4. Відносна деформація по діаметру $\varepsilon_D=9,3\%$.
5. Відносна деформація по товщині стінки $\varepsilon_S=17,2\%$.
6. Подача $m=2,1 \text{ мм}$.
7. Сумарна деформація по площі поперечного перерізу $\varepsilon_{\Sigma}=24\%$.
8. Лінійне зміщення $m\mu_{\Sigma}=2,77 \text{ мм}$.

Даний маршрут використовується в умовах виробництва для зменшення різностінності на останніх циклах прокатки. Для цього труби з великим показником різностінності прокатуються на станах ХПТР.

Під час прокатки труб на стані за вищенаведеним маршрутом проведений відбір конуса деформації. Зроблена поперечна порізка конуса на 27 рівних частин-кілець, параметри геометрії яких замірялися трубним мікрометром в 8-ми точках поперечного перерізу.

Висновок по розділу II

Відповідно до поставлених задач, була розроблена та обґрунтована методика досліджень, яка має три складові:

1. Розрахунковий аналіз на базі застосування програми скінченно-елементного моделювання «Forge3D», при якому геометричні та фізичні параметри розрахункових моделей співпадають з миттєвим осередком деформації в стані ХПТ-75 при прокатці по маршруту 63x8,5 мм→38x4,5 міліметра.

2. Експеримент з осадження зразків зі сплаву на основі титану з параметрами, однаковими з розрахунковим аналізом. Мета експерименту – апробація розрахункового аналізу виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання.

3. Промисловий експеримент на станах ХПТ та ХПТР з дослідження зменшення поперечної різностінності труб по довжині робочого конуса. Мета апробація розвиненого метода прогнозування поперечної різностінності при багатопрохідній холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану.

Ці складові дають змогу побудувати комплексний механізм по прогнозуванню рівня поперечної різностінності. Кожний експеримент та розрахунковий аналіз направлений на підтвердження запропонованої теорії та може слугувати окремим механізмом для дослідження.

РОЗДІЛ 3. РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ВІДНОСНО ЗМІНИ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ПРИ ПРОКАТЦІ В КАЛІБРАХ НА ОПРАВЦІ ДЛЯ УМОВ ПРОКАТКИ НА СТАНАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

3.1. Розробка теоретичного пояснення механізму зменшення поперечної ексцентричної різностінності при прокатці на оправці

Основною заготовкою для титанових труб є гарячекатана труба-заготовка отримана після прошивання на станах поперечно-гвинтової прокатки. Основним видом різностінності труб після косовалкової прокатки є ексцентрична різностінність [1, 20, 22]. Така різностінність характеризується тим, що зміна товщини стінки по периметру труби має вигляд синусоїди (див. рис. 2.4-2.5)

Спроба побудови повної моделі деформування в миттєвому осередку деформації, яка описуватиме повне поле швидкостей функціями, єдиними для повного осередку деформації, пов'язана з практично непереборними труднощами та не забезпечить тієї оперативності в аналізі, яка потребується від моделі [53, 54,55]. Тому найбільш раціональним підходом до вирішення задачі з деформації різностінної труби на оправці є розподіл осередку деформації на активні і пасивні зони. І найбільш ефективним є дослідження саме активних зон по вершинах калібру і урахування їх взаємодії.

Для вирішення задачі було розроблено спрощений механізм зменшення ексцентричної різностінності. Були зроблені припущення, які незначно або не в повній мірі впливають на процес і не можуть внести значні огріхи при аналізі. Ці припущення направлені на відокремлення і виведення з дослідження пасивних зон осередку деформації (зон випусків) при прокатці труб.

Були прийняті такі припущення для моделі:

1. Деформується труба, яка має тільки ексцентричну різностінність.

Різностінність труб складається з ексцентричної та симетричної компоненти [1]. Значення ексцентричної складової значно більше, ніж симетричної, тому припускаємо, що труба має лише ексцентричну

різностінність. При ексцентричній різностінності максимальне значення стінки знаходиться навпроти мінімального.

2. Розглядаємо прокатку в системі 2-х пів-калібрів.

3. Тонка стінка знаходиться у вершині одного калібру, а товста стінка у вершині протилежного калібру.

Ексцентрична різностінність (рис. 3.1) характерна розташуванням товстої стінки навпроти тонкої через особливості процесу прошивання заготовки на станах поперечно-гвинтової прокатки.

При прокатці виконується поворот труби на 57° – 120° перед кожною подачею. Таким чином, перед кожною подачею мінімальне та максимальне значення стінки будуть знаходитися достатньо часто у зонах, близьких до вершини калібру. Коли S_{\max} та S_{\min} знаходяться у зонах випусків калібру аналізований у роботі процес зменшення різностінності не відбувається. Так як по вершинам верхнього та нижнього калібрів будуть знаходитися однакові товщини стінок.

Калібр на дві третини складається з замкнутого перерізу, де має місце контакт металу між валком та оправкою, і лише третина або менше припадає на зону, де метал контактує лише з валками або контакт з інструментом відсутній взагалі. Для випадку прокатки на станах ХПТР зона випусків є ще меншою і становить 10–20% від периметра калібру [52].

4. Розглядаємо деформацію по вершині калібру.

Деформація у випусках має складний характер і не є основною при холодній прокатці труб. Тому до уваги взяті вершини калібру, де проходить найбільша деформація.

У випадку, наприклад, розташування товстої та тонкої стінки у випусках калібру, по вершинам калібру будуть знаходитись стінки однакової товщини (рис. 3.1). Тобто у цьому випадку стінки труби будуть зазнавати однакової деформації.

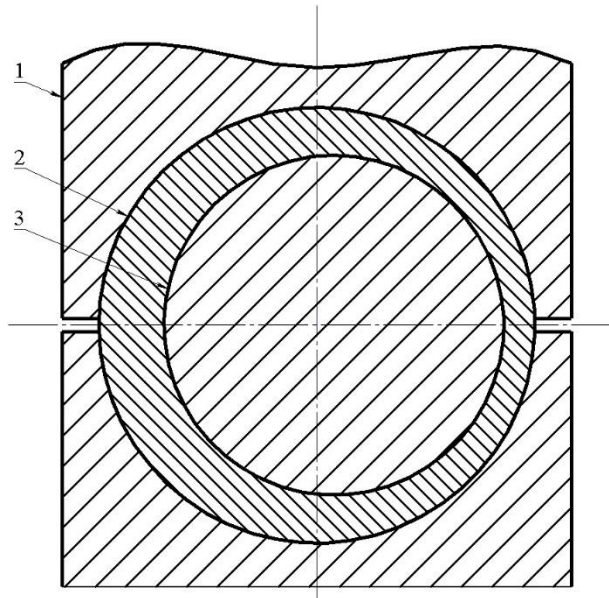


Рис. 3.1 – Схема поперечного перерізу труби в калібрах при розтошуванні товстої та тонкої стінки в випусках калібру

1 – калібр, 2 – поперечний переріз різностінної труби, 3 – оправка

5. Не беремо до уваги течію металу у випусках.

6. Не беремо до уваги вплив пружного спотворення геометрії осередку деформації внаслідок великих напружень.

Дане припущення введено оскільки відсутні практичні методики обліку пружних деформацій [42] та величини спотворення компенсується практичним шляхом, за рахунок зміни положення оправки та зазору між валками. Окрім того, величина пружних деформацій враховується безпосередньо при розрахунку калібровки, як емпірична величина, чи компенсується на величину тиску одержану в результаті лабораторних досліджень.

7. Оправка не має можливості переміщуватися уздовж вісі прокатки.

Дане припущення засновано на тому, що оправка на станах холодної прокатки зафіксована лише у кінці довгого стержня і може переміщуватися лише в вертикальній площині від осі прокатки [51, 52].

Розглянемо спрощений механізм зменшення ексцентричної різностінності у миттєвому осередку деформації (рис. 3.2).

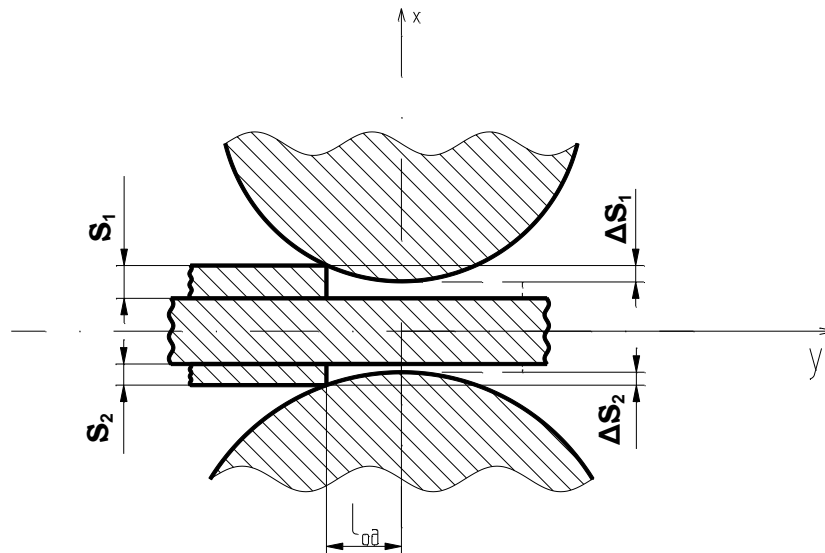


Рис. 3.2 – Схема осередку деформації при первинному контакті труби з валками до пояснення спрощеного механізму зменшення ексцентричної різностінності при прокатці на оправці:

S_1 – більша товщина стінки; S_2 – менша товщина стінки; ΔS_1 – прогнозові необтиснення металу з боку товстої стінки, у момент захвату; ΔS_2 – прогнозоване обтиснення металу з боку тонкої стінки, у момент захвату; l_{0d} – відстань від початку контакту труби з валками до вісі, що з’єднує центри валків

Розглянемо процес прокатки у початковий момент при захваті труби валками (калібрами) на оправці (рис.3.2). Якщо зробити припущення, що будемо мати рівність абсолютних обтиснень як товстої, так і тонкої стінки, це призведе до того, що при рівних обтисненнях та різних товщинах стінки відносна деформація на тонкій стінці буде більшою.

$$\Delta S_1 = \Delta S_2; \quad (3.1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\Delta S_2}{S_2}; \quad (3.2)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta S_1}{S_1}; \quad (3.3)$$

Тоді:

$$S_1 > S_2 ; \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_2 > \varepsilon_1 ; \quad (3.5)$$

Тонка стінка зазнає більших відносних деформацій, і зміцнення металу у тонкій стінці буде більшим.

При однаковому обтиску ми повинні мати однакову площу контакту зі сторони тонкої і товстої стінки. Розглянемо взаємодію тисків з боку верхнього і нижнього валка зробивши припущення про рівність площ контакту ьруби з калібром. Якщо площі контакту однакові то можна аналізувати не сили, а середній питомий тиск та спростити розрахунки. Для аналізу взаємодії тисків з боку верхнього і нижнього валка використали формулу Шевакіна Ю.Ф. [44], яка виведена для умов холодної прокатки труб на оправці та дозволяє розрахувати середній питомий тиск:

$$p = \sigma_{\text{в.і.}} \left[n_{\omega} + f \left(\frac{S}{S'} - 1 \right) \frac{R_{\text{зр.і}}}{R_m} \frac{\sqrt{2R_{\text{зр.і}} \Delta S}}{S'} \right] \quad (3.6)$$

де $\sigma_{\text{в.і.}}$ – межа міцності; n_{ω} – коефіцієнт, враховуючий вплив середнього головного напруження ($n_{\omega} = 1,02 - 1,08$); f – коефіцієнт тертя на межі інструмент-труба; S – стінка труби до прокатки; S' – стінка труби після прокатки; $R_{\text{гр.і}}$ – радіус гребня рівчака; R_m – радіус шестерні.

Співставимо рівняння (3.6) дій середнього питомого тиску на тонкій та товстій стінці. Оскільки сили та площі контакту з боку верхнього і нижнього валків є рівними, одержуємо:

$$p_1 = \sigma_{\text{в.і.}} \left[n_{\omega} + f \left(\frac{S_1}{S_1'} - 1 \right) \frac{R_{\text{зр.і}}}{R_m} \frac{\sqrt{2R_{\text{зр.і}} \Delta S_1}}{S_1'} \right] \quad (3.7)$$

$$p_2 = \sigma_{\text{в.і.}} \left[n_{\omega} + f \left(\frac{S_2}{S_2'} - 1 \right) \frac{R_{\text{гп.і.}} \sqrt{2R_{\text{гп.і.}} \Delta S_2}}{R_m S_2'} \right] \quad (3.8)$$

де $\sigma_{\text{в.і.}}$ – межа міцності; n_{ω} – коефіцієнт, враховуючий вплив середнього головного напруження; f – коефіцієнт тертя на межі інструмент-труба; S_1 – товста стінка труби; S_1' – товста стінка труби після прокатки; S_2 – тонка стінка труби до прокатки; S_2' – тонка стінка труби після прокатки; $R_{\text{гп.і.}}$ – радіус гребня рівчака; R_m – радіус шестерні.

Далі виконаємо спрощення цих формул виключивши з них всі складові, які є однаковими для осередку деформації, такі, як радіус валків (що є незмінним для миттєвого перерізу деформації з боку як верхнього, так і нижнього валка), та ін., одержуємо:

$$p_1 = \sigma_{\text{в.і.}} \cdot \left(n_{\omega} + f \left(\frac{S_3'}{S_1'} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{2\Delta S_1'}}{S_1'} \right) \quad (3.9)$$

$$p_2 = \sigma_{\text{в.і.}} \cdot \left(n_{\omega} + f \cdot \left(\frac{S_3''}{S_2''} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{2\Delta S_2''}}{S_2''} \right) \quad (3.10)$$

Серед складових, які впливають на осередок деформації, залишаються межа міцності, деформація по стінці, відношення товщин стінок та тертя.

Наведемо приклад розрахунку. Приймемо, що прокатується труба з товщиною стінки 5 мм і різностінністю $\pm 10\%$. Тобто $S_{\text{max}} = 5,5$ мм; $S_{\text{min}} = 4,5$ мм. Проектна деформація по товщині стінки становить 1 міліметр. Тоді при підстановці цих даних до рівняння (3.9 та 3.10) ми одержуємо:

$$p_1 = \sigma_{\text{в.і.}} \cdot \left(n_{\omega} + f \left(\frac{5,5}{4,5} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{4,5} \right) \quad (3.11)$$

$$p_2 = \sigma_{e.i} \cdot (n_w + f \left(\frac{4,5}{3,5} - 1 \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{3,5}) \quad (3.12)$$

Проводимо розрахунок та одержуємо:

$$p_1 = \sigma_{e.i} \cdot (n_w + 0,07f) \quad (3.13)$$

$$p_2 = \sigma_{e.i} \cdot (n_w + 0,115f) \quad (3.14)$$

Розрахувавши на базі цього силу прокатки, при незмінній межі міцності, коефіцієнті тертя та впливу середнього контактного напруження видно, що умова рівноваги сил з боку верхнього та нижнього валка не буде виконуватись. Різниця між середніми питомими тисками, яка виникає в такому випадку, може становити до 40 %.

Застосувавши формулу розрахунку середнього питомого тиску прокатки (3.6), при холодній прокатці труб [41, 47], одержуємо (3.13, 3.14), що сила деформації повинна бути більшою з боку тонкої стінки, ніж на товстій стінці при незмінній площі контакту. Існування стабільного процесу прокатки з такими умовами є неможливим, оскільки це не відповідає другому закону Ньютона: сили, що діють вздовж вертикальної вісі на верхній та нижній валок повинні бути врівноважені.

Сили, які витрачаються на деформацію тонкої та товстої стінки, повинні бути рівними. Виникає збільшення обтиснення на товстій стінці та зменшення обтиснення на тонкій, що дає різні довжини горизонтальних проекцій дуг контакту та різну площу контакту.

Це стає можливим тому, що метал деформується на тонкій стінці інтенсивніше [5, 19, 20, 25] та зміцнення виникає більше у тонкій стінки, ніж товстої.

Система повинна відповідати умові рівноваги, а саме, стабілізувати процес. Сили прокатки, що діють з боку верхнього та нижнього валка, мають

бути урівноважені та дорівнювати одна одній.

Щоб це відбулося, у системі, під час стабілізації процесу, змінюється розподіл обтиснення між товстою та тонкою стінкою. Виникає збільшення обтиснення на товстій стінці та зменшення обтиснення на тонкій стінці, що дає різні довжини горизонтальних проекцій дуг контакту (рис.3.3). Досягнення рівноваги виконується за рахунок різниці довжин дуги контакту на товстій стінці та на тонкій. При цьому довжина дуги контакту на товстій стінці буде більшою, ніж на тонкій.

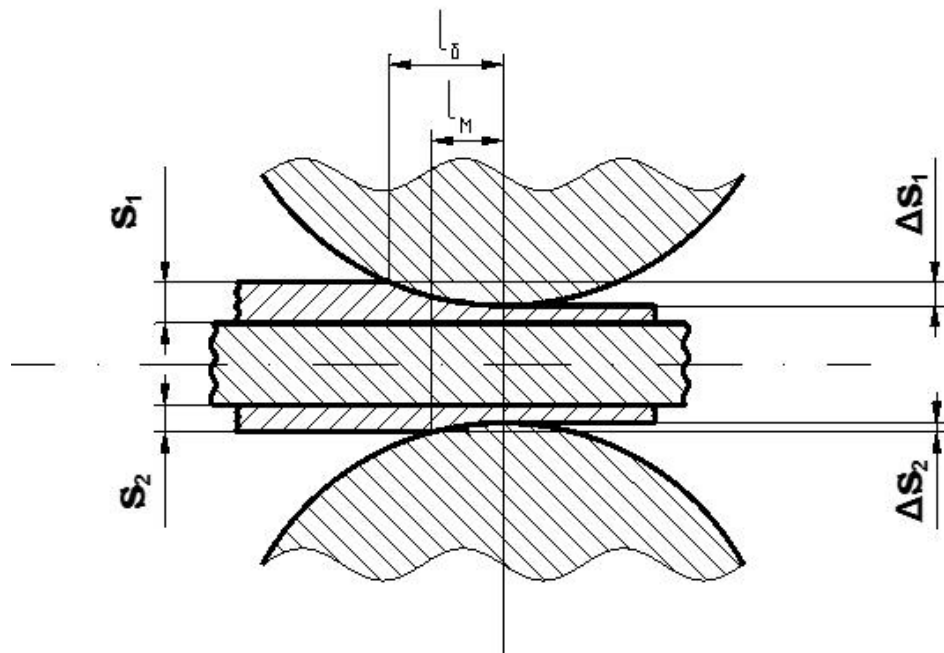


Рис. 3.3 – Схема миттєвого осередку деформації при стабілізації процесу до пояснення спрощеного механізму зменшення ексцентричної різностінності при прокатці на оправці:

S_1 – товста стінка труби; S_2 – тонка стінка труби; ΔS_1 – обтиснення на товстій стінці труби; ΔS_2 – обтиснення на тонкій стінці труби; l_{δ} – довжина осередку деформації для верхнього валка; l_M – довжина осередку деформації для нижнього валка.

Це можливо, коли система труба-оправка переміститься відносно валків у бік товстої стінки.

За такими умовами, ми одержимо зменшення поперечної ексцентричної різностінності, що у повній мірі відповідає реальному процесу прокатки труб на станах холодної прокатки труб.

3.2 Розрахунковий аналіз деформування двох зразків різної товщини в умовах близьких до деформації на станах холодної прокатки труб

Проведено розрахунковий аналіз деформування зразків, які мають близькі розміри по висоті до максимальної та мінімальної стінки труби при прокатці на промисловому стані ХПТ–75. Матеріалом був вибраний сплав на основі титану ПТ–1М [38, 44, 56, 57, 58]. Розрахунковий аналіз процесу деформації (рис. 3.4 – рис. 3.5) було проведено з дев'ятьма дробовими обтисненнями відповідно до обтиснень, яких зазнає труба вздовж конуса деформації під час прокатки за маршрутом 63x8,5мм→38x4,5 мм на стані ХПТ-75.

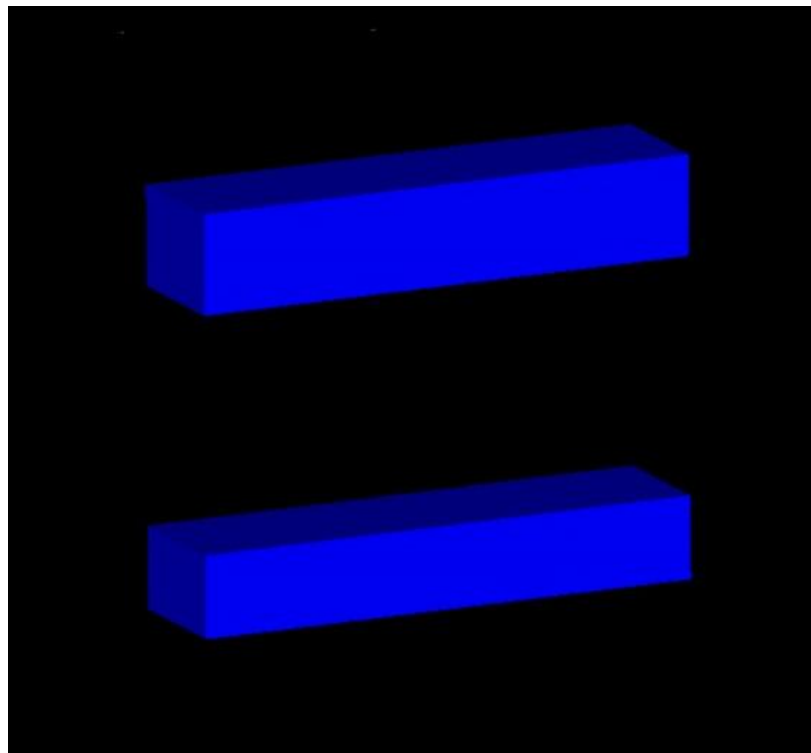


Рис. 3.4 – Зразки різної товщини для розрахунку деформації зразків між трьома плитами; без інструмента до початку деформації

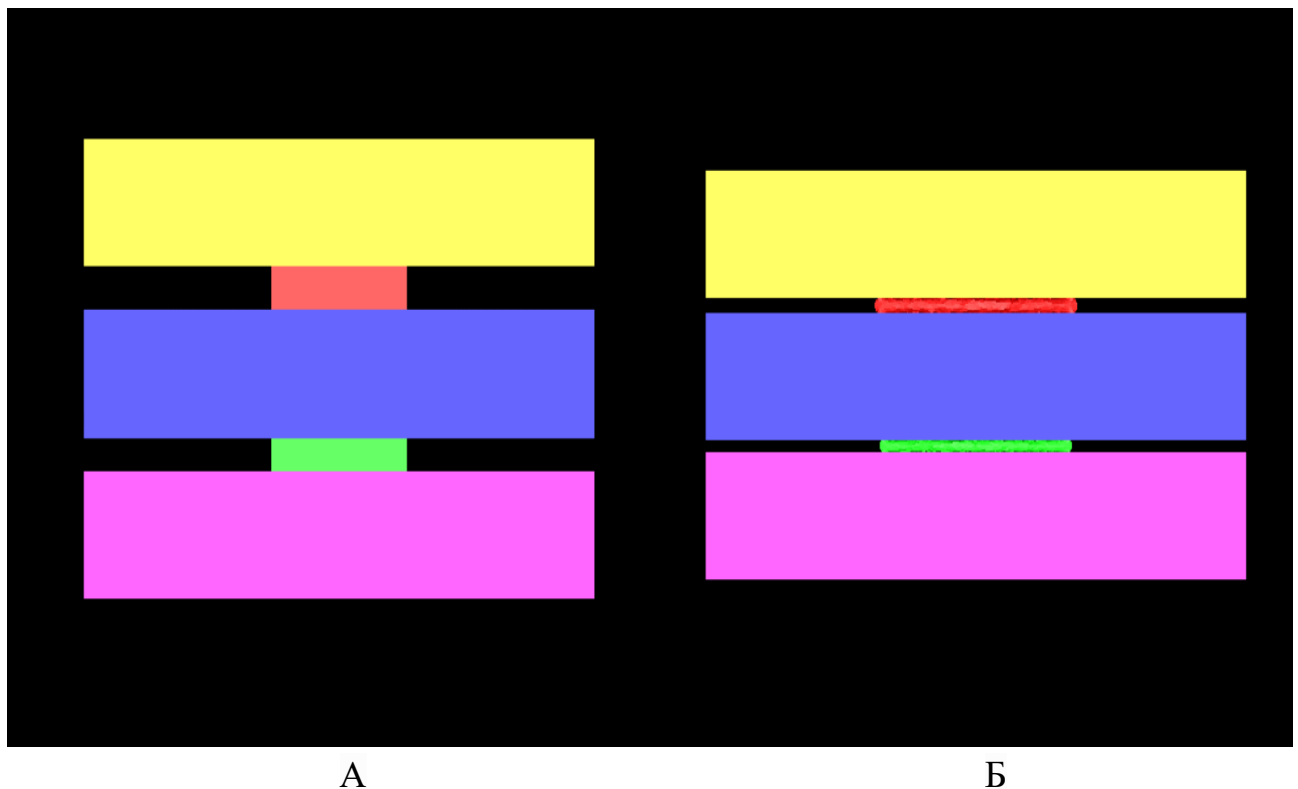


Рис. 3.5 – Початкова та фінальна стадія розрахункового аналізу деформації різнотовщинних зразків між трьома плитами; вид збоку на інструмент та зразки: А - початкова стадія моделювання. Б - фінальна стадія моделювання

Одержані результати розрахункового аналізу представлені у таблиці 3.1, де внесені: геометричні параметри зразків, розраховані значення середньої товщини стінки, абсолютної та відносної різнотовщинності та значення розрахованого загального обтиснення в абсолютних та відносних величинах, якого зазнавали зразки під час експерименту.

Згідно методики під час розрахункового аналізу були задані висоти з інтервалом приблизно 1 мм на які розраховувалася деформація. Розрахунок було проведено до значення відносної деформації у 60%.

На основі одержаних даних з процесу аналізу видно, що абсолютна різнотовщинність зразків зменшилася у 3 рази з 1,5 мм до 0,49 мм. Відносна різнотовщинність зменшилася не так суттєво, тобто з 17,6% до 14%.

Результати розрахункового аналізу процесу осадження двох зразків різної товщини зі сплаву на основі титану між трьома плитами

Заплановані параметри		Результати розрахункового аналізу			
Зростаюча загальна деформація по висоті двох зразків, %		Висоти зразків по обтисненням, мм		Різнотовщинність	
абсолютна, мм	відносна, %	S_{\max}	S_{\min}	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	8,50	7,00	1,5	17,6
0,95	6	7,96	6,59	1,37	17
1,95	13	7,40	6,15	1,25	17
2,95	19	6,83	5,72	1,11	16
4,00	26	6,23	5,27	0,96	15
4,95	32	5,73	4,82	0,91	16
5,95	38	5,16	4,39	0,77	15
6,95	45	4,60	3,95	0,65	14
7,95	51	4,06	3,49	0,57	14
8,95	58	3,52	3,03	0,49	14

Для наочності побудовано графіки які описують зміну різностінності для розрахункового аналізу для абсолютних (рис 3.6) та відносних (рис. 3.7) величин.

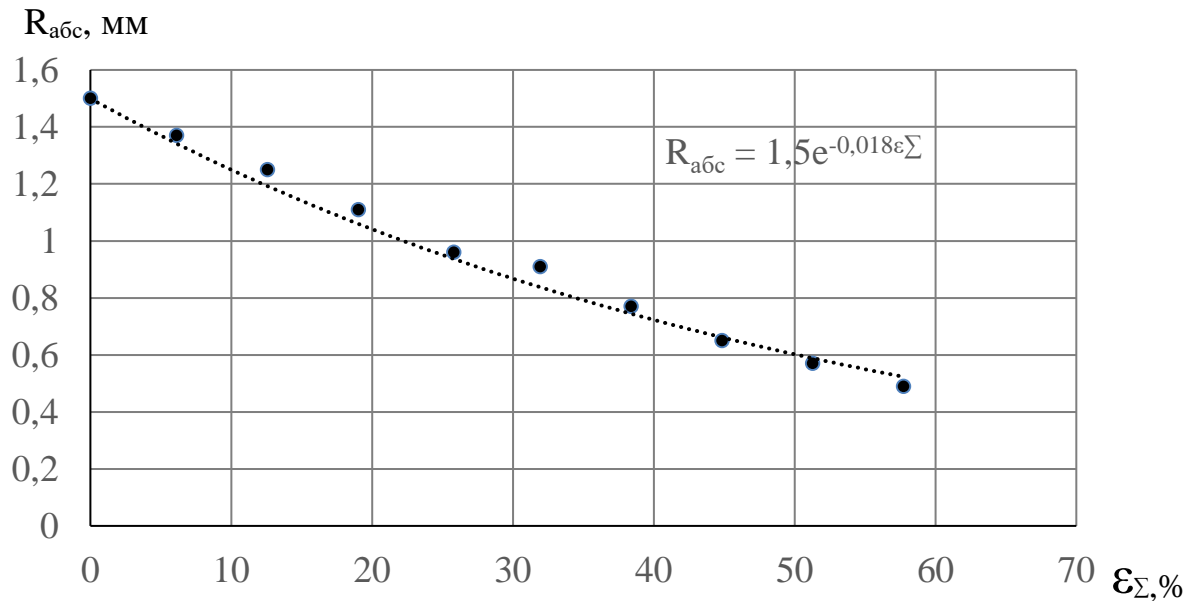


Рис. 3.6 – Значення абсолютної різностінності під час розрахункового аналізу процесу деформації зразків зі сплаву на основі титану:

маркери – дані зменшення різностінності;

пунктирна лінія – апроксимаційна лінія;

R_{abc} – абсолютна різностінність;

ϵ_{Σ} – відносна сумарна деформація по загальній товщині товстого і тонкого зразка.

Апроксимаційна крива описує закономірності зменшення різностінності під час деформування для абсолютної різностінності.

Формула для абсолютних величин має вигляд:

$$R_{abc} = 1,5e^{-0,018\epsilon_{\Sigma}}, \quad (3.15)$$

де: 1,5 – рівень початкової абсолютної різностінності, мм;

-0,018 – коефіцієнт інтенсивності зменшення різностінності (α).

Відносна різностінність має схожий характер зміни з абсолютними величинами. Для неї також було виведено формулу, яка описує зміну різностінності в залежності від одержаної деформації.

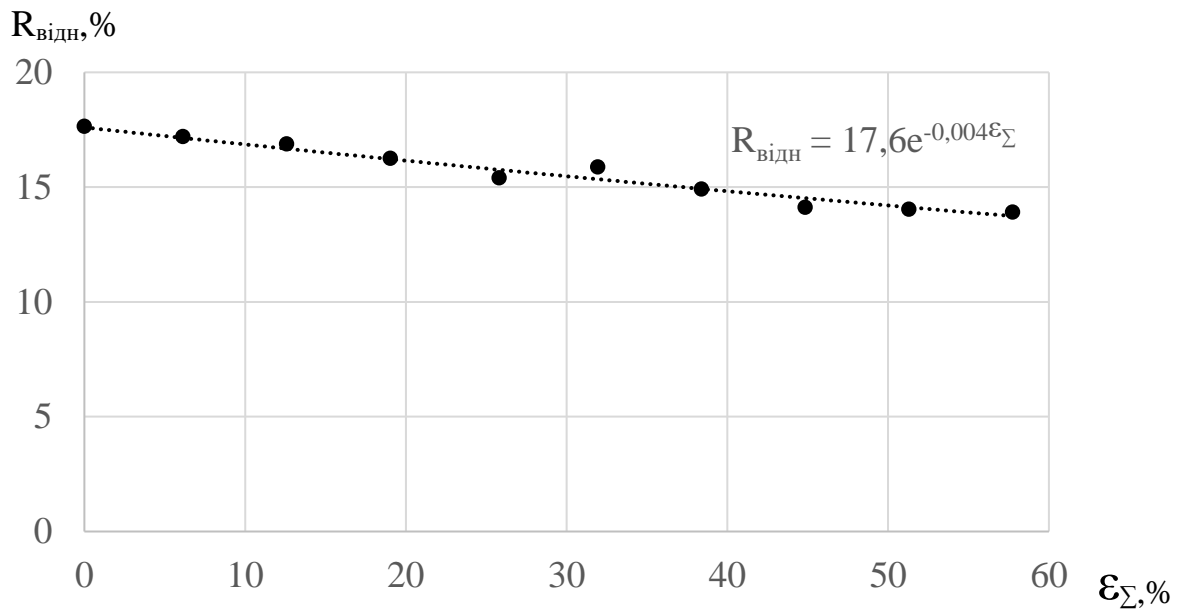


Рис. 3.7 – Значення поперечної відносної різностінності під час розрахункового аналізу процесу деформації зразків зі сплаву на основі титану:

маркери – дані по зміні різностінності

пунктирна лінія – апроксимаційна лінія

$R_{\text{відн}}$ – відносна різностінність

ϵ_{Σ} – відносна зростаюча деформація по загальній товщині зразків

3.3 Експериментальні лабораторні дослідження з підтвердження механізму зменшення ексцентричної різностінності для апробації розрахункового аналізу

Експериментальні дослідження проводили у лабораторних умовах з використанням сучасних стандартизованих методик та обладнання. Опис методики приведено у розділі 2. Для виготовлення інструмента, необхідного для експерименту, використані марки сталі [38,41, 49, 50, 51] і технологія, аналогічні тим, які застосовуються для виготовлення деформуючого інструмента станів холодної прокатки труб, тобто деформуючий інструмент виготовлено зі сталі 40ХФЮА [44]. Зазначена сталь у останні роки набула високої популярності при виготовленні технологічного інструмента.

Всі експерименти проводилися серійно, що дозволяє робити висновки про не випадковість досліджених процесів [59].

Дослідження були проведені для сплаву на основі титану ПТ-1М, який використовується у сучасному виробництві труб.

Зразки зі сплаву на основі титану були виготовлені та продеформовані згідно з методикою описаною в розділі 2.

Результати експерименту було зведено у таблицю 3.2 і розраховані значення абсолютної та відносної різнотовщинності. Також було розраховано загальний абсолютний та відносний обтиск, якого зазнавали зразки під час експерименту.

Таблиця 3.2

Результати експерименту з осадження зразків різної товщини зі сплаву на основі титану між трьома плитами

Параметри деформації		Результати експерименту			
Зростаюча загальна деформація по висоті двох зразків		Висоти зразків по обтисках		Різнотовщинність	
абсолютна, мм	відносна, %	S_{\max} , мм	S_{\min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	8,50	7,00	1,5	18
1,20	8	7,74	6,56	1,18	15
2,18	14	7,27	6,05	1,22	17
3,47	22	6,55	5,48	1,07	16
4,55	29	5,93	5,02	0,91	15
5,26	34	5,47	4,77	0,7	13
5,84	38	5,13	4,53	0,6	12
6,57	42	4,77	4,16	0,61	13
7,95	51	4,03	3,52	0,51	13
8,92	58	3,49	3,09	0,4	11

Із результатів експерименту видно, що абсолютні значення різностінності зменшилися більше ніж у 3 рази, з 1,5 мм до 0,4 мм, відносні зменшилися з 18% до 11%. Для наочності результатів побудовано графіки залежності зміни різностінності від деформації, якої зазнають зразки (рис. 3.8. 3.9.)

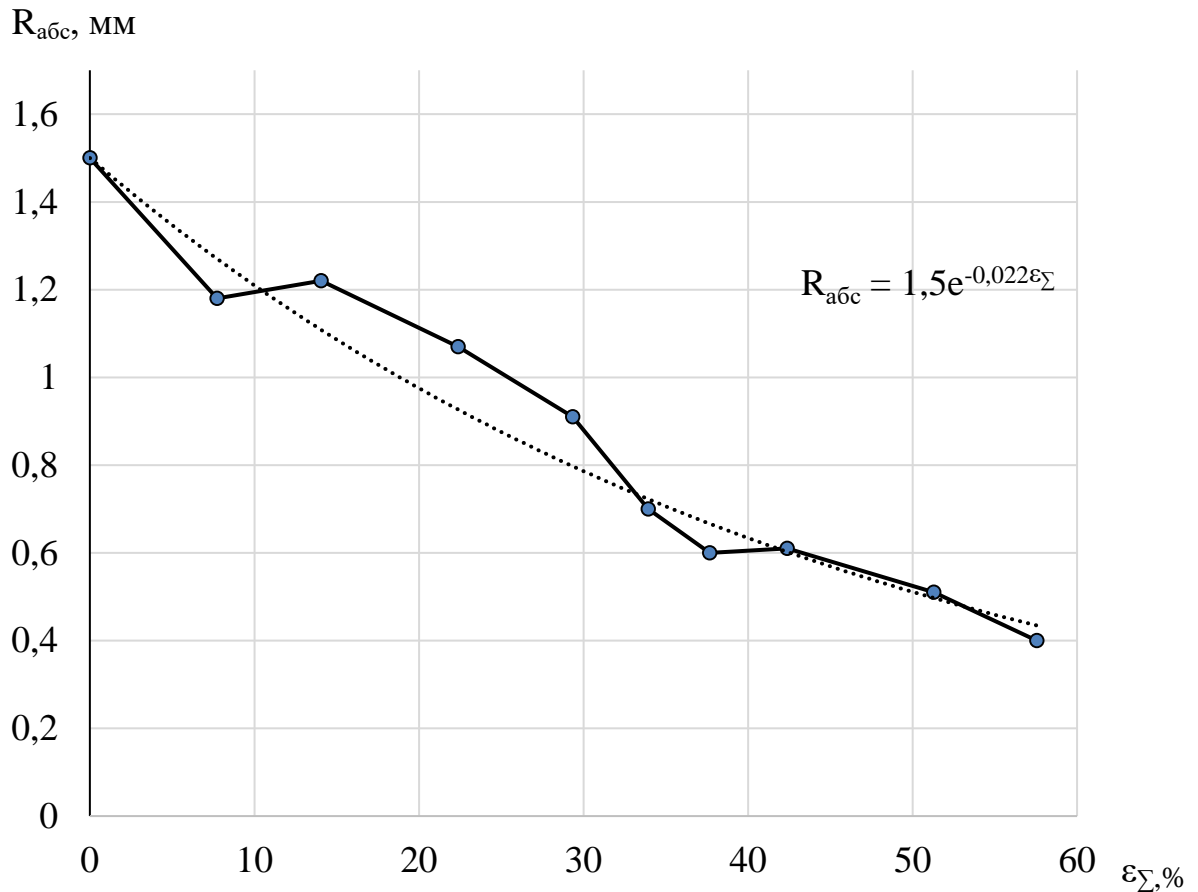


Рис. 3.8 – Експериментальне значення абсолютної різностінності зразків в залежності від сумарної деформації:

суцільна лінія – графік значення різностінності; пунктирна лінія – апроксимаційна лінія тренда; R_{abc} – абсолютна різностінність; ϵ_{Σ} – відносна зростаюча деформація по загальній товщині зразків

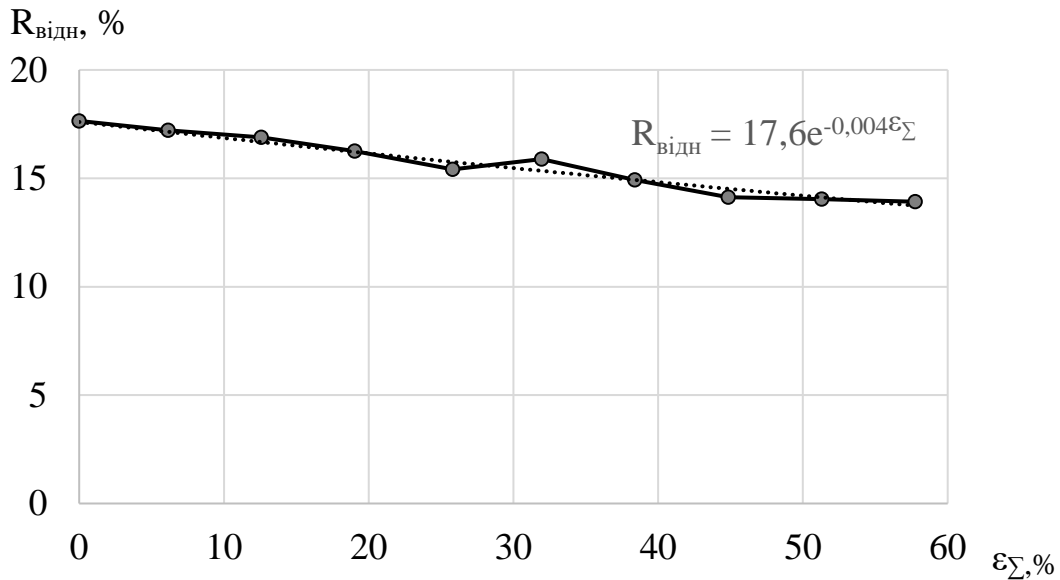


Рис. 3.9 – Експериментальне значення відносної поперечної різностінності зразків в залежності від сумарної деформації, якої вони зазнають:

суцільна лінія – графік значення різностінності;

пунктирна лінія – апроксимаційна лінія;

$R_{\text{відн}}$ – відносна різностінність;

ϵ_{Σ} – відносна зростаюча деформація по загальній товщині зразків.

Апроксимаційні криві (рис. 3.9 та рис. 3.10), що описують дані відносно зміни абсолютної та відносної різностінності мають вигляд:

$$R_{\text{абс}} = 1,5e^{-0,022\epsilon_{\Sigma}} \quad (3.16)$$

$$R_{\text{відн.}} = 17,6e^{-0,004\epsilon_{\Sigma}} \quad (3.17)$$

де: 1,5 – рівень початкової абсолютної різнотовщинності, мм;

17,6 – рівень початкової відносної різнотовщинності, %;

-0,022 – коефіцієнт інтенсивності зменшення абсолютної різностінності (α) для абсолютних величин;

-0,004 – коефіцієнт інтенсивності зменшення відносної різностінності (β) для відносних величин.

Порівнюючи формули, які характеризують зменшення різностінності при деформуванні, зроблено висновок, що формула для опису зміни різностінності при деформуванні на оправці при застосуванні експоненційного опису кривої має вид:

$$R = R_{\text{поч}} e^{-\alpha \varepsilon \Sigma} \quad (3.18)$$

$$R = R_{\text{поч}} e^{-\beta \varepsilon \Sigma} \quad (3.18)$$

де $R_{\text{поч}}$ – початкова різностінність заготовки

α – коефіцієнт інтенсивності зменшення абсолютної поперечної різностінності для абсолютних величин; β – коефіцієнт інтенсивності зменшення абсолютної поперечної різностінності для відносних величин; $\varepsilon \Sigma$ – сумарна відносна деформація по стінці труби.

Коефіцієнти інтенсивності зменшення різностінності α та β є ключовою компонентою у формулі, яка описує залежність зміни різностінності від деформації. Їх величина характеризує інтенсивність зміни різностінності при деформуванні. Коефіцієнт враховує механічні властивості деформованого матеріалу, умови тертя, діапазон деформацій, яких зазнав матеріал. При розрахунковому аналізі, така аналітика закладена в основу програми кінцево-елементного моделювання.

Для оцінки якості побудованого графіку використано індекс детермінації – R^2 . Як відомо [59, 60, 61], чим вищим є показник детермінації, тим краще крива описує дані. Для вибраної експоненційної залежності, яка описує графік зменшення різностінності при деформації, коефіцієнт детермінації був найбільшим, на відміну від лінійної, поліноміальної, або лінійної фільтрації. Це дозволяє зробити висновок, що побудована формула регресії є більш точною.

Також проведено оцінку значимості усього рівняння регресії в цілому за допомогою критерію Фішера – F. За допомогою вбудованого модуля «аналітика»

в програмному продукті «Microsoft Excel» розраховали значення критерію Фішера як табличного, так і фактичного, та порівняли їх між собою.

Для лабораторного експерименту з осадження різнотовщинних зразків зі сплаву на основі титану фактичне та табличне значення становили $F_{\text{факт}}=192,35$, $F_{\text{таб}}=5,32$.

З одержаних даних $F_{\text{таб}} < F_{\text{факт}}$ видно, що використане рівняння є адекватним.

Значення стандартної похибки для лабораторного експерименту з осадження зразків різної товщини зі сплаву на основі титану становило $P=10^{-5}$. Тобто значення P є меншим ніж 0,05, що дозволяє вважати вплив похибки на одержану апроксимаційну залежність дуже низьким.

Також розраховано значення стандартної похибки для лабораторного експерименту з осадження зразків різної товщини зі сплаву на основі титану між трьома плитами, яке становить $P=2 \cdot 10^{-9}$. Значення P є набагато меншим ніж 0,05, що дозволяє вважати вплив похибки на одержану апроксимаційну залежність дуже низьким.

Для даних, одержаних в результаті розрахункового аналізу, були також розраховані критерії Фішера та величина стандартної похибки.

Такий самий розрахунок критеріїв був проведений і для розрахункового аналізу.

Для розрахункового аналізу деформації пластин з різною товщиною між трьома плитами, виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання осадження різнотовщинних зразків зі сплаву на основі титану, фактичне та табличне значення становлять $F_{\text{факт}} = 848,43$ та $F_{\text{таб}} = 5,32$. З одержаних даних $F_{\text{таб}} < F_{\text{факт}}$ видно, що використане рівняння є адекватним та може застосовуватися для опису характеру графіку.

Більш детальна інформація відносно розрахунків регресійного аналізу для кінцево-елементного моделювання приведено у додатку А, а для лабораторного експерименту приведена у додатку Б.

Подальшим кроком для підтвердження адекватності використаної в розрахунковому аналізі моделі є співставлення результатів розрахункового

аналізу (таб. 3.1) та лабораторного експерименту (таб. 3.2) для абсолютної різностінності.

Для цього, обидва графіки були побудовані з однаковим масштабом на одному полі зміни різнотовщинності в залежності від відносної деформації, якій піддаються зразки. На графіку приведені лінії тренда та формули, які описують зміну різнотовщинності деформуємих зразків (рис 3.10.). Дані приведені для деформування зразків з деформацією з 0 до 60% по загальній товщині двох зразків.

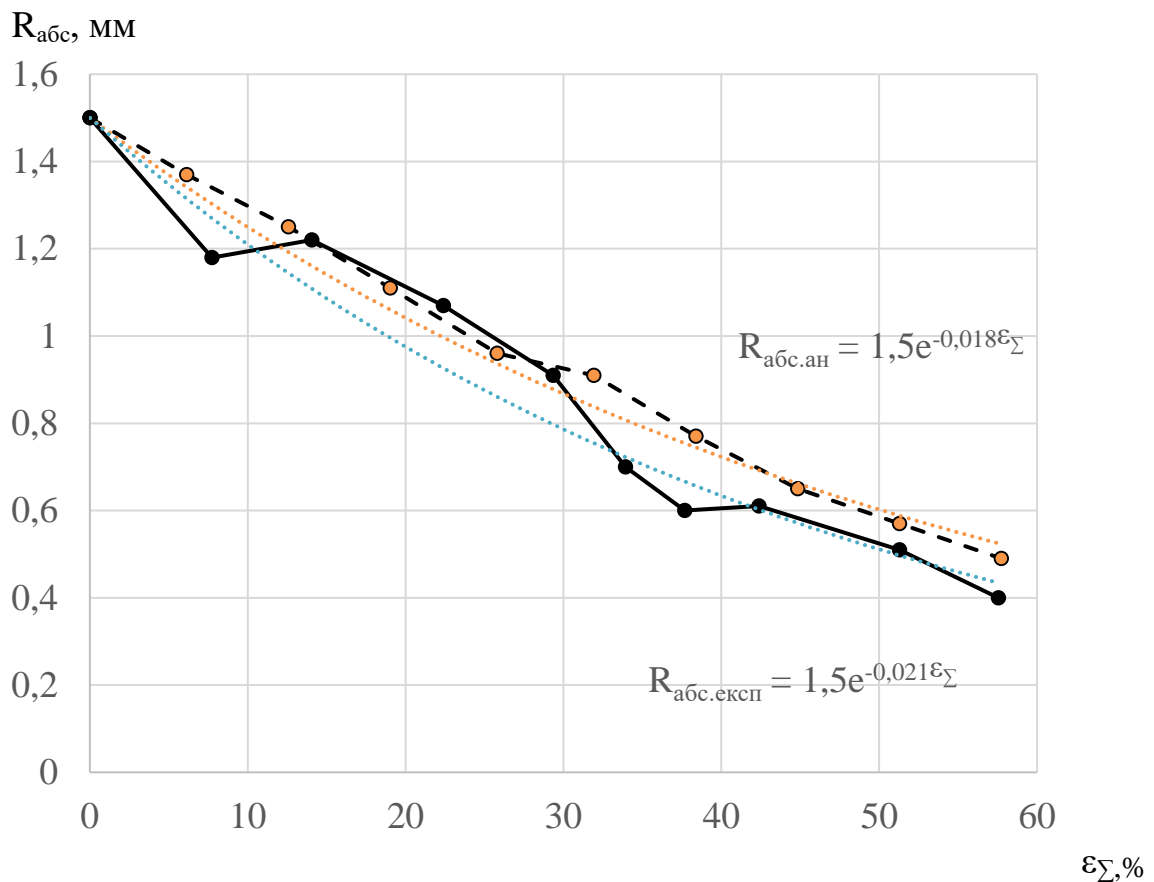


Рис. 3.10 – Порівняння результатів розрахункового аналізу, виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання, та лабораторного експерименту при осадженні різнотовщинних зразків зі сплаву ПТ-1М для абсолютної різностінності:

суцільна лінія – графік значення різностінності при лабораторному експерименті; штрих-пунктирна лінія – графік значення різнотовщинності при розрахунковому аналізі; пунктирні лінії – апроксимаційні криві; $R_{абс}$ – абсолютна різностінність; ϵ_{Σ} – відносна зростаюча деформація по загальній товщині зразків.

Як видно з графіків зменшення різностінності для розрахункового аналізу та лабораторного експерименту з осадження різновтовщинних зразків зі сплаву ПТ-1М, для абсолютної різностінності різниця становить від 0,02 до 0,18 у різних точках графіку. Більша частина графіків припадає на дуже близькі значення. Це свідчить про високий рівень якості висунутої моделі та її адаптивність для дослідження.

Подібний графік був побудований для значень відносної різностінності при моделюванні та осадженні (рис. 3.11).

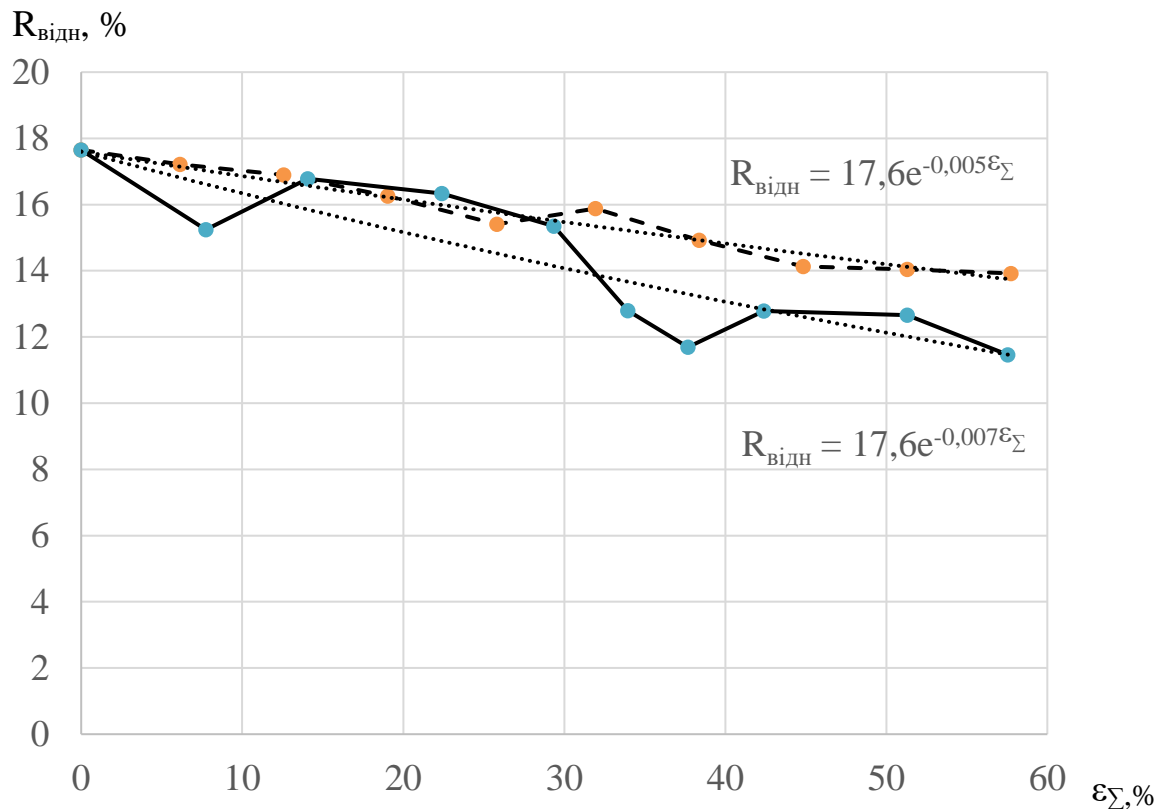


Рис. 3.11 – Порівняння результатів розрахункового аналізу, виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання, та лабораторного експерименту при осадженні різновтовщинних зразків зі сплаву ПТ-1М для відносної різностінності:

суцільна лінія – графік зменшення різновтовщинності при лабораторному експерименті; штрих-пунктирна лінія – графік значення різновтовщинності при розрахунковому аналізі; пунктирні лінії – апроксимаційні криві.

Порівняно коефіцієнти інтенсивності зменшення різнотовщинності для розрахункового аналізу та лабораторного експерименту по деформуванню зразків різної товщини між трьома плитами (таб. 3.3).

Таблиця 3.3

Порівняння коефіцієнтів інтенсивності зменшення різностінності при деформуванні зразків різної товщини між трьома плитами

Коефіцієнт для абсолютних величин (α)	
Розрахунковий аналіз	експеримент
0,018	0,021
Коефіцієнт для відносних величин (β)	
Розрахунковий аналіз	експеримент
0,005	0,007

Розбіжність між коефіцієнтами (0,021 та 0,018) мала (табл. 3.3). Це ще раз доводить, що результати розрахунків дуже близькі до експериментальних даних і створені вирази є достовірними[26, 43].

3.4 Дослідження зміни різнотовщинності при розрахунковому аналізі деформації зразків з різною початковою різнотовщинністю

Для розвитку методу прогнозування зменшення ексцентричної різностінності при холодній прокатці на оправці необхідні якісні і чисельні дані відносно впливу величини початкової різностінності на остаточну. Для цього було використано розрахунковий аналіз з застосуванням програми скінченно-елементного моделювання. Методику розрахункового аналізу та її апробацію описана в розділі 3.3.

Було проведено декілька серій розрахункового аналізу для сплаву на основі титану ПТ-1М із застосуванням програми скінченно-елементного моделювання.

Розрахунковий аналіз був проведений для зразків з різним рівнем початкової відносної різнотовщинності 20%, 15% , 10% та у 5%. Одержано дані щодо інтенсивності зменшення різностінності під час деформування як для абсолютних величин, так і для відносних.

Різностінність у 20% на зразках відповідає низькоякісній заготовці після обточки (за геометричними параметрами). Таку заготовку часто одержують після гарячої прокатки. Частина заготовок, яка приходить на виробництво з таким рівнем різностінності, становить 20-30% від усієї заготовки, що поступає на виробництво.

Використання такої заготовки з попередньою механічною обробкою перед прокаткою веде до втрат металу, та не завжди дає очікуваний результат по точності труб-заготовок.

Обґрунтування та опис методики проведення розрахункового аналізу в дослідженні приведено в розділі 2.

Результати виконаного розрахункового аналізу деформації зразків різної товщини за допомогою програми скінченно-елементного моделювання Forge3D® представлено на рис. 3.13–3.19 та у таблицях 3.4–3.6. Одержаний масив даних представлено у вигляді таблиці з шагом зростання деформації до 1 міліметра. Такий обтиск є аналогічним до деформації, якої зазнає стінка труби під час прокатки на оправці з застосуванням промислового стану ХПТ–90. Так процес деформування кожного поперечного перерізу труб відображається дрібною деформацією, яка становить орієнтовно від 5% до 15% від загальною деформації, яку одержує труба за прокатку [62, 63].

Одержані результати розрахункового аналізу представлені у таблиці 3.4, де внесені: геометричні параметри зразків, розраховані значення середньої товщини стінки, абсолютної та відносної різнотовщинності та значення

розрахованого загального обтиснення в абсолютних та відносних величинах, якого зазнавали зразки під час експерименту.

Таблиця 3.4

Результати розрахункового аналізу процесу деформації зразків із початковою різнотовщинністю у 20%

Заплановані параметри		Результати експерименту			
Зростаючий загальний обтиск по висоті двох зразків		Висоти зразків по обтисках, мм		Різнотовщинність	
абсолютний, мм	відносний, %	S_{\max} , мм	S_{\min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	9,35	7,65	1,7	20
0,95	11	8,78	7,27	1,51	19
1,95	23	8,19	6,86	1,33	18
2,95	35	7,62	6,43	1,19	17
3,95	46	7,06	5,99	1,07	16
4,95	58	6,50	5,55	0,95	16
6,14	72	5,85	5,01	0,84	15
6,95	82	5,39	4,66	0,73	15
7,96	94	4,84	4,20	0,64	14

В технологіях виробництва труб зі сплавів на основі титану деформація на виробництві рідко перевищує 60%. Для того, щоб одержати розгорнуті дані по зміні різностінності в залежності від деформації, було вирішено сумарну деформацію, якій піддавалися зразки, розрахувати до 92%. Для титану така деформація є граничною. Існує інформація [64, 65, 66, 67, 68, 69] про деформування титанових сплавів з максимальною деформацією у 88%, тому дані з розрахункового аналізу, одержані із застосуванням програми скінченно-елементного моделювання Forge3D, близькі до реальних умов і є актуальними для сучасних процесів.

Слід відзначити, що для першого проходу при прокатці труб-заготовок застосовують деформацію до 55% [70], але сучасна якість сплавів на основі титану є значно вищою, ніж раніше, тому в наступних проходах вже є можливість задавати деформації більші ніж 55%.

Одержані під час розрахункового аналізу результати демонструють, що різностінність під час деформації зменшилась з 20% до 14%. На відміну від відносної різностінності, яка зменшилася не так суттєво, абсолютна різностінність зменшилася в 2,64 рази.

Одержані дані співпадають із запропонованим аналітичним поясненням механізму зменшення поперечної різностінності при прокатці труб-заготовок, які мають ексцентричну різностінність.

Для наочності результатів розрахункового аналізу побудовано графік зменшення різностінності зразків у вигляді залежності абсолютної (рис.3.12) та відносної (рис.3.13) різностінності від загальної деформації.

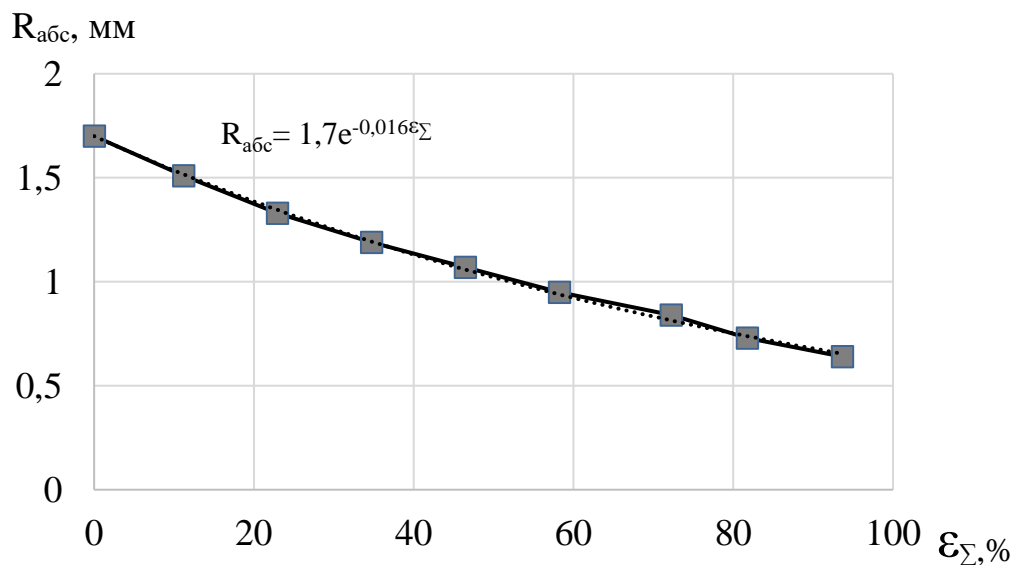


Рис. 3.12 – Зміна абсолютної різностінності під час розрахункового аналізу деформації зразків із початковою різностінністю 20%:

суцільна лінія – графік зменшення різностінності, пунктирна лінія – апроксимаційна лінія, $R_{абс}$ – абсолютна різностінність, ϵ_{Σ} – відносна зростаюча деформація по загальній товщині зразків.

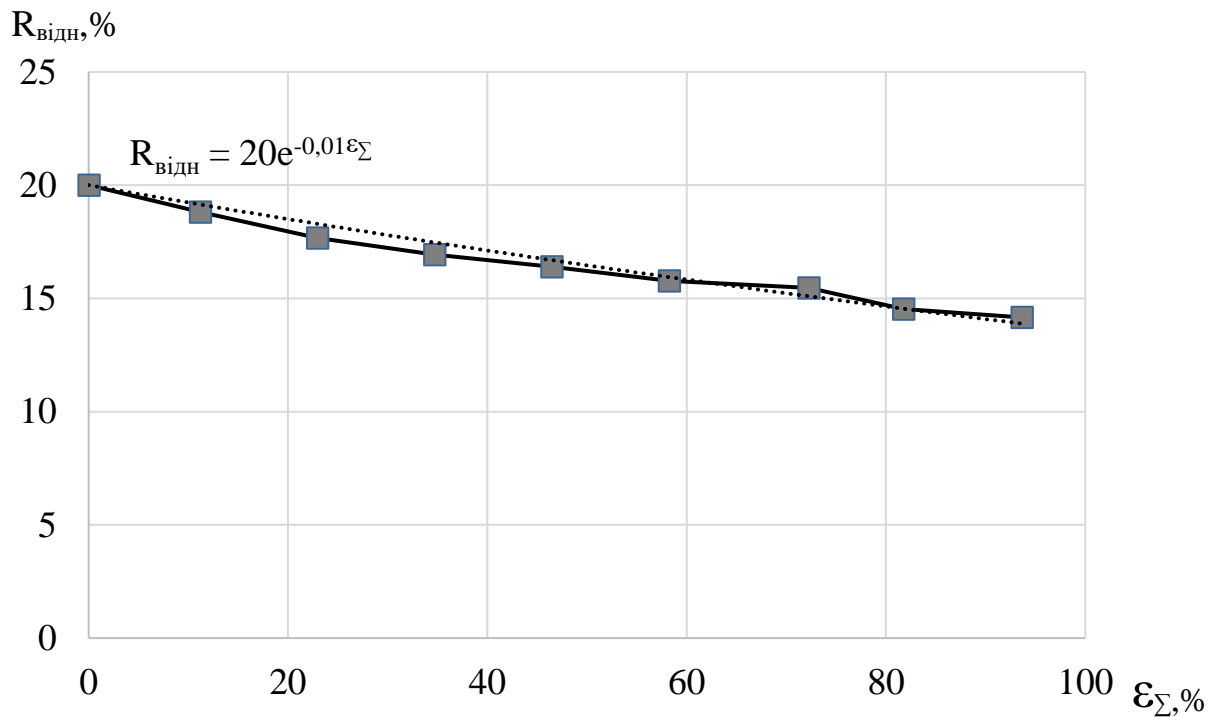


Рис. 3.13 – Зменшення відносної різностінності при обтисненні зразків з початковою різностінністю у 20%, одержаної з розрахункового аналізу процесу деформації:

- суцільна лінія – графік зменшення різностінності;
- пунктирна лінія – апроксимаційна лінія.

При розрахунковому аналізі деформації зразків із різнотовщинністю у 15% був одержаний схожий результат (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5

Результати розрахункового аналізу процесу деформації зразків з початковою різностінністю у 15%

Заплановані параметри		Результати експерименту			
Зростаюча загальна деформація по товщині двох зразків		Висоти зразків по обтисках		Різнотовщинність	
абсолютна, мм	відносна, %	S_{max} , мм	S_{min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	9,14	7,86	1,28	15

Продовження таблиці 3.5

Заплановані параметри		Результати експерименту			
Зростаюча загальна деформація по товщині зразків		Висоти зразків по обтисках		Різновтовщинність	
абсолютна, мм	відносна, %	S_{max} , мм	S_{min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0,95	11	8,59	7,46	1,13	14
1,95	23	8,03	7,02	1,01	13
2,95	35	7,47	6,58	0,89	13
3,95	46	6,93	6,12	0,81	12
4,95	58	6,39	5,66	0,73	12
5,95	70	5,84	5,21	0,63	11
6,95	82	5,31	4,74	0,57	11
7,95	94	4,77	4,28	0,49	11

На даний час різностінність в 15% є типовою для заготовки, яка використовується на виробництві труб зі сплавів на основі титану, оскільки більша частина заготовок поставляється на виробництво саме із різностінністю в інтервалі від 10% до 15%. Є важливим знання про те, як сильно зменшиться різностінність такої заготовки під час першої прокатки на стані типу ХПТ–90.

Як видно з одержаних під час розрахункового аналізу даних, відносна різностінність зменшилася лише на 4% на відміну від попереднього розрахункового аналізу, коли ми одержали зменшення на 6%.

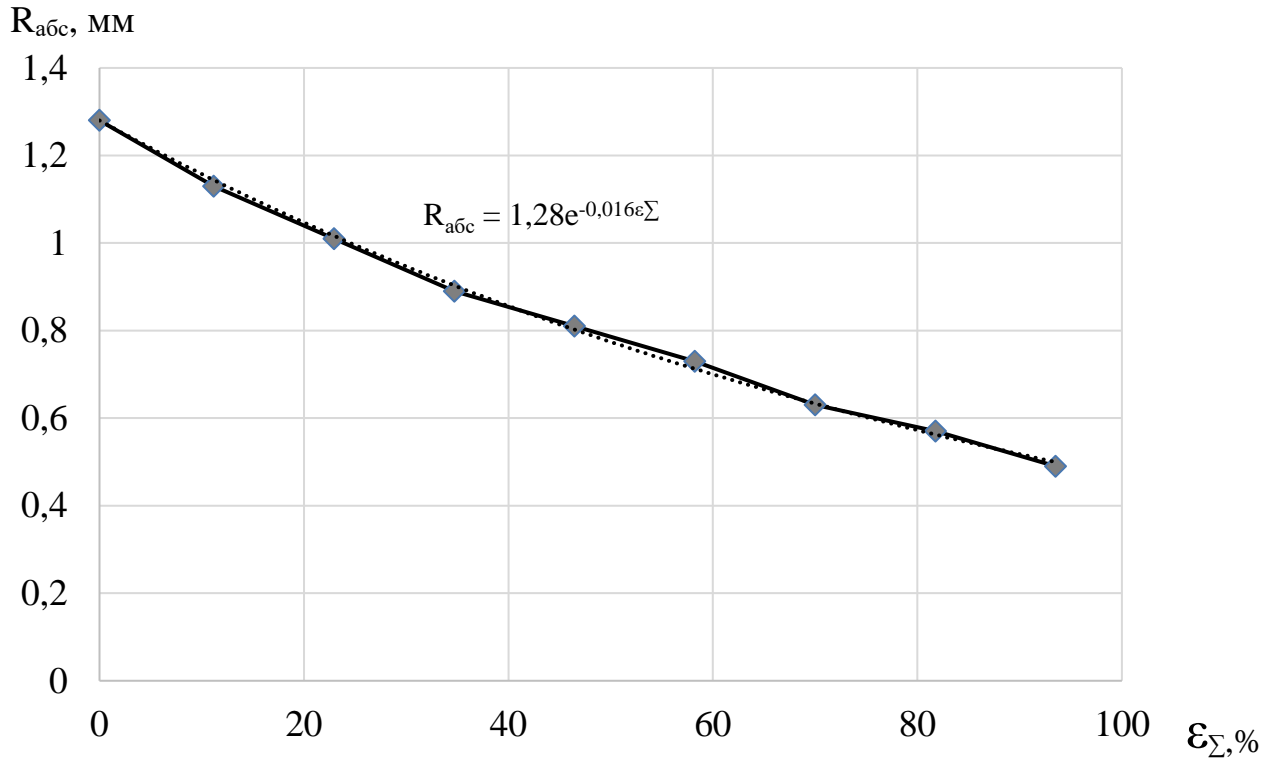


Рис. 3.14 – Зменшення абсолютної різностінності під час розрахункового аналізу деформації зразків з початковою різностінністю у 15%

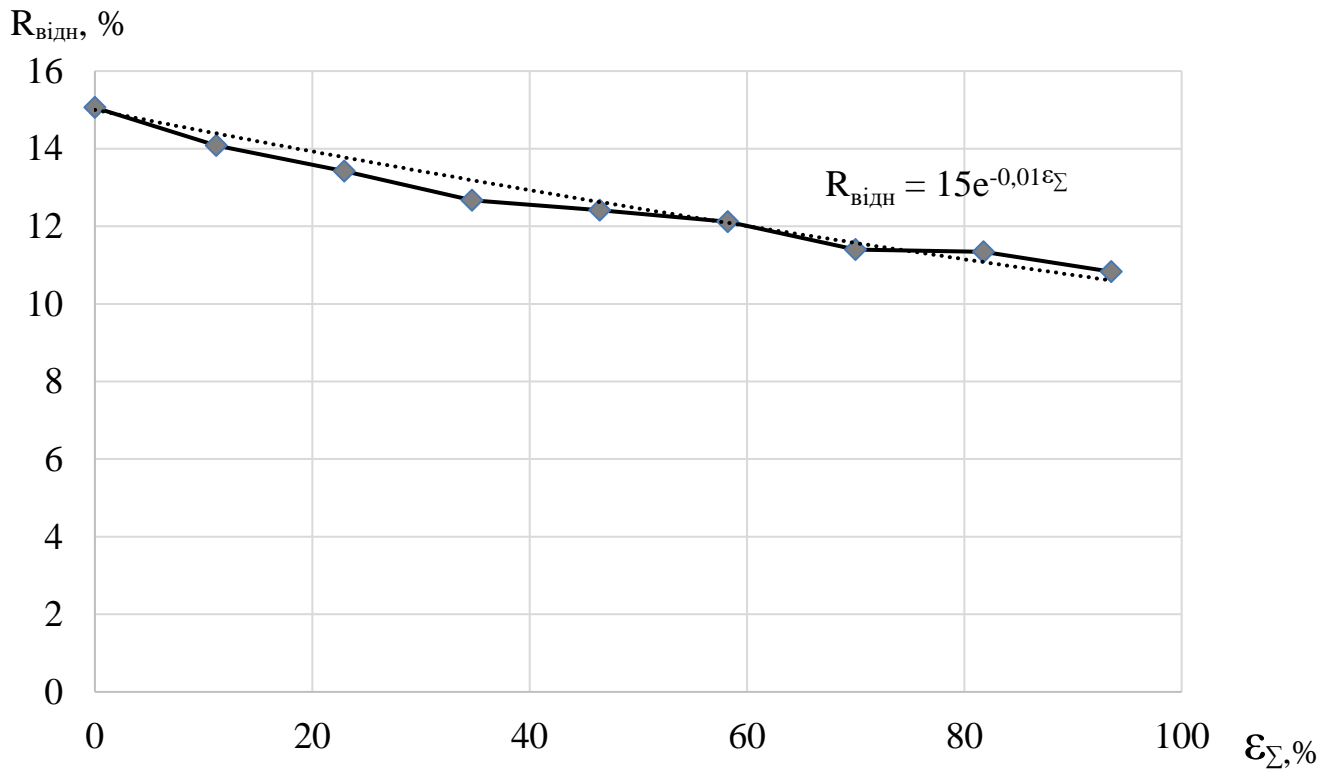


Рис. 3.15 – Зменшення відносної різностінності при розрахунковому аналізі деформації зразків з початковою різностінністю у 15%

Розглянемо результати розрахункового аналізу для зразків з різною початковою товщиною у 10% (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Результати розрахункового аналізу процесу деформації зразків з початковою різностінністю у 10%

Заплановані параметри		Результати експерименту			
Зростаючий загальний обтиск по висоті двох зразків		Висоти зразків по обтисках		Різнотовщинність	
абсолютний, мм	відносний, %	S_{max} , мм	S_{min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	8,93	8,08	0,85	10
0,94	11	8,41	7,66	0,75	9
1,94	23	7,87	7,20	0,67	9
2,95	35	7,33	6,73	0,60	9
3,95	46	6,80	6,26	0,54	8
4,95	58	6,27	5,79	0,48	8
5,95	70	5,74	5,32	0,42	8
6,94	82	5,22	4,85	0,37	7
7,95	94	4,69	4,37	0,32	7

Одержані під час розрахункового аналізу результати демонструють, що різностінність під час деформації зменшилась з 10% до 7%, а абсолютна різнотовщинність зменшилася на 0,53 мм, або в 2,66 рази.

Для наочності результатів розрахункового аналізу побудовано графік зменшення різностінності зразків у вигляді залежності абсолютної (рис.3.16) та відносної (рис.3.17) різностінності від загальної деформації.

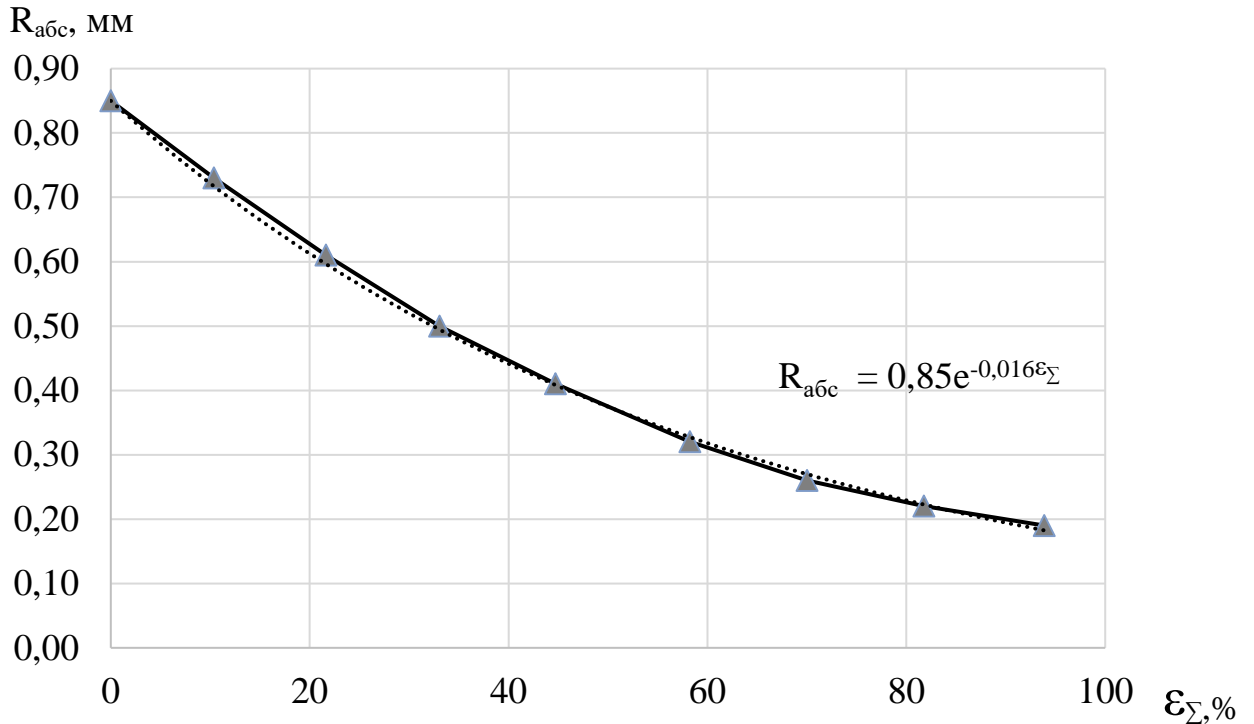


Рис. 3.16 – Зменшення абсолютної різностінності під час розрахункового аналізу деформації зразків з початковою різностінністю у 10%:

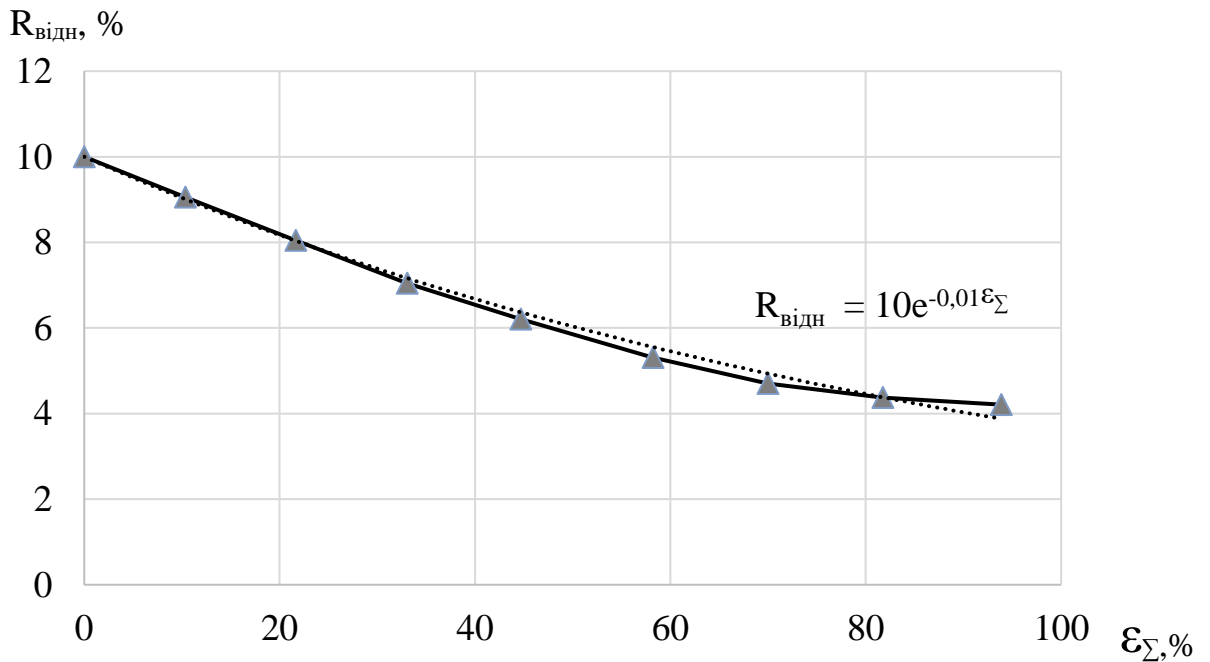


Рис. 3.17 – Зменшення відносної різностінності при розрахунковому аналізі деформації зразків з початковою різностінністю у 10%

Також було виконано розрахунки для труби-заготовки з високим показником точності. А саме, з різностінністю у 5%. Підприємства отримують заготовку з такими високими показниками точності після гарячого пресування. Коливання відносної різностінності у такої заготовки становить від 2 до 5%. На даний час це найбільш якісний вид заготовки, який можливо використовувати в серійному виробництві.

Така заготовка має високу якість в геометричних розмірах та має добрі механічні властивості, високу якість зовнішньої та внутрішньої поверхні. Але даний тип заготовки є дуже коштовним і в значній мірі впливає на собівартість виготовлення труб.

Таблиця 3.7

Результати розрахункового аналізу процесу деформації зразків з початковою різностінністю у 5%

Заплановані параметри		Результати експерименту			
Зростаючий загальний обтиск по висоті двох зразків		Висоти зразків по обтисках		Різновисочинність	
абсолютний, мм	відносний, %	S_{\max} , мм	S_{\min} , мм	абсолютна, мм	відносна, %
0	0	8,71	8,29	0,42	5
0,93	11	8,21	7,86	0,35	4
1,92	23	7,69	7,39	0,298	4
2,91	34	7,17	6,92	0,25	4
3,89	46	6,66	6,45	0,21	3
4,87	57	6,15	5,98	0,17	3
5,88	69	5,63	5,49	0,14	3
6,89	81	5,11	5,00	0,11	2
7,89	93	4,60	4,51	0,09	2

Як ми бачимо з результатів розрахункового аналізу, абсолютна різнотовщинність зменшилася в 2,65 рази, у той час як відносна зменшилася всього на 2 відсотки.

В свою чергу тут відносна різностінність практично не змінюється і складає 3% та є дуже близькою до початкового значення у 5%.

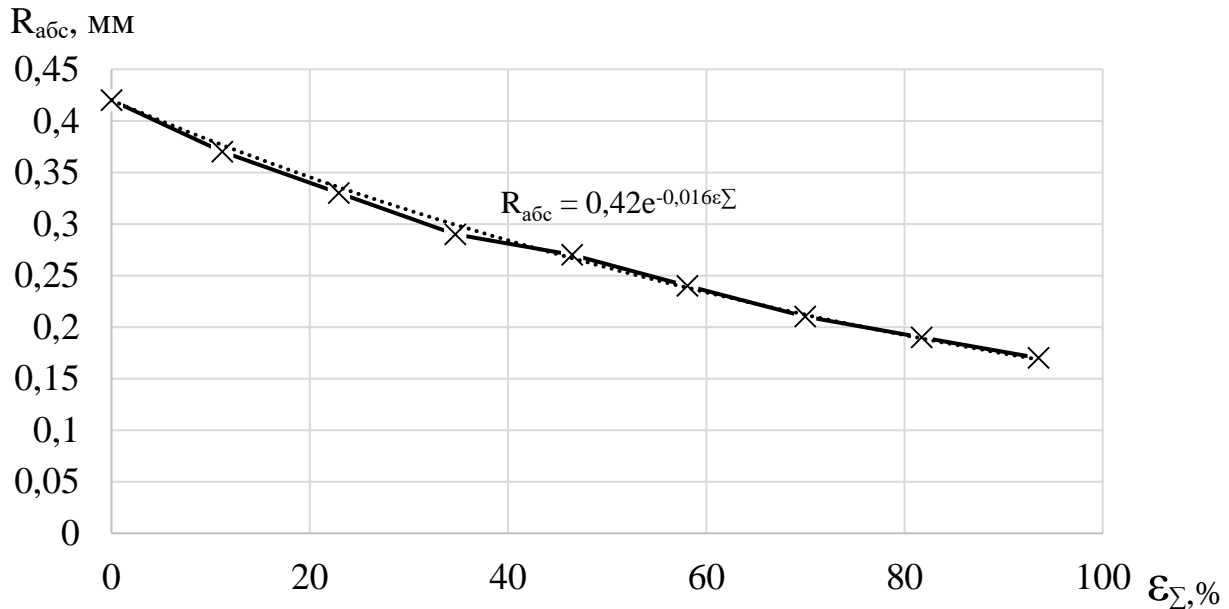


Рис. 3.18 – Зміна абсолютної різностінності під час розрахункового аналізу деформації зразків з початковою різностінністю у 5%:

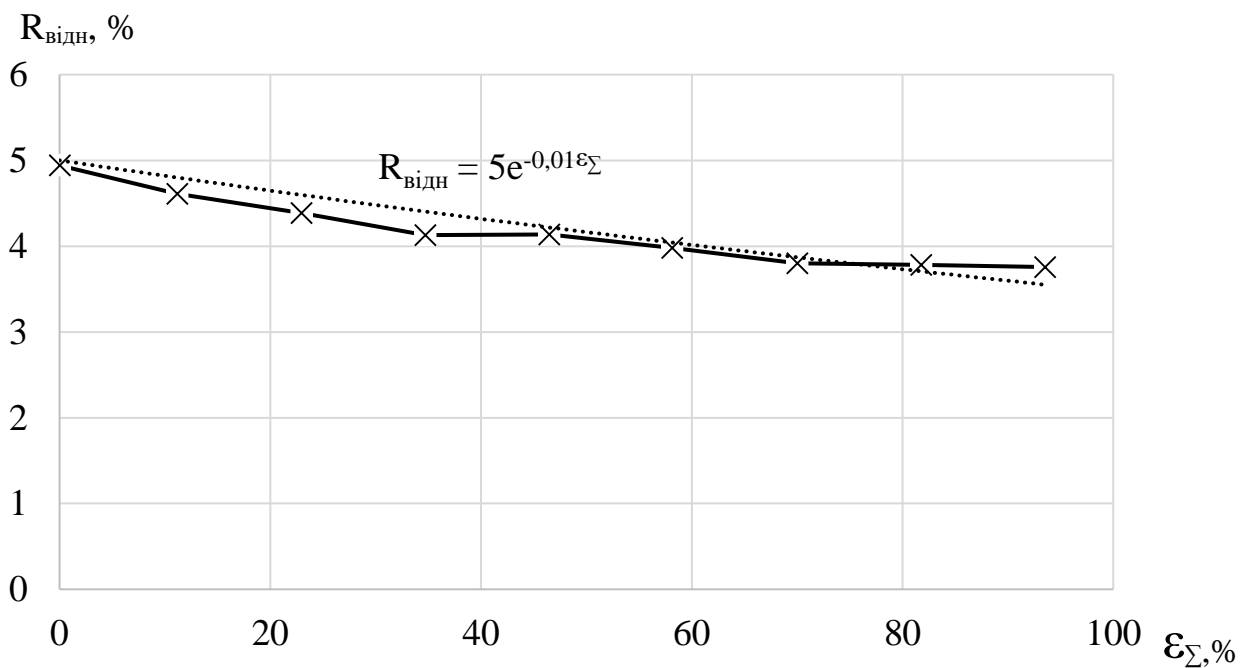


Рис. 3.19 – Зміна відносної різностінності при розрахунковому аналізі деформації зразків з початковою різностінністю у 5%

При всіх аналітичних розрахунках для різновтовщинністю у 20%, 15%, 10% та 5% розраховане значення інтенсивності зміни різновтовщинності є однаковим.

Тобто при зміні різновтовщинності під час деформування значення початкової різновтовщинності не впливає на інтенсивність його зміни та при більших значеннях початкової різновтовщинності – остаточна різновтовщинність зменшується більше.

Для більшої наглядності зведемо на один графік дані по зміні абсолютної різновтовщинності (рис. 3.20) при розрахункову аналізі деформуванні зразків з різною товщиною.

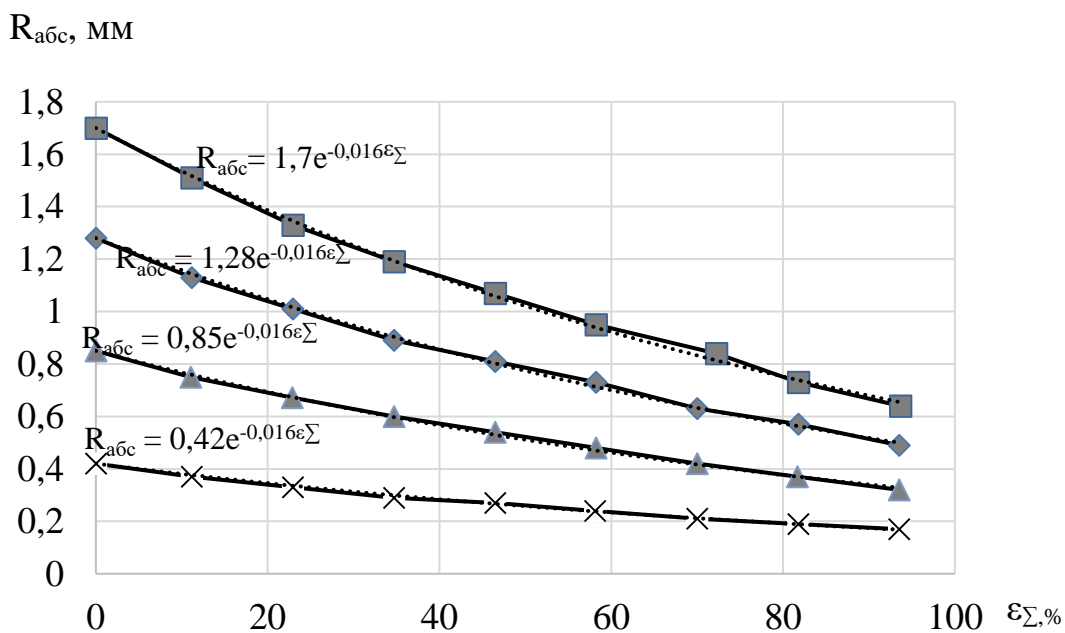


Рис. 3.20 – Результати розрахункового аналізу виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання по зменшенню абсолютної різновтовщинності зразків з початковою різновтовщинністю у 20%, 15% та 5% для абсолютної різновтовщинності:

- – графік зразків з початковою різновтовщинністю у 20%;
- ◆ – графік зразків з початковою різновтовщинністю у 15%;
- ▲ – графік зразків з початковою різновтовщинністю у 10%;
- x – графік зразків з початковою різновтовщинністю у 5%.

Для цього, усі графіки були побудовані з однаковим масштабом на одному полі зміни різновтовщинності в залежності від відносної деформації якій

підвергаються зразки. На графіку приведені лінії тренда та формули які описують зміну різнотовщинності деформуємих зразків. Формули для опису кривих на графіку виведені згідно експоненційного розподілу, оскільки він найбільш точно описує характер зміни різнотовщинності (див. с. 73-74).

Дані приведені для деформування зразків від 0 до 94% по загальній товщині.

Дані зміни відносної різнотовщинності також було зведено на один графік (рис. 3.21).

Графіки були побудовані з однаковим масштабом на одному полі зміни різнотовщинності в залежності від відносної деформації якій підвергаються зразки. На графіку приведені лінії Тренда та формули які описують зміну різнотовщинності деформуємих зразків.

Приведені результати розрахункового аналізу для деформування зразків від 0 до 94% по загальній товщині.

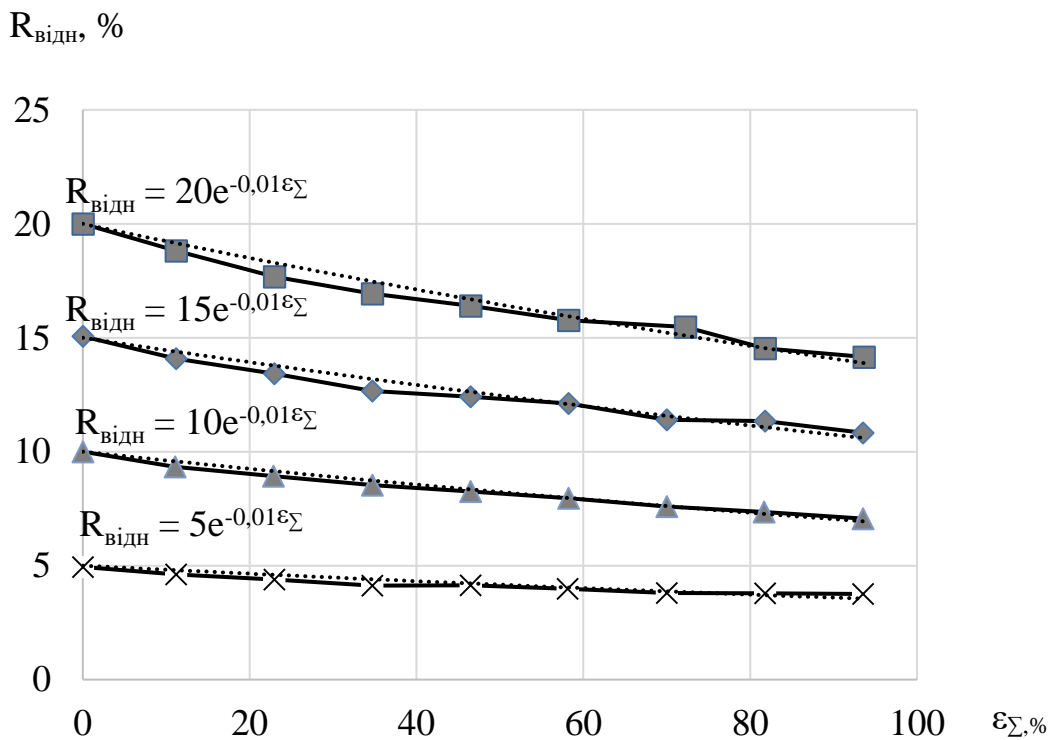


Рис. 3.21 – Порівняння результатів розрахункового аналізу виконаного за допомогою програми скінченно-елементного моделювання по зменшенню абсолютної різностінності зразків з початковою різностінністю у 20%, 15% та 5% для відносної різностінності:

■ – графік зразків з початковою різностінністю у 20%; ◆ – графік зразків з початковою різностінністю у 15%; ▲ – графік зразків з початковою різностінністю у 10%; x – графік зразків з початковою різностінністю у 5%.

3.5 Розрахунковий порівняльний аналіз особливостей режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву на основі титану, сталі 20 та сталі X18H9T

Інтенсивність процесу зменшення поперечної різностінності різниться в залежності від марки сталі або сплаву: чим більшою є інтенсивність наклепу, тим швидше буде протікати процес зменшення різностінності.

Розглянуто, як інтенсивно відбувається наклеп сплаву на основі титану, сталі 20 та нержавіючої марки сталі X18H9T, які є найпоширенішими представниками серед сплавів на основі титану та сталей.

Для виявлення особливостей холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану ВТ1 (який є близьким аналогом сплаву ПТ-1М), нержавіючої сталі X18H10T та вуглецевої сталі 20 була розрахована сила прокатки. Попередньо розраховували калібровку інструмента за методикою Ю.Ф.Шевакіна [40, 41].

Розрахунки виконувалися для однакового маршруту 57x4,5мм→38x1,8мм, але при подачі 3мм для сплаву на основі титану, 10мм для сталі X18H9T та 15мм для сталі марки 20.

Вибір подачі обумовлений умовами прокатки для обраних марок сталей та сплаву і відповідає подачам при прокатці на станах ХПТ, які використовуються при промисловому виробництві холоднодеформованих труб. Розраховували силу прокатки за методикою Ю.Ф.Шевакіна відповідно для прямого та зворотного ходу кліти стана. В цій методиці застосовується значення σ_B , яке описується формулами для кожної сталі та сплаву.

Для сталі X18H9T:

$$\sigma_B = 68 + 0,62\varepsilon^{1,24} \quad (3.14)$$

Для сплаву ВТ-1:

$$\sigma_B = 56 + 2,9\varepsilon^{0,56} \quad (3.15)$$

Для сталі марки 20:

$$\sigma_B = 51 + 0,58\varepsilon^{0,98} \quad (3.16)$$

Так, аналізуючи формули видно, що кожна сталь або сплав мають різні механічні властивості і повинні мати різну методику деформування для одержання готової продукції з регламентованими механічними властивостями та з геометричними параметрами.

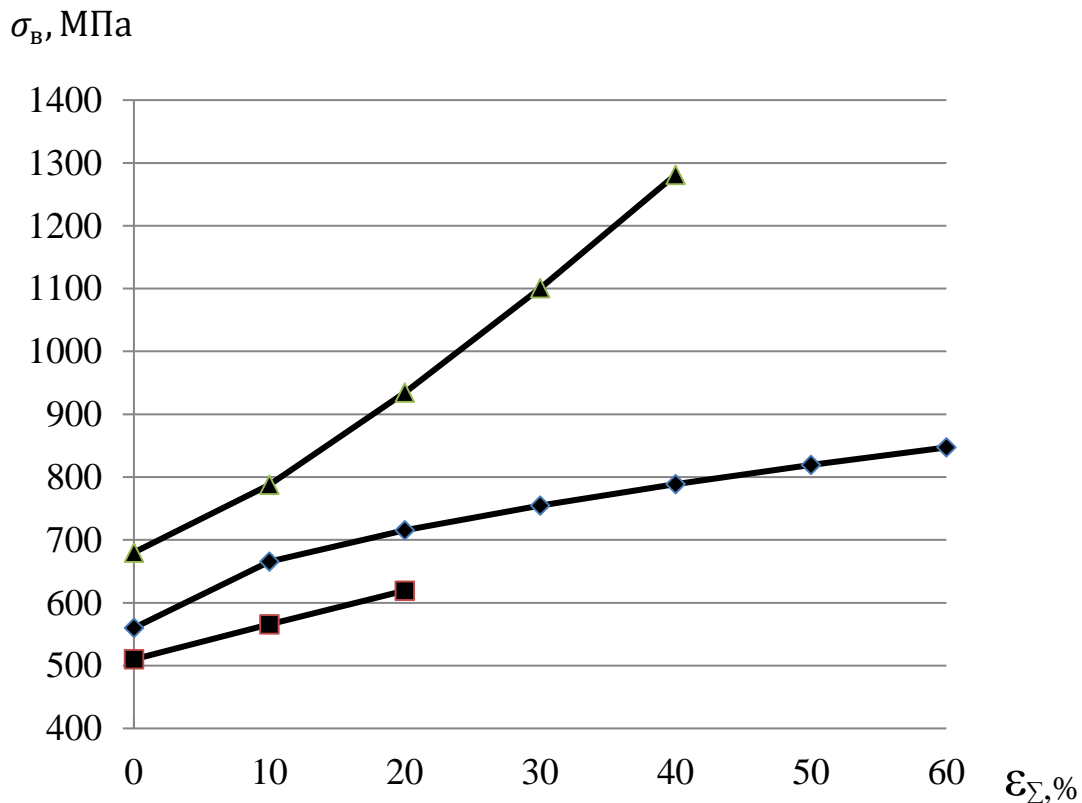


Рис. 3.22 Порівняльні криві зміни межі міцності, що задані формулами (3.14, 3.15, 3.16) у розрахунковому аналізі

◆ – графік для сплаву на основі титану VT1

■ – графік для сталі 20

▲ – графік для нержавіючої сталі X18H9T

σ_B – межа міцності

ε_{Σ} – відносна деформація

За графіком (рис. 3.22) інтенсивність наклепу у сплаву на основі титану VT1

та у сталі марки 20 майже однакові, а у корозійностійкої сталі Х18Н9Т набагато вища. Так при деформації у 40% різниця буде двохкратною, а при деформаціях у 80% різниця буде близькою до трьохкратної.

Для порівняння даних одержаних в результаті розрахунків сили прокатки яка діє на валок при деформуванні сплаву ВТ-1 був побудований графік в діапазоні сил від 150 до 350 кН.

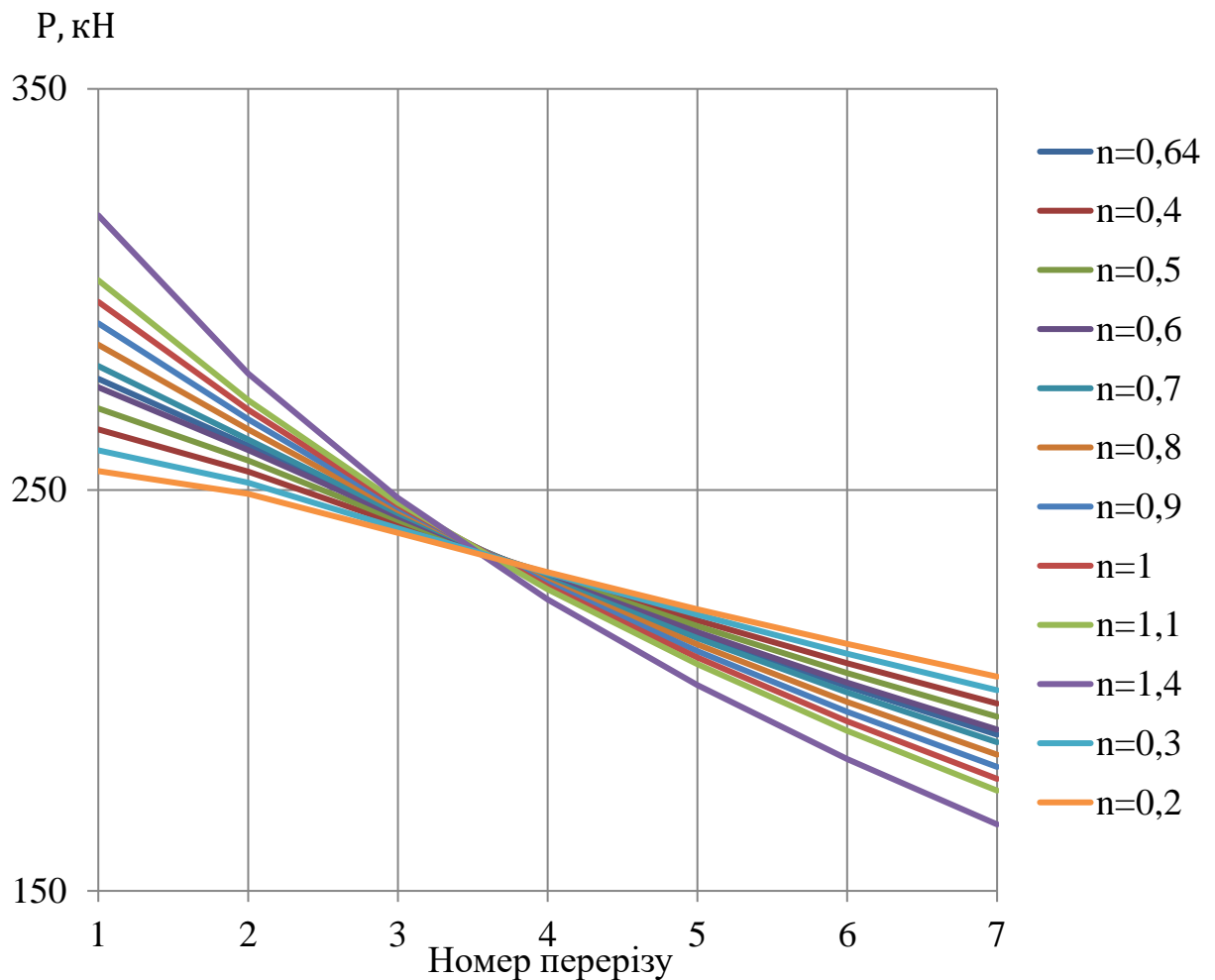


Рис. 3.23 – Порівняння сили прокатки по довжині зони обтиснення стінки при холодній прокатці труб зі сплаву на основі титану марки ВТ1 при прямому ході:

P – сила, діюча на валок, кН;

n – коефіцієнт розподілу деформації по довжині робочого конусу.

Як видно з графіків, розподіл сил при прокатці труби зі сплаву на основі титану має вигляд спадаючої кривою. Пік навантаження припадає на першу частину кривої і поступово зменшується до кінця ходу. Для зворотного ходу ми одержали подібну картину, відмінність полягає лише у кількісному показнику сили, яка діє на валок. Як видно з графіку, розподіл сили представляє собою низпадаючу криву вздовж осередку деформації. Коефіцієнт розподілу деформації впливає на інтенсивність зміни сили вздовж конусу.

Для порівняння даних одержаних в результаті розрахунків сили прокатки, яка діє на валок при деформуванні сталі 20 був побудований графік в діапазоні сил від 550 до 750 кН.

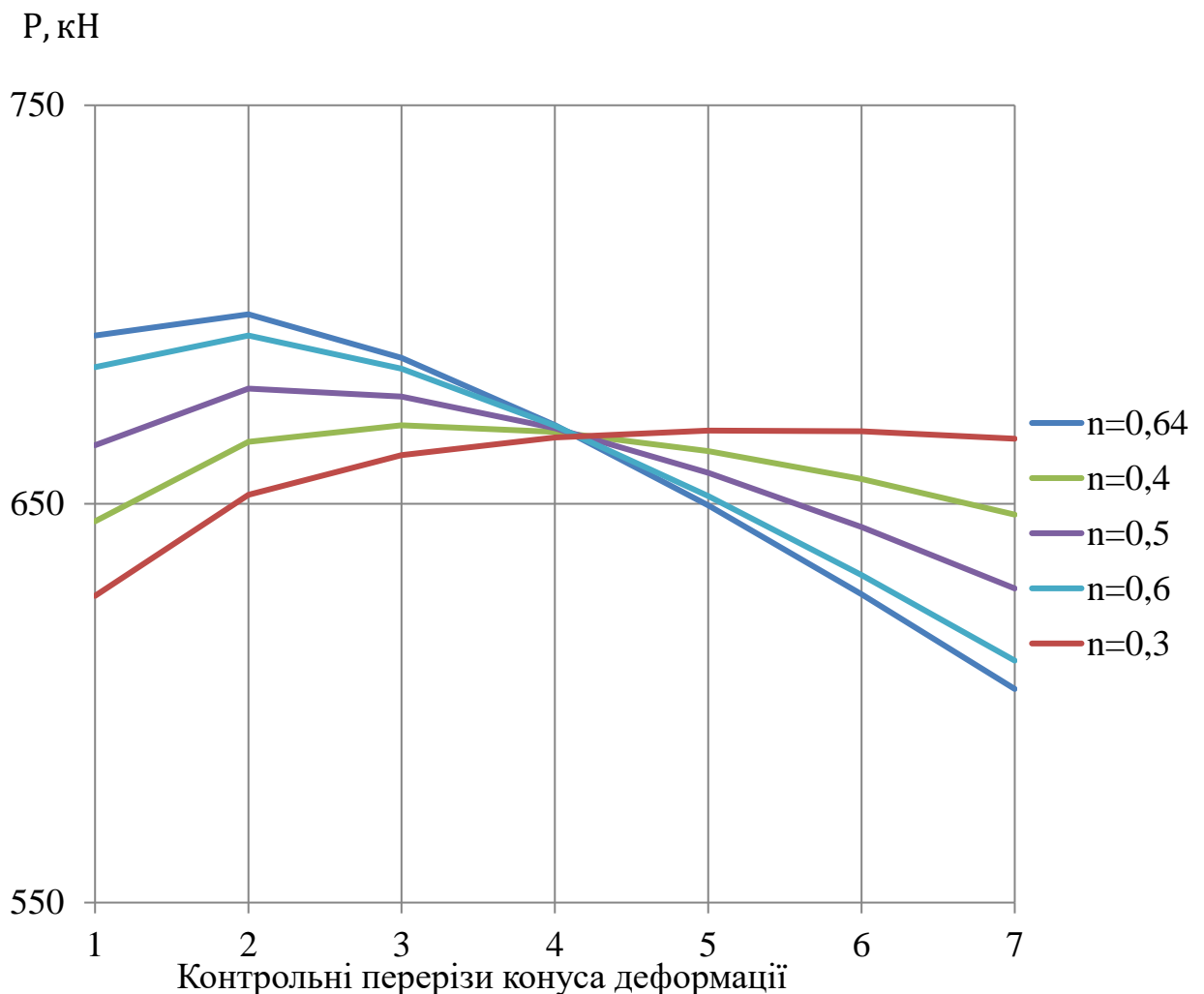


Рис. 3.24 – Розподіл сили прокатки по довжині зони обтиснення стінки при холодній прокатці сталі 20 для прямого ходу:

Р – сила, діюча на валок, кН;

n – коефіцієнт розподілу деформації по довжині робочого конуса.

Для сталі марки 20 картина відрізняється. В першу чергу, сила прокатки є значно вищою, ніж при прокатці сплаву на основі титану, і вона розподіляється з піком у середині кривої та є мінімальною на початку та наприкінці прокатки. Різниця між силою прокатки при прямому та зворотному ході у сталі більш суттєва, ніж у сплаву на основі титану та становить 110 кН у піковому навантаженні.

Для порівняння даних одержаних в результаті розрахунків сили прокатки яка діє на валок при деформуванні сталі X18H9T був побудований графік в діапазоні сил від 550 до 850 кН.

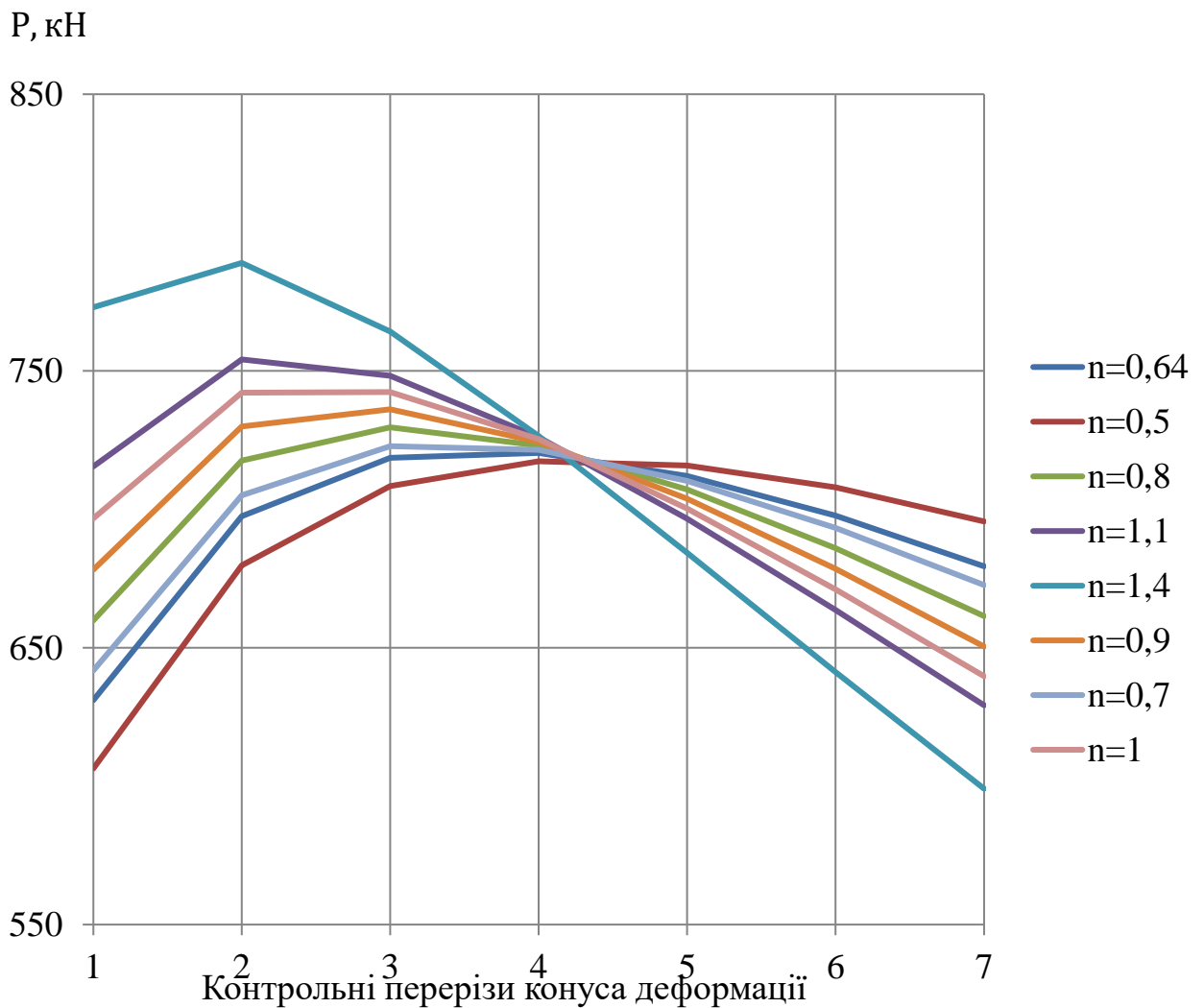


Рис. 3.25 – Розподіл сили прокатки по довжині зони обтиснення стінки при холодній прокатці корозійностійкої сталі X18H9T для прямого ходу:

P – сила діюча на валок, кН;

n – коефіцієнт розподілу деформації по довжині робочого конусу.

Як видно з графіків, сталь марки X18H9T, яка належить до корозійностійких марок, при деформуванні має пік сили на початку кривої.

При холодній прокатці труб деформації по довжині робочого конуса бажано розподіляти так, щоб розподіл сили прокатки по довжині зони обтиснення стінки був рівномірним [41, 47, 62, 71, 73]. Це дає можливість зберігати заплановані величини деформації при зміні зазорів між калібрами, коли відбувається настройка стана для одержання регламентованих значень діаметра і товщини стінки.

Для сплаву на основі титану VT1 видно, що умови рівномірного розподілу сили неможливо забезпечити. Для всіх розрахованих значень «n» пік сили буде на початку деформації робочого конуса. Слід також відмітити, що за заводськими даними при прокатці труб із сплавів на початку робочого конуса знос калібрів найбільший. Це можливо вважати за особливість процесу прокатки труб зі сплавів.

З розрахункового аналізу видно, що сила прокатки для сплаву на основі титану є значно меншою, ніж при деформуванні сталі 20 чи X18H9T. Причина цього у малих значеннях подачі, та як наслідок деформації з малими обтисками. Такі режими застосовують, оскільки на великих значеннях подачі сила буде настільки високою, що призведе до пошкодження обладнання. Таким чином, за допомогою розрахункового аналізу доведено, що під час прокатки труб зі сплавів на основі титану величина подачі обмежена силовими характеристиками.

Висновки по розділу III

1. В результаті розробки теоретичного пояснення механізму зменшення поперечної ексцентричної різностінності при холодній прокатці на оправці труб показано, що у разі розташування тонкої і товстої стінки по вершинам калібрів більше обтиснення відбувається по товстій стінці. Причиною такого явища є більше зміцнення металу тонкої стінки, ніж товстої.

2. На базі застосованої скінченно-елементної програми проведено розрахунковий аналіз осадження різнотовщинних зразків між трьома плитами

для умов, ідентичних з параметрами миттєвого осередку деформації в стані ХПТ-75, для сплаву ПТ-1М. Отримані кількісні дані, що підтверджують розроблене теоретичне пояснення механізму зменшення поперечної різностінності.

3. Експериментальні лабораторні дослідження проведені при осадженні зразків різної товщини зі сплаву на основі титану між трьома плитами з параметрами, однаковими з розрахунковим аналізом, показали, що розбіжність між коефіцієнтами інтенсивності зменшення поперечної різностінності (-0,022 та -0,018) мала. Це показує що розрахункові вирази дають результати, близькі до експериментальних даних, і застосування методу розробленого на базі програми скінченно-елементного моделювання, дає достовірні результати.

4. Для зразків з поперечною різностінністю у 20%, 15%, 10% та 5% коефіцієнт інтенсивності зменшення абсолютної різнотовщинності однаковий. У чотирьох формулах, що описують апроксимаційну криву для чотирьох значень початкової поперечної абсолютної різностінності, значення абсолютного коефіцієнта інтенсивності зменшення різностінності однакове ($\alpha = -0,01$). Але чим більшою є початкова абсолютна різнотовщинність, тим більше і її зменшення в абсолютних величинах.

За результатами розрахункового аналізу, в діапазоні 0–90% зменшення відносної різностінності для труб-заготовок з початковою різностінністю 20% становить 6%, для труб-заготовок з початковою різностінністю у 15% становить 4%, для труб-заготовок з початковою різностінністю у 10% становить 3%, а для труб-заготовок з початковою різностінністю у 5% становить лише 1%. Тобто для труб з більшою в абсолютних величинах поперечною різностінністю зменшення буде більш інтенсивним.

5. Одержані вирази для розрахунку величини різностінності. Вони враховують початкову різнотовщинність, коефіцієнт інтенсивності зменшення поперечної різнотовщинності, що залежить майже від усіх факторів процесу холодної прокатки та величини загального відносного обтиснення.

6. Проведений аналіз розрахунку параметрів процесу холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану ВТ1, вуглецевої сталі марки 20 та

корозійностійкої сталі X18H9T продемонстрував, що при прокатці труб зі сплавів на основі титану на початку робочого конуса значення сили прокатки більше, ніж в останніх перерізах. Виникнення такого ефекту пов'язано з малими значеннями величини подачі.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕКСЦЕНТРИЧНОЇ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ ТРУБИ НА ОПРАВЦІ

4.1 Експериментальні промислові дослідження зменшення поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану по довжині робочого конуса при прокатці на станах ХПТ

Методика проведення експериментальних досліджень на стані ХПТ-75 в промислових умовах приведена в розділі 2.

Робочі конуси відбиралися при прокатці на стані ХПТ-75, ХПТ-55 та ХПТР 15-30 заводу ТОВ «ВСМПО ТИТАН Україна». На стані ХПТ-75 труби зі сплавів на основі титану прокатували за маршрутом 63x8,5→38x4,5 мм. Результати вимірів товщини стінок було зведено у таблиці (таб. 4.1 та таб. 4.2), в яких наведено значення максимальної, мінімальної та середньої стінки по периметру перерізу. З цих даних розраховано абсолютну та відносну різностінність.

Таблиця 4.1

Значення товщини стінок і поперечної різностінності при холодній пільгерній прокатці за маршрутом 63x8,5мм→38x4,5 мм в зоні редукування

№ п.п.	Макс. стінка, мм	Мін. стінка, мм	Середня стінка, мм	Абсолютна різност., мм	Відносна різност., %
1	8,80	8,25	8,54	0,55	6,44
2	8,82	8,26	8,54	0,56	6,56
3	8,80	8,10	8,49	0,70	8,24

Таблиця 4.2

Значення товщини стінок і поперечної різностінності при холодній пільгерній прокатці по маршруту 63x8.5→38x4.5 мм в зоні обтиснення стінки

№ перерізу	Макс. стінка, мм	Мін. стінка, мм	Сер. стінка, мм	Абс. різност., мм	Відн. різност., %
4	8,77	8,34	8,56	0,43	5,02

Продовження таблиці 4.2

№ перерізу	Макс. стінка, мм	Мін. стінка, мм	Сер. стінка, мм	Абс. різност., мм	Відн. різност., %
5	8,04	7,65	7,84	0,39	4,97
6	7,53	7,20	7,36	0,33	4,48
7	7,19	6,92	7,04	0,27	3,83
8	6,83	6,53	6,71	0,30	4,47
9	6,52	6,19	6,38	0,33	5,17
10	6,24	5,98	6,12	0,26	4,25
11	6,01	5,75	5,88	0,26	4,42
12	5,77	5,54	5,65	0,23	4,07
13	5,57	5,39	5,49	0,18	3,28
14	5,43	5,22	5,33	0,21	3,94
15	5,24	5,05	5,15	0,19	3,69
16	5,06	4,90	4,98	0,16	3,21
17	5,06	4,84	4,95	0,22	4,44
18	5,01	4,80	4,88	0,21	4,30
19	4,95	4,78	4,85	0,17	3,51
20	4,90	4,71	4,81	0,19	3,95
21	4,84	4,68	4,76	0,16	3,36
22	4,79	4,63	4,70	0,16	3,40
23	4,74	4,59	4,66	0,15	3,22
24	4,70	4,53	4,61	0,17	3,69
25	4,68	4,52	4,59	0,16	3,49
26	4,66	4,50	4,57	0,16	3,50
27	4,65	4,50	4,57	0,15	3,28

Абсолютна різностінність в ході прокатки на оправці труб зі сплаву на основі титану ПТ-1М зменшилася в 2,86 рази, а відносна різностінність зменшилася у 1,52 рази.

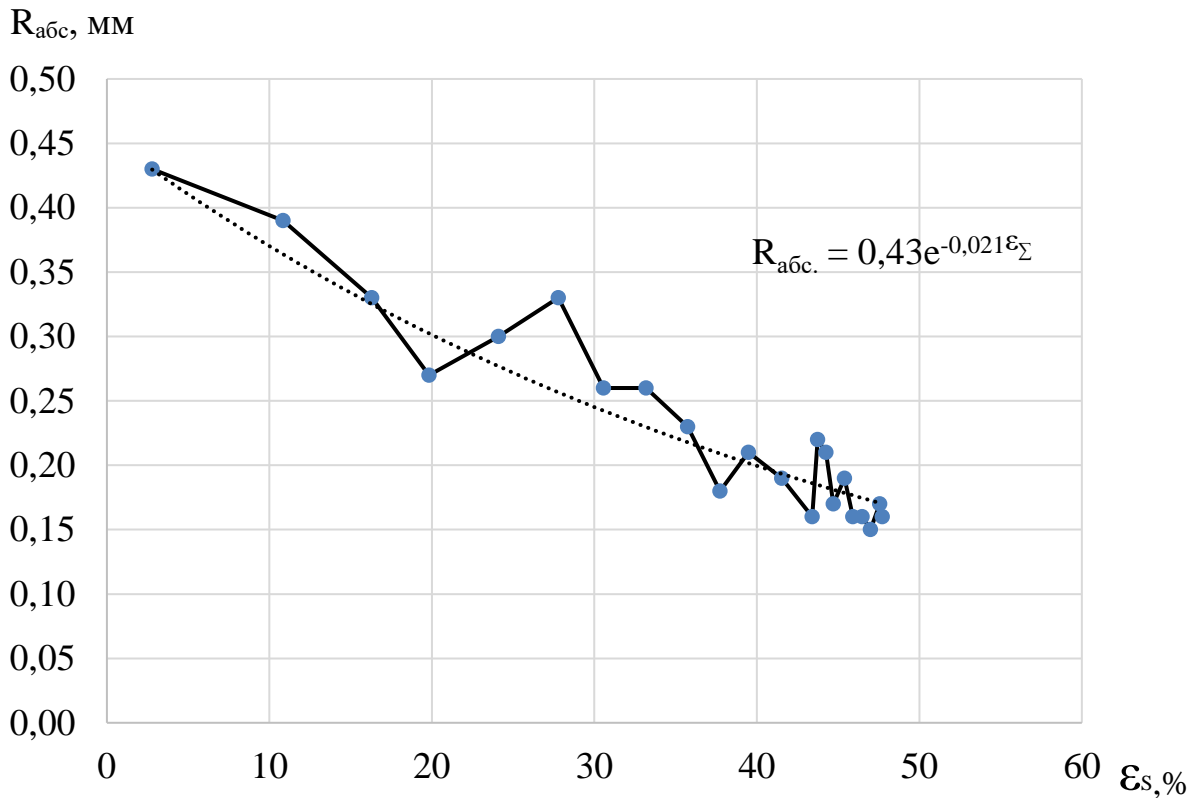


Рис. 4.1 – Графік зменшення абсолютної поперечної різностінності уздовж зони обтиснення стінки стана ХПТ-75(90) при прокатці труб по маршруту 63x8.5→38x4.5 мм в зоні обтиснення стінки:

—●— — значення різностінності;
 — апроксимація одержаного графіку.

За заводськими даними на станах ХПТ, в основному, сплави на основі титану прокатують із загальними деформаціями не більше ніж 55-60% [48]. З появою станів КРВ на виробництві та опираючись на нові дослідження деформування труб зі сплавів на основі титану [64-69, 71], для досягнення необхідних механічних властивостей застосовують загальні деформації до 80%.

Ця інформація в співставленні з даними щодо деформації під час прокатки труб за маршрутом 63x8.5→38x4.5 мм дозволяє зробити висновок, що під час даної прокатки не було досягнуто максимально можливих деформацій, які не призведуть до руйнування труби і, як наслідок, не було реалізовано в повній мірі ресурс для зменшення різностінності при прокатці.

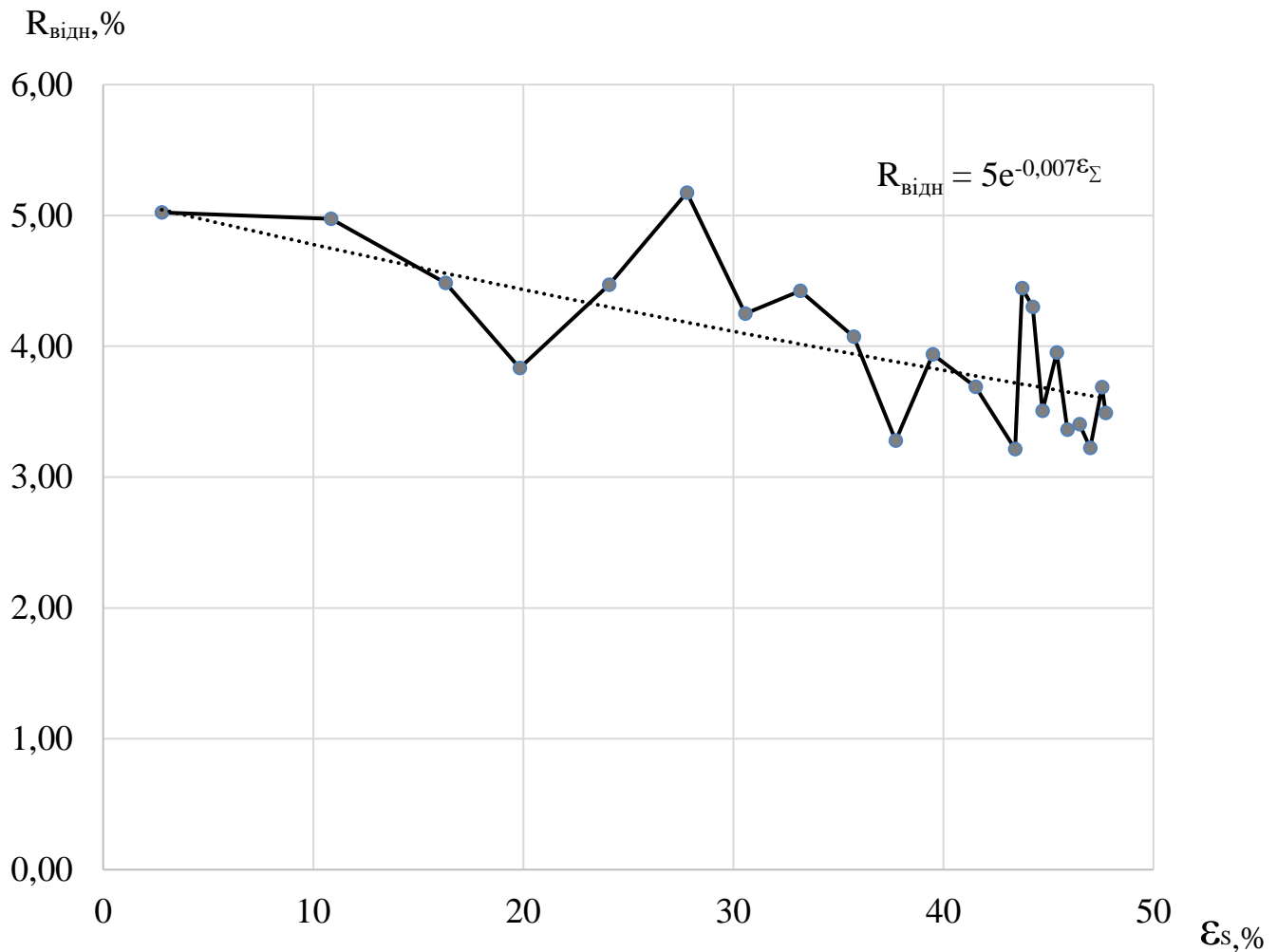


Рис. 4.2 – Відносна різностінність уздовж зони обтиснення стінки при прокатці труби зі сплаву на основі титану за маршрутом 63x8.5→38x4.5 мм в зоні обтиснення стінки:

- — значення різностінності;
- — апроксимація одержаного графіку.

Надалі труби 38x4,5 мм були прокатані на розмір 25,4x2,25 міліметра. Прокатка проводилася на стані ХПТ-55. Під час деформування однієї з труб процес був зупинений та вирізаний конус, на якому проведені заміри по зменшенню різностінності уздовж конуса (таблиця 4.3 та 4.4).

В таблиці представлені дані щодо середньої, мінімальної та максимальної товщини стінки. Також розраховані дані щодо величині абсолютної та відносної поперечної різностінності для кожного з перерізів.

Таблиця 4.3

Значення товщини стінок і поперечної різностінності при холодній пільгерній прокатці на стані ХПТ-55 за маршрутом 38x4.5 мм→25,4x2,25 мм в зоні редукування

№ перерізу	Середня стінка, мм	Мінімальна стінка, мм	Максимальна стінка, мм	Абсолютна різностінність, мм	Відносна різностінність, %
1	4,63	4,50	4,75	0,25	5,41
2	4,65	4,53	4,77	0,24	5,16
3	4,63	4,51	4,75	0,24	5,18

Товщина стінки у зоні редукування незначно збільшилася на 0,04 міліметра, абсолютна та відносна поперечна різностінність незначно зменшилася.

Таблиця 4.4

Значення товщини стінок і поперечної різностінності при холодній пільгерній прокатці при прокатці на стані ХПТ-55 за маршрутом 38x4.5-25,4x2,25 мм в зоні обтиснення стінки на оправці

№ перерізу	Середня стінка, мм	Мінімальна стінка, мм	Макс. стінка, мм	Абсолютна різностінність, мм	Відносна різностінність, %
4	4,58	4,46	4,73	0,27	5,90
5	4,67	4,54	4,77	0,23	4,92
6	4,27	4,16	4,36	0,20	4,69
7	4,08	3,97	4,17	0,20	4,90
8	3,90	3,77	4,01	0,24	6,15
9	3,70	3,60	3,80	0,20	5,41
10	3,52	3,43	3,60	0,17	4,83
11	3,33	3,22	3,42	0,20	6,01
12	3,17	3,09	3,24	0,15	4,73

Продовження таблиці 4.4

№ перерізу	Середня стінка мм	Мінімальна стінка, мм	Максимальна стінка, мм	Абсолютна різностінність, мм	Відносна різностінність, %
13	3,01	2,92	3,09	0,17	5,65
14	2,87	2,79	2,94	0,15	5,23
15	2,73	2,65	2,80	0,15	5,49
16	2,62	2,54	2,71	0,17	6,48
17	2,52	2,45	2,58	0,13	5,16
18	2,45	2,37	2,59	0,22	8,97
19	2,39	2,32	2,47	0,15	6,28
20	2,37	2,29	2,48	0,19	8,01
21	2,36	2,30	2,39	0,09	3,82
22	2,36	2,31	2,39	0,08	3,40
23	2,35	2,31	2,40	0,09	3,83
24	2,35	2,31	2,41	0,10	4,25
25	2,35	2,29	2,38	0,09	3,84
26	2,37	2,30	2,48	0,18	7,61
27	2,34	2,31	2,40	0,09	3,84

Одержані дані представлено у вигляді графіка залежності зміни абсолютної та відносної різностінності від обтиску по стінці уздовж робочого конуса для абсолютної та відносної різностінності (рис. 4.3 та 4.4).

За результатами експерименту абсолютна різностінність зменшилася в 3,4 рази, а відносна різностінність зменшилася в 1,3 рази.

Під час прокатки за цим маршрутом деформації по стінці також становлять не більше 50%.

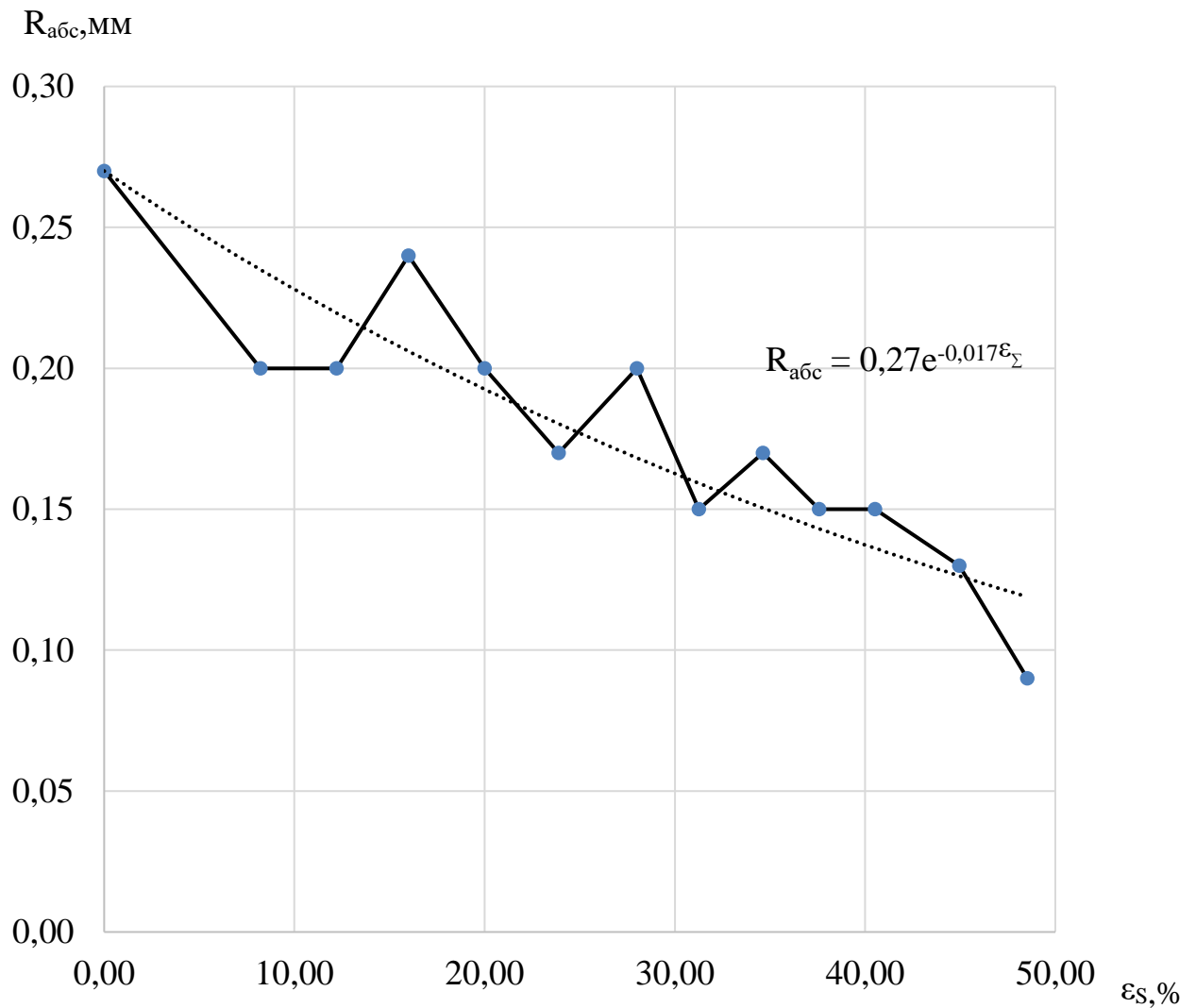


Рис. 4.3 – Графік зміни абсолютної поперечної різностінності уздовж зони обтиснення стінки робочого конуса деформації стана ХПТ-55 при прокатці труб за маршрутом 38x4.5→25,4x2,25 міліметра:

—●— — значення різностінності;

..... — аппроксимаційна крива.

Характер даних по зміні різностінності в зоні обтиску стінки має очевидний низпадаючий характер та достатньо постійну інтенсивність зміни різностінності вздовж усієї зони.

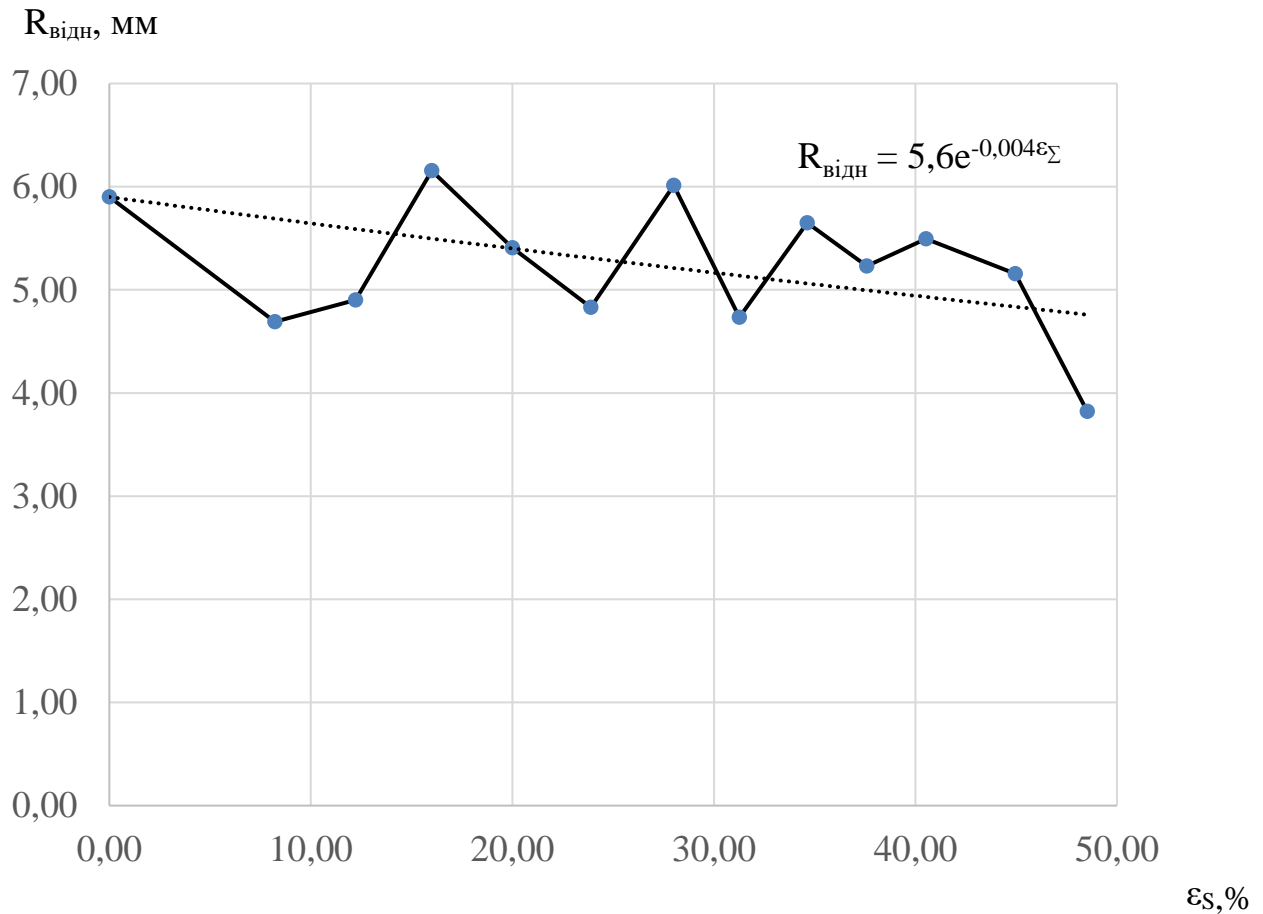


Рис. 4.4 – Графік зміни відносної поперечної різностінності уздовж конуса деформації стана ХПТ-55 при прокатці труб за маршрутом 38x4.5→25,4x2,25 міліметра:

- — зменшення різностінності;
- — апроксимаційна крива.

Відносна різностінність коливається в межах 5-6% впродовж конуса деформації та лише наприкінці прокатки зменшується до 3,8%.

Це теж корелюється з результатами розрахункового аналізу

4.2 Експериментальні промислові дослідження зміни поперечної різностінності по довжині робочого конуса на стані ХПТР 15-30 при прокатці труб зі сплаву на основі титану

Для експерименту вибрано трубу 25,4x2,65 мм зі сплаву на основі титану. Труби було прокатано на стані ХПТР 15-30 з холоднокатаної заготовки розміром

28x3,2 мм. Подача та поворот проводилися за класичною схемою – перед прямим ходом кліті.

Під час прокатки відібрано конус деформації, де було максимальне значення поперечної різностінності. Конуси порізано на 27 рівних частин, параметри геометрії яких заміряно трубним мікрометром в 8-ти точках поперечного перерізу. Далі була відокремлені дані замірів частини конусу, які стосувалися зони обтиску стінки, та зведені у таблицю (таб. 4.3). В ній наведено значення максимальної, мінімальної та середньої стінки по периметру перерізу. З цих даних розраховано абсолютну та відносну різностінність.

Таблиця 4.5

Значення товщини стінок і поперечної різностінності при холодній пільгерній прокатці при прокатці на стані ХПТР 15-30 за маршрутом 28x3,2 мм →25,4x2,65 мм в зоні обтиснення стінки

№ п.п.	Макс. стінка, мм	Мін. стінка, мм	Середня стінка, мм	Абсолютна різност., мм	Відносна різност., %
3	3,57	2,95	3,20	0,62	19
4	3,54	2,97	3,24	0,57	18
5	3,50	2,94	3,16	0,56	18
6	3,41	2,87	3,09	0,54	17
7	3,35	2,81	3,02	0,54	18
8	3,30	2,77	2,97	0,53	18
9	3,25	2,72	2,93	0,53	18
10	3,20	2,65	2,88	0,55	19
11	3,15	2,63	2,83	0,52	18
12	3,10	2,58	2,77	0,52	19
13	3,07	2,54	2,74	0,53	19
14	3,04	2,52	2,72	0,52	19

Продовження таблиці 4.5

№ п.п.	Макс. стінка, мм	Мін. стінка, мм	Середня стінка, мм	Абсолютна різност., мм	Відносна різност., %
15	3,02	2,52	2,72	0,5	18
16	3,02	2,50	2,70	0,52	19
17	3,02	2,50	2,69	0,52	19
18	3,01	2,49	2,67	0,52	19
19	3,00	2,49	2,67	0,51	19
20	3,00	2,50	2,68	0,5	19

Для більшої наглядності результати зменшення абсолютної та відносної різностінності приведено на рис. 4.5 та рис. 4.6 відповідно.

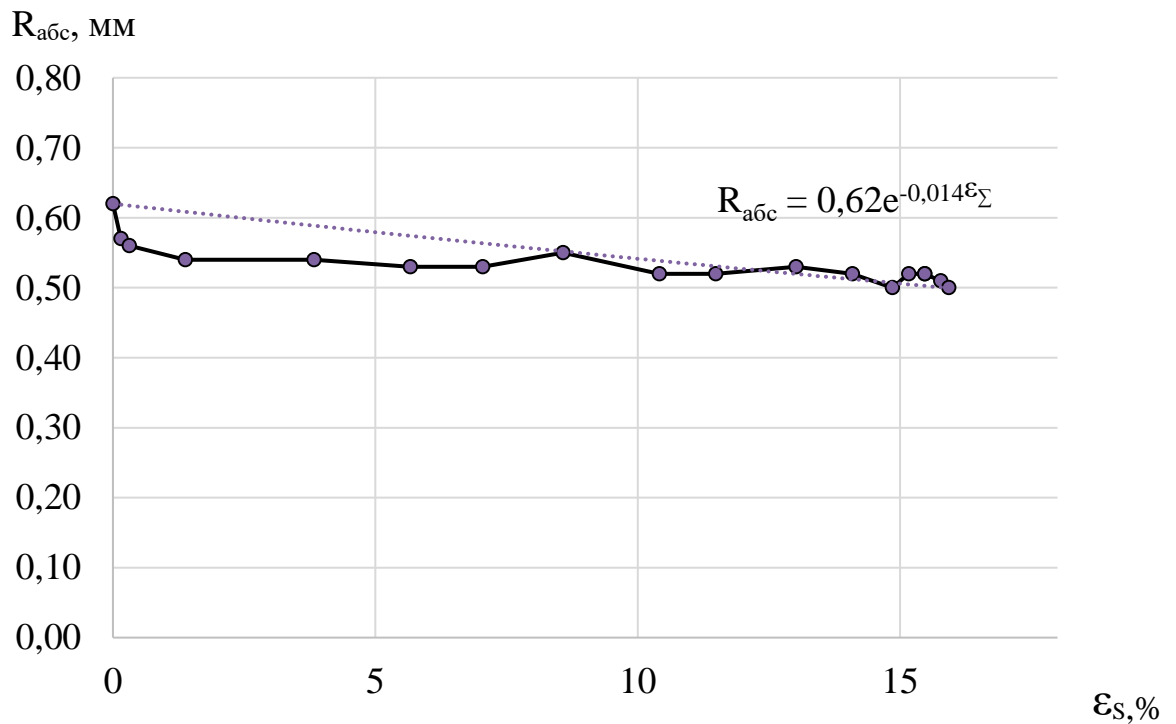


Рис. 4.5 – Графік зміни абсолютної різностінності уздовж зони обтиснення стінки робочого конуса деформації стана ХПТР 15-30 при прокатці труб зі сплаву за маршрутом 28x3,2 - 25,4x2,65 (подача та поворот у передньому положенні кліті):

- — значення абсолютної різностінності;
- — апроксимація одержаного графіка.

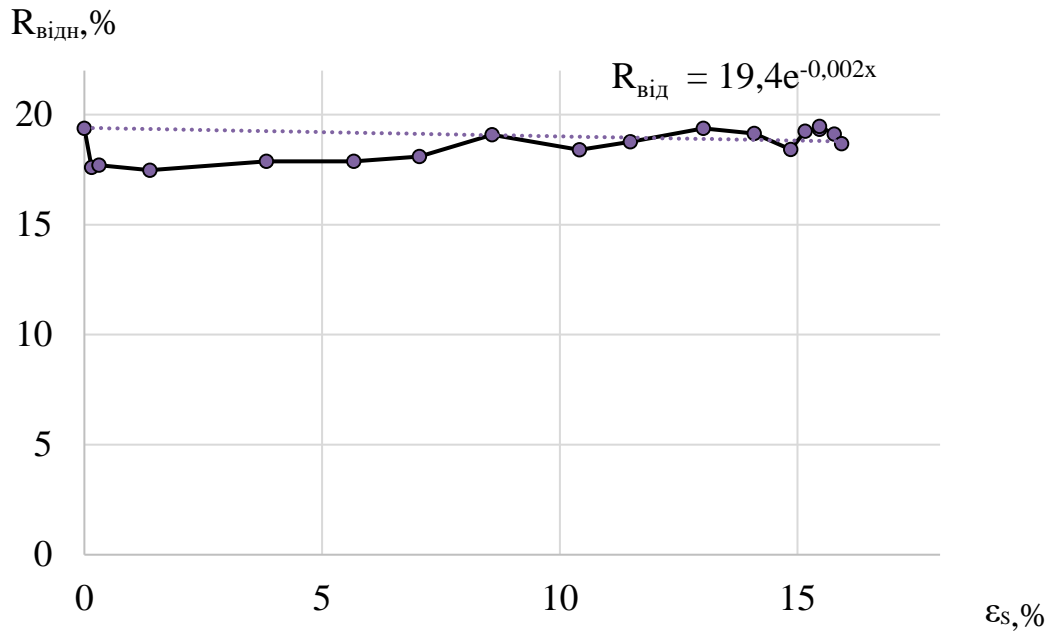


Рис. 4.6 – Графіки зміни відносної різностінності уздовж конуса деформації стана ХПТР 15-30 при прокатці труб зі сплаву за маршрутом 28x3,2→25,4x2,65 (подача та поворот проводилися за класичною схемою та подачею 3 мм):

- зменшення різностінності ($S_{\text{max}}-S_{\text{min}}$);
-— апроксимація одержаного графіка.

Формули, що описують апроксимаційні криві, мають вигляд:

$$R_{\text{абс.пр}} = 0,62e^{-0,014\varepsilon_s}; \quad (4.1)$$

$$R_{\text{відн.пр}} = 19,4e^{-0,002\varepsilon_s}; \quad (4.2)$$

де: 0,62 – рівень початкової абсолютної різностінності, мм; 25 – рівень початкової відносної різностінності, %; 0,014– коефіцієнт інтенсивності зменшення різностінності для абсолютних величин; 0,002 – коефіцієнт інтенсивності зменшення різностінності для відносних величин;

4.3 Порівняння результатів по зменшенню ексцентричної поперечної різностінності при розрахунковому аналізі, лабораторних та експериментальних дослідженнях

Для співставлення результатів, одержаних при розрахунковому аналізі та при прокатці на стані ХПТ-75, був побудований графік (рис. 4.7), який включає в себе графіки по зміні абсолютної різностінності одержані при розрахунковому аналізі та з експерименту на промисловому стані холодної прокатки. Для розрахункового аналізу була застосована початкова різностінність стінок у 0,43 мм по аналогії з різностінністю на початку зони обтиснення стінки на стані ХПТ-75.

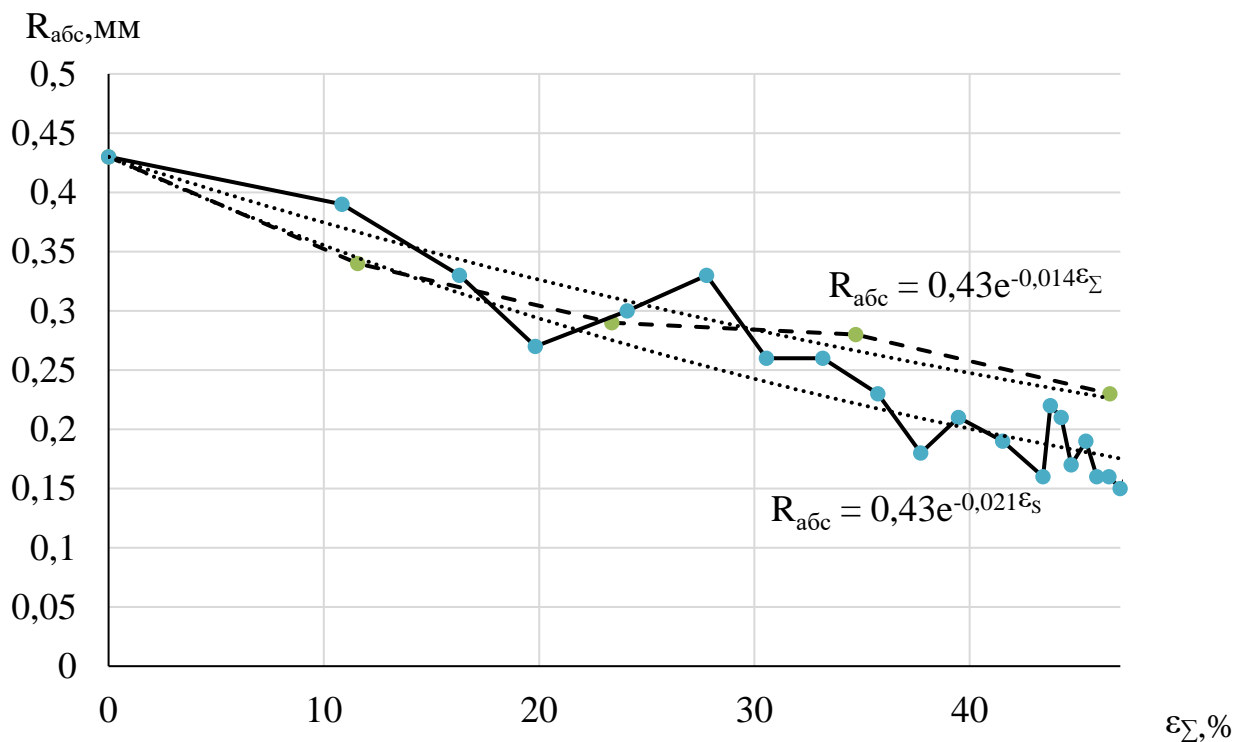


Рис. 4.7. – Порівняння зменшення абсолютної різностінності при розрахунковому аналізі та прокатці на стані ХПТ-75:

- — дані з розрахункового аналізу по зменшенню різностінності;
- — дані з прокатки на стані ХПТ по зменшенню різностінності;
- — лінії тренду

Аналогічно було побудовано графіки для порівняння зміни абсолютної різностінності при прокатці на стані ХПТР та при розрахунковому аналізі.

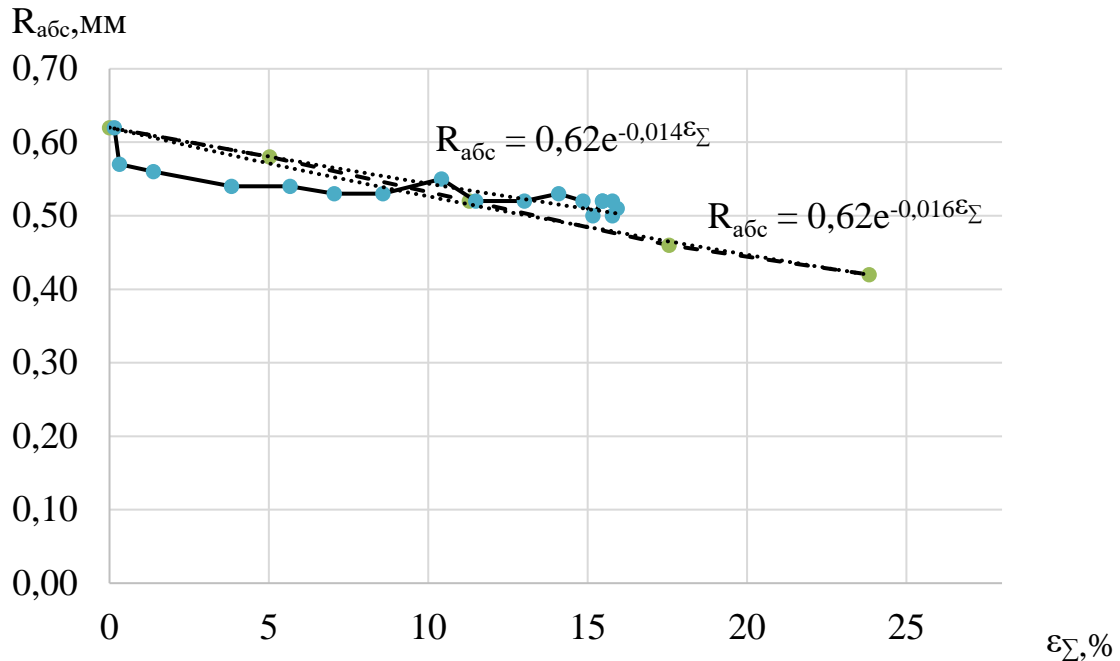


Рис. 4.8. Порівняння зміни абсолютної різностінності при розрахунковому аналізі та прокатці на стані ХПТР:

—●— — зміна різностінності уздовж конуса деформації стана ХПТР;
 -●- - зменшення різностінності при розрахунковому аналізі; — лінії тренду

Таблиця 4.6

Значення інтенсивності зменшення поперечної різностінності для сплаву на основі титану

Коефіцієнти інтенсивності зменшення різностінності (α) при дослідженнях зменшення різностінності на стані ХПТ-75	
розрахунковий аналіз	експеримент
0,015	0,017
Коефіцієнти інтенсивності зменшення різностінності (α) при дослідженнях зменшення різностінності на стані ХПТР 15-30	
розрахунковий аналіз	експеримент
0,016	0,014

Вище зазначені дані свідчать, що ефект наклепу металу необхідно враховувати на етапі проектування технології та способів деформації станів холодної прокатки труб.

Значення коефіцієнта « α » характеризує зменшення поперечної різностінності. Коефіцієнт « α » для випадку прокатки труб зі сплаву на основі титану ПТ-1М близький до коефіцієнта « α », одержаного при розрахунковому аналізі виконаному на базі програми кінцево-елементного моделювання. Це дозволяє стверджувати, що результати досліджень відповідають дійсності, а також підтверджує правильність вибору граничних умов при розрахунковому аналізі. Розбіжності пояснюються спрощенням моделі та незначно впливають на результат.

Висновки по розділу IV

1. Виконані (послідовно на стані ХПТ-75 та ХПТ-55) експериментальні промислові дослідження значень поперечної різностінності по довжині зони обтиснення стінки показали, що інтенсивність зменшення поперечної різностінності на стані ХПТ-75 близька до значень при розрахунковому аналізі. Є можливість застосувати результати розрахункового аналізу для прогнозування зменшення поперечної різностінності на станах ХПТ в промислових умовах.

2. Експериментальні дослідження поперечної різностінності труб по довжині зони обтиснення стінки, виконані на промисловому стані ХПТР 15-30 та розрахунковий аналіз на базі програми скінченно-елементного моделювання показали, що інтенсивність зменшення різностінності на стані ХПТР близька до значень при розрахунковому аналізі. Це дає можливість застосовувати результати роботи для прогнозування різностінності на станах ХПТР.

РОЗДІЛ 5. РОЗВИТОК МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ТРУБ ПРИ БАГАТОПРОХІДНІЙ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1 Розвиток методу прогнозування поперечної різностінності труб для холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану

На даний момент при розрахунках маршруту прокатування труби, тобто її деформацій на кожному стані, різностінність прогнозується на базі накопленого досвіду технолога.

Для цього використовується емпіричний заводський досвід. Такий підхід має велику похибку при розробках та застосовується як орієнтовна величина. За заводською методикою зменшення різностінності під час кожної прокатки приймається на рівні 30-40% та приймається підвищення різностінності за рахунок наведеної різностінності приблизно на 2-5% в залежності від типу стану та рівнем його наладки.

Такий підхід призводить до неможливості якісного прогнозування поперечної різностінності та одержання труб з високим рівнем різностінності. В подальшому, для зменшення поперечної різностінності застосовуються додаткові операції, такі як обточка та розточка та ін., що, веде до підвищення витрат на метал та затрати на додаткові переробки.

Прогнозування, де враховано багато факторів деформування, дозволить одержувати дані із поперечної різностінності після кожної прокатки і експлуатувати технологію, яка має прогнозовані результати по регламентованій точності труб.

На даний час використовують два основних способи для розрахунку режимів деформування труб:

А) Прямий – при якому розраховується режим деформування відповідно до існуючої труби-заготовки

Б) Зворотній – при якому розраховується режим деформування відповідно до потрібної готової труби.

На підприємствах найбільш популярним є перший спосіб, оскільки при зворотному розрахунку режиму деформування потрібно купувати заготовку з різними геометричними розмірами, що вносить важкість у логістику, планування та інше та, як наслідок, піднімає вартість труб.

Для прогнозування різностінності при багатопрохідній прокатці труб регламентованої точності потрібно мати гнучкий метод розрахунку, який інтегровано до загального комплексу розрахунку режимів деформації. Такий метод дозволяє технологу на етапі розробки маршруту аналізувати різностінність заготовки та приймати рішення про застосування заготовки з певною різностінністю для виробництва труб.

Наявність методу прогнозування дозволить одержувати значну економію у багатьох статтях бюджету виробництва у порівнянні з існуючою технологією.

Одержання труб з прогнозованою поперечною різностінністю базується на розрахунках їх за допомогою одержаних вище залежностей, які враховують такі параметри деформації: геометрію, механічні властивості, обтиски, наклеп металу та коефіцієнт тертя. Використання запропонованого в роботі розвиненого методу базується на розрахунковому аналізі процесу, що підтверджений результатами лабораторного та промислового дослідження.

Основою є одержані в роботі вирази, які описують зменшення поперечної абсолютної різностінності та мають вигляд:

$$R_{\text{абс}} = R_{\text{абс.поч}} e^{-\alpha \varepsilon \Sigma} ; \quad (5.1)$$

$$R_{\text{відн}} = R_{\text{відн.поч}} e^{-\beta \varepsilon \Sigma} . \quad (5.2)$$

Коефіцієнти α і β одержуються за допомогою програм розрахункового аналізу, які базуються на скінченно-елементному моделюванні, при лабораторних дослідженнях або за результатами заводських експериментальних

даних. При його визначенні за допомогою програм використовуються початкові та граничні умови згідно теорією обробки металів тиском.

Зона редукування при деформуванні сплавів на основі титану проектується мінімально можливої довжини для запобігання утворенню дефектів на внутрішній поверхні, тому її вплив – незначний.

Формули для розрахунку прогнозування абсолютної та відносної різностінності при одному проході слід доповнити з урахуванням наведеної в прокатному стані різностінності. Вони мають вигляд:

$$R_{\text{абс.пр}} = R_{\text{абс.поч}} e^{-\alpha \varepsilon_{\Sigma}} + R_{\text{абс.нав}}, \quad (5.3)$$

$$R_{\text{відн.пр}} = R_{\text{відн.поч}} e^{-\beta \varepsilon_{\Sigma}} + R_{\text{відн.нав}}, \quad (5.4)$$

де $R_{\text{абс.поч}}$ – початкова абсолютна різностінність заготовки, мм;

$R_{\text{відн.поч}}$ – початкова відносна різностінність заготовки, %;

α – коефіцієнт інтенсивності зменшення абсолютної поперечної різностінності;

β – коефіцієнт інтенсивності зменшення відносної поперечної різностінності;

ε_{Σ} – сумарна деформація по стінці труби, %;

$R_{\text{абс.нав}}$ та $R_{\text{відн.нав}}$ – наведена різностінність яка виникає в стані під час прокатки.

Використовуючи вирази (5.3, 5.4) по розрахунку абсолютної та відносної зміни поперечної різностінності, розраховується сумарне зниження різностінності ($R_{\text{пр.пов}}$) від заготовки до готової труби за формулою:

$$R_{\text{абс.п}} = R_{\text{абс.поч}} \cdot e^{(-\alpha_1 \varepsilon_{\Sigma 1} \dots + (-\alpha_n \varepsilon_{\Sigma n}))} + R_{\text{абс.сим.п}}, \quad (5.5)$$

$$R_{\text{відн.п}} = R_{\text{відн.поч}} \cdot e^{(-\beta_1 \varepsilon_{\Sigma 1} \dots + (-\beta_n \varepsilon_{\Sigma n}))} + R_{\text{відн.сим.п}}, \quad (5.6)$$

де: $e^{-\alpha \varepsilon_{\Sigma n}}$ – зменшення абсолютної різностінності при n-ній прокатці;

$e^{-\beta \varepsilon_{\Sigma n}}$ – зниження відносної різностінності при n-ній прокатці;

$R_{абс.}$ – абсолютна різностінність труби заготовки при прокатці;

$R_{від.}$ – відносна різностінність труби заготовки при прокатці;

$R_{абс.сим.п}$ – абсолютна наведена різностінність, що виникає в стані під час п-ої прокатки;

$R_{відн.сим.п}$ – відносна наведена різностінність, що виникає в стані під час п-ої прокатки;

Поставлена технічна задача вирішується на стадії розробки режимів прокатки. Розрахунки виконуються за допомогою розробленого програмного продукту «ХПТ, ХПТР - прогноз різностінності».

Програмний продукт дозволяє технічному персоналу оцінити параметри різностінності, яких набуде труба після прокатки, і в разі потреби скорегувати маршрут прокатки таким чином, щоб зменшити початкову різностінність і одержати потрібне її регламентоване значення. Порівняємо схему розрахунку маршруту прокатки за існуючої схеми прокатки та запропонованій (рис. 5.1).

Так для існуючої схеми прокатки (рис. 5.1) розрахунок проходить чотири етапи: заміри поперечної різностінності труб (контроль геометричних параметрів), формування параметрів прокатки, розрахунок загальних деформацій по кожному проходу і за «остаточним принципом» розрахунок зменшення різностінності, який є інформативним фактором у розрахунках.

Запропонована схема розрахунку (рис. 5.1 Б) доповнена розрахунками коефіцієнтів зміни різностінності для кожної прокатки та, як наслідок, розрахунку зміни різностінності для кожної прокатки при багатопрохідному маршруті виробництва труб. Після цього додано порівняння прогнозованої різностінності та регламентованої різностінності труби. У разі прогнозування недостатньої точності труби, можливо внести корективи до розрахунку загальних деформацій таким чином, щоб прогнозований рівень різностінності відповідав регламентованому.

Таким чином, запропонований метод розрахунку є трохи довшим, ніж існуючий, проте може значно зекономити час та виробничі витрати на переробку

при подальшому виробництві труб. Одержання труб з прогнозованим рівнем поперечної різностінності дозволить не застосовувати, або застосовувати в меншій мірі такі фінішні операції як шліфування та струміневе травлення.



Рис. 5.1 – Логічна схема прогнозування різностінності при багатопрохідній холодній прокатці труб

де А – існуюча схема; Б – запропонована схема

Для оцінки одержаної залежності із прогнозування зниження абсолютної поперечної різностінності проведено порівняльний аналіз її експериментальних

значень при багатопрохідній прокатці за цеховим маршрутом та з використанням аналітичних даних, одержаних із застосуванням розрахункового аналізу.

Маршрут прокатки:

- 1) 63x8,5мм → 38x4,5мм (ХПТ-90);
- 2) 38x4,5мм → 25,4x2,41мм (ХПТ-55);
- 3) 25,4x2,41мм → 19,8x1,65мм (ХПТ-32).

Для порівняння була заміряна абсолютна різностінність труб до та після кожної з прокаток. За формулами (5.3, 5.5) розраховали зміну різностінності для вище наведеного маршруту. Для наочності і порівняння дані з розрахунків та замірів (таб. 4.1-4.5) різностінності зведено в таблицю (таб. 5.1).

Таблиця. 5.1

Порівняння зміни ексцентричної різностінності при багатопрохідній прокатці на станах ХПТ та розрахункових даних

Стан	Розрахована різностінність, мм	Різностінність з замірів, мм
Початкова	0,55	0,55
ХПТ-75(90)	0,22	0,2
ХПТ-55	0,09	0,08
ХПТ-32	0,05	0,05

З порівняння графіків експериментальних та розрахункових даних щодо остаточної поперечної різностінності для кожного із станів видно, що застосований розрахунковий метод прогнозування поперечної різностінності при холодній багатопрохідній прокатці дає результати, подібні промисловим даним.

Під час проектування маршруту прокатки технологу не обов'язково проводити усі досліди які описані в роботі оскільки було доведено, що вони демонструють схожі результати. Таким чином остаточну методологію по прогнозуванню поперечної різностінності можна вважати багатоваріантною (рис. 5.2). Таким чином, одержати необхідні коефіцієнти для розрахунків можна

за допомогою розрахункового аналізу, лабораторного експерименту чи з промислових досліджень.



Рис. 5.2 – Запропонований, багатоваріантний метод прогнозування зміни поперечної різностінності при багатопрхідній холодній прокатці

Запропонований метод дозволяє одержувати залежності необхідні для прогнозування рівня поперечної різностінності одним з трьох варіантів – за допомогою програмного продукту, з лабораторних досліджень чи з прямого експерименту прокатки на станах холодної прокатки труб.

Висновки по розділу V

1. Одержаний вираз (5.3) для прогнозування зменшення різностінності під час багатопрхідного маршруту прокатки з урахуванням деформаційних параметрів прокатки під час кожного проходу. Складовою цього виразу є застосування кінцево-елементного моделювання для визначення коефіцієнтів інтенсивності зменшення різностінності.

2. Розроблена програма «ХПТ, ХПТР прогноз різностінності», що дозволяє визначати значення вихідної абсолютної поперечної різностінності після кожного проходу на станах ХПТ, ХПТР. Розвинений метод прогнозування зміни остаточної поперечної різностінності труб, при багатопрохідній прокатці, дозволяє розрахувати з достатньою достовірністю прогнозований рівень поперечної різностінності труби для сплавів на основі титану. Як наслідок можливо при проектуванні маршрутів водержувати прогнозовані значення поперечної різностінності труб.

4. Одержані результати проведених наукових досліджень, що стосуються прогнозування інтенсивності зменшення поперечної різностінності при холодній прокатці на оправці труб із сплавів на основі титану, були впроваджені та застосовуються додатково при проектуванні технологій прокатки на станах ХПТ та ХПТР підприємством ТОВ «ВСМПО ТИТАН УКРАЇНА» в існуючій технології розробки маршрутів виробництва труб (акт від 12.04.2015 р.).

ВИСНОВКИ

У дисертації наведені теоретичні узагальнення та нове вирішення науково-прикладної задачі, що полягає у розвитку наукових основ методу прогнозування зміни поперечної ексцентричної різностінності при холодній прокатці труб на оправці зі сплавів на основі титану. Задача вирішена із застосуванням розрахункового аналізу на базі кінцево-елементного моделювання та результатів експериментального дослідження впливу інтенсивності зміцнення металу на зміну поперечної різностінності труб. Це дало можливість створити та застосовувати розвинений метод прогнозування поперечної різностінності для проектування технології прокатки труб з регламентованими геометричними параметрами.

Аналіз літературних даних показав:

1.1 Вимоги сучасних стандартів та норм (ASTM 4946E) з допусками у межах 5% на поперечну різностінність труб зі сплавів на основі титану значно звузились по зрівнянню зі стандартами ASTM 338 та ГОСТ 22897-86, які були найбільш затребуваними останні 30 років та мають поле допуску $\pm 10-15\%$. Це поставило науково-практичну задачу по розвитку методу прогнозування для забезпечення регламентованої точності труб.

1.2 Не існує аналітичного методу прогнозування поперечної різностінності труб для холодної багатопрохідної прокатки труб зі сплавів на основі титану з урахуванням особливостей прокатки сплавів. В сучасних методиках розрахунку маршрутів прокатки прогнозуванню зміни початкової різностінності труб не приділено належної уваги. Це приводить до неможливості точного прогнозування остаточної поперечної різностінності труб, яку можна одержати наприкінці всіх циклів прокатки. Це також веде до підвищення втрати металу та додаткових витрат на виробництві.

2. Обґрунтовано і розроблено методику дослідження зміни поперечної ексцентричної різностінності для умов прокатки в станах холодної прокатки труб. Вона складається з:

- аналітичного опису механізму зменшення ексцентричної різностінності;
- розрахункового аналізу деформування різнотовщинних зразків між трьома плитами за допомогою програми скінченно-елементного моделювання з параметрами близькими до параметрів деформування поперечного перетинів труби на оправці в стані ХПТ при прокатці труб зі сплавів на основі титану;
- розрахункового аналізу впливу рівня різної початкової різностінності (20%, 15%, 10% та 5%) на остаточну.
- лабораторного експерименту по обтисненню двох зразків різної товщини (різнотовщинність 18%) між трьома плитами з розмірами та параметрами деформування ідентичними розрахунковому аналізу для підтвердження адаптивності розрахункового аналізу;
- прямих експериментальних дослідженнях зміни поперечної різностінності по довжині зони обтиску стінки робочого конуса промислових станів ХПТ-75 (маршрут прокатки 63x8.5 мм→38x4.5 мм), ХПТ-55 (маршрут прокатки 38x4.5 мм→25,4x2,25 мм) та ХПТР 15-30 (маршрут прокатки 28x3,2 мм→25,4x2,65 мм)
- розвитку методу прогнозування остаточної поперечної різностінності при холодній багатопрохідній прокатці труб зі сплавів на основі титану на базі використання результатів виконаних досліджень.

3. На основі літературних та експериментальних даних показано, що при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану у разі застосування заготовки отриманої після стану поперечно-гвинтової прокатки поперечна різностінність має виражений ексцентричний характер.

4. Розвинуто наукові основи методу прогнозування остаточної поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрохідній холодній прокатці.

4.1 З теоретичного аналізу показано, що під час обтисків товстої і тонкої стінок у вершинах калібрів станів холодної прокатки по причині більшого наклепу тонкої стінки товста стінка підвергається більшому обтиску, що приводить до зменшення поперечної різностінності труб.

4.2 При застосуванні розрахункового аналізу на базі скінченно-елементного моделювання одержали математичний вираз, який описує зміну ексцентричної різностінності коли товста і тонка стінка труби деформується у зонах вершин калібрів станів холодної прокатки. Цей вираз покладено в основу для розрахунку поперечної різностінності після деформування в станах холодної прокатки труб. В математичному виразі присутні коефіцієнти α та β , які характеризують інтенсивність зміни поперечної різностінності. Коефіцієнт α використовується для розрахунку абсолютної різностінності, а коефіцієнт β для відносної різностінності.

4.3 Проведений лабораторний експеримент при ідентичних параметрах деформування з розрахунковим аналізом показав його адекватність (різниця результатів між розрахунковим аналізом та експериментом склала до 7%).

5. Одержані експериментальні промислові дані по проходженню процесу зміни ексцентричної різностінності уздовж зони обтиску стінки робочого конуса деформації на станах холодної прокатки (ХПТ-75 та ХПТР 15-30) зі сплаву на основі титану. Ці дані подібні тим, що були одержані при розрахунковому аналізі та при лабораторному експерименті (різниця результатів між розрахунковим аналізом та експериментом склала 10-15%). З аналізу одержаних даних показано, що висунуті теоретичні положення і результати розрахункового аналізу по зменшенню ексцентричної різностінності достовірні.

6. Розвинуто на базі результатів розрахункового аналізу та експериментальних досліджень метод прогнозування остаточної поперечної різностінності при холодній багатопрохідній прокатці труб зі сплавів на основі титану.

7. Розроблена програма «ХПТ, ХПТР прогноз різностінності», що дозволяє визначати значення остаточної поперечної різностінності після кожного проходу на станах ХПТ, ХПТР. Як наслідок, можливо проектувати та корегувати деформаційні параметри при холодній прокатці труб зі сплавів на основі титану і одержувати прогнозовані геометричні параметри труб.

8. Результати проведених наукових досліджень, що стосуються прогнозування зміни поперечної різностінності при холодній прокатці на оправці труб зі сплавів на основі титану впроваджені та застосовуються додатково при проектуванні технологій прокатки на станах ХПТ та ХПТР підприємством ТОВ «ВСМПО ТИТАН УКРАЇНА» в існуючій технології розробки маршрутів виробництва труб (акт від 12.04.2015 р.) та використовуються викладачами кафедри теорії, технології і автоматизації металургійних процесів при підготовці та викладанні навчальних курсів лекцій з дисциплін: «Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском»; «Технологічні процеси трубного виробництва» для студентів напряму 6.050401 та спеціальності 7.05040104 «Обробка металів тиском», а також при виконанні студентами дипломних проектів, випускних робіт бакалаврів і курсових науково-дослідних робіт (довідка від 10.04.2016 р.).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Столетний М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М.: Металлургия 1975 - 239 с.
2. Биск М.Б. Холодная прокатка стальных труб / Биск М.Б., Грехов И.А., Славин В.Б.. – Свердловск: Средне-уральское книжное издательство, 1977. - 231 с.
3. Хаустов Г.Й. Исследование точности прокатки холоднокатаных труб: Автореферат дис. на соискание степени канд. тех. наук: спец. 324 «Обработка металлов давлением» / Хаустов Г.И.. – Днепропетровск, 1971. – 20с.
4. Міщенко О.В. Дослідження зміни різностінності при прокатці тонкостінних труб на станах ХПТР / Міщенко О.В., Пилипенко С.В., Григоренко В.У. // Системні технології. – Дніпропетровськ. НМетАУ, 2010. – 5(70) . – С. 37-46.
5. Міщенко О.В. До пояснення механізму зменшення поперечної різностінності труб при холодній прокатці на оправці / Міщенко О.В., Григоренко В.У. // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2011. – №3(28). – С.216-219.
6. Мищенко А.В. Экспериментальное исследование закономерностей снижения поперечной разностенности труб при холодной деформации на оправке / Мищенко А.В., Григоренко В.У. // Обработка материалов давлением. – 2013. – №4(37) . – С.172-176.
7. Пилипенко С.В. До питання холодної прокатки труб з підвищеними вимогами до точності геометричних розмірів /Пилипенко С.В., Міщенко О.В.// Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus Специальный выпуск, 2014 ст. 125-129.
8. Мищенко А.В. Результаты данных компьютерного моделирования и эксперимента по изменению эксцентричной разнотолщинности при холодной деформации на оправке / А.В.Мищенко, В.У.Григоренко, А.Стефанек //

Пластическая деформация металлов: сб. научн. трудов в 2-х томах. Днепропетровск : Акцепт ПП. – 2014. – Т. 2. – Ст. 295-299.

9. Міщенко О.В. Порівняльний аналіз режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву титана VT1 та сталі 20 і X18H9T / Міщенко О.В., Маркевич І.В., Кожухар Г.Г., Григоренко В.У. // Теорія і практика металургії Дніпропетровськ 2014.

10. Міщенко О.В. Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана на станах холодной прокатки / Міщенко О.В., Григоренко В.У. // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2016. – №1(42). – С.199-202. – ISSN 2076-2151

11. Henryk Dyja. Development of forecasting method of change of transverse variation in wall thickness in case of cold rolling of pipes made of titanium alloys / Henryk Dyja, Vladimir Grigorenko, Oleksii Mishchenko // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipro, 2017 – No.1 – Pp.401–404.

12. Мищенко А.В. Исследования изменения разностенности по длине рабочего конуса на станах холодной прокатки труб роликами / Мищенко А.В. Григоренко В.У., Х.Дья и др. // XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – 2013. – Volume 1. – 401-404 pp.

13. ГОСТ 21945–76 Трубы бесшовные горячекатаные из сплавов на основе титана / [Электронный ресурс] // – Режим доступа до ресурсу: <https://www.lador.ru/gost/gost-21945-76.pdf> .

14. ASTM B338-17, Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

15. AMS 4946 C, Titanium Alloy Tubing, Seamless, Hydraulic 3Al - 2.5V, Texture Controlled Cold Worked, Stress Relieved, SAE Aerospace Standards, London, UK, 2017.

16. Станы холодной прокатки труб / [Электронный ресурс] // – Режим доступа до ресурсу: <http://www.eztm.ru/catalog/prokatnoe-oborudovanie/stans/>.

17. Гуляев Ю.Г. Анализ условий формирования поперечной разностенности при волочении труб на короткой удерживаемой оправке / Ю.Г. Гуляев, В.М. Друян, С.А. Чукмасов, Д.Ю. Гармашев // Теория и практики металлургии. – 2003. – №4(36). – С.54-63.

18. Гуляев Ю.Г. Промышленная апробация способа волочения труб повышенной точности на короткой оправке / Ю.Г. Гуляев, Е.И. Шифрин, Д.Ю. Гармашев, А.В. Семичев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №1. – С.29-30.

19. Григоренко В.У. Исследование снижения поперечной разностенности труб при редуцировании в условиях непрерывной периодической роликовой прокатки труб / Григоренко В.У., Данченко В.Н., Миленин А.А. // Дніпропетровськ: Системні технології. – 2003. – № 6/ (29). – С. 140-148.

20. Данченко В.Н. Продольная прокатка труб /Данченко В.Н., Чус А.В. –М.: Металлургия, 1984. – 137 с.

21. Дехтярев В.С. Уменьшение эксцентричной разностенности при холодной пильгерной прокатке труб / Дехтярев В.С.,Мацко Ю.Ю., Фролов Я.В. // Металл и литье Украины. - 2006. - №11 - 12. - С.39 – 41.

22. Кузнецов Е.Д. Развитие теории и практики производства прецизионных стальных труб / Кузнецов Е.Д.// Развитие теории процессов производства труб: Сб. науч. тр. под редакцией В.Н. Данченко – Днепропетровск: Системные технологии, 2005 – С. 233-259

23. Григоренко В.У. Экспериментальные исследования изменения разностенности труб по длине рабочего конуса при прокатке на стане ХПТР / В.У. Григоренко, К.В. Щербань // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів. Теорія і технологія виробництва труб. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2008. – Т. 11.- С. 270-273.

24. Григоренко В.У. Развитие метода расчета параметров процесса холодной пильгерной прокатки труб / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко // Обработка материалов давлением: 36. науч. праць. - Краматорськ, 2010 - С. 214 – 217
25. Кузнецов Е.В. Неравномерность деформации при прокатке слоистых полос / Е.В. Кузнецов, В.Г. Павлов // Metallургическая и горнорудная промышленность: Трубы V Международной научно-технической конференции. - Днепропетровск, 2010 - С. 362 – 364
26. Єршов С.В. Конспект лекцій з дисципліни "Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ" для студентів всіх форм навчання спеціальності 7.05040104, 8.05040104 "Обробка металів тиском" / Єршов С.В. - Дніпродзержинськ, ДДТУ. - 2013. - 72 с.
27. Минаев О. А. Механика сплошных сред. Теория и задачи / О. А. Минаев, Б. М. Илюкович, М. К. Измайлова. - К.: НМК, 1993. - 352 с.
28. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М: Металлургия, 1966. – 340с.
29. Тетерин П.К. Теория периодической прокатки / П.К. Тетерин - М: Металлургиздат, 1978. - 254 с.
30. Григоренко В.У. Холодна пильгерна прокатка труб. / Навчальний посібник. - Дніпропетровськ: НМетаУ, 2006 р. – 48 с.
31. Вышинский В.Т. Влияние особенностей поворотно-подающих механизмов станов ХПТ на стабильность геометрических параметров труб / В.Т. Вышинский, С.Р. Рахманов, В.Г. Воронько, А.В. Журавлёв // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2010. №4. -С.58-62.
32. Швейкин В. В. Технология холодной прокатки и редуцирования труб: [Учеб. пособие] / В. В. Швейкин. - Свердловск : УПИ, 1983. - 100 с.
33. Головкин А. Н. Исследование энергосиловых параметров процесса прессования труб из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc / Головкин А. Н., Андреев В. В., Третьяк А. Ю. // – Краматорск: Научный вестник ДГМА, № 2 (10Е), 2012 – С. 24-29

34. Хенрик Дья. FORGE 3 в моделировании процессов обработки давлением / Дья Хенрик // Сучасні проблеми металургії, – 2002. – Т. 5. – С. 27–33.
35. Dyja H. 3D Fem modeling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod / H. Dyja, P. Szota, S. Mroz // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. - № 1-3. – P. 115-121.
36. Forge 3 - a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / J. L. Chenot, L. Fourment, T. Coupez [and other] // Forging and Related Technology. – 1998. – P. 113–122.
37. Компьютерное моделирование процессов ОМД. Численные методы / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич // Днепропетровск: «Системные технологии», 2005. – 448 с.
38. Thilo Spittel. Part 3: Non-ferrous Alloys. Volume 2: / Thilo Spittel, Marlene Spittel. – New York : Springer, 2016. – P. 650.
39. Григоренко В.У. Расчеты калибровки и усилий в станах холодной прокатки труб с применением ЭВМ: [Учебн. пособ.] / Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханин М.И. - Днепропетровск: НМетАУ, 2000. - 22 с.
40. Шевакин Ю.Ф. Производство труб: [Учебн. пособ.] / Шевакин Ю.Ф., Коликов А.П., Райков Ю.Н. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. - 564 с.
41. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М: Metallurgizdat, 1963. – 269 с.
42. Фролов В.Ф. Холодная пильгерная прокатка труб / Данченко В.Н., Фролов Я.В., Фролов В.Ф. - Днепропетровск: Пороги, 2005. - 255 с.
43. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Пер. с англ. Е.Г. Коваленко, Н.П. Бусленко. – М: «МИР», 1972. – 381с.
44. Марочник стали и сплавов / [Электронный ресурс] // – Режим доступа до ресурсу: [URL: www.splav-kharkov.com](http://www.splav-kharkov.com).
45. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М: Металлургия, 1973. – 224с.

46. Кекух С.Н. Особенности безэмульсионной прокатки труб на станах ХПТ с применением солевой смазки / Кекух С.Н., Штанько В.Л., Лисовский А.А. // Сталь. - №4. – С. 53-54.
47. Шевакин Ю.Ф. Станы холодной прокатки труб / Шевакин Ю.Ф., Сейдалиев Ф.С. – М.: Металлургия, 1966. – 211 с.
48. Целиков А.И. Прокатные станы / Целиков А.И. – М.: Металлургиздат, 1948. – 642с.
49. Технология трубного производства: Учебник / Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А. и др. - М.: Интермет Инжиниринг, 2003. - 255 с.
50. Коликов А.П. Производство холоднодеформированных труб Учебное пособие для вузов / А.П. Коликов, Ю.Н. Райков. - М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2013. – 328 с.
51. Холодная прокатка труб / Кофф З.А., Соловейчик П.М., Алёшин В.А., Гриншпун М.И. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. - 431 с.
52. Вердеревский В.А. Роликовые станы холодной прокатки труб / Вердеревский В.А.. - М.: Металлургия, 1992. - 239 с.
53. Григоренко В.У. Математическая модель холодной пильгерной валковой прокатки труб, ее компьютерная реализация и выбор рациональных параметров процесса / Григоренко В.У., Нагний А.С. // Удосконалення процесів і обладнання обробки металів тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. праць. - Краматорськ, 2006. - С. 97 - 102.
54. Дехтярьов В. С. Тримірне моделювання параметрів холодної пильгерної прокатки / В. С. Дехтярьов, Я. В. Фролов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2006. – С. 59 – 64.
55. Компьютерное моделирование процесса холодной прокатки циркониевых труб-оболочек ТВЕЛ / Вольфович Г.В., Замощиков В.Я., А.В. Подлозный А.В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. - 2003.- №3 – С. 89-91.

56. Энциклопедия по машиностроению XXL / [Электронный ресурс] // – Режим доступа до ресурсу: <http://mash-xxl.info/info/171806/>.
57. ГОСТ 19807-91 Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.– М.:ИПК Издательство стандартов, 1991. – 3 с.
58. Характеристики материала ПТ1М [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://prom-metal.ru/marochnik/titan-splav-titana/titan-tehnicheskii/PT1-M>.
59. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика - М: Высшая школа, 2002. - 478 с.
60. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. - М: Высшая школа, 2002. - 403 с.
61. Справочник по высшей математике / Выгодский М.Я.. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991с.
62. Коробочкин И.Ю. Некоторые вопросы калибровки инструмента станов холодной периодической прокатки труб /И.Ю. Коробочкин // Проблеми і перспективи одержання конкурентоздатної продукції в гірничо-металургійному комплексі України: тематич. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2001. – С. 515 – 528.
63. Баканов В.М. Методика расчета периодической (шаговой) прокатки / В.М. Баканов, А.В. Бушев // Цветные металлы. - 1996. - №11. - С. 52 - 55.
64. Murty K. L. Texture development and anisotropic deformation of zircalloys. / Murty K. L., Charitl. // Progress in Nuclear Energy, 2006. V. 48. P. 325-359.
65. Dillamore I.L. Preferred orientations in wrought and annealed metals. / Dillamore I.L., Roberts W.T. // Metals Reviews, 1965. V. 10. P. 271.
66. Ballinger R.G. The effects of plastic strain on the evolution of crystallographic texture in zircaloy / Ballinger R.G., Lucas G.E., Pelloux R.M.// 2. Journal of Nuclear Materials. 1984. V. 126. P. 53.

67. Torsional Properties of T1-3Al-2.5V Tubing and Its Application to Sports Products / S.E. Meredith // International Conference on Titanium Products and Applications, Titanium Development Association, Oct. 1990. – P.p 118-124

68. Russo, P. A. Properties of Titanium for Industrial Applications with Emphasis on Ti-3Al-2.5V / Russo, P. A. and Seagle, S.R.// Industrial Applications of Titanium and Zirconium. – The Third Conference, ASTM STP830, ASTM, 1984. – P.p 99-112.

69. Anderson, Thomas. Isothermal and Continuous Cooling Transformation of Beta Phase in the Titanium Alloy Ti3Al2.5V / Anderson, Thomas //Scandinavian Journal of Metallurgy, 2 (5). 1973– P.p.251-256.

70. Анализ основных технологий производства холоднодеформированных труб [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://metalat.ru/analytics/70-analiz-osnovnyh-tehnologiy-proizvodstva-holodnodeformirovannyh-trub.html>.

71. Григоренко В.У. Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента: [Монографія] / Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П.. - Дніпропетровськ: Пороги, 2015. - 120 с

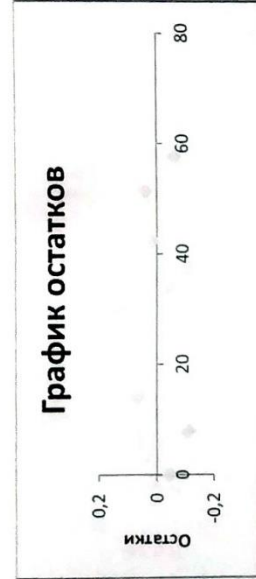
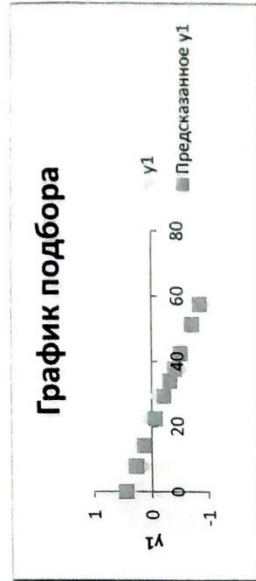
72. Попов М.В. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / Попов М.В., Атанасов С.В., Беликов Ю.М.. – Днепропетровск: Независимая организация «Дива», 2008. – 192 с.

73. Новые технологии и машины для производства холоднодеформированных труб и изделий / Соколовский В.И. // – Сталь. - 2008. - №9. - С.60 - 62.

74. Великий тлумачний словник української мови / уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. – Київ; Ірпінь: Перун, 2009. – 1736 с.

ДОДАТКИ

Додаток А



ВЫВОД ИТОГОВ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,979832034
R-квадрат	0,960070815
Нормированный R-квадрат	0,955079666
Стандартная ошибка	0,091642341
Наблюдения	10

Дисперсионный анализ

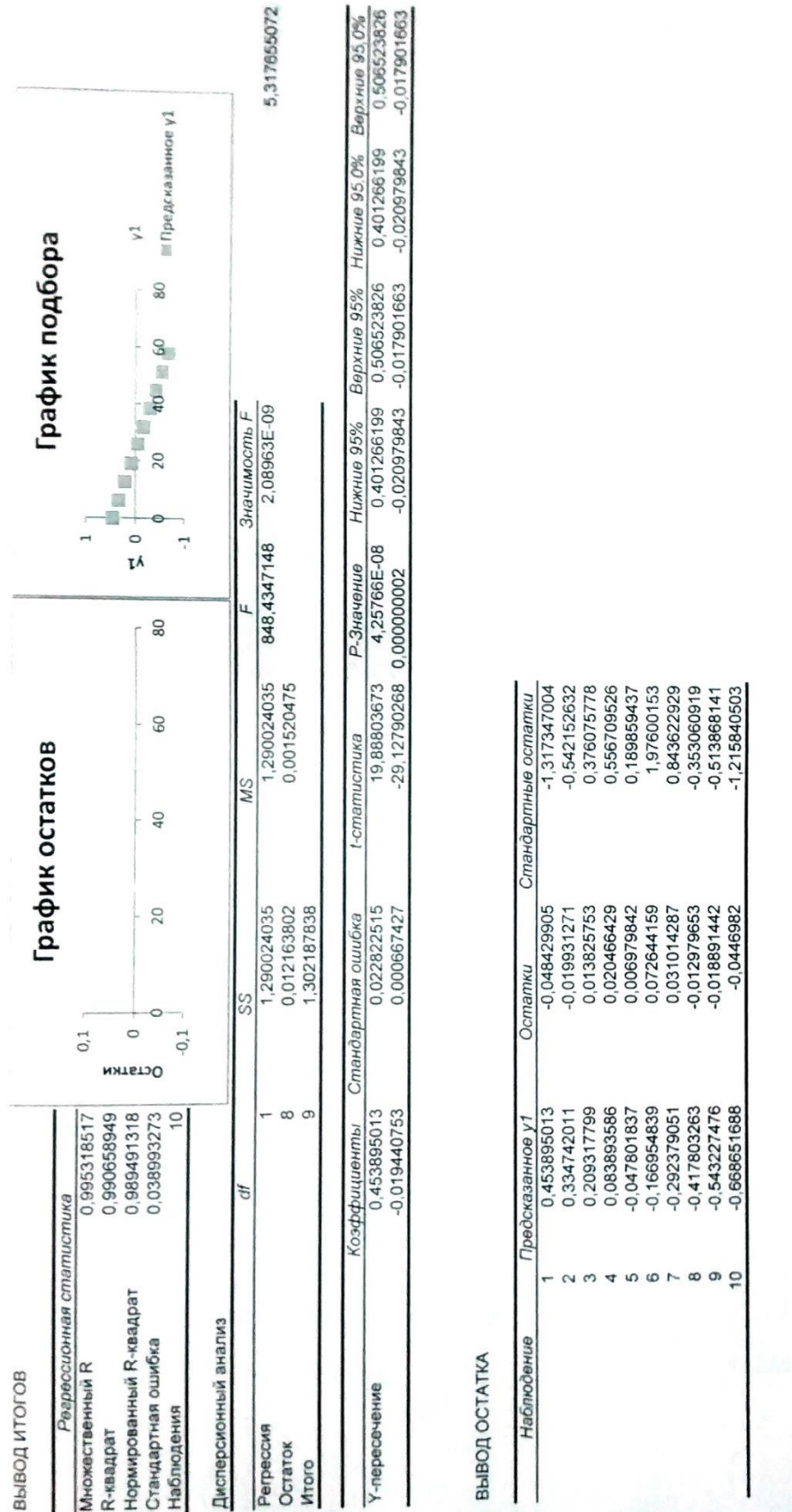
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	1,61545609	1,61545609	192,3547009	7,06443E-07
Остаток	8	0,06718655	0,008398319		
Итого	9	1,68264264			

У-пересечение	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Верхние 95%	Нижние 95%	Верхние 95,0%	Нижние 95,0%
0,450748262	0,056431523	7,987526142	4,41615E-05	0,320616938	0,580879587	0,320616938	0,580879587	
-0,022658667	0,00163374	-13,86919972	0,000001	-0,026426078	-0,018891255	-0,026426078	-0,018891255	

ВЫВОД ОСТАТКА

Наблюдение	Предсказанное y1	Остатки	Стандартные остатки
1	0,450748262	-0,045283154	-0,524103129
2	0,275326327	-0,109811888	-1,270952865
3	0,13206508	0,066785779	0,772972566
4	-0,056513501	0,124172149	1,437157224
5	-0,214393242	0,120082563	1,389824723
6	-0,318184554	-0,03849039	-0,445484291
7	-0,402971823	-0,107853801	-1,248290138
8	-0,509686833	0,015390512	0,17812839
9	-0,711422059	0,038077506	0,440705608
10	-0,853221457	-0,063069275	-0,729958087

Додаток Б



Додаток В



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з виробництва

ДП «ВЕМПО ТИТАН Україна»

листі

Журавлев А.В.

«12» квітня 2015р.

АКТ

про впровадження розробок виконаних в дисертаційній роботі аспіранта Національної металургійної академії України Міщенко О.В. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» по темі «Розвиток наукових основ методу прогнозування кінцевої поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрохідній холодній прокатці для забезпечення регламентованої точності».

На станах ХПТ-75(90), ХПТ-55, ХПТ-32 Міщенко О.В. були виконані дослідження зміни поперечної різностінності по довжині робочих конусів та отримані значення інтенсивності зміни поперечної різностінності.

Ці результати та результати досліджень виконаних в НМетАУ з застосуванням розрахункового аналізу та лабораторних експериментів застосовуються додатково при проектуванні технологій прокатки на станах ХПТ та ХПТР зі сплавів на основі титану.

Рекомендації використовуються для виробництва труб за стандартами DIN 17849, DIN 17850, DIN 17861, OCT1.90065, AMS 4946C та ін., і дають можливість зменшити час налаштування технології.



Начальник ТВ – начальник цеху

Д.В. Арсентьев

Начальник технічного бюро

С.О. Срілець

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ



ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Міщенко Олексія Васильовича на тему: «Розвиток наукових основ методу прогнозування кінцевої поперечної різностінності труб зі сплавів на основі титану при багатопрохідній холодній прокатці для забезпечення регламентованої точності», на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском», у навчальний процес Національної металургійної академії України

Цією довідкою засвідчується, що результати проведених наукових досліджень, що одержані в НМетАУ аспірантом Міщенко Олексієм Васильовичем при виконанні дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук щодо нових експериментальних та теоретичних даних впливу зміцнення металу на зменшення поперечної різностінності при холодній прокатці на оправці труб з $\alpha+\beta$ сплавів на основі титану використовуються викладачами кафедри теорії, технології і автоматизації металургійних процесів при підготовці та викладанні навчальних курсів лекцій з дисциплін: «Теоритичні дослідження процесів обробки металів тиском»; «Технологічні процеси трубного виробництва» для студентів напряму 6.050401 та спеціальності 7.05040104 «Обробка металів тиском», а також при виконанні студентами дипломних проектів, випускних робіт бакалаврів і курсових науково-дослідних робіт.

Зав.кафедрою ТТіАМП
к.т.н., доц..

І.Й. Водін

Додаток Д

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Міщенко О.В. Дослідження зміни різностінності при прокатці тонкостінних труб на станах ХПТР / О.В. Міщенко, С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко // Системні технології. – Дніпропетровськ. НМетАУ, 2010. – 5(70). – С. 37-46.
2. Міщенко О.В. До пояснення механізму зменшення поперечної різностінності труб при холодній прокатці на оправці / О.В. Міщенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2011. – №3(28). – С.216-219.
3. Мищенко А.В. Экспериментальное исследование закономерностей снижения поперечной разностенности труб при холодной деформации на оправке / А.В. Мищенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2013. – №4(37). – С.172-176.
4. Мищенко А.В. Результаты данных компьютерного моделирования и эксперимента по изменению эксцентричной разнотолщинности при холодной деформации на оправке / А.В.Мищенко, В.У. Григоренко, А. Стефанек // Пластическая деформация металлов: сб. научн. трудов в 2-х томах. Днепропетровск : Акцепт ПП. – 2014. – Т. 2. – С. 295-299.
5. Міщенко О.В. Порівняльний аналіз режимів деформування при холодній прокатці труб зі сплаву титана VT1 та сталі 20 і Х18Н9Т / О.В.

Мищенко, І.В. Маркевич, Г.Г. Кожухар, В.У. Григоренко // Теорія і практика металургії. – Дніпропетровськ, 2014.

6. Мищенко О.В. Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана на станах холодной прокатки / О.В. Мищенко, В.У. Григоренко // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск. ДГМА, 2016. – №1(42). – С.199-202.

7. Henryk Dyja Development of forecasting method of change of transverse variation in wall thickness in case of cold rolling of pipes made of titanium alloys / Henryk Dyja, Vladimir Grigorenko, Oleksii Mishchenko // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipro, 2017 – No.1 – P.80-83.

8. Мищенко А.В. Исследования изменения разностенности по длине рабочего конуса на станах холодной прокатки труб роликами / А.В. Мищенко В.У. Григоренко, Х.Дья и др. // XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. – 2013. – Volume 1. – 401-404 pp.

9. Пилипенко С.В. До питання холодної прокатки труб з підвищеними вимогами до точності геометричних розмірів / С.В. Пилипенко, О.В. Мищенко // X Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 6-13 июня 2014г., Варна, Болгария С. 125-129.