

## **ВІДГУК**

офіційного опонента Рудя Олександра Дмитровича  
на дисертацію Нурадінова Ібрагіма Абдійовича

**«Валкова розливка високоміцних алюмінієвих сплавів для одержання прокату з підвищеними механічними властивостями»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – Металургія, галузь знань 13 – «Механічна інженерія»

### **1. Актуальність теми дисертації**

В Україні на сьогоднішній день взагалі відсутнє виробництво листового прокату із алюмінієвих сплавів. Особливо актуальним за останній час став листовий металопрокат із високоміцних алюмінієвих сплавів, який використовується при створенні елементів ракетної техніки різного призначення. Зокрема, для цих цілей використовуються зміцнювані термічною обробкою високоміцні алюмінієві сплави, які мають незаперечну перевагу перед іншими матеріалами через високі значення їх питомої міцності при відносно невеликій масі.

Класична технологія виробництва листового металопрокату з роздільним литтям заготовок (зливків або слябів) з подальшою їх прокаткою характеризується високою ресурсоемністю. Найефективнішою технологічною схемою виробництва тонкого металевого листа у сучасності є схема беззливкового розливання-прокатування заготовок на двовалкової установці. Така схема дозволяє суттєво знизити енерго- та матеріаломісткість виробництва, а також значно скоротити технологічний цикл виробництва листового металопрокату.

Але станом на сьогодні в світі відсутня схема валкового розливання високоміцних алюмінієвих сплавів, що пов'язано з дуже широким інтервалом кристалізації цих сплавів (більше 100°C). Тому робота, спрямована на створення технології валкової розливки для цього класу алюмінієвих сплавів, присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання.

Дисертаційну роботу виконано у відділі безперервного лиття та деформаційних процесів Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України.

### **2. Загальна характеристика роботи**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 154 найменувань. Матеріали роботи викладено на 174 сторінках, вона містить 18 таблиць, 58 рисунків та 2 додатки.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковою тематикою ФТІМС НАН України, сформульовано мету та задачі досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення, а також відомості щодо особистого внеску здобувача, апробації отриманих результатів, публікацій.

У *першому розділі* розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку промислових технологій виробництва листового металопрокату. Доведено



доцільність використання технологічної схеми валкового розливання-прокатки алюмінієвих сплавів для виробництва листового металопрокату з них. Перспективність цієї технології при виробництві тонкого листа пов'язана з дуже високою гармонізацією роботи всіх металургійних агрегатів у технологічному процесі та зниженні енергетичних і капітальних витрат виробництва у цілому.

Виходячи з цього обґрунтовано актуальність проблеми отримання листової металопродукції з високоміцних алюмінієвих сплавів для різних галузей промисловості, а також відзначено причину відсутності технологічної схеми беззливкової прокатки цих сплавів дотепер, яка, головним чином, полягає у широкому температурному інтервалі їх кристалізації. На основі виконаного аналізу літературних даних обґрунтовано доцільність проведення теоретичних та експериментальних досліджень з метою розробки наукових та технологічних основ беззливкової розливки-прокатки високоміцних термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавів.

*У другому розділі* представлено відомості щодо матеріалів, обладнання та детальний опис методик, які були здобувачем розроблені та використані у дослідженнях.

*Третій розділ* дисертаційної роботи присвячений результатам фізичного та математичного моделювань, за допомогою яких вивчено особливості тепло-масообмінних процесів у рідкому металі при його беззливковій прокатці, тому що вони відіграють вирішальну роль у формуванні структури та властивостей литих заготовок.

Автором за допомогою прозорого органічного середовища (камфен) наочно доведена вирішальна роль тепло- масообмінних процесів у валковому кристалізаторі на формування структури листових заготовок. Розроблено ефективний спосіб підвищення теплової роботи валкового кристалізатора шляхом нанесення штучної шорсткості на внутрішніх поверхнях валків, що контактують з водою. При цьому встановлено, що за інших рівних умов кількість тепла, що відводиться у кристалізаторі, збільшується до 45%.

Математичне моделювання тепло- масообмінних процесів у валковому кристалізаторі автором проведено у комп'ютерній системі ProCAST за спрощеної схеми розрахунку лінійної швидкості для випадкової точки у рідкій лунці розплаву металу. У результаті цих розрахунків для всіх дослідних сплавів вперше у металургійній практиці одержані математичні моделі (рівняння регресії), за якими можна визначити лінійні швидкості розливки при технологічних параметрах, що задаються з самого початку (товщина заготовок, кут меніска, радіус валка та температура перегріву розплаву тощо). За результатами лабораторного експерименту розрахований рівень швидкостей розливки показав високу їх адекватність з реальними значеннями.

*У четвертому розділі* наведені результати дослідження процесів валкової розливки дослідних алюмінієвих сплавів на лабораторній установці для лиття листових заготовок.

Металографічними дослідженнями встановлено, що мікроструктура всіх



дослідних сплавів здебільшого складається з первинних кристалів  $\alpha$ -Al твердого розчину різного ступеня розгалуженості. Встановлено, що рівень механічних характеристик кожного сплаву, головним чином, визначається дисперсністю первинних кристалів  $\alpha$ -Al та інтерметалідних фаз. Для кожного етапу технологічного процесу (валкова розливка, гаряча прокатка та термічна обробка) визначено кількісні характеристики структур  $\alpha$ -Al твердого розчину та інтерметалідних фаз (об'ємну частку інтерметалідних фаз, розмір кристалів інтерметалідів, параметр форми інтерметалідів, розмір дендритних осередків та параметр форми дендритних осередків), при яких отримувана алюмінієва штаба має найвищі показники механічних характеристик. При цьому рівень механічних характеристик для всіх досліджених сплавів помітно вище, ніж відповідні стандартні значення.

У загальних висновках дисертації належним чином відображено одержані автором результати, що розкривають наукові та практичні досягнення, що були отримані в процесі дисертаційного дослідження і які сприяли розв'язанню важливого науково-прикладного завдання.

**3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни** підтверджується комплексом теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних із залученням сучасних методів: фізичне та математичне моделювання; диференціально-термічний аналіз, електронно-мікроскопічні дослідження та реальна валкова розливка-прокатка досліджуваних алюмінієвих сплавів; стандартні методи механічних випробувань металевих сплавів, а також методи комп'ютерної обробки експериментальних результатів.

Загалом використані автором методи досліджень базуються на фундаментальних закономірностях процесів тепло- та масопереносу, кристалізації та структуроутворення у металевих сплавах. Застосування фізичного моделювання для вивчення процесів валкової розливки металів ґрунтується на теорії подібності, яка широко використовується під час проведення наукових досліджень реальних металургійних процесів. Достовірність результатів математичного моделювання процесів валкової розливки дослідних алюмінієвих сплавів забезпечується використанням перевіреної часом комп'ютерної програми ProCAST. Обґрунтованість та достовірність отриманих дисертантом нових наукових результатів підтверджена численними експериментальними даними, отриманими у лабораторних умовах при проведенні валкового розливання досліджуваних алюмінієвих сплавів, а також апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному:

3.1. Одержано відсутні у науковій літературі аналітичні залежності для розрахунку швидкостей валкової розливки-прокатки алюмінієвих сплавів В95, АМг5 і АД35, які забезпечують отримання листових заготовок заданої товщини при різних значеннях вихідних технологічних параметрів.



3.2. Розроблено ефективний механізм інтенсифікації теплообмінних процесів у валковому кристалізаторі, який полягає у зміні характеру руху пристінкового шару охолоджувальної води з ламінарного режиму на турбулентний за рахунок нанесення виступів на внутрішніх поверхнях валків-кристалізаторів. Під час набігання потоку води на виступ за ним утворюється вихор, який руйнує структуру ламінарного підшару, турбулізуючи його, через що у валку-кристалізаторі тепловідведення за рахунок теплопровідності змінюється на тепловідведення за рахунок конвекції.

3.3. Вперше розроблено технологічні режими валкової розливки-прокатки високоміцних алюмінієвих сплавів з широкими інтервалами кристалізації та отримані листові заготовки зі сплаву В95, який має широкий інтервал кристалізації 162°C.

3.4. Встановлено взаємозв'язок між параметрами первинної кристалічної будови листових заготовок з алюмінієвих сплавів марок АД35, АМг5 і В95 та особливостями формування структури і властивостей кінцевого листового прокату з них. Представлено їх залежності від технологічних режимів валкового розливання, гарячої прокатки та термічної обробки цих сплавів. Для усіх сплавів визначено оптимальні режими гарячої прокатки та термічної обробки, що забезпечують максимальний рівень механічних властивостей одержуваної листової продукції, який перевищує відповідні стандартні межі.

#### **4. Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою, застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує достатній рівень доступності їх сприйняття та використання.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

#### **5. Практичне значення.**

Цінність результатів роботи для практики полягає в універсальності розроблених фізичних та математичних моделей, що є основою їх використання для проведення наукових досліджень з вивчення процесів валкової розливки-прокатки для інших типів металевих сплавів. Розроблений спосіб посилення інтенсивності тепловідведення у валковому кристалізаторі теж має універсальний характер і може бути використаний для підвищення ефективності теплової роботи будь-якого типу кристалізатора, що охолоджується водою (рідким теплоносієм).

Використання розробленої технології валкової розливки-прокатки алюмінієвих сплавів дозволить металургійним підприємствам суттєво підвищити ресурсо- та енергоефективність процесу одержання листової металопродукції.

#### **6. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні результати роботи висвітлені у 15 публікаціях, серед них: 7 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, одне видання з яких входить



до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, та 8 публікацій у матеріалах Міжнародних науково-практичних конференцій.

#### **7. Оцінка змісту дисертації та дотримання принципів академічної доброчесності**

Дисертаційна робота була написана автором самостійно. За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Нурадінова І.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 136 Металургія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Металургія».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги – 14% (найбільша схожість припадає на власні опубліковані праці), можна зробити висновок, що дисертаційна робота Нурадінова Ібрагіма Абдійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

#### **8. Загальні зауваження по роботі**

Разом із загальною позитивною оцінкою роботи, дисертація не позбавлена деяких недоліків:

1. В роботі температурні параметри фазових перетворень у досліджуваних сплавах проводили методом диференційно-термічного (ДТА) у діапазоні температур 27-727°C (Розділ 4.1). Але на рис. 4.1-4.3 наведено тільки криві кристалізації для відповідних сплавів. Хоча сплави є широковідомими та дослідженими, бажано було б навести і криві плавлення.
2. В багатьох випадках на мікрофотографіях (напр., рис. 4.4, 4.5) не наведено масштабних лінійок, як це зроблено на рис. 4.9). Ця обставина заважає кількісній оцінці параметрів мікроструктури сплавів.
3. На рис. 4.11-4.14 в підписах йдеться про режими термічної обробки ТО №1 - №3, але в тексті Розділу 4 і в переліку позначень ці режими не розшифровані.
4. Для встановлення фазового складу досліджених сплавів та його зміни в процесі термічної обробки бажано було проведення рентгенодифракційних досліджень.
5. Швидкість нагріву/охолодження більш коректно вказувати в одиницях К/хв.
6. Хоча в цілому дисертація написана гарною українською мовою, присутні в незначній кількості помилки.

Висловлені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи. Вони спрямовані, швидше, на пошук шляхів подальших досліджень, доцільність продовження яких не викликає сумніву.

#### **Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам**

В цілому дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Нурадінова Ібрагіма Абдійовича на тему **«Валкова розливка високоміцних алюмінієвих сплавів для одержання прокату з підвищеними механічними властивостями»** становить собою самостійну завершену наукову розробку, має теоретичне і прикладне значення. Дисертаційна робота містить одержані автором науково обґрунтовані результати, що в сукупності дозволяють вирішити важливу



задачу по створенню технології валкової розливки-прокатки високоміцних алюмінієвих сплавів з широким інтервалом кристалізації для отримання листової металопродукції, що має суттєве значення для таких галузей промисловості, як авіа- та ракетобудування.

Дисертація Нурадїнова Ібрагіма Абдїйовича є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, що має внутрішню єдність, характеризується системністю, базується на фундаментальних положеннях сучасної науки і свідчить про особистий внесок автора в науку, містить нові науково обґрунтовані результати, які не викликають сумніву.

Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Відмічені недоліки роботи не мають вирішального значення щодо формулювання наукової новизни та оцінки дисертації в цілому.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Нурадїнов Ібрагім Абдїйович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія.

**Офіційний опонент:**

завідувач відділу фізики дисперсних систем

Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

доктор фізико-математичних наук, професор



Олександр РУДЬ

Підпис О.Д.. Рудя засвідчую.

учений секретар ІМФ ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

кандидат фізико-математичних наук



Марина САВЧУК

25 червня 2024 р.