

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Бондаренко Сергій Валерійович

УДК 621.7.04

**ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-  
ПРОКАТКИ ШТАБ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЗМІННИХ ЗА ШИРИНОЮ  
ПАРАМЕТРІВ**

Спеціальність 05.03.05  
«Процеси та машини обробки тиском»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро - 2018

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент **Гридін Олександр Юрійович**, заступник завідувача кафедри матеріалознавства Падерборнського університету, м. Падерборн (ФРН).

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Приходько Ігор Юрійович**, завідувач відділу процесів та машин обробки металів тиском Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро;

- кандидат технічних наук **Присяжний Андрій Григорович**, доцент кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь.

Захист відбудеться “27” грудня 2018 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02 при Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

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

Автореферат розісланий “24” листопада 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.02,  
доктор технічних наук, професор

Т. М. Миронова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Профільовані штаби та плоскі штаби з гетерогенними механічними властивостями набувають більш широкого застосування в різних галузях промисловості. Це обумовлюється перевагами їх використання: зниженням ваги конструкцій при одночасному збереженні або підвищенні міцності та жорсткості. Існуючі технології виробництва таких штаб, зокрема, зварюванням, прокаткою або способами локальної термічної обробки не відповідають сучасним вимогам стосовно енергозбереження і екологічності виробничих процесів. Окрім того, вони переважно орієнтовані на виготовлення штаб зі сталей. Тому для України перспективною є розробка технологій виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом та плоских штаб з заданими локально різними механічними властивостями з легких алюмінієвих сплавів при мінімальних енерговитратах. Найбільш енергозаощаджувальними, як свідчить світова практика, є технології, що поєднують процеси розливу і прокатки тонких штаб. Але відомий спосіб, у якому використовують профільовані за допомогою нікелю валки-кристалізатори, має низку недоліків: малу стійкість робочих поверхонь валків; необхідність великого парку валків та складність самого способу їх профілювання.

Існуючі теоретичні і експериментальні дослідження вказують на те, що вплив геометричних та технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки на температурно-деформаційні умови формування елементів профільованих алюмінієвих штаб в зоні кристалізації-деформації майже не вивчений. Додаткові складнощі викликає також відсутність фізично обґрунтованих даних стосовно впливу товщини штаб на умови тепловіддачі на межі «метал-валок». Це, в свою чергу, ускладнює коректний математичний опис системи «метал-валок» і взагалі - теоретичні дослідження процесу формування як плоских, так і профільованих штаб з розплаву. Крім того, відсутні дані стосовно можливості використання штаб з профільованим поперечним перерізом для виготовлення плоских штаб з гетерогенними за шириною властивостями.

Зважаючи на наведене, робота, присвячена розробці нового способу виготовлення штаб із забезпеченням змінних за шириною параметрів з алюмінієвих сплавів за допомогою валкового розливу-прокатки і вивченню температурно-деформаційних умов їх формування та розробці на їх основі рекомендацій з практичної реалізації енергоефективного процесу виробництва профільованих штаб, а також плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконана дисертаційна робота пов'язана з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані в рамках програм, що відповідають тематиці держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри обробки металів тиском НМетАУ, а саме: № 0112U000641 «Теоретичне і експериментальне дослідження та обґрунтування процесів обробки тиском з метою отримання тонкостінних довгомірних металовиробів з регламентованими механічними властивостями» (2012...2014 р.), № 0218U003283 «Розробка методів пластичної обробки та створення високопродуктивних технологічних процесів виробництва профілів зі сплавів на основі алюмінію з

питомою міцністю більше  $120\text{ м}^2/\text{с}^2$ ) (2016...2017 р.), № 0118U003280 «Розробка методів пластичної обробки та створення високопродуктивних технологічних процесів виробництва профілів зі сплавів на основі алюмінію з питомою міцністю більше  $120\text{ м}^2/\text{с}^2$ ) (2018...2020 р.). Автор був виконавцем цих робіт. Також дослідження проводились у рамках кооперації університетів України та Німеччини в рамках проекту «Praxispartnerschaft Metallurgie» (за підтримки Німецького товариства академічних обмінів DAAD) а також німецької стипендіальної програми підготовки наукових кадрів для спільних наукових досліджень TRR 30 (Ідентифікатор проекту DFG # 14802874), що дало можливість використання ліцензійного програмного продукту «ANSYS».

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка способу виготовлення штаб з алюмінієвих сплавів із забезпеченням змінних за шириною параметрів валковим розливом-прокаткою шляхом використання отриманих закономірностей формування елементів профільованих штаб, а також дослідження впливу параметрів холодної пластичної деформації попередньо профільованих штаб, отриманих валковим розливом-прокаткою, на властивості кінцевої продукції.

Для досягнення поставленої мети сформульовані та вирішені такі завдання:

- дослідити вплив товщини алюмінієвої штаби на температуру металу та умови тепловіддачі на межі «метал-інструмент» під час валкового розливу-прокатки алюмінієвих сплавів для експериментальних умов;
- розробити математичну модель процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб з використанням методу скінченних елементів в програмному комплексі «ANSYS»;
- розробити спосіб та реалізувати експериментальний пристрій для прямого виготовлення штаб з розплаву з профільованим поперечним перерізом;
- дослідити закономірності впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки на температурно-деформаційні умови формування елементів профільованих штаб;
- розробити метод визначення раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб та спосіб їх забезпечення;
- експериментально дослідити вплив параметрів холодної прокатки на гладкій бочці профільованих штаб зі сплавів EN AW-1050 та EN AW-6082 на формування градієнту механічних властивостей у виготовлених плоских штабах;
- експериментально дослідити вплив геометричних параметрів елементів профільованої штаби на формування «закату» та розробити рекомендації щодо оптимізації параметрів інструменту, за допомогою якого виконується профілювання валків-кристалізаторів;
- результати досліджень і розробок впровадити у виробничі умови і навчальний процес.

**Об'єкт дослідження.** Процес валкового розливу-прокатки.

**Предмет дослідження.** Закономірності формування штаб із забезпеченням змінних за їх шириною параметрів при валковому розливі-прокатці.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження побудовані на фундаментальних положеннях теорії обробки металів тиском, теорії та технології

валкового розливу-прокатки та математичному моделюванні з використанням сучасних програмних продуктів, оснований на методах скінченних елементів. Експериментальні дослідження проводились в лабораторних умовах Падерборнського Університету (ФРН). Для порівняння використовувались дані досліджень, опубліковані в закордонних та вітчизняних виданнях. При отриманні та обробці експериментальних даних використовувалась сучасна тензометрична апаратура та повірена вимірювальна і комп'ютерна техніка. Експериментальні дані опрацьовувались з використанням методів математичної статистики.

**Наукова новизна.** Наукову новизну мають перелічені нижче результати наукових і експериментальних досліджень.

**1. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив товщини алюмінієвої штаби на температуру металу в зоні кристалізації-деформації та умови тепловіддачі на межі «метал-валок» при валковому розливі-прокатці.**

Отримані результати відрізняються урахуванням впливу товщини алюмінієвої штаби при відсутності на поверхні валків-кристалізаторів розділового змащувального шару на коефіцієнт тепловіддачі на межі «метал-валок» при валковому розливі-прокатці. Це дозволило визначити значення коефіцієнту тепловіддачі на межі «метал-валок», а також побудувати адекватну математичну модель процесу валкового розливу-прокатки.

**2. Вперше шляхом комп'ютерного моделювання визначено закономірності впливу температури розплаву, довжини зони кристалізації-деформації, швидкості руху інструменту та товщини штаб при валковій розливці-прокатці з додатковим деформуючим інструментом на швидкість виходу з зони контакту, температуру та ступінь деформації металу.**

Розробка відрізняється використанням в математичній моделі процесу уточнених значень коефіцієнтів тепловіддачі на межі метал-валок та зіставленням швидкості виходу з валків, температури та ступеня деформації штаб, що формувались без та за участю профільюючої стрічки. Отримані дані дозволили визначити раціональні технологічні параметри, які забезпечують мінімальну різницю між ступенями деформації, температурами та швидкостями виходу штаб, що формувались без та за участю профільюючої стрічки.

**3. Отримав подальший розвиток метод розрахунку раціональних параметрів технології валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом.**

Метод відрізняється забезпеченням ітераційним шляхом мінімальної розрахункової різниці між швидкостями виходу елементів суцільної профільованої штаби з валків при валковому розливі-прокатці. Це дозволяє мінімізувати повздовжні напруження в профільованій штабі та визначити раціональні технологічні параметри валкового розливу-прокатки штаб із забезпеченням змінних за шириною параметрів.

**4. Вперше експериментально визначено залежність прояву повздовжнього дефекту («закату») та анізотропії механічних властивостей при холодній прокатці на гладкій бочці попередньо профільованих штаб з**

**алюмінієвих сплавів від поперечної геометрії профілю (кут сполучення та різниця товщин елементів профілю штаби).**

До виконання цієї роботи експериментальні дані про вплив параметрів поперечної геометрії профільованих штаб з алюмінієвих сплавів на розмір закату та можливість формування градієнту механічних властивостей під час їх холодної прокатки на гладкій бочці не були відомі. Це дало можливість визначити особливості геометрії поперечного перерізу додаткового деформуючого інструменту (профільюючої стрічки) для валкового розливу-прокатки профільованих штаб з забезпеченням можливості подальшого їх використання для виготовлення плоскої продукції з гетерогенними механічними властивостями.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили:

- визначити параметри контактної теплової взаємодії на межі «метал-валок» при валковому розливі-прокатці алюмінієвих сплавів, що дає змогу підвищити точність визначення технологічних параметрів процесу для виробництва плоских і профільованих штаб;
- розробити новий спосіб профілювання поверхні валків-кристалізаторів при валковому розливі-прокатці;
- розробити в скінченно-елементному середовищі «ANSYS» математичну модель процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб;
- розробити методикау теоретичного визначення раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом, основою якого є врахування ступеня деформації та швидкості елементів профілю штаби;
- розробити спеціальну ступінчасту форму сопла для подачі розплаву з метою забезпечення різних температурно-деформаційних умов формування штаб вздовж бочки валка;
- визначити параметри геометрії елементів профілю та параметри холодної прокатки на гладкій бочці штаб з алюмінієвих сплавів EN AW-1050 та EN AW-6082 з метою виготовлення плоскої продукції з різними механічними властивостями по ширині без «закатів» в області сполучення елементів профілю штаби.

Результати дисертаційної роботи використовуються в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» (акт від 30.05.2018 р.).

Теоретичні та експериментальні результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском Національної металургійної академії України (довідка від 18.05.2018 р.), а також в умовах кафедри матеріалознавства Падерборнського Університету (рекомендаційний лист від 17.05.2018р.)

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Всі принципові теоретичні й експериментальні результати, які були отримані в дисертації, засновані на дослідженнях, виконаних автором. Особистий внесок у спільних публікаціях (згідно з переліком опублікованих робіт в авторефераті): [1] – проведення математичного моделювання валкового розливу-

прокатки та визначення коефіцієнтів тепловіддачі на межі «метал-валок» на основі відомих експериментальних даних; [2,3] – аналіз літератури, постановка, проведення експериментів та обробка отриманих даних щодо формування в плоских штабах гетерогенних за шириною властивостей; [4] – проведення математичного моделювання валкового розливу-прокатки профільованих штаб, аналіз отриманих даних та розробка методу розрахунку раціональних параметрів процесу; [5, 9] - розробка математичної моделі, проведення теоретичних досліджень та аналіз результатів математичного моделювання; [6] – аналіз літератури та формулювання вимог щодо раціональних умов роботи пристрою для валкового розливу-прокатки профільованих штаб; [7] – аналіз літературних даних щодо розвитку технології розливу-прокатки; [8] – постановка, проведення експериментів та обробка отриманих даних з метою визначення впливу холодної прокатки на утворення «закатів».

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах: X Міжнародній науково-технічній конференції «Пластична деформація металів» (м. Дніпро, 2014 р.), Abschlusskolloquium Sonderforschungsbereich Transregio 30 (м. Кассель, ФРН, 2015 р.), MEFORM 2016 «Production and Further Processing of Flat Products» (м. Фрайберг, ФРН, 2016 р.), XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2016 р.), XX Міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Пластична деформація металів 2017» (м. Дніпро, 2017 р.), XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2018 р.), Придніпровському науковому семінарі «Обробка металів тиском» (м. Дніпро, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 рр.).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації викладені в 9 публікаціях, в тому числі: 2 статті у спеціалізованих фахових виданнях згідно переліку МОН України, 2 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus та 1 патент України на винахід, який зараховано як фахове видання.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 5 розділів, висновків по роботі; виконана на 176 сторінках; містить: таблиць – 14, рисунків – 69, список використаних джерел зі 101 найменування, додатків – 4.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі представлена загальна характеристика роботи: обґрунтовано актуальність її теми, наведено мету, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, висвітлено наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено перелік публікацій за темою роботи та дані про апробацію отриманих результатів.

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одними з багатообіцяючих інноваційних видів продукції є листи та штаби зі змінними за шириною або довжиною параметрами. Найбільш відомими з них на сьогодні є чотири групи металічних листових матеріалів: Tailor Welded Blank, Patchwork Blanks, Tailor Rolled Blanks та Tailor Heat Treated Blanks. Їх виготовляють за різними технологіями, зокрема, зварюванням, прокаткою або способами локальної термічної обробки. Дані способи виготовлення штаб зі змінними механічними властивостями та штаб з варійованою геометрією показали на практиці свою працездатність. Однак усі вони мають загальні недоліки, а саме: відносно низьку енергоефективність, орієнтованість на виготовлення сталюї продукції. Тому з наукової точки зору цікавою є розробка нової енергоефективної технології виробництва штаб зі змінними параметрами з легких металів.

Прикладом енергоефективної технології, що відповідає сучасним вимогам до виробничих процесів, є технологія прямого виготовлення штаб з розплаву, більш відома як технологія валкового розливу-прокатки. Дослідженням цієї технології для випадку виготовлення плоских штаб присвячені роботи Гридїна О. Ю., Столбченка М. Ю., Santos C. A., Haga T. та ін. Водночас, в роботах Daamen M. та Vidoni M. наведена інформація стосовно можливості використання даної технології для виготовлення сталевих штаб з профільованим поперечним перерізом. Однак, існуючий метод профілювання робочої поверхні валків-кристалізаторів за допомогою нанесення додаткового шару нікелю має ряд недоліків, що перешкоджають його промислового поширенню. Основним з цих недоліків є необхідність наявності великого парку валків для різних видів профілю. Це перешкоджає розвитку даного способу виготовлення профільованих штаб. До того ж, через суміщення процесів кристалізації та пластичної деформації металу при валковому розливі-прокатці для її вивчення широко використовують математичне моделювання з використанням методу скінченних елементів, що дозволяє вивчати вплив різних технологічних параметрів процесу на умови формування штаб та умови роботи основних елементів агрегатів валкового розливу-прокатки. Однак, до теперішнього часу не існувало даних стосовно експериментально визначених умов теплової взаємодії валків-кристалізаторів та металу в зоні кристалізації-деформації, що не давало змогу вірного теоретичного опису даної взаємодії в математичних моделях. Крім цього, до сьогодні не було робіт, присвячених вивченню впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки алюмінієвих сплавів на температурно-деформаційні умови формування профільованих штаб.

Таким чином, аналіз стану науки та техніки показав, що набуває актуальності науково-технічна задача наукового обґрунтування параметрів та розробки нового способу виготовлення профільованих штаб валковим розливом-прокаткою на основі теоретичного та експериментального вивчення температурно-деформаційних умов формування профільованих штаб, що дозволяє розробити рекомендації з практичної реалізації енергоефективних процесів виробництва профільованих штаб, а також плоских штаб зі змінними механічними властивостями по їх ширині.



## РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ ШТАБ З ПРОФІЛЬОВАНИМ ПОПЕРЕЧНИМ ПЕРЕРІЗОМ

В роботі запропоновано та використано новий спосіб прямого виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з розплаву. В основі розробки лежить новий спосіб профілювання поверхні валків-кристалізаторів за допомогою додаткового деформуючого інструменту, а саме - сталеві профілюючої стрічки. Для дослідження процесу валкового розливу-прокатки в рамках розробки нової енергоефективної технології виготовлення штаб зі змінними характеристиками по ширині використано математичне моделювання в скінченно-елементному програмному пакеті «ANSYS» американської компанії Ansys Inc. Право користування ліцензійним програмним пакетом було надано Падерборнським університетом (ФРН).

Для моделювання процесу валкового розливу-прокатки профілюваних штаб були побудовані двовимірні моделі: для моделювання ділянки кристалізації та деформації «товстого» елемента профілюваної штаби на ділянці валків-кристалізаторів без додаткового деформуючого інструменту (рис. 1-а), для моделювання процесів кристалізації-деформації «тонкого» елемента профілюваної штаби на ділянці з додатковим деформуючим інструментом (рис. 1-б). Використання двовимірних моделей дозволяє підвищити точність результатів розрахунків з мінімальним збільшенням тривалості розрахунку.

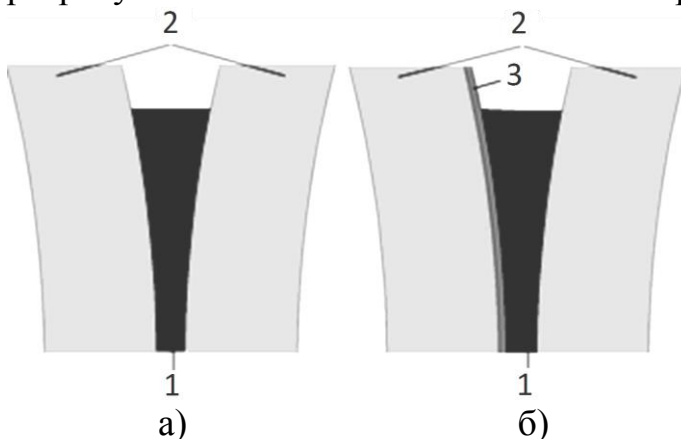


Рис. 1. Геометрія моделей для дослідження валкового розливу-прокатки профілюваних штаб: для «товстого» елемента профілюваної штаби (а), для «тонкого» елемента профілюваної штаби (б); 1 – розплав; 2 – бандажі валків-кристалізаторів; 3 – профілююча стрічка

Вихідні дані побудованих моделей: матеріал штаби - алюмінієвий сплав EN AW-1050 (найближчий аналог АД0), матеріал бандажів валків-кристалізаторів та профілюючої стрічки – сталь. Фізичні властивості матеріалу штаби: густина розплаву –  $2300 \text{ кг/м}^3$ , густина закристалізованого металу –  $2700 \text{ кг/м}^3$ , теплопровідність розплаву –  $200 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , питома теплоємність розплаву –  $880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ , температура солідус –  $930 \text{ К}$ , температура ліквідус –  $919 \text{ К}$ . Фізичні властивості профілюючої стрічки та бандажів валків-кристалізаторів: густина –  $7800 \text{ кг/м}^3$ , теплопровідність –  $35 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , питома теплоємність –  $462$

$\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ . Товщина профілюючої стрічки  $0,5 \text{ мм}$ . Граничні умови створених моделей: охолодження бандажів валків-кристалізаторів з внутрішньої сторони відбувається шляхом конвекції, ззовні бандажів валків-кристалізаторів і штаби - вільна конвекція, температура розплаву на поверхні зони кристалізації-деформації постійна. Для врахування нагріву поверхні бандажів валків-кристалізаторів при валковому розливі-прокатці в моделях використано додаткову граничну умову першого роду. В

якості припущень, при створенні моделей було прийнято наступне: бандажі валків-кристалізаторів не деформуються, плин розплаву турбулентний, повне прилипання по всій площині контакту розплаву з поверхнею бандажів валків-кристалізаторів.

Для експериментальних досліджень розробленого методу виготовлення алюмінієвих профільованих штаб валковим розливом-прокаткою було спроектовано та виготовлено оригінальний пристрій. Розробка дозволяє уникнути більшості недоліків існуючого способу профілювання валків-кристалізаторів. Схема розробленого пристрою (патент України на винахід № 113368) та тривимірне зображення виготовленого пристрою без профілюючої стрічки наведено на рис. 2.

Принцип дії пристрою: профілювання валків-кристалізаторів 1 виконується за допомогою сталюї профілюючої стрічки 3. Для забезпечення її щільного прилягання до поверхні валків передбачене попереднє натягнення стрічки за допомогою натяжного ролика 2. Для забезпечення відсутності переміщення профілюючої стрічки вздовж бочки валка використовуються дві пари профільованих роликів 4. Для компенсації подовження профілюючої стрічки внаслідок впливу високих температур в ході процесу передбачено два компенсаційно-натяжних ролики 5. Для запобігання налипанню алюмінію на поверхню профілюючої сталюї стрічки, у вказаному патенті, передбачена можливість нанесення розділового шару 7.

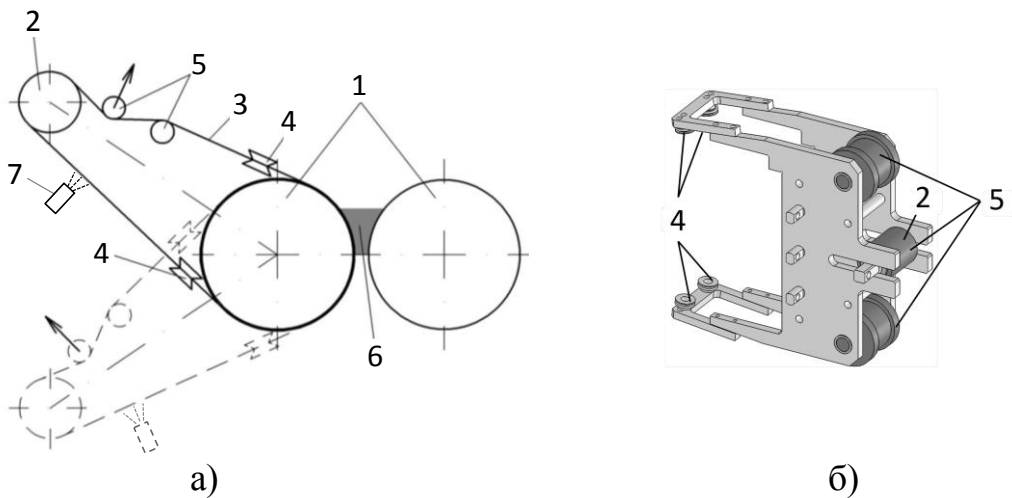


Рис. 2. Схема запатентованого пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб (а) та тривимірне зображення виготовленого пристрою (б): 1 – валок-кристалізатор; 2 – натяжний ролик; 3 – профілююча стрічка; 4 – профільовані ролики; 5 – компенсаційно-натяжні ролики; 6 – метал в зоні кристалізації-деформації; 7 – нанесення розділового шару на профілюючу стрічку

#### ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ НА ЯКІСТЬ ПРОФІЛЬОВАНИХ ШТАБ

Як показали проведені розрахунки за допомогою математичного моделювання, одним з параметрів створених моделей, які впливають на точність розрахунку розподілу температур в зоні кристалізації-деформації і як наслідок - на точність визначення координат точки початку зони деформації, є коефіцієнт тепловіддачі на межі «метал-валок». Тому з метою підвищення точності

теоретичних розрахунків за допомогою створених математичних моделей першим кроком в ході роботи був проведений зворотній аналіз відомих експериментальних даних валкового розливу-прокатки штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-6082 (найближчий аналог АД35). Проведені дослідження показали, що даний показник залежить від товщини штаби. Отримані результати дозволили уточнити значення коефіцієнта тепловіддачі на межі «метал-валок», що для штаби товщиною 2 мм становить  $17800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , для 3 мм –  $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , і для 4 мм –  $13100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Наступні теоретичні розрахунки з використанням розроблених математичних моделей були виконані з метою вивчення впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки на температуру, ступінь деформації та швидкість виходу з валків-кристалізаторів штаб, що формувалися без додаткового деформуючого інструменту та з ним. Перелік варійованих в ході математичного моделювання технологічних параметрів та інтервал досліджених значень наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Технологічні параметри валкового розливу-прокатки, що були дослідженні шляхом математичного моделювання

№ пор.	Технологічний параметр	Діапазон значень
1	Швидкість валкового розливу-прокатки, м/хв	3,25...5,57
2	Температура розплаву, К	933...973
3	Довжина зони кристалізації-деформації, мм	25...60
4	Товщина штаби, що формувалась, мм: - без додаткового деформуючого інструменту - з додатковим деформуючим інструментом	1,0...3,5 0,5...3,0

Вивчення закономірностей впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з додатковим деформуючим інструментом та без нього дозволило дослідити умови формування профільованої штаби з наявністю «товстого» ( $h_n$ ) та «тонкого» ( $h'_n$ ) елементів (рис. 3) при використанні профілюючої

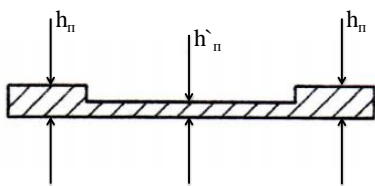


Рис. 3. Форма профілю штаби ( $h_n > h'_n$ )

стрічки. В якості базових значень технологічних параметрів валкового розливу-прокатки при моделюванні було прийнято: швидкість процесу – 3,25 м/хв, температура розплаву – 933 К, довжина зони кристалізації-деформації – 35 мм. Базова товщина «товстого» ( $h_n$ ) та «тонкого» ( $h'_n$ ) елементів 1,5 мм і 1,0 мм, відповідно. Дані базові значення основних

технологічних параметрів процесу використовуються на практиці при виготовленні плоских штаб з алюмінієвих сплавів на експериментальній машині валкового розливу-прокатки в Падерборнському університеті (ФРН), що описана в роботах Гридін О.Ю.

Першим параметром, вплив якого на закономірності формування елементів профільованої штаби було досліджено, була швидкість процесу валкового розливу-прокатки, яка визначається лінійною швидкістю на поверхні валків-кристалізаторів. В якості результатів моделювання було отримано розподіли температур в зоні

кристалізації-деформації як для «товстого», так і для «тонкого» елемента профільованої штаби. Після чого було визначено координати точки наскрізної кристалізації елемента штаби, яка відповідає початку зони деформації. З роботи Ferry M. відомо, що ступінь деформації штаб з алюмінієвих сплавів при валковому розливі-прокатці повинен перевищувати 20...30%, що свідчить про повну проробку литої мікроструктури штаби. Тому наступним кроком після проведення теоретичних розрахунків був розрахунок ступенів деформації «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби. За отриманими в результаті розрахунків даними були побудовані криві, що описують зміну ступеня деформації та середньомасової температури кожного елемента в залежності від значення швидкості процесу валкового розливу-прокатки (рис. 4).

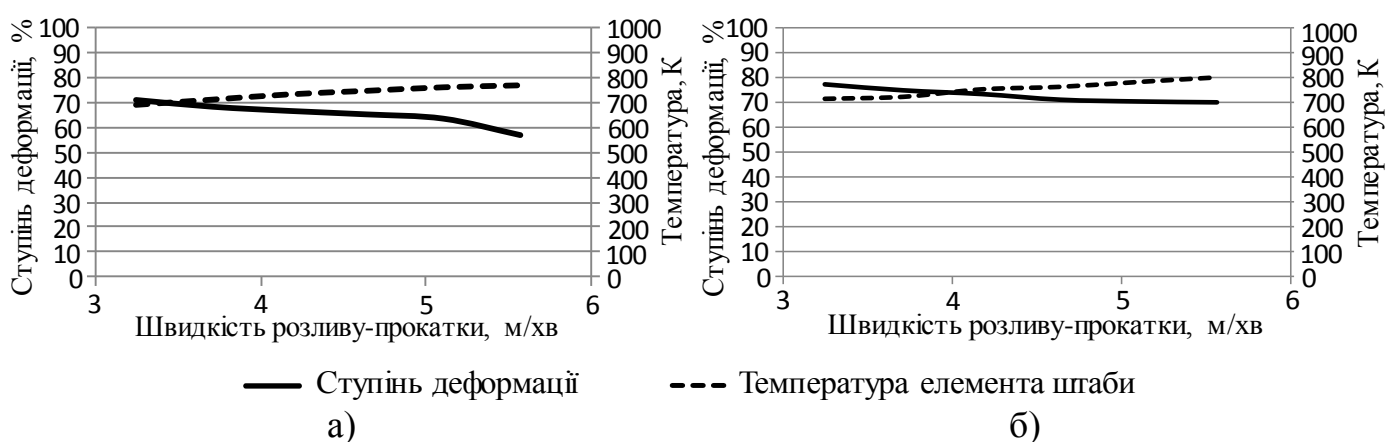


Рис. 4. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури «товстого» (а) та «тонкого» (б) елементів профільованої штаби від швидкості розливу-прокатки

Отримані результати свідчать про те, що характерні зміни температури та ступеня деформації «товстого» і «тонкого» елементів штаби схожі. Тобто, при збільшенні швидкості ведення процесу ступінь деформації елементів штаби зменшується, про що також свідчить зростання їх температури в площині виходу з валків. Водночас, мінімальна величина ступеня деформації «товстого» та «тонкого» елемента профільованої штаби значно перевищує мінімально необхідний показник, що свідчить про високу якість штаби.

Порівняння отриманих результатів показало, що максимальна абсолютна різниця значень відносного ступеня деформації між «товстим» та «тонким» елементами становить 13 %, а мінімальна 5,75 %, що відповідає швидкостям валкового розливу-прокатки 4,6 м/хв та 5,56 м/хв. Різниця між ступенями деформації окремих елементів профільованої штаби свідчить про різницю між їх швидкостями на виході з валків-кристалізаторів, що призводить до появи додаткових напружень розтягнення, які можуть призвести до дефектоутворення. Приймаючи це до уваги, було прийнято рішення провести дослідження впливу швидкості валкового розливу-прокатки на швидкість виходу елементів профільованої штаби при їх незалежному розгляді. Оскільки найбільше на швидкість елементів штаби, при незалежному їх розгляді, впливають швидкості, що спрямовані в напрямі прокатки, для аналізу



Рис. 5. Залежність швидкості елементів профільованої штаби від швидкості розливу-прокатки

використовувався саме цей показник. На рис. 5 представлені графіки отриманих залежностей для «товстого» та «тонкого» елементів. Аналіз отриманих кривих показав, що відмінність швидкостей виходу «товстого» та «тонкого» елементів, в абсолютних значеннях, становить близько 0,01...0,14 м/хв. Дана незначна різниця швидкостей елементів профілю є критичною для процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб,

так як може призвести до викривлення форми або появи дефектів на поверхні штаби. Точка перетину отриманих кривих, що відповідає швидкості 3,78 м/хв, є раціональною швидкістю валкового розливу-прокатки, яка дозволяє забезпечити виконання умови рівності швидкостей виходу різних елементів профільованої штаби. Дотримання цієї умови гарантує мінімальний рівень додаткових розтягуючих напружень і зменшує пов'язаний з ними ризик дефектоутворення. Однак слід враховувати, що в даному випадку для забезпечення рівності швидкостей виходу елементів необхідним є створення різниці між швидкостями профілюючої стрічки та поверхні бандажа валка-кристалізатора, з яким вона контактує.

Проведення теоретичних досліджень аналогічних дослідженню впливу швидкості валкового розливу-прокатки (рис. 4 та рис. 5) для всіх технологічних параметрів, наведених у таблиці 1, у встановлених діапазонах значень дозволили дослідити вплив на температурно-деформаційні умови формування «товстого» та «тонкого» елементів профільованих штаб таких технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки як температура розплаву, довжина зони кристалізації-деформації та товщина елементів. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що зміна значень технологічних параметрів в розглянутих діапазонах не призводить до зменшення ступеня деформації «товстого» та «тонкого» елементів нижче мінімально необхідних 30%. Водночас, варіювання технологічних параметрів в розглянутих діапазонах не дозволяє досягти умови рівності між швидкостями цих елементів, крім випадку використання довжини зони деформації рівної 60 мм, що свідчить про ризик появи дефектів на штабі під час розливу-прокатки. Слід врахувати, що використання зони кристалізації-деформації довжиною 60 мм забезпечить ступінь деформації «тонкого» елемента на рівні 92%, а «товстого» - 89%. Подібні значення пластичної деформації призведуть до високого навантаження на валки-кристалізатори та інші елементи машини валкового розливу-прокатки.

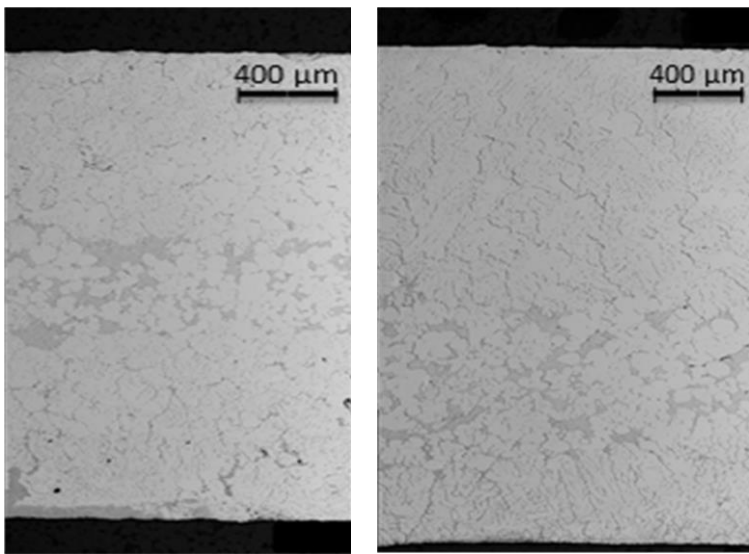
### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою перевірки працездатності розробленого способу прямого виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з розплаву та пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб в умовах кафедри

матеріалознавства Падерборнського університету (м. Падерборн, ФРН) були проведені експериментальні дослідження з виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом, наведеним на рис. 3, з алюмінієвого сплаву EN AW-1050.

Підготовка до експериментальної процедури полягала у наступному: визначення розмірів та встановлення сталюї профілюючої стрічки; з'єднання кінців профілюючої стрічки; забезпечення відсутності переміщення профілюючої стрічки вздовж бочки валка-кристалізатора за допомогою профільованих вертикальних роликів (див. рис. 2-б); натягнення профілюючої стрічки та нанесення на неї розділового шару для запобігання налипанню алюмінію. Значення технологічних параметрів валкового розливу-прокатки профільованих штаб, що були використанні при проведенні експериментальних досліджень наступні: товщина «товстого» елемента профільованої штаби – 2,7 мм, товщина «тонкого» елемента – 2,2 мм, температура розплаву – 933 К, довжина зони кристалізації-деформації – 60 мм, швидкість валкового розливу-прокатки – 3,25 м/хв, ширина профілюючої стрічки – 59 мм, довжина профілюючої стрічки – 2000 мм, товщина профілюючої стрічки – 0,5 мм.

З метою аналізу зеренної структури з однієї з виготовлених штаб було відібрано зразки з ділянок, що відповідають «товстому» (рис. 6-а) та «тонкому»



а) б)

Рис. 6. Мікроструктура «товстого» (а) та «тонкого» (б) елемента штаби

(рис. 6-б) елементам профілю штаби. Аналіз отриманих даних підтвердив дані математичного моделювання та показав симетричність фронту кристалізації «товстого» елемента профільованої штаби та асиметричність фронту кристалізації «тонкого» елемента, про що свідчить положення більших зерен на знімках мікроструктури елементів.

Крім цього, для перевірки адекватності розроблених математичних моделей було виконано вимірювання температури «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби на стадії

сталого процесу розливу-прокатки. Вимірювання температури «товстого» елемента профільованої штаби здійснювалося в серединній його частині шляхом занурення термопари діаметром 0,75 мм у ванну розплаву, після чого дана термопара захоплювалась корками закристалізованої штаби та проходила через зону деформації. Температура «тонкого» елемента профільованої штаби фіксувалась за допомогою іншої термопари, яку було закріплено на профілюючій стрічці і відповідає температурі в зоні контакту профілюючої стрічки та металу. Співставлення температур, отриманих експериментальним та теоретичним шляхом, виявило відносну похибку теоретичних розрахунків за допомогою математичних

моделей, яка становить для «товстого» елемента – 4 %, а для «тонкого» елемента – 12,3%. Це свідчить про адекватність створеної математичної моделі та задовільну точність теоретичних розрахунків.

Крім цього, з метою визначення можливості використання отриманих валковим розливом-прокаткою профільованих штаб для виготовлення тонких плоских штаб з гетерогенними за шириною властивостями були проведені експериментальні дослідження з холодної прокатки попередньо профільованих штаб. В якості матеріалу штаб використовувались алюмінієві сплави EN AW-1050 та EN AW-6082. Експериментальні дослідження для зразків зі сплаву EN AW-1050 були виконані за двома схемами. В першій серії експериментів при прокатці профільованих штаб на гладкій бочці деформувалися лише «товсті» елементи штаб, а деформація «тонких» елементів була близькою до 0. При цьому були використані зразки з різницею між товщиною «товстого» та «тонкого» елементів від 0,1 мм до 0,9 мм, що відповідає різниці між істинними ступенями деформації ( $e$ ) даних елементів 0,035...0,372. Дані дослідження дозволили визначити вплив величини обтиснення «товстого» елемента профільованої штаби на приріст показників механічних властивостей даного елемента. Друга серія експериментів для сплаву EN AW-1050 була присвячена вивченню впливу одночасної деформації «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби з постійною різницею між їх товщинами, яка становила 0,55 мм, що відповідає різниці істинних деформацій цих елементів 0,232. Під час другої серії експериментальних досліджень істинний ступінь деформації «тонкого» елемента збільшувався від 0 до 0,211, а «товстого» елемента від 0,232 до 0,443. В подальшому, порівняння механічних властивостей попередньо «товстого» та «тонкого» елементів штаби виконувалось за показниками відношень межі міцності ( $\sigma_B/\sigma_B^*$ ), межі плинності ( $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2}^*$ ) та твердості ( $HBW/HBW^*$ ). В графічному вигляді отримані дані, на прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050, наведені на рис. 7.

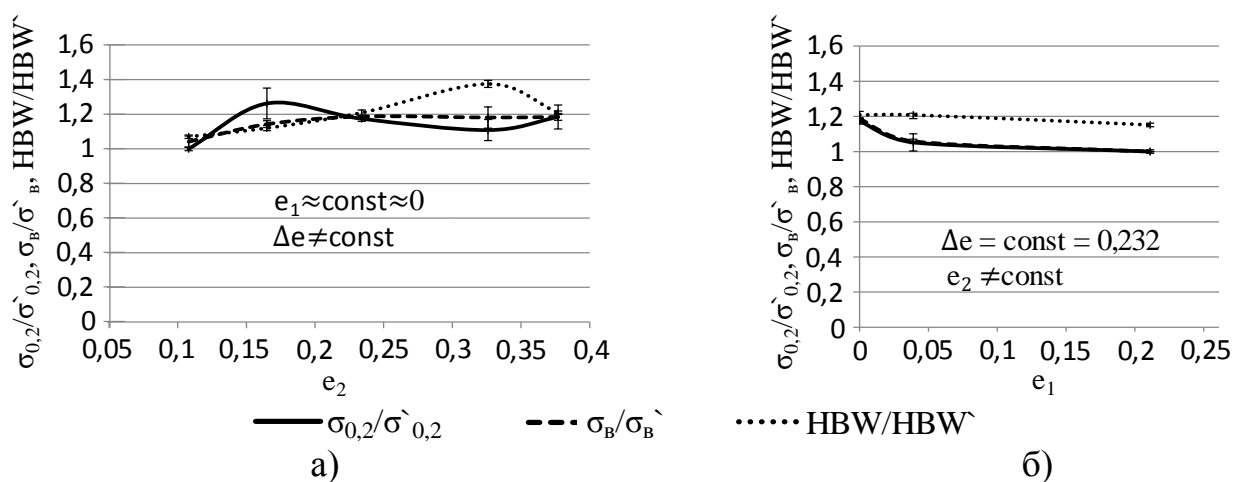


Рис. 7. Порівняння механічних властивостей попередньо «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби зі сплаву EN AW-1050 для першої (а) та другої (б) серії експериментів

Подібні дослідження були проведені з використанням в якості матеріалу штаб алюмінієвого сплаву EN AW-6082. Однак у даному випадку було досліджено лише вплив пластичної деформації «товстого» елемента за умови відсутності деформації «тонкого» елемента штаби (за аналогією до першої серії експериментів з використанням сплаву EN AW-1050). Співставлення результатів, отриманих в ході холодної прокатки профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 і EN AW-6082, дозволило визначити раціональну товщину профілюючої стрічки для валкового розливу-прокатки профільованих алюмінієвих штаб з метою забезпечення можливості подальшого формування градієнту механічних властивостей, яка має становити 0,4...0,6 мм.

Крім дослідження впливу параметрів холодної пластичної деформації, в рамках розробки нової технології, було проведено експериментальні дослідження з визначення раціонального значення кута сполучення елементів профільованої штаби. Величина даного кута визначається величиною кута бокової кромки профілюючої стрічки і має безпосередній вплив на ймовірність утворення повздовжнього «закату» в області сполучення елементів профільованої штаби під час холодної прокатки. Це, в свою чергу, не дозволить виготовляти плоскі штаби зі змінними за шириною механічними властивостями високої якості. Експериментальна процедура була схожою до експериментальної процедури з дослідження впливу параметрів холодної прокатки для алюмінієвого сплаву EN AW-1050. Для досліджень були обрані наступні величини кута бокової кромки профілюючої стрічки, що відповідають значенням кута сполучення «товстого» та «тонкого» елементів ( $\alpha$ ):  $166^\circ$ ,  $147^\circ$ ,  $137^\circ$ ,  $118^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $90^\circ$ .

Для оцінювання величини дефектів було використано показник їх довжини «х» (рис. 8). Цей показник було отримано шляхом аналізу в світловому мікроскопі

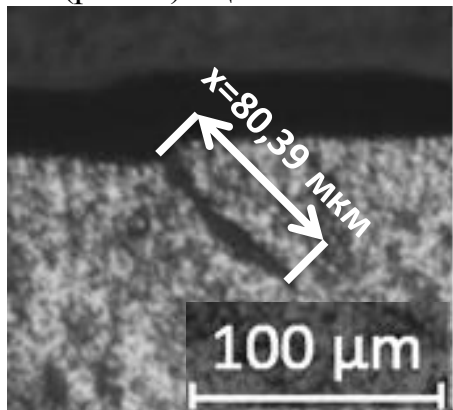


Рис. 8. Приклад дефекту, утвореного при холодній прокатці профільованої штаби

зразків, що були відібрані з області сполучення елементів профільованої штаби після холодної прокатки. В першій серії досліджень було досліджено вплив величини кута сполучення для трьох випадків: різниця між товщинами «товстого» та «тонкого» елемента становила 0,6 мм, 0,8 мм та 0,9 мм, що відповідає різниці між їх істинними ступенями деформації 0,232, 0,323 та 0,372 (рис. 9-а). В другій серії експериментальних досліджень було визначено вплив одночасної деформації «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби при постійній величині кута сполучення  $90^\circ$  та постійному значенні різниці істинних деформацій даних елементів, що становила 0,232 (рис. 9-б).

Результати проведених досліджень дозволили визначити параметри геометрії профілю штаби, яка дає змогу отримувати плоскі штаби зі змінними механічними властивостями по ширині з мінімальним ризиком утворення повздовжнього «закату» в області сполучення елементів її заготовки. Таким чином, встановлено, що при валковому розливі-прокатці штаб з профільованим поперечним перерізом слід



використовувати профілюючу стрічку, яка забезпечить кут сполучення елементів профільованої штаби рівний  $137^\circ$  та більше. Також, на прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050, експериментально визначено, що збільшення деформації «тонкого» елемента профільованої штаби спільно зі збільшенням деформації «товстого» елемента профільованої штаби при постійності кута сполучення цих елементів приводить до зменшення «закату».

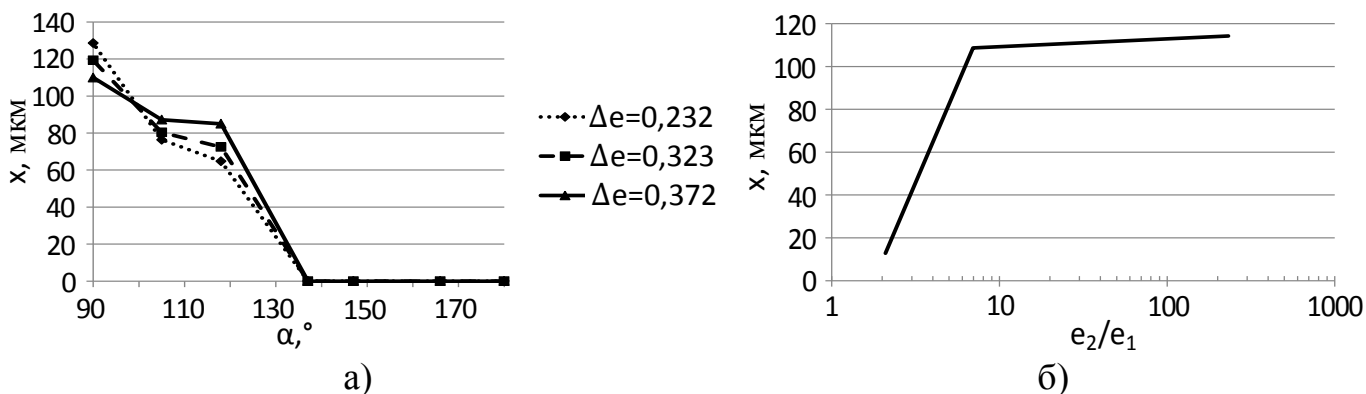


Рис. 9. Вплив величини кута сполучення елементів профільованої штаби на розмір дефекту, що утворюється при холодній прокатці на гладкій бочці: а – деформація «тонкого» елемента відсутня, б - одночасна деформація «товстого» та «тонкого» елемента ( $\alpha=90^\circ$ )

## РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ ШТАБ З ПРОФІЛЬОВАНИМ ПОПЕРЕЧНИМ ПЕРЕРІЗОМ

Відповідно до результатів теоретичних досліджень стала очевидною необхідність розробки методу визначення раціональних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки профільованих штаб. В основу розробленого методу покладено дві умови за якими можна опосередковано стверджувати про якість виготовленої профільованої штаби: ступінь деформації елементів профілю штаби повинна становити 30% і більше, що гарантує повну проробку литої мікроструктури штаби; швидкості виходу елементів профільованої штаби повинні бути рівні між собою, що гарантує мінімальне значення або відсутність додаткових розтягуючих напружень, які можуть призвести до дефектоутворення або неможливості веденні процесу розливу-прокатки. Теоретично визначено, що раціональним шляхом для регулювання швидкості елементів профільованої штаби є забезпечення різної довжини зони кристалізації-деформації для різних елементів профільованої штаби. Одним із шляхів практичної реалізації цього підходу є застосування сопел для подачі розплаву в міжвалковий простір спеціальної форми. Найпростішим в реалізації є ступінчате сопло, яке знаходиться в безпосередній близькості до поверхні валка-кристалізатора і забезпечує необхідну довжину зони кристалізації-деформації на окремих ділянках формування профільованої штаби.

Розроблений метод розрахунку технологічних параметрів полягає в наступному.

За формулами, що отримані шляхом кореляційного аналізу результатів теоретичних досліджень, виконується розрахунок ступеня деформації «товстого» (1) та «тонкого» (2) елементів профільованої штаби:

$$\varepsilon = (1,348 - d_1 \cdot V - d_2 \cdot T + d_3 \cdot l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - d_4 \cdot h_{\text{п}}) \cdot 100 ; \quad (1)$$

$$\varepsilon' = (1,708 - d_5 \cdot V - d_6 \cdot T + d_7 \cdot l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - d_8 \cdot h'_{\text{п}}) \cdot 100 , \quad (2)$$

де  $V$  – швидкість валкового розливу-прокатки, м/хв;  $T$  – температура розплаву, К;  $l_{\text{кр.}+\text{деф.}}$  – довжина зони кристалізації-деформації, м;  $h_{\text{п}}$  – товщина «товстого» елемента профільованої штаби, м;  $h'_{\text{п}}$  – товщина «тонкого» елемента профільованої штаби, м; коефіцієнти рівнянь наведені в таблиці 2 та таблиці 3:

Таблиця 2. Коефіцієнти рівняння (1)

Коефіцієнт	$d_1$ , хв/м	$d_2$ , 1/К	$d_3$ , 1/м	$d_4$ , 1/м
Значення	0,052	0,0005	8,385	192,201

Таблиця 3. Коефіцієнти рівняння (2)

Коефіцієнт	$d_5$ , хв/м	$d_6$ , 1/К	$d_7$ , 1/м	$d_8$ , 1/м
Значення	0,042	0,00087	6,615	210,545

За даними формулами визначається, чи відповідає ступінь деформації кожного елемента профільованої штаби мінімально необхідному при обраних значеннях технологічних параметрів валкового розливу-прокатки. У разі невиконання цієї умови проводиться коректування параметрів: зменшення температури розплаву, зниження швидкості розливу-прокатки або збільшення довжини зони кристалізації-деформації, яка на даному етапі приймається постійною для всіх елементів профілю. Після коректувань розрахунки за формулами (1) і (2) повторюються.

Далі виконується розрахунок швидкості виходу кожного елемента профільованої штаби з використанням різних значень довжини зони кристалізації-деформації за формулами, що також були отримані шляхом кореляційного аналізу результатів теоретичних досліджень. Для «товстого» елемента формула має вигляд (3), а для «тонкого» елемента - (4).

$$V_{\text{ел.}} = k_1 + k_2 \cdot V - k_3 \cdot T + k_4 \cdot l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - k_5 \cdot h_{\text{п}} ; \quad (3)$$

$$V'_{\text{ел.}} = k_6 + k_7 \cdot V - k_8 \cdot T + k_9 \cdot l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - k_{10} \cdot h'_{\text{п}} , \quad (4)$$

де коефіцієнти рівнянь наведені в таблиці 4 та таблиці 5:

Таблиця 4. Коефіцієнти рівняння (3)

Коефіцієнт	$k_1$ , м/хв	$k_2$	$k_3$ , м/хв·К	$k_4$ , 1/хв	$k_5$ , 1/хв
Значення	0,4657	1,29	0,0007	7,8362	85,2563

Таблиця 5. Коефіцієнти рівняння (4)

Коефіцієнт	$k_6$ , м/хв	$k_7$	$k_8$ , м/хв·К	$k_9$ , 1/хв	$k_{10}$ , 1/хв
Значення	0,2469	1,25	0,00027	5,65	61,5239

За отриманими результатами розрахунків будується крива, що описує зміну швидкості «товстого» елемента профільованої штаби в залежності від довжини зони кристалізації-деформації. Наступним кроком, за формулою (4), як мінімум, для одного значення довжини зони кристалізації-деформації «тонкого» елемента профільованої штаби встановленого на попередньому етапі розрахунку визначається швидкість даного елемента штаби і наноситься на побудований графік у вигляді прямої лінії. Координата по осі абсцис отриманої на графіку точки перетину відповідає раціональному значенню довжини зони кристалізації-деформації для «товстого» елемента штаби, при заданій довжині зони кристалізації-деформації «тонкого» елемента.

Розроблений метод визначення раціональних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки профільованих штаб в роботі розглянуто на прикладі виготовлення профільованої штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 з простою формою профілю (див. рис. 3) та товщиною «товстого» та «тонкого» елементів 1,5 мм та 1,0 мм.

Отримані результати дисертаційної роботи використовуються в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ», а також в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском Національної металургійної академії України та кафедрі матеріалознавства Падерборнського університету (ФРН).

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано теоретичне обґрунтування і нове рішення науково-технічної задачі, яка полягає в розробці нового способу виготовлення штаб із забезпеченням змінних за шириною параметрів шляхом використання закономірностей, отриманих експериментально та теоретично, присвячених дослідженню процесу формування елементів профільованих штаб при валковому розливі-прокатці та визначенню впливу параметрів холодної пластичної деформації попередньо профільованих штаб на їх властивості, що дає можливість розробити рекомендації з практичної реалізації енергоефективного процесу виробництва профільованих штаб, а також плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями.

1. Аналіз літературних джерел показав, що однією з перспективних та затребуваних груп сучасних листових металічних матеріалів є штаби та листи з локально відмінними геометрією та механічними властивостями в залежності від їх функціонального призначення. Однак, існуючі технології виготовлення продукції такого роду орієнтовані, переважно, на сталі та мають ряд недоліків, серед яких відносно низька енергоефективність. Альтернативною технологією виготовлення профільованих штаб є валковий розлив-прокатка. Однак, існуючому способу профілювання валків-кристалізаторів притаманні недоліки, що не дозволяють подальшому розвитку даної технології. Окрім цього, в літературних джерелах

відсутні дані стосовно закономірностей формування елементів профільованих штаб з алюмінієвих сплавів в умовах валкового розливу-прокатки. Вищенаведене свідчить про те, що тематика виконаної роботи є актуальною.

2. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив товщини алюмінієвої штаби на температуру металу в зоні кристалізації-деформації та умови тепловіддачі на межі «метал-валок» при валковому розливі-прокатці. На прикладі валкового розливу-прокатки алюмінієвого сплаву EN AW-6082 (найближчий аналог АД 35) визначено та фізично обґрунтовано значення коефіцієнтів тепловіддачі на межі «метал-валок» для експериментальних умов. Визначено, що коефіцієнт тепловіддачі в діапазоні температур 915...921 К для плоских штаб товщиною 2 мм становить 17800 Вт/(м<sup>2</sup>·К), для 3 мм – 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) і для 4 мм – 13100 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Визначені значення коефіцієнтів тепловіддачі дозволили побудувати адекватну математичну модель процесу валкового розливу-прокатки, а також - створюють основу для фізично обґрунтованого опису теплової контактної взаємодії в системі «метал-валок».

3. Розроблено та імплементовано в скінченно-елементному середовищі «ANSYS» математичні моделі валкового розливу-прокатки штаб без профілюючої стрічки (формування «товстого» елемента) та з нею (формування «тонкого» елемента). В результаті моделювань вперше визначено вплив температури розплаву, довжини зони кристалізації-деформації, швидкості процесу і товщини штаб на швидкості виходу із зони контакту, температуру та ступінь деформації «товстого» та «тонкого» елементів при уточнених коефіцієнтах тепловіддачі на межі «метал-валок». Встановлено, що зміна швидкості розливу-прокатки з 3,25 м/хв до 5,56 м/хв при сталості інших технологічних параметрів і товщині «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби 1,5 мм і 1 мм призводить, за рахунок зменшення тривалості контакту металу з валками, до відносного зниження їх ступенів деформації на 25% та 10%, відповідно. Збільшення температури розплаву з 933 К до 973 К призводить до зниження ступеня деформації «товстого» та «тонкого» елементів профільованої штаби на 10% та 8%.

Дослідження впливу довжини зони кристалізації-деформації показали, що її збільшення з 25 мм до 60 мм приводить до збільшення ступеня деформації «товстого» елемента штаби на 61%, а «тонкого» – на 40%. Зміна товщини «товстого» елемента профільованої штаби з 1 мм до 3,5 мм і «тонкого» – з 0,5 мм до 3 мм, за умови незмінності інших параметрів процесу, призводить до зниження ступеня деформації цих елементів у 2,28 та 2,5 рази. З метою удосконалення технології валкового розливу-прокатки виконано зіставлення швидкостей виходу з валків, температур та ступенів деформації штаб, що формувались без та за участю профілюючої стрічки.

4. Розроблено новий спосіб виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом шляхом валкового розливу-прокатки. На основі існуючого лабораторного обладнання спроектовано й виготовлено пристрій для дослідження процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб з алюмінієвих сплавів. Розроблений пристрій забезпечує профілювання поверхні валка-кристалізатора за допомогою натягнутої нескінченної сталеві стрічки, що утримується роликками.

Експериментальні дослідження з виготовлення з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 (аналог АД 0) профільованих штаб переріз яких сформований тонким елементом, що розміщений між товстими елементами (товщини елементів профілю 2,7 - 2,2 - 2,7 мм), виконані на даній установці, підтвердили працездатність розробленого способу валкового розливу-прокатки профільованих штаб, які відповідають вимогам DIN EN 485-2:2009-01.

5. Спираючись на результати теоретичних досліджень, розроблено метод визначення раціональних технологічних параметрів процесу. В цьому методі критеріями якості штаби є ступінь деформації елементів профільованої штаби та рівність швидкостей елементів профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів при незалежному їх розгляді. Розроблений метод детально розглянуто на прикладі виготовлення профільованої штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 з товщинами елементів профілю 1,5 - 1,0 - 1,5мм. Визначено, що при температурі розплаву 933 К і швидкості процесу 3,25 м/хв, в експериментальних умовах, раціональними довжинами зони кристалізації-деформації для «товстого» і «тонкого» елементів профільованої штаби є 40,6 мм та 35 мм, відповідно. Для практичної реалізації різних довжин зони кристалізації-деформації по елементах профільованої штаби запропоновано застосування сопла для подачі розплаву спеціальної ступінчатої форми.

6. Вперше експериментально визначено вплив параметрів холодної прокатки профільованих штаб на гладкій бочці на формування змінних механічних властивостей по ширині штаби, що виготовляється. На прикладі профільованих штаб з алюмінієвих сплавів EN AW-1050 і EN AW-6082 визначено, що максимальний приріст механічних властивостей в області «товстого» елемента профільованої штаби спостерігається за умови відсутності пластичної деформації «тонкого» елемента штаби. Отримано максимальне значення приросту межі плинності в розмірі 12% для сплаву EN AW-6082 та 35% для сплаву EN AW-1050. Максимальний приріст межі міцності склав 15,9% для сплаву EN AW-6082 та 20% для EN AW-1050. Максимальний приріст показника твердості, що було отримано, становив 11,5% та 40% для сплаву EN AW-6082 і EN AW-1050, відповідно. На основі аналізу отриманих даних встановлено, що для досягнення максимальних значень приросту показників механічних властивостей різниця між товщиною «товстого» і «тонкого» елементів повинна становити 0,4...0,6 мм, що визначає товщину профілюючої стрічки для валкового розливу-прокатки профільованих штаб.

7. Вперше експериментальним шляхом отримані залежності розміру «закату», що утворюється в області сполучення елементів профільованої штаби різної товщини під час холодної прокатки, від величини кута сполучення елементів профілю. Визначено, що кут сполучення, який визначається боковою кромкою профілюючої стрічки розробленого пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб, повинен становити не менше 137°. При цих значеннях кута дефект в області сполучення елементів профілю при деформації «товстого» елемента і відсутності деформації «тонкого» елемента не утворюється. На прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050 експериментально встановлено, що збільшення

деформації «тонкого» елемента профільованої штаби спільно зі збільшенням деформації «товстого» елемента профільованої штаби приводить до зменшення «закату».

8. Отримані в дисертаційній роботі дані використано на заводі ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» (акт від 30.05.2018 р.); використано в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском НМетАУ при викладанні курсів лекцій з дисциплін «Обробка металів тиском», «Процеси та машини обробки тиском», «Технології обробки тиском кольорових металів і сплавів» для студентів спеціальності 136 Металургія (спеціалізація - обробка металів тиском), а також при виконанні студентами дипломних проектів, випускних магістерських і курсових науково-дослідних робіт (довідка від 18.05.2018 р.), а також на кафедрі матеріалознавства Падерборнського університету (ФРН) (рекомендаційний лист від 17.05.2018 р.).

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ОПУБЛІКОВАНИЙ У РОБОТАХ:**

#### *Статті у фахових виданнях:*

1. Бондаренко С. В. Определение коэффициента теплоотдачи в системе металл-валок при валковой разливке-прокатке алюминиевых сплавов / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Ю. Столбченко, М. Шапер // Металл и литье Украины. – 2013. – №5. – С. 3–8.

2. Бондаренко С. В. Влияние холодной прокатки на гладкой бочке на механические свойства предварительно профилированных полос из алюминиевого сплава EN AW-6082 / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Шапер // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск:ДГМА. - 2018. - №1 (46). – С.143-148.

#### *Статті у закордонних періодичних виданнях:*

3. Grydin O. Rolling of flat aluminum strips with tailored mechanical properties / O. Grydin, S. Bondarenko, M. Stolbchenko, M. Schaper // Materials Science Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications. – 2016. – Vol.854. – P. 87–92. (Scopus)

4. Bondarenko S. Numerical analysis of twin-roll casting of strips with profiled cross-section [Електронний ресурс] / S. Bondarenko, M. Stolbchenko, M. Schaper, O. Grydin // Materials Research. – 2018. – Vol. 21 (4) – Режим доступу до ресурсу: [www.scielo.br/pdf/mr/2018nahead/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2017-1098.pdf](http://www.scielo.br/pdf/mr/2018nahead/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2017-1098.pdf). - DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-1098. (Scopus)

*Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:*

5. Бондаренко С. В. Моделювання процесу валкової розливки-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом в кінцево-елементному середовищі ANSYS FLOTRAN / С. В. Бондаренко, О. Ю. Гридін // Пластична деформація металів: Матеріали наук.-практ. конф., 22-26 травня 2017 р., м. Дніпро: тез. допов. – Дніпро: [б.в.], 2017. – С. 10-11.

#### *Патенти:*

6. Пат. 113368 Україна, МПК (2006.01) B22D 11/06, B22D 11/10 Пристрій для валкової розливки-прокатки профільованих штаб / Гридін О. Ю. (UA), Огінський Й. К.

(UA), Бондаренко С. В. (UA), Шапер М. (DE); заявник та патентовласник Національна металургійна академія України. – № 201600100; заявл. 04.01.16; опубл. 10.01.17, Бюл. №1. – 5с.: з іл.

*Статті у виданнях, що не входять до переліку фахових:*

7. Бондаренко С. В. Тенденции и перспективы развития валковой разливки-прокатки / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, А. Н. Головки // Пластична деформація металів: збірник наукових праць у 2-х томах. – Дніпропетровськ: Акцент ПП. – 2014. – Т.1. - С. 260-263.

8. Бондаренко С. В. Исследование дефектообразования при прокатке на гладкой бочке предварительно профилированных полос / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Шапер // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. - 2016. - № 1(42). - С. 169-174.

9. Бондаренко С. В. Исследование зависимости температуры и степени деформации тонких участков профилированных полос при валковой разливке-прокатке с дополнительным тепловым сопротивлением / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Шапер // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. - 2017. - № 1(44). - С. 89-95.

## АНОТАЦІЯ

**Бондаренко С.В. Обґрунтування та розробка технології валкового розливу-прокатки штаб із забезпеченням змінних за шириною параметрів. – 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.

В роботі наведено інформацію щодо розробленої технології виготовлення профільованих штаб та плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями з алюмінієвих сплавів валковим розливом-прокаткою з використанням профілюючої стрічки. На основі лабораторної установки спроектовано й виготовлено пристрій розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом. Шляхом зворотного аналізу відомих експериментальних даних спільно з теоретичними розрахунками визначено значення коефіцієнту тепловіддачі на межі метал-інструмент для експериментальних умов валкового розливу-прокатки. Теоретично визначено вплив технологічних параметрів процесу розливу-прокатки на ступінь деформації, швидкість та температуру штаб на виході з валків, що формувались без та за участю профілюючої стрічки. На основі отриманих теоретичних даних розроблено метод визначення раціональних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки профільованих штаб з мінімальними повздовжніми напруженнями. Експериментально визначено вплив параметрів геометрії профілюючої стрічки і параметрів холодної прокатки на прояв повздовжнього «закату» та формування змінних за шириною механічних властивостей при прокатці на гладкій бочці попередньо профільованих штаб з алюмінієвих сплавів.

Результати дисертаційної роботи використовуються в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ», а також в навчальному процесі на кафедрі

обработки металів тиском Національної металургійної академії України та на кафедрі матеріалознавства Падерборнського університету.

**Ключові слова:** валковий розлив-прокатка, алюміній, тонка штаба, профільований поперечний переріз, пластична деформація, температура, швидкість, механічні властивості

### АННОТАЦІЯ

**Бондаренко С.В. Обоснование и разработка технологии валковой разливки-прокатки полос с обеспечением изменяемых по ширине параметров. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.03.05 – «Процессы и машины обработки давлением». – Национальная металлургическая академия Украины, Днепро, 2018

Работа посвящена разработке нового способа производства тонких полос с профилированным поперечным сечением и возможностью дальнейшего их применения для производства плоской продукции с варьируемыми по ширине механическими свойствами. Основой разработанного способа является технология валковой разливки-прокатки. Для практической реализации и экспериментальных исследований технологии валковой разливки-прокатки полос с изменяемыми по ширине параметрами спроектировано и изготовлено устройство валковой разливки-прокатки профилированных полос. Разработка защищена патентом Украины на изобретение № 113368.

Для исследования зависимостей скорости выхода, температуры и степени деформации элементов профилированной полосы, при независимом их рассмотрении, от технологических параметров процесса валковой разливки-прокатки разработаны математические модели. Впервые изучено влияния толщины алюминиевых полос на значение коэффициента теплоотдачи на границе металл-валок при валковой разливке-прокатке. Полученные результаты позволили определить значения данных коэффициентов для некоторых толщин полос, что позволяет корректно описывать систему металл-валок при математическом моделировании валковой разливки-прокатки алюминиевых сплавов.

При помощи математического моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос без использования дополнительного деформирующего инструмента и с ним исследовано влияние температуры расплава, длинны зоны кристаллизации-деформации, скорости разливки-прокатки и толщины полосы на температурно-деформационные условия формирования элементов профилированной полосы. На основе полученных данных разработан метод определения рациональных технологических параметров валковой разливки-прокатки профилированных полос с минимальным уровнем продольных растягивающих напряжений. В основе разработанного метода лежат условия соответствия степени деформации всех элементов профилированной полосы минимально необходимому значению и равенства их скоростей выхода из валков.

Впервые экспериментально исследовано влияние геометрии поперечного сечения профилированной полосы и параметров холодной прокатки на гладкой



бочке на формирование градиента механических свойств и формирование дефекта в области сопряжения элементов профилированной полосы разной толщины. Это дало возможность определить геометрию поперечного сечения профилирующей ленты для валковой разливки-прокатки профилированных полос с целью дальнейшего их применения для производства плоской продукции с изменяемыми по ширине механическими свойствами.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, используются в условиях ЗАО Днепровский завод «АЛЮМАШ», а также в учебном процессе на кафедре обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины и на кафедре материаловедения Падерборнского университета.

**Ключевые слова:** валковая разливка-прокатки, алюминий, тонкая полоса, профилированное поперечное сечением, пластическая деформация, температура, скорость, механические свойства

### ABSTRACT

**Bondarenko S. Justification and development of the technology of twin-roll casting of strips with providing of variables parameters on the width. - Qualification scientific work on the manuscript rights.**

Thesis for the candidate degree (Doctor of Philosophy) in engineering sciences by specialty 05.03.05 «Processes and machines of metal forming». – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

The paper gives information on the developed technology of manufacturing profiled and flat strips with heterogeneous mechanical properties from aluminum alloys by twin-roll casting with profiling strip. On the basis of the laboratory twin-roll casting unit, a twin-roll casting unit for producing strips with profiled cross-section was designed and manufactured. By inverse analysis of the known experimental data and theoretical calculations was determined values of heat transfer coefficient at the boundary of the metal-tool for the experimental conditions of twin-roll casting. Was theoretically determined influence of the technological parameters on the degree of deformation, outlet speed and outlet temperature of the strips, which were formed without and with profiling strip. Using obtained theoretical data has been developed method of determination of optimal technological parameters of the twin-roll casting for the producing of profiled strips with minimum longitudinal stresses. It has been experimentally determined influence of the profiling strip geometry parameters and the parameters of cold rolling on the formation of longitudinal defect and the formation of variables mechanical properties on the width at rolling in plain rolls of pre-profiled aluminum strips.

Dissertation work results are used in the conditions of the JSC Dniprovskiy factory «Alumash», as well as in the educational process at the Department of Metal Forming of the National Metallurgical Academy of Ukraine and the Department of Materials Science at Paderborn University.

**Keywords:** twin-roll casting, aluminum, thin strip, profiled cross-section, plastic deformation, temperature, speed, mechanical properties