

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бондаренко Сергій Валерійович

УДК 621.7.04

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.03.05 - процеси та машини обробки тиском
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____Бондаренко С.В.

Науковий керівник:

Гридін Олександр Юрійович
доктор технічних наук, доцент

м. Дніпро – 2018

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.

Дисертаційна робота присвячена розробці нового способу виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою і дослідженню температурно-деформаційних умов формування профільованих штаб з алюмінієвих сплавів та розробці на їх основі рекомендацій з практичної реалізації енергоефективного процесу виробництва профільованих штаб, а також плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями.

Проведений аналіз сучасного стану питання стосовно сфер використання та способів виробництва штаб зі змінними механічними властивостями по ширині і штаб зі змінною геометрією профілю в повздовжньому та поперечному напрямках дозволив зробити висновок про існуючу необхідність розробки нового процесу виготовлення штаб зі змінними характеристиками по ширині. В якості основи нового процесу була обрана технологія прямого виготовлення штаб з розплаву у двовалкових кристалізаторах, яка поєднує в собі безліч переваг. Основними з яких є мала кількість шкідливих викидів в атмосферу, що за літературними даними для CO₂ становить близько 25 кг/т продукції, та висока енергоефективність в порівнянні з іншими технологіями у зв'язку зі зменшенням кількості технологічних операцій при виготовленні тонких штаб.

Існуюче технологічне рішення для виробництва штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою з використанням профільованих, шляхом нанесення додаткового слою нікелю, валків-

кристалізаторів не може бути реалізована в промислових масштабах через низьку стійкість виконаної таким чином робочої поверхні валків, високі витрати на процес профілювання та необхідність великого парку валків для широкого асортименту.

Спираючись на все вищезазначене, в рамках роботи розроблено новий метод виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом на агрегатах валкового розливу-прокатки. Для практичної реалізації розробленого методу спроектовано та виготовлено оригінальний запатентований пристрій валкового розливу-прокатки профільованих штаб. Особливістю розробленого пристрою є те, що профілювання робочої поверхні валків-кристалізаторів виконується завдяки використанню нескінченної профілюючої сталльної стрічки. В рамках перевірки працездатності розробленого методу та пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб було виконано експерименти з розливу-прокатки профільованих штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 з товщиною товстого-тонкого-товстого елемента профілю штаби 2,7мм...2,2мм...2,7мм, які, за результатами досліджень, показали свою відповідність до вимог німецького стандарту DIN EN 485-2:2009-01.

Шляхом інверсного аналізу відомих експериментальних даних спільно з результатами проведених теоретичних розрахунків було встановлено характер впливу товщини штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-6082 на коефіцієнт тепловіддачі на межі метал-валок. Аналіз отриманих даних дозволив визначити значення коефіцієнту тепловіддачі на межі метал-валок при валковому розливі-прокатці алюмінієвих сплавів, що для товщини штаби 2 мм становить 17800 Вт/(м²·К), для штаби товщиною 3 мм – 15000 Вт/(м²·К) і для штаби товщиною 4 мм – 13100 Вт/(м²·К). Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі дозволили розвинути уявлення про теплову взаємодію інструменту та штаби, що формується, на прикладі валкового розливу-прокатки алюмінієвого сплаву EN AW-6082 та, в подальшому, підвищити точність математичного моделювання процесу валкового розливу-прокатки.

З метою аналізу впливу таких технологічних параметрів валкового розливу-прокатки як температура розплаву, довжина зони кристалізації-деформації, швидкість розливу-прокатки і товщина елементів профілю штаби на температурно-деформаційні умови формування та швидкісні параметри елементів профільованої штаби була розроблена математична модель процесу в скінченно-елементному середовищі Ansys Flotran. Перевірка адекватності створеної моделі виконана шляхом порівняння експериментальних та теоретичних даних стосовно середньомасової температури елементів профілю штаби. Відносна похибка моделювання середньомасової температури металу для товстого елемента профільованої штаби склала 4% та для тонкого елемента – 12,3%.

З використанням розробленої математичної моделі проведено теоретичний аналіз процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб та вперше визначено вплив технологічних параметрів процесу на умови формування зони пластичної деформації при уточнених коефіцієнтах тепловіддачі на межі метал-валок при виробництві алюмінієвих штаб з профільованим поперечним перерізом. Теоретичний аналіз впливу технологічних параметрів було виконано на прикладі простої форми профілю штаби з товщиною товстого та тонкого елемента 1,5 мм і 1,0 мм.

Встановлено, що збільшення швидкості валкового розливу-прокатки в діапазоні 3,25...5,56 м/хв, при незмінності інших технологічних параметрів, призводить до зниження ступеня деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби на 25% та 10 %, відповідно, а різниця між абсолютними значеннями ступенів деформації цих елементів профільованої штаби становить 5,75...13%. Швидкість елементів профілю штаби, при даних умовах та незалежному їх розгляді, також збільшується, а абсолютна різниця між швидкостями становить 0,01...0,14 м/хв.

Теоретично визначено характер впливу збільшення температури розплаву з 933 К до 973 К, при сталості інших технологічних параметрів, що призводить до зниження ступеня деформації товстого та тонкого елемента на 8% і 10%,

відповідно. Водночас абсолютна різниця між ступенями деформації елементів становить 4,98...6,65%. За таких умов швидкість товстого та тонкого елемента профільованої штаби, при незалежному їх розгляді, знижується, а абсолютна різниця становить близько 0,003...0,09 м/хв.

Шляхом теоретичного аналізу визначено, що збільшення довжини зони кристалізації-деформації з 25 мм до 60 мм при постійності інших технологічних параметрів, призводить до збільшення ступеня деформації товстого елемента штаби на 61%, тонкого – на 40% та зростанню швидкостей виходу цих елементів профільованої штаби. Різниця між абсолютними значеннями ступенів деформації товстого та тонкого елементів штаби, за наведених умов, знаходиться в діапазоні 3...10,4%, а абсолютна різниця між швидкостями даних елементів - в діапазоні від 0,09 м/хв до 0 м/хв. Однаковість швидкостей виходу елементів профільованої штаби, що зі свого боку гарантує відсутність розтягуючих напружень в області сполучення елементів профільованої штаби різної товщини, досягається при довжині зони кристалізації-деформації 60 мм.

Теоретично встановлено, що збільшення товщини товстого елемента профільованої штаби від 1 до 3,5 мм і тонкого – від 0,5 мм до 3 мм призводить до зниження ступеня деформації цих елементів профілю у 2,28 та 2,5 рази, відповідно. Водночас швидкість товстого та тонкого елемента профільованої штаби при незалежному їх розгляді зменшується, а абсолютна різниця між відповідними значеннями становить 0,04...0,11 м/хв.

На основі отриманих теоретичних даних з характеру впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки розроблено метод визначення раціональних значень даних параметрів для отримання профільованих штаб високої якості, що забезпечується мінімальним ступенем деформації кожного елемента рівного 30% та ідентичності швидкостей виходу даних елементів з валків-кристалізаторів.

Експериментальним шляхом, вперше визначено вплив параметрів холодної прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом з алюмінієвих сплавів EN AW-1050 і EN AW-6082 на гладкій бочці на можливість одержання

різних показників механічних властивостей по ширині готової штаби. Визначено, що максимальний приріст показника межі плинності в розмірі 12% для сплаву EN AW-6082 та 35% для сплаву EN AW-1050 можна отримати при істинній деформації товстих елементів профілю 0,109 і 0,165, відповідно. Для одержання максимального приросту межі міцності в розмірі 15,9% для сплаву EN AW-6082 та 20% для EN AW-1050 необхідно щоб товстий елемент профільованої штаби зазнав пластичної деформації, а показник істинної деформації становив 0,322 та 0,234, відповідно. Встановлено, що максимальний приріст показника твердості, який можна отримати при холодній прокатці на гладкій бочці, для сплаву EN AW-6082 становить 11,5%, а для сплаву EN AW-1050 - 40%. Даний приріст твердості можна отримати при істинній деформації товстого елемента 0,232 для сплаву EN AW-6082 та 0,326 для EN AW-1050. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив зробити висновок, що для досягнення одночасного максимального приросту показників механічних властивостей в готовій плоскій штабі різниця між товщиною товстого та тонкого елемента попередньо профільованої штаби, отриманої валковим розливом-прокаткою, повинна становити 0,4...0,6 мм.

Шляхом холодної прокатки на гладкій бочці вперше отримані залежності розміру дефекту, який утворюється при прокатці в області сполучення товстого та тонкого елемента профілю штаби, від величини кута сполучення даних елементів. Даний кут сполучення визначається кутом бокової кромки профілюючої стрічки, що використовується в розробленому пристрої валкового розливу-прокатки профільованих штаб. Встановлено, що розмір дефекту в області сполучення елементів профілю штаби, який утворюється при прокатці профільованих штаб на гладкій бочці, збільшується від 0 мкм до 130 мкм при зменшенні кута сполучення цих елементів з 137° до 90°. Визначено, що величина даного кута при валковому розливі-прокатці повинна становити щонайменше 137°, оскільки при цьому значенні кута нахилу бокової кромки профілюючої стрічки дефект в області сполучення елементів готової

профільованої штаби, при деформації товстого елемента і відсутності деформації тонкого елемента під час холодної прокатки, не утворюється.

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

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 thesis focuses on the development of new production method of strips with profiled cross-section by twin-roll casting and investigations of temperature-deformation conditions of the profiled aluminum strips formation and development of recommendations for the practical implementation of energy-efficient production processes for profiled strips and flat strips with heterogeneous mechanical properties production.

The conducted analysis of the current state of the question regarding the using and methods of strips production with variable mechanical properties along the width and strips with variable profile geometry in the longitudinal and transverse directions made it possible to conclude that there is an acute necessity for developing a new manufacturing process for producing strips with variable characteristics in width. As a basis of the new process, technology of direct strips manufacturing from the melt in twin-roll caster was selected. This technology has numerous advantages. The main ones are the small amount of harmful emissions into the atmosphere, which according

to the literature data for CO₂ is about 25 kg/t of product, and high energy efficiency in comparison with other technologies due to the decreasing of the intermediate technological operations numbers in thin strips manufacturing process.

Existing technology solution for the production strips with profiled cross-section by twin-roll casting using profiled by applying an additional layer of nickel rolls-crystallizers cannot be implemented in industry because the working surface of the rolls like this has low durability and high profiling process costs.

Based on the above, a new method of producing strips with profiled cross-section on twin-roll casting unit was developed within the framework of the thesis. For the practical implementation of the developed method the original patented device for twin-roll casting of profiled strips was designed and produced. The feature of the developed device is that the profiling of the working surface of the rolls-crystallizers is carried out by the usage of an endless profiling steel strip. As part of the testing of the proposed method and device for profiled strips twin-roll casting the experimental twin-roll casting of profiled strip of aluminum alloy EN AW-1050 with a thickness of thick-thin-thick elements of strip profile 2,7mm...2,2mm...2,7mm was carried out, which, according to research results, showed their conformity to the requirements of the German standard DIN EN 485-2: 2009-01.

By inverse analysis of the known experimental data together with the results of the theoretical calculations, the effect of the thickness of the strips of aluminum alloy EN AW-6082 on the heat transfer coefficient at the metal-roll boundary was determined. The analysis of the data allowed to determine the value of the heat transfer coefficient at the metal-roll boundary at twin-roll casting of aluminum alloys, which for strips thickness 2 mm is 17800 W/(m²·K), for strips thickness 3 mm - 15000 W/(m²·K) and for strips thickness 4 mm - 13100 W/(m²·K). Obtained values of the heat transfer coefficients allowed to evolve understanding of the thermal contact interaction of the tool and the strip which being formed, on example of twin-roll casting of aluminum alloy EN AW-6082 and, subsequently, to improve accuracy of the mathematical modeling of twin-roll casting process.

In order to analyze the influence of such twin-roll casting technological parameters as liquid metal temperature, length of solidification-deformation zone, twin-roll casting speed and thickness of strips profile elements on the temperature-deformation conditions of formation and on the profiled strip elements speed parameters, a mathematical model of the process in the finite-element environment Ansys Flotran was developed. The adequacy of the created model was checked by comparing the experimental and theoretical data regarding to the strips profile elements average temperature. Relative error of the average metal temperature modeling for the thick element of the profiled strip was 4% and for the thin element - 12,3%.

Using the developed mathematical model, the theoretical analysis of the twin-roll casting of profiled strips was carried out, and for the first time, the influence of process technological parameters on the conditions of plastic deformation zone formation with the specified heat transfer coefficients at the metal-roll boundary at the production process of aluminum strips with profiled cross-section was defined. The theoretical analysis of the influence of technological parameters was performed on the example of a simple strip profile with thickness of a thick and thin element of 1,5 mm and 1,0 mm.

It was defined that the increasing of twin-roll casting speed in the range of 3,25...5,56 m / min, with constancy of other technological parameters, reduces normal strain of the thick and thin element of the profiled strip by 25% and 10%, respectively, and the difference between the absolute values of the normal strain of these elements of the profiled strip is 5,75...13%. The speed of the strip profile elements, under given conditions and independent consideration also increases and the absolute difference between the speeds is 0,01...0,14 m / min.

The character of the influence of increasing melt temperature from 933 K to 973 K was theoretically defined with the constancy of other technological parameters, which leads to decreasing of normal strain of the thick and thin element by 8% and 10%, respectively. At the same time, the absolute difference between the normal strains of the elements is 4,98...6,65%. Under these conditions, the speed of

thick and thin element of profiled strip, with their independent consideration, decreases and the absolute difference is about 0,003...0,09 m / min.

By theoretical analysis it has been determined that increasing of the solidification-deformation zone length from 25 mm to 60 mm, with the constant values of other technological parameters, leads to an increasing of normal strain of the thick element of the strip by 61%, and thin one - by 40%, and increasing of these elements outlet speed. The difference between the absolute values of the normal strains of the strip thick and thin elements, under the given conditions, is in the range of 3...10,4%, and the absolute difference between the speeds of these elements is in the range from 0,09 m/min to 0 m/min. The similarity of the outlet speeds of the profiled strips elements, which, in its turn, guarantees the absence of tensile stresses in the junction area of the profiled strip elements with different thicknesses, is achieved with a length of the solidification-deformation zone of 60 mm.

It has been theoretically determined that the increasing of the thickness of thick element of profiled strip from 1 to 3,5 mm and a thin one - from 0,5 mm to 3 mm leads to decreasing of the normal strains of these profile elements at 2,28 and 2,5 times, respectively. At the same time, the outlet speed of the thick and thin element of the profiled strip, at their independent consideration, decreases and the absolute difference between the corresponding values is 0,04...0,11 m/min.

Based on the obtained theoretical data of the influence nature of twin-roll casting technological parameters the method of determining the optimal values of these parameters has been developed for obtaining high quality profiled strips, which is provided by minimum normal strain of each element equal to 30%, and the identity of the output speeds of the elements.

Experimentally for the first time the influence of cold rolling parameters of strips with profiled cross-section of aluminum alloys EN AW-1050 and EN AW-6082 in plain rolls for the possibility of obtaining various mechanical properties along the width of the finished strips was determined. It has been determined that the maximal increasing of the yield strength value by 12% for the EN AW-6082 alloy and 35% for the EN AW-1050 alloy can be obtained with true strain of the thick

elements of the profile 0,109 and 0,165, respectively. To obtain a maximum increasing of tensile strength by 15,9% for the EN AW-6082 alloy and 20% for EN AW-1050, it is necessary that the thick element of profiled strip subjected plastic deformation, and the true strain value was 0,322 and 0,234, respectively. It is established that the maximum increase of the hardness value, which can be obtained by cold rolling in plain barrel, for the alloy EN AW-6082 is 11,5%, and for the EN AW-1050 alloy - 40%. This hardness increase can be obtained with the true strain of the thick element 0,232 for the EN AW-6082 alloy and 0,326 for EN AW-1050.

The analysis of the obtained experimental data allowed to conclude that in order to achieve maximum increasing of all mechanical properties at once in the finished flat strips, the difference between the thickness of the thick and thin element of the pre-profiled strip, obtained by twin-roll casting, should be 0,4...0,6 mm.

By cold rolling in the plain rolls, for the first time, it was obtained the dependencies of the defect size, which formed during rolling process in the connection area of the thick and thin element of the strip profile, from the value of these elements connection angle. This connection angle corresponds to the angle of the profiling strip side edge, which is used in the designed device for twin-roll casting of profiled strips. It was established that the size of the defect in the connection area of the elements of the strip profile, which formed during rolling process of profiled strips in the plain rolls, with reduction of the connection angle of these elements from 137° to 90° increases from 0 μm to 130 μm . It was determined that the value of this angle at twin-roll casting must be at least 137° , since at this value of the side edge angle of the profiling strip there are no defect in the connection area of the elements of the finished profiled strip at deformation of the thick element and without deformation of the thin element during cold rolling.

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

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. - DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-1098. (Scopus)

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

5. Бондаренко С. В. Моделирование процесса валковой разливки-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. Головкин // 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	24
1.1 Способи виготовлення штаб зі змінними характеристиками.....	24
1.2 Технологія валкового розливу-прокатки та її використання	29
1.3 Методи дослідження валкового розливу-прокатки.....	37
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ ШТАБ З ПРОФІЛЬОВАНИМ ПОПЕРЕЧНИМ ПЕРЕРІЗОМ	51
2.1 Математичне моделювання процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб.....	54
2.2 Експериментальні дослідження процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб.....	59
2.2.1 Пристрій для профілювання гладких валків-кристалізаторів.....	59
2.2.2 Експериментальна установка валкового розливу-прокатки, яка була використана для виготовлення профільованих штаб	64
2.2.3 Обладнання, використане при проведенні експериментів з виготовлення плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями ..	66
Висновки до розділу 2	67
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ НА ЯКІСТЬ ПРОФІЛЬОВАНИХ ШТАБ	68
3.1 Визначення значень коефіцієнтів тепловіддачі при валковому розливі-прокатці штаб різної товщини за допомогою інверсного аналізу	69
3.2 Аналіз впливу швидкості валкового розливу-прокатки на закономірності формування профільованих штаб з розплаву.....	73
3.3 Аналіз впливу температури розплаву на закономірності формування профільованих штаб з розплаву.....	83

3.4 Аналіз впливу довжини зони кристалізації-деформації на закономірності формування профільованих штаб з розплаву.....	90
3.5 Аналіз впливу товщини елементів профільованої штаби на закономірності їх формування.....	96
Висновки до розділу 3	102
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	106
4.1 Валковий розлив-прокатка профільованих штаб	106
4.2 Вплив параметрів холодної прокатки на формування градієнту механічних властивостей у виготовлених валковим розливом-прокаткою штабах з профільованим поперечним перерізом.....	118
4.3 Вплив кута бокової кромки профілюючої стрічки пристрою для виробництва профільованих штаб на формування дефектів при послідуєчій холодній прокатці штаб з профільованим поперечним перерізом	132
Висновки до розділу 4	138
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВУ-ПРОКАТКИ ШТАБ З ПРОФІЛЬОВАНИМ ПОПЕРЕЧНИМ ПЕРЕРІЗОМ.....	141
5.1 Розробка технології виготовлення бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою.....	141
5.2 Розробка методу розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом.	145
5.3 Приклад розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом товщиною 1,5 мм × 1,0 мм × 1,5 мм	148
Висновки до розділу 5	151
ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТКИ.....	170

ВСТУП

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 енергозощаджувальними, 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 визначати 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 (профілюючої 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 методику 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): [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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Способи виготовлення штаб зі змінними характеристиками

В сучасному світі в різних сферах життєдіяльності людини постійно відбуваються зміни та з'являються нові тенденції. Така ж ситуація й у сфері виробничих процесів. Так, у зв'язку зі збільшенням кількості промислових підприємств, одним з основних й головних на сьогоднішній день напрямів є охорона навколишнього середовища. Найбільш явно це простежується у хімічній, металургійній та автомобілебудівній промисловості. Одним з основних шляхів зниження об'ємів вихлопних газів, що виробляють двигуни внутрішнього згоряння, є зменшення маси автомобіля, що також приводить до зниження кількості споживаного палива та значного зниження кількості шкідливих викидів в атмосферу. Найчастіше це досягається шляхом заміни масивних деталей на елементи менших габаритів та меншої маси, які виготовлені з більш високоміцних матеріалів. Останнє десятиріччя також ознаменувалося спробами заміни максимально можливої кількості сталевих деталей кузова автомобіля на більш легкі, виготовлені, наприклад, з алюмінію чи його сплавів. Наприклад, деякими крупними автомобілебудівними компаніями, які виготовляють автомобілі під торговими марками Audi, Jaguar, BMW та інші, було випущено як прототипи, так і серійні автомобілі, з кузовом що виготовлений повністю з конструкційних алюмінієвих сплавів. Алюмінієві сплави також використовуються і в інших галузях промисловості, таких як будівництво, машинобудування, авіабудування та інші. Про це свідчать й зростаючі темпи росту кількості виробленого алюмінію, котра у 2003 році становила 28 млн. т., а у 2010 році вже наблизилась до позначки 41,5 млн. т. [1-2].

Однак, заміна масивних сталевих елементів на алюмінієві не є панацеєю у зв'язку з тим, що більшість алюмінієвих сплавів поступається сталі в міцності

та жорсткості. Тому актуальними продовжують залишатися роботи з розробки нових видів виробів й матеріалів, що зможуть конкурувати з вже існуючими й дозволять зменшити масу конструкцій, при цьому не знижуючи, а в деяких випадках навіть підвищуючи їх жорсткість та міцність. Одним з видів подібної металургійної продукції, що на сьогоднішній день має велику перспективу широкого впровадження в майбутньому, є штаби з профільованим поперечним перерізом та плоскі штаби з гетерогенними властивостями, які виготовляються як зі сталей так і з різноманітних сплавів, зокрема алюмінієвих. Змінна товщина або властивості по ширині та довжині штаби дозволяють збільшити жорсткість й міцність виготовлених з цих штаб елементів конструкцій, а також локально посилити місця кріплення даних елементів.

Найбільш відомими з такого роду продукції є чотири види штаб: Tailor Welded Blank, Patchwork Blanks, Tailor Rolled Blanks и Tailor Heat Treated Blanks (рис. 1.1). Їх класифікація представлена за способом виробництва. Таким чином [3-6]:

- Patchwork Blanks (PB) – різновид штаб, що виготовляються шляхом приварювання однієї штаби до поверхні іншої з метою локального посилення. При цьому штаби можуть бути як з різних матеріалів, так і з одного;
- Tailor Welded Blank (TWB) – ці штаби за способом виробництва схожі на Patchwork blanks, однак у випадку TWB зварювання кількох штаб з різних матеріалів та/або різної товщини виконується встик;
- Tailor Rolled Blanks (TRB) – штаби з профільованим поперечним перерізом, що виготовляються шляхом прокатки;
- Tailor Heat Treated Blanks (THTB) – штаби постійної товщини, які мають різні механічні властивості на різних ділянках, що досягається завдяки локальному застосуванню різних режимів термообробки.

Через те, що PB та TWB схожі за способом виробництва – дані штаби виготовляються шляхом зварювання – недоліки в них також однакові. Головним їх недоліком є зміна властивостей матеріалу штаб в області зварного

шва. Ця зміна властивостей викликана локальним нагріванням металу на ділянці, що прилягає до зони оплавлення і послідуєчим швидким охолодженням за рахунок вирівнювання температури в конструкції шляхом теплопровідності. Можна сказати, що виготовлення штаб, які відносяться до даних двох груп, досить добре вивчено у випадку використання сталей. Однак при спробі виготовлення профільованих штаб за даними технологіями з алюмінію та його сплавів явно проявляється погіршення показників міцності в безпосередній близькості до зварного шва [3, 7]. Дана особливість викликана впливом високої температури під час виконання зварювання, що може призвести згодом до їх руйнування при використанні їх в якості готової продукції або напівфабрикату [7].

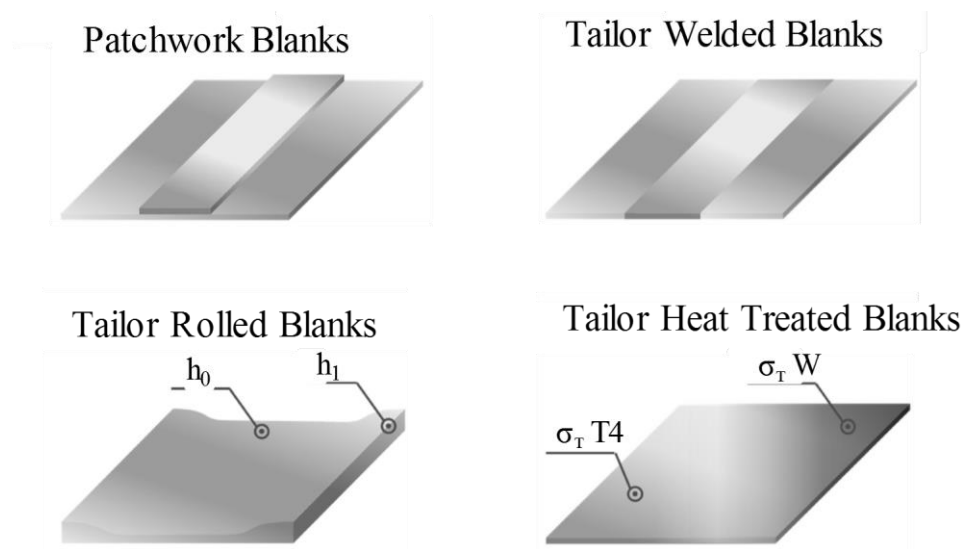


Рис. 1.1. Класифікація штаб з різними механічними властивостями за способом виробництва [3]

TRB умовно можна розділити на два види штаб: перші – штаби зі змінною товщиною по довжині, другі – штаби зі змінною товщиною по ширині. В першому випадку, при прокатці виконується контрольована зміна зазору між валками чистової кліті (рис.1.2). Використання процесу прокатки для виготовлення TRB дозволяє використовувати всі переваги даного процесу, а саме високу продуктивність та точність геометричних розмірів. З цього, однак,

впливають й головні недоліки даного способу виробництва, такі як висока вартість обладнання, складність налаштування прокатного стану та висока енергоємність процесу.

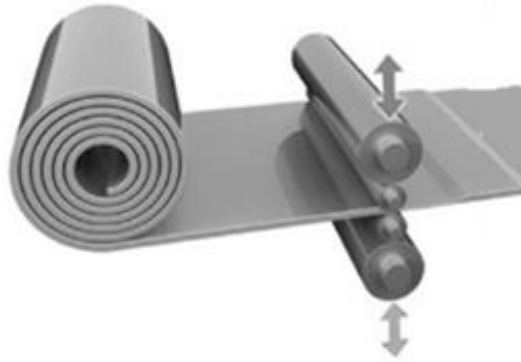


Рис. 1.2. Схема процесу виготовлення Tailor Rolled Blanks зі змінною по довжині товщиною [3]

Технологія виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з'явилася не так давно. Такі штаби виготовляють шляхом інкрементальної холодної прокатки штаб у профілюючих роликах (рис.1.3). Головним недоліком даної технології є складність виготовлення штаб без утворення таких дефектів як тріщини, напливи та ін. Це викликано появою розтягуючих напружень, що виникають через різні коефіцієнти витяжки по елементах штаби при прокатці. Для зменшення впливу різниці коефіцієнтів витяжки та забезпечення високої якості штаб збільшують кількість роликів та кількість проходів, що призводить до збільшення тривалості виробничого циклу [8, 9]. Саме тому, дана технологія має мале розповсюдження в промисловості.

До четвертої групи, як вже вказувалось раніше, відносяться плоскі штаби з різними механічними властивостями на різних ділянках. Дані штаби є найбільш перспективними на сьогоднішній день з точки зору можливості їх використання в автомобілебудівній промисловості. Це викликано можливістю забезпечення кращої пластичності на необхідних локальних ділянках виробу, що дозволяє забезпечити кращу послідовну оброблюваність (рис. 1.4) [10]. З

рисунка видно, що при використанні ТНТВ оброблюваність металу при штамповці значно краще, ніж при використанні звичайних листів.

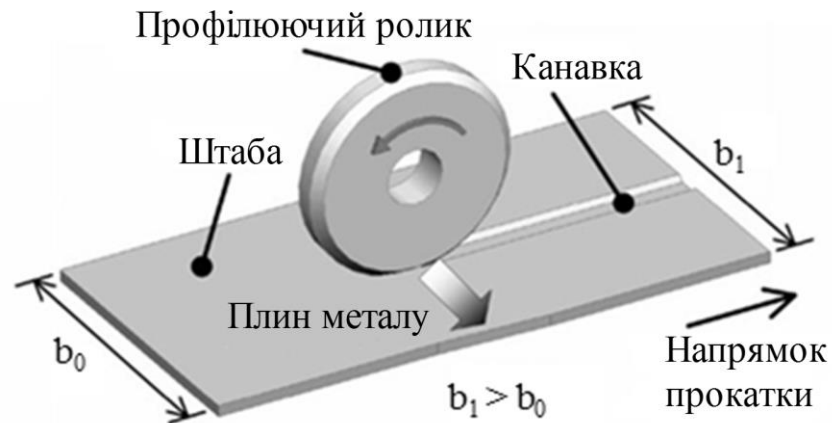


Рис. 1.3. Схема процесу виготовлення Tailor Rolled Blanks з профільованим поперечним перерізом [3]

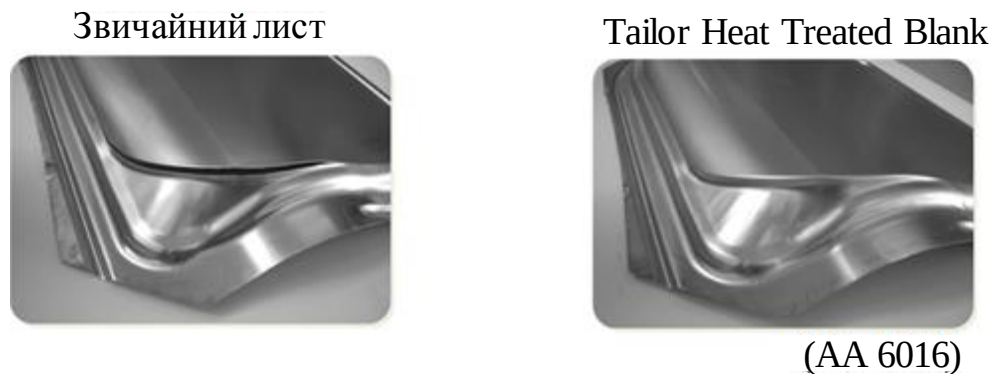


Рис. 1.4. Елемент кузова автомобіля після штамповки, виготовлений зі звичайного листа з алюмінієвого сплаву AA6016 та Tailor Heat Treated Blank [3]

Технологія виробництва ТНТВ полягає в локальному застосуванні різних режимів термообробки для різних ділянок штаб та листів. Однак, не дивлячись на високу затребуваність, дані штаби не знаходять широкого промислового використання. Останнє викликане високою вартістю та складністю виготовлення обладнання необхідного для виготовлення ТНТВ, а саме для виконання локальної термообробки.

Також в закордонних джерелах наводиться інформація про новий спосіб виробництва штаб постійної товщини з різними механічними властивостями, не включений до сих пір в вищезгадану класифікацію. За основу даного способу взято технологію рівноканального кутового пресування [11, 12]. Однак у даного способу виробництва існує ряд недоліків, основним з яких є вкрай обмежені розміри готового виробу по його довжині та ширині, а також велика кількість операцій з підготовки та низька швидкість реалізації. Підводячи підсумок можна сказати, що існуючі технологічні рішення з виготовлення штаб зі змінними характеристиками по довжині та ширині мають загальний недолік, а саме високі енергетичні витрати на повний технологічний цикл починаючи з отримання розплаву і закінчуючи готовою штабою, що відноситься до групи Tailor Blanks

1.2 Технологія валкового розливу-прокатки та її використання

Поряд з бажанням використовувати більш легкі та міцні матеріали, в світі відбувається постійне посилення вимог до екологічної чистоти виробництв при одночасному зменшенні собівартості виробничих процесів.

Однією з технологій, які дозволяють поєднати в собі відносно низьку собівартість металургійного виробничого процесу, та, відповідно, знизити ціну продукції – штаб, з високою екологічністю процесу є технологія валкового розливу-прокатки [13, 14]. На практиці, в умовах металургійних підприємств, були реалізовані вимірювання кількості шкідливих викидів для технології виготовлення гарячекатаної штаби із застосуванням машин безперервного лиття заготовки й агрегатів з кристалізаторами валкового типу, після чого отримані дані були перераховані на тону продукції. В цілому, отримані результати засвідчили значний потенціал технології валкового розливу-прокатки з точки зору екологічної чистоти виробничого процесу завдяки зменшенню кількості викидів газів на прикладі CO_2 , NO_x та SO_2 (рис. 1.5) [15].

Технологія валкового розливу-прокатки відома ще з 1857 року. В цьому році Генрі Бесемер озвучив ідею виготовлення тонких штаб безпосередньо з розплаву з використанням кристалізатора двовалкового типу. Пізніше, у 1865 році, ця ідея була запатентована ним у вигляді конструкції машини валкового розливу-прокатки (див. рис.1.6) [16].

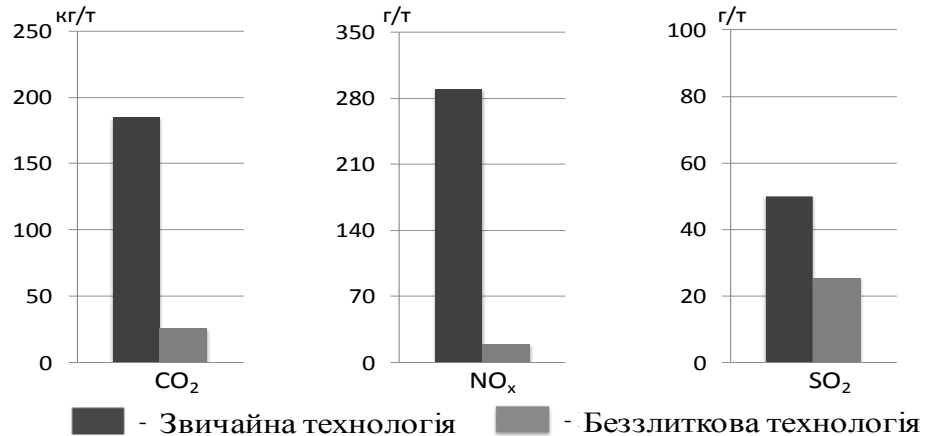


Рис. 1.5. Порівняння кількості шкідливих викидів при виробництві тонкої гарячекатаної штаби за звичайною технологією та з використанням агрегатів валкового розливу-прокатки

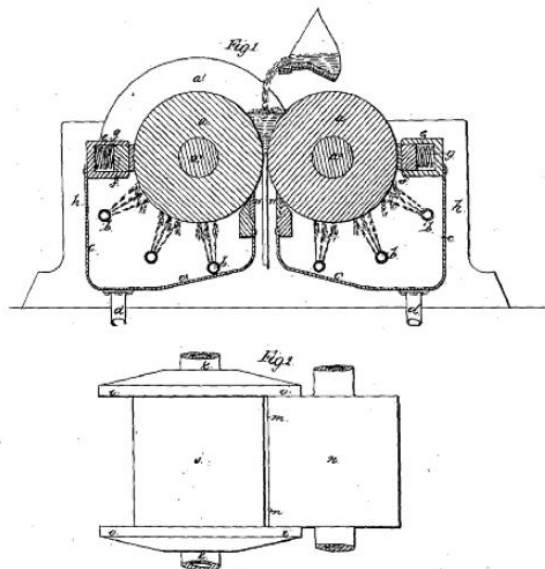


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд агрегату валкового розливу-прокатки, запатентований Генрі Бесемером у 1865 році.

Аналізуючи подальшу історію розвитку технології прямого виготовлення штаб з розплаву, усі схеми ведення процесу можна умовно розділити на три групи:

Група I – агрегати прямого виготовлення штаб з розплаву, в яких кристалізація металу проходить на стрічкових кристалізаторах різної конструкції.

Група II – агрегати валкового розливу-прокатки з одним валком-кристалізатором. На даних агрегатах процес може проходити за трьома схемами: валок-кристалізатор занурюється в розплав, розплав подається на валок-кристалізатор і валок-кристалізатор витягує закристалізовану штабу з прилеглого до нього тигля.

Група III – до цієї групи відносяться агрегати з двома валками-кристалізаторами в різноманітному виконанні; процес розливу-прокатки на цих агрегатах може вестись вертикально, горизонтально та під кутом.

У агрегатів, що відносяться до I групи, як вже зазначалося вище, однією зі складових частин є стрічковий кристалізатор. Їх також називають кристалізаторами стрічкового типу системи Хазелетт. Дані агрегати є більш успішним рішенням в порівнянні з одновалковими кристалізаторами завдяки більшій довжині зони кристалізації. Схематичне зображення такого агрегату наведено на рисунку 1.7.

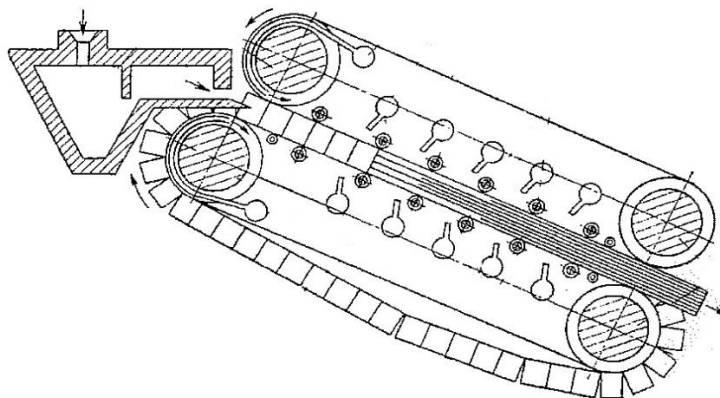


Рис. 1.7. Кристалізатор стрічкового типу системи Хазелет

В агрегатах цього типу кристалізація проходить, на відміну від валкових кристалізаторів, між двома стрічками, які постійно перебувають у русі та інтенсивно охолоджуються водою з внутрішньої сторони. Особливістю даних агрегатів є висока продуктивність в порівнянні з іншими типами кристалізаторів. Викликано це відносно високою товщиною штаб, виготовлення котрих реалізується на подібних агрегатах. Так, діапазон товщин штаб, що виготовляються на даних агрегатах, знаходиться в межах від 9 мм до 70 мм, а максимальна ширина штаби може становити 2000 мм. Однак, агрегати зі стрічковими кристалізаторами типу Хазелет мають і ряд недоліків, основними з яких є низька якість поверхні та наявність нерівномірної литої структури в штабі, що призводить до необхідності обов'язкової додаткової пластичної деформації штаби в декількох прокатних клітях. Крім того фактором, що обмежує поширення агрегатів з даним типом кристалізаторів, є низька стійкість й висока вартість сталевих стрічок, які використовуються в якості кристалізаторів.

Паралельно зі спробами реалізації процесу на агрегатах подібних наведеному в патенті Г. Бесемера, велися роботи по розробці машин з одним валком-кристалізатором [17, 18]. Приклади декотрих рішень наведені на рисунку 1.8.

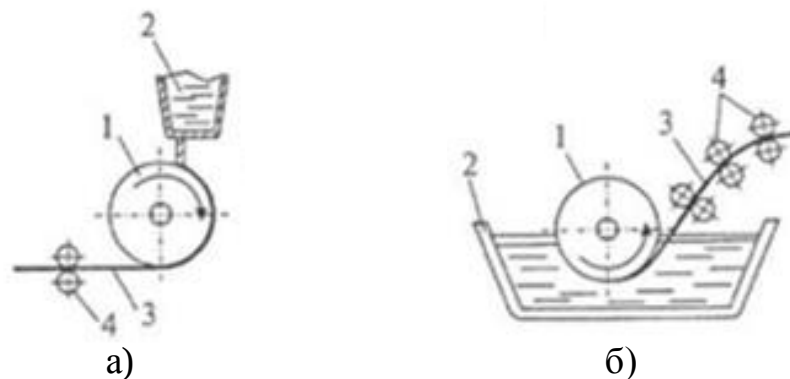


Рис. 1.8. Схематичне зображення одновалкових машин валкового розливу: а – з подачею розплаву на валок-кристалізатор, б – із зануренням валка-кристалізатора до розплаву: 1 – валок-кристалізатор; 2 – розплав; 3 – штаба; 4 – направляючі ролики

Основним недоліком, притаманним агрегатам валкового розливу з одним валком-кристалізатором, є низька якість штаб та різнотовщинність як в поперечному, так і поздовжньому напрямках. Послідуюча пластична деформація даних штаб не завжди дозволяє видалити ці дефекти, саме цьому агрегати розливу-прокатки з одним валком-кристалізатором не отримали подальшого розвитку й не знайшли поширення в промисловості.

Найбільш цікавими на сьогоднішній день є агрегати прямого виготовлення штаб з розплаву з двома валками-кристалізаторами. Дані агрегати спрямовані на виробництво тонких штаб з різноманітних сталей та сплавів. Більшість існуючих промислових агрегатів такого типу дозволяють виготовляти штаби товщиною від 1 мм до 5 мм. Існуючі агрегати валкового розливу-прокатки на практиці показали всі свої переваги, головною з яких є висока екологічність процесу, що досягається завдяки зменшенню кількості технологічних операцій з моменту отримання розплаву та до моменту виготовлення готової штаби, і, відповідно, кількості витраченої енергії (рис. 1.9). [19-21]

Крім того, агрегати з машинами валкового розливу-прокатки потребують менших виробничих площ. Середня довжина технологічної лінії із застосуванням агрегату валкового розливу-прокатки в комбінації з двома прокатними клітьми становить близько 60 м [22]. В той самий час, довжина технологічної лінії з використанням машин безперервного лиття слябів товщиною 50...200 мм з послідуною прокаткою виготовленої заготовки до необхідної товщини в чорновій та чистовій групах клітей становить більше 300-500 м. У зв'язку зі зменшенням кількості обладнання, задіяного в технологічному циклі, з'являється можливість знизити кількість задіяних в його обслуговуванні працівників та енерговитрати на виробничий процес. У сукупності це приводить до зменшення фінансових витрат, зменшення собівартості готової продукції та підвищення її конкурентоспроможності на вітчизняному та світовому ринках, а також дає поштовх до подальшого розвитку даної технології [22-34].

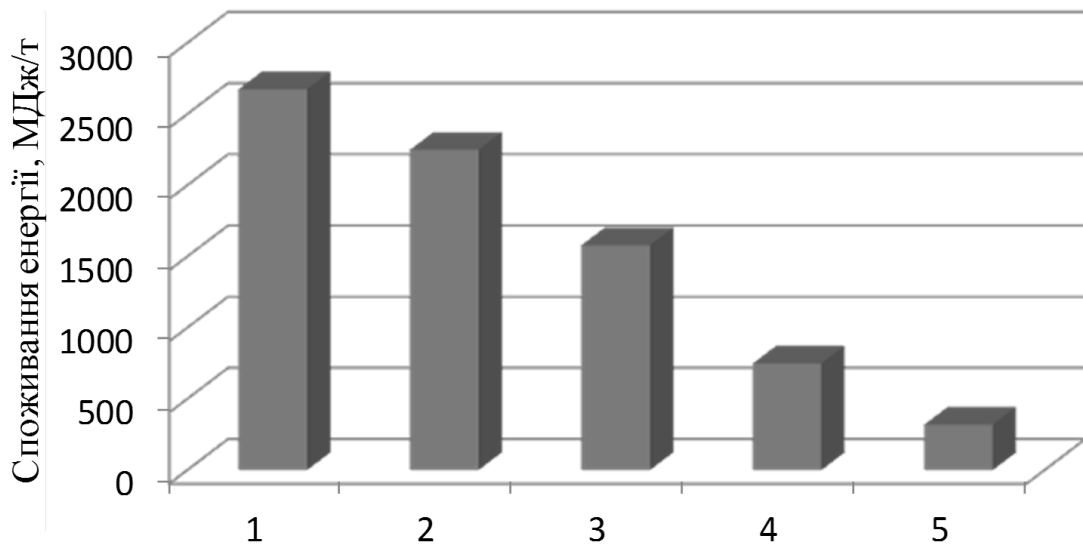


Рис. 1.9. Витрати енергії (МДж/т) при виробництві тонкого листа за різними технологічними схемами: 1 – при розливі в злитки з послідуною прокаткою; 2 – при розлиі на слябовій МБЛЗ з охолодженням злитків до нормальної температури та послідуною прокатці; 3 – при розливі на слябовій МБЛЗ та передачі гарячих слябів для послідуною прокатки; 4 – при безперервному розливі та прокатці на тонкослябовій МБЛЗ; 5 – при розливі на валкових ливарно-прокатних комплексах та холодній прокатці [19]

У всьому світі діє більше 1000 машин валкового розливу-прокатки. Найбільш відомими промисловими агрегатами для виробництва сталевих листів є проекти Eurostrip та Castrip. Промислова версія установки Castrip введена в експлуатацію компанією Castrip LLC у 2002 году в США. Загальна довжина агрегату становить 60 м. Діаметр валків-кристалізаторів становить 500 мм. За існуючими даними мінімальна товщина листів, що можуть виготовлятися на даному агрегаті, становить 0,7 мм [26,27]. Максимальна ширина листів становить 2000 мм. Продуктивність даного агрегату становить 500 тис.т./рік.

Установка Eurostrip схожа на установку Castrip й знаходиться в м.Крефільд (ФРН). Товщина штаб, можливих до виробництва на даному агрегаті, знаходиться в діапазоні від 1,5 мм до 4,5 мм [22]. Ширина штаб може

варіюватися від 1100 мм до 1450 мм. Головною відмінністю установки проекту Eurostrip є більший діаметр валків-кристалізаторів, який становить 1500 мм. Швидкість валкового розливу-прокатки даного агрегату досягає 150 м/хв. Мінімальна продуктивність агрегату становить 400-500 тис.т./рік [28, 29].

Технологія валкового розливу-прокатки добре зарекомендувала себе при виробництві плоских тонких штаб з різних сталей, алюмінієвих та магнієвих сплавів [5, 35-41]. Наступним кроком розвитку даної технології є розповсюдження способу виготовлення штаб безпосередньо з розплаву на виробництво штаб з профільованим поперечним перерізом, так званих Tailor Blanks, описаних вище в розділі 1.1, що є одним з перспективних видів металургійної продукції. В останнє десятиріччя було опубліковано декілька праць, що присвячені питанню виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом на агрегатах валкового розливу-прокатки. Ці роботи велись співробітниками Рейн-Вестфальської вищої технічної школи (м. Ахен, ФРН). Ними було запропоновано використовувати для виконання профілювання поверхні валків-кристалізаторів нікелеве покриття змінної товщини. Шар нікелю наносився на поверхню валків-кристалізаторів, після чого в ході механічної обробки поверхні йому надавався профіль необхідної форми (рис. 1.10-а). Зовнішній вид поверхні спрофільованого валка-кристалізатора наведено на рисунку 1.10-б [42].

В перших експериментах авторами була показана можливість виготовлення клиновидних по ширині штаб на агрегаті з двовалковим кристалізатором. Потім була проведена серія експериментів з виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом та використанням описаного раніше інструмента (див. рис.1.10). В результаті експериментів була отримана штаба з корозійностійкої сталі 1.4301, вітчизняним аналогом якої є сталь 08X18H10. В наведених даних вказується, що максимальна різниця товщин між тонким та товстим елементом штаби становила 1 мм (див. рис. 1.11) [42-47].

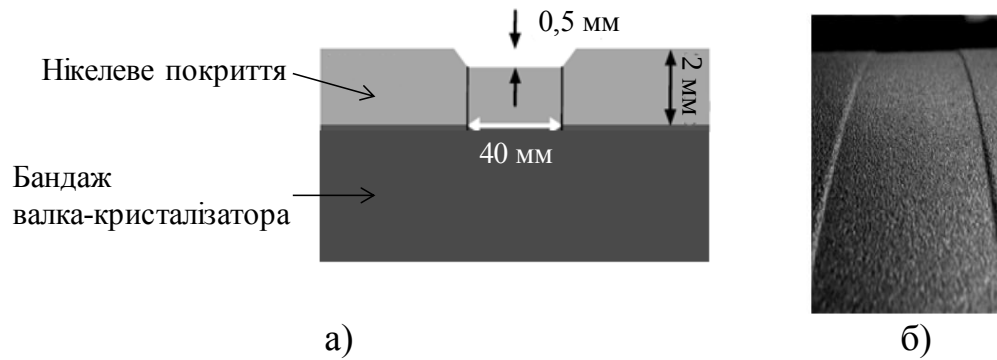


Рис. 1.10. Спосіб профілювання валків-кристалізаторів агрегатів валкового розливу-прокатки (а) та фрагмент профільованого валка-кристалізатора (б)

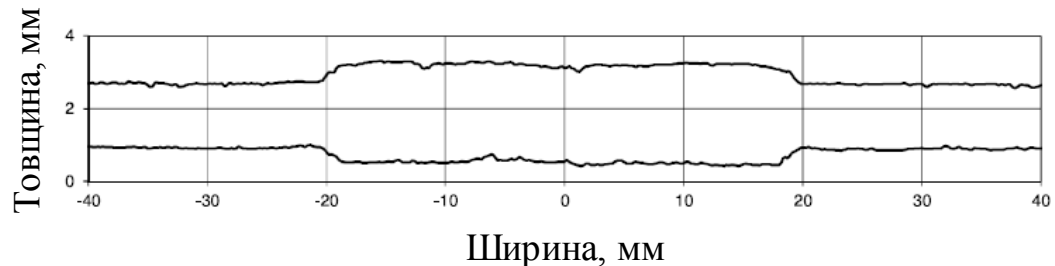


Рис. 1.11. Поперечний переріз профільованої штаби, що була виготовлена валковим розливом-прокаткою

Слід зазначити, що при більш детальному розгляді запропонованого способу виробництва профільованих штаб на агрегатах валкового розливу-прокатки можна виявити ряд недоліків, які не сприяють подальшому розвитку даної технології. По-перше, профілювання валків-кристалізаторів, виконане за запропонованою схемою, вимагає наявності індивідуальної пари профільованих валків-кристалізаторів для кожного типорозміру профільованої штаби, тому виробнику необхідно мати великий парк масивних та дорогих валків-кристалізаторів. По-друге, використання нікелю в якості матеріалу для профілювання валків-кристалізаторів вносить додаткові фінансові й часові витрати у зв'язку з відносно високою вартістю операції нанесення покриття та тривалістю самого процесу профілювання. Крім того, профілювання, виконане за таким способом, має схильність до швидкого зносу, що викликаний різницею

окружних швидкостей на різних ділянках профільованих валків-кристалізаторів.

1.3 Методи дослідження валкового розливу-прокатки

Технологія прямого виготовлення штаб в валкових кристалізаторах є складною для досліджень. Це викликано суміщенням при валковому розливі-прокатці процесів кристалізації металу в просторі між валками-кристалізаторами та послідуною пластичною деформацією [48].

На якість виготовленої в ході валкового розливу-прокатки штаби впливає багато технологічних параметрів процесу. Зокрема, якість одержаної штаби безпосередньо залежить від ступеня деформації, якої вона зазнає в валковому кристалізаторі.

З літературних даних відомо, що середній мінімальний ступінь деформації, який забезпечує високу якість виготовленої штаби, а саме дрібнозернисту рекристалізовану структуру, при валковому розливі-прокатці повинен становити для сталей в районі 15% [49], а при виробництві штаб з алюмінію та його сплавів ступінь деформацій повинен знаходитись в діапазоні від 20% до 30% [50]. Слід також зазначити, що даний показник мінімально необхідного ступеня деформації може варіюватися в залежності від хімічного складу металу штаби. Однак слід врахувати те, що збільшення ступеня деформації штаби призводить до збільшення навантаження на елементи конструкції машин прямого виготовлення штаб з розплаву. Найслабшим та найвідповідальнішим елементом, на міцність якого слід звертати увагу при конструюванні агрегату й розробці технології, є валки-кристалізатори. Крім того, водоохолоджуємі зсередини бандажі валків-кристалізаторів деформуються в ході процесу, тому слід врахувати, що надмірні показники ступеня деформації штаби, й, відповідно, навантаження, які діють на валки-кристалізатори, можуть призвести до їх інтенсивного зносу [51].

З іншого боку, зменшення ступеня деформації штаби з метою зменшення навантаження на валки-кристалізатори може призвести до ситуації, в якій штаба не зазнає необхідної пластичної деформації в валках-кристалізаторах й буде мати на виході структуру литого металу. Малий ступінь деформації може призвести також до утворення різнотовщинності, яку досить складно, а в деяких випадках – неможливо, виправити.

Одним з параметрів процесу валкового розливу-прокатки, що впливає на ступінь деформації штаби, є швидкість ведення процесу, яка пов'язана зі швидкістю обертання валків-кристалізаторів.

Одна з робіт Бровмана М. Я. [49] присвячена теоретичному визначенню величини критичної та допустимої швидкості процесу прямого виготовлення штаб з розплаву в двовалкових кристалізаторах.

$$v_k = \frac{2kaR}{h(0.25h+x_0)} \quad (1.1)$$

$$v_d = \frac{1,54kaR}{h(0.33h+x_0)} \quad (1.2)$$

де v_k – критична швидкість процесу, при досягненні й перевищенні якої повна кристалізація штаби в просторі між валками-кристалізаторами не відбувається; v_d – допустима швидкість валкового розливу-прокатки, при якій досягається оптимальний ступінь деформації штаби; k – коефіцієнт аналогічний коефіцієнту кристалізації; x_0 – коефіцієнт, що визначає закономірності збільшення товщини корки злитка в початкові моменти кристалізації; h – товщина штаби на виході з валкового кристалізатора; R – радіус валка-кристалізатора; a – кут контакту валків-кристалізаторів з металом.

Дані залежності (1.1) та (1.2), наведені в роботі [49], отримані авторами тільки виходячи з геометрії осередку кристалізації-деформації при валковому

розливи-прокатці та містять в собі ряд емпіричних коефіцієнтів (k та x_0). Ці коефіцієнти приймають різні значення для різних марок сталей та сплавів, що оброблюються валковим розливом-прокаткою. З цього випливає перший недолік даних залежностей, а саме висока похибка розрахунку при невідповідності хімічного складу конкретної сталі чи сплаву до того, що використовувався при експериментальному визначенні даних коефіцієнтів. Другим недоліком є припущення, яке було зроблено в ході отримання даних залежностей, а саме, що швидкість штаби на виході з валків-кристалізаторів дорівнює швидкості валків-кристалізаторів. Крім того, дані залежності не дозволяють описати вплив інших важливих технологічних параметрів процесу, таких, як температура розплаву, температура охолоджуючої рідини та матеріал валків-кристалізаторів на ступінь деформації штаби в ході валкового розливу-прокатки.

При вивченні процесу валкового розливу-прокатки та розробці технології виготовлення різних видів продукції отримали розповсюдження натурні експерименти. Однак, через поєднання процесів кристалізації та деформації можливості для детального вивчення процесу обмежені. Так, відомо лише декілька робіт присвячених експериментальному визначенню впливу параметрів процесу валкового розливу-прокатки на довжину зони деформації.

Bercovici S. J., в роботі [52], описав спосіб при якому в ході процесу в зону кристалізації-деформації занурювалися термоелементи й тонкі штифти. В ході процесу валкового розливу-прокатки дані штифти контролюємо занурювалися на різну глибину в зону кристалізації-деформації й фіксувалася швидкість їх переміщення. Різка зміна швидкості руху занурених штифтів відповідала моменту охоплення їх закристалізованим металом й втягуванням їх разом із штабою, яка формується, в зону деформації, що свідчило про повну кристалізацію металу при даному положенні штифта в зоні кристалізації-деформації. Запропонований метод дозволяє практично миттєво отримувати дані, щодо довжини зони деформації. Однак його практична реалізація ускладнена у зв'язку з відсутністю прямого доступу до поверхні зони

кристалізації-деформації в ході процесу й необхідністю наявності спеціального вимірювального обладнання для контрольованого руху штифтів та вимірювання швидкості їх переміщення.

Іншими роботами, в яких пропонується альтернативний метод вивчення впливу параметрів процесу валкового розливу-прокатки на довжину зони деформації, є роботи Гридін О. Ю. [53, 54]. Для визначення довжини зони деформації в них пропонується виконувати контрольовану зупинку валків-кристалізаторів після досягнення сталої стадії процесу. В подальшому, з матеріалу, який залишився в зоні кристалізації-деформації між валками-кристалізаторами після їх зупинки, відбирався зразок й проводився аналіз його мікроструктури. Початок зони деформації пропонується співвідносити з положенням в клиновидному зразку перших рекристалізованих зерен. Запропонований метод, однак, також має свій недолік, а саме неможливість оперативного одержання експериментальних даних, що пов'язано з необхідністю металографічної підготовки матеріалу. Оскільки експериментальні дослідження не дозволяють проводити кількісне вивчення валкового розливу-прокатки в широкому діапазоні варійованих технологічних параметрів процесу, в комплексі з ним широко застосовують математичне моделювання. В даному випадку, результати експериментальних досліджень використовували для перевірки адекватності моделі та внесення в неї необхідних виправлень.

Математичне моделювання за допомогою чисельних методів на сьогодні є найбільш поширеним рішенням для дослідження різноманітних процесів, в тому числі й валкового розливу-прокатки сталей та різних сплавів легких металів. В сучасному світі існує ряд програм, які дозволяють вивчати вплив різних параметрів процесу валкового розливу-прокатки розрахунковим шляхом за допомогою методу скінченних елементів.

Однією з таких програм є комерційний програмний комплекс Deform. Так, в роботі Y.-S. Lee [55] опубліковані результати досліджень впливу різних параметрів валкового розливу-прокатки на силу, що діє на валки

кристалізатори. Дана робота присвячена виготовленню штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-7075. В ході моделювання автори варіювали такі технологічні параметри валкового розливу-прокатки, як швидкість обертання валків-кристалізаторів, температура розплаву, а також коефіцієнт тепловіддачі на межі метал-валок. Особливістю роботи є також те, що в ній розглядалась горизонтальна схема ведення процесу. Криві сил, які отримані в даній роботі, представлені на рисунку 1.12.

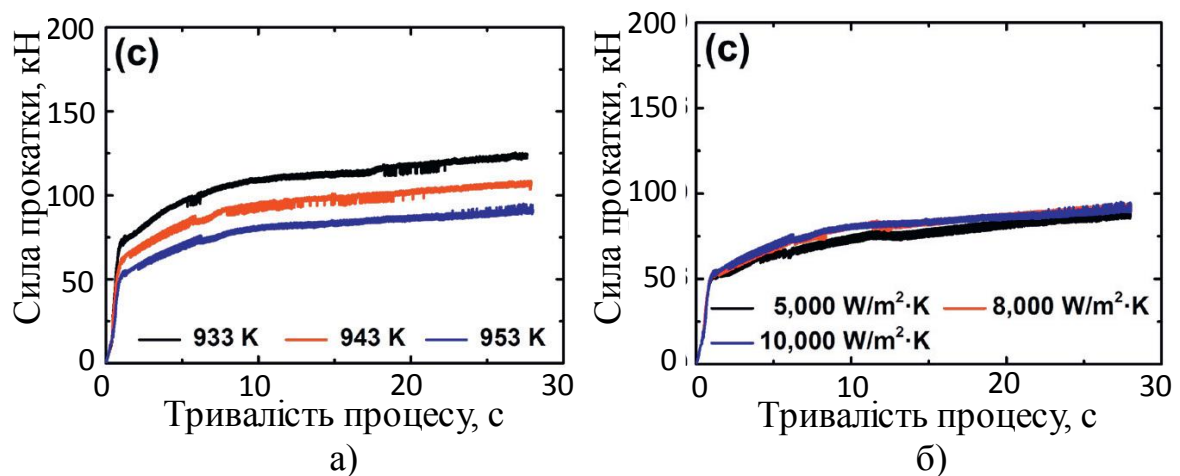


Рис. 1.12. Криві залежності сили, що діє на валки-кристалізатори в ході процесу валкового розливу-прокатки, в залежності від температури розплаву (а) та коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок (б) [55]

Результати даної роботи також підтвердили, що у валкового розливу-прокатки є початкова стадія та стала стадія процесу, про що свідчить низький рівень сил, які діють на валки до початку сталої стадії процесу.

Отримані в даній роботі результати показали, що зі зростанням температури розплаву, а також при збільшенні швидкості ведення процесу, сила, яка діє на валки-кристалізатори в ході процесу, знижується, а температура штаби на виході з валкового кристалізатора підвищується. Дані результати свідчать про зменшення довжини зони деформації і, відповідно, зменшення ступеня деформації штаби в ході процесу при відповідній зміні параметрів, що досліджуються. Також з результатів даної роботи видно, що коефіцієнт

тепловіддачі на межі метал-валок має незначний вплив на умови кристалізації-деформації, про що свідчить незначне відхилення розрахункової сили в ході ведення процесу.

Питанню дослідження сили, що діє на валки-кристалізатори, та напружень, які виникають в інструменті, присвячено багато робіт. Наприклад, в роботі [56] було проведено дослідження впливу швидкості валкового розливу-прокатки та температури розплаву при виробництві штаб зі сплаву Al-33Cu. Автор показав, що при збільшенні даних параметрів довжина зони деформації зменшується, а при критичних значеннях швидкості обертання валків точка повної кристалізації штаби може вийти за межі перерізу виходу штаби з валків-кристалізаторів, що негативно позначиться на якості виготовлених штаб.

В інших роботах, присвячених питанню впливу параметрів ведення процесу розливу-прокатки плоских штаб, представлені дані, схожі з описаними вище. Так, в роботі [57] подібні дослідження проводилися за допомогою скінченно-елементного середовища ANSYS для алюмінієвого сплаву EN AW-1100. Авторами було визначено, що сила прокатки зростає при збільшенні коефіцієнта тепловіддачі, а також при збільшенні швидкості ведення процесу. Про це свідчать наведені криві залежності сили прокатки від швидкості ведення процесу та коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок (рис. 1.13). В роботі [58] за допомогою скінченно-елементного середовища ANSYS, були також проведені дослідження впливу параметрів процесу на довжину зони деформації і, як наслідок, силу прокатки. Дослідження виконувалися з метою визначення впливу ступеня деформації на вірогідність утворення тріщин на поверхні штаби в ході ведення процесу. Дані теоретичні дослідження, виконані для випадку валкового розливу-прокатки магнієвого сплаву AZ31, також показали, що сила прокатки повинна постійно контролюватися в ході ведення процесу. Саме це повинно дозволити покращити якість штаб та уникнути дефектоутворення, а саме утворення тріщин на їх поверхні. Також, завдяки цій роботі, можна зробити висновок про те, що деформаційні напруження при валковому розливі-прокатці мають більший вплив на якість штаб, ніж термічні напруження. Окрім

цих робіт також існують роботи присвячені аналізу плинності металу в просторі між валка-кристалізаторами [59].

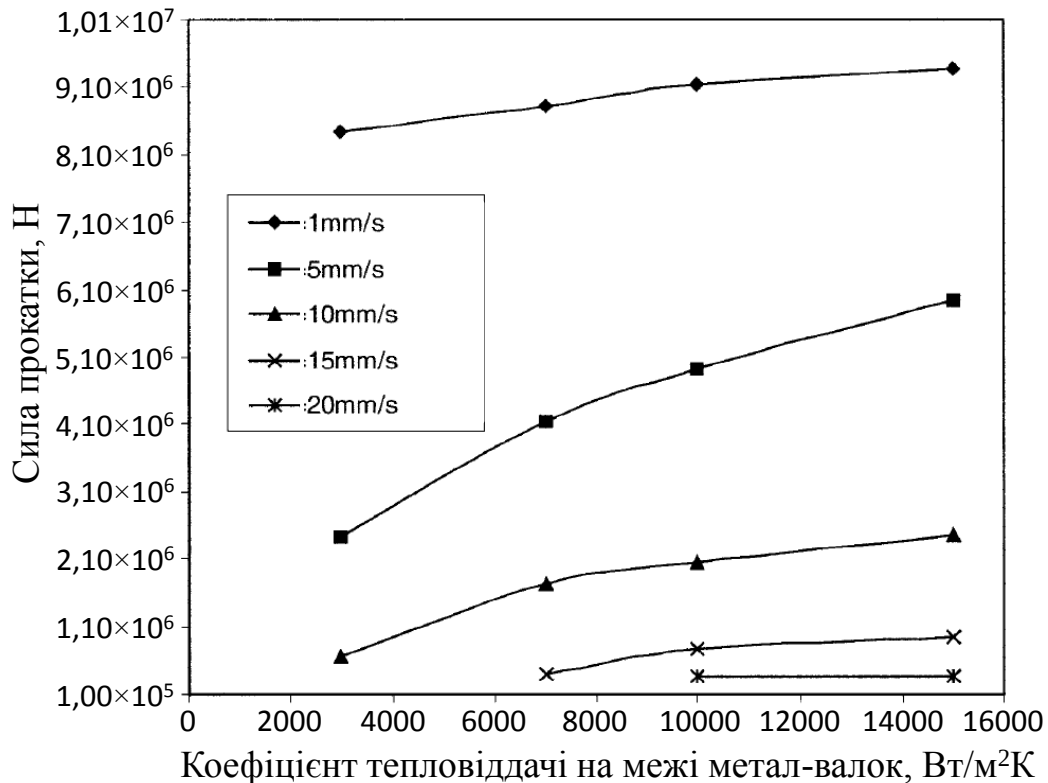


Рис. 1.13. Криві залежності сили прокатки від коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок та швидкості ведення процесу [57]

Другим напрямом використання математичного моделювання та скінченно-елементних програмних пакетів є дослідження впливу технологічних параметрів валкового розливу-прокатки безпосередньо на довжину зони деформації та ступінь деформації штаби, яка формується в двовалковому кристалізаторі. Саме ці параметри визначають якість виготовленої штаби. Також, по них можна робити висновки про величину деформуючої сили, яка навантажує валки-кристалізатори в ході процесу.

Так, в роботі [60] авторами проведено теоретичне дослідження впливу параметрів процесу валкового розливу-прокатки на температурно-деформаційні характеристики штаб, що виготовлені зі сплаву EN AW-6082. Результати чисельного моделювання показали характер впливу температури розплаву, швидкості ведення процесу та довжини зони кристалізації-деформації на

ступінь деформації штаби в валках-кристалізаторах та температуру її виходу з зони деформації. Приклад отриманих в даній роботі температурних полів та положення фронту кристалізації представлені на рисунку 1.14.

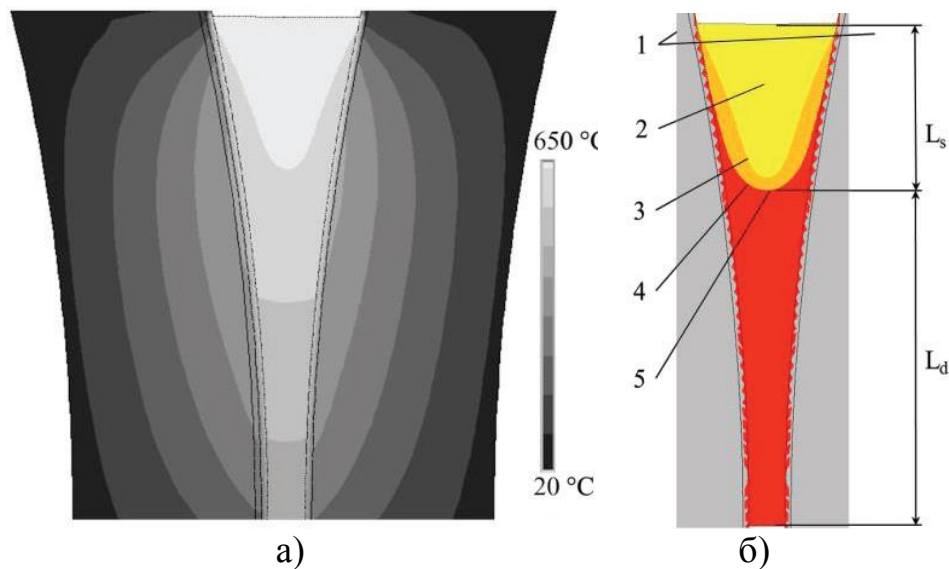


Рис. 1.14. Температурні поля (а) та форма фронту кристалізації (б), що отримані шляхом математичного моделювання: 1 – валки-кристалізатори, 2 – розплав, 3 – лінія початку кристалізації, 4 – повністю закристалізований розплав, 5 – «kissing point»; L_s - довжина зони кристалізації, L_d – довжина зони деформації [60]

Як видно, у випадку виготовлення плоских штаб температурні поля в зоні кристалізації-деформації та фронт кристалізації має симетричний вигляд відносно середньої лінії валків. Це пояснюється ідентичними умовами охолодження з боку обох валків-кристалізаторів.

В даній роботі автори оперували таким поняттям, як відносна довжина зони деформації. Цей показник характеризує відношення довжини зони деформації до загальної довжини зони кристалізації-деформації та вказує яку частку займає зона деформації. За даним показником можна розрахувати ступінь деформації штаби в процесі валкового розливу-прокатки в залежності від значень інших технологічних параметрів процесу. Отримані на прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-6082 дані також продемонстрували, що ступінь

деформації штаби знижується по мірі збільшення температури розплаву та швидкості розливу-прокатки (рис. 1.15).

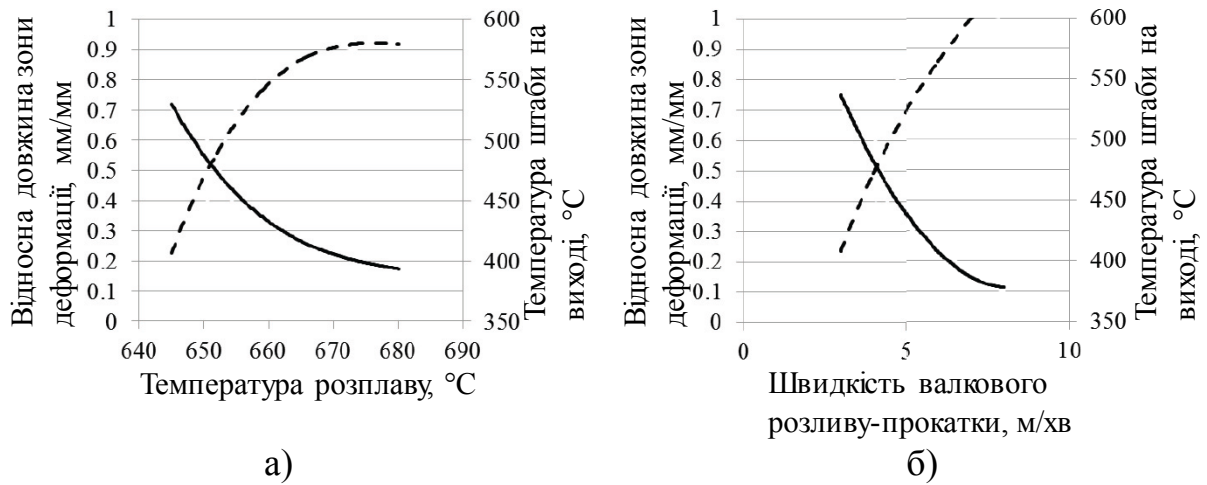


Рис. 1.15. Графіки залежності відносної довжини зони деформації (суцільна лінія) та температури штаби (пунктирна лінія) в залежності від температури розплаву (а) та швидкості ведення процесу (б) [60]

Математичне моделювання широко застосовується і при аналізі впливу параметрів процесу на умови формування біметалевих штаб. Схема ведення процесу при виробництві біметалевих штаб схожа на процес валкового розливу-прокатки плоских штаб. Головною відмінністю при моделюванні такого процесу є наявність додаткового теплового опору на межі метал-валок.

В роботі [61] представлено глибокий аналіз впливу різноманітних параметрів валкового розливу-прокатки біметалевих штаб на температуру та ступінь деформації двошарової штаби, що формується. Було показано, що точка повної кристалізації зміщується ближче до валка-кристалізатора, з боку якого здійснюється подача твердої сталевих штаби. Дана сталева штаба є тим самим додатковим тепловим опором, який ускладнює кристалізацію розплаву і вносить в поля температур та форму фронту кристалізації асиметричність відносно середньої лінії валків (рис. 1.16).

Розрахункові дані про залежність відносної довжини зони деформації від різноманітних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки, зокрема

від температури розплаву та швидкості ведення процесу, для випадку виробництва біметалевих штаб, також були узагальнені у вигляді відповідних графіків (рис. 1.17).

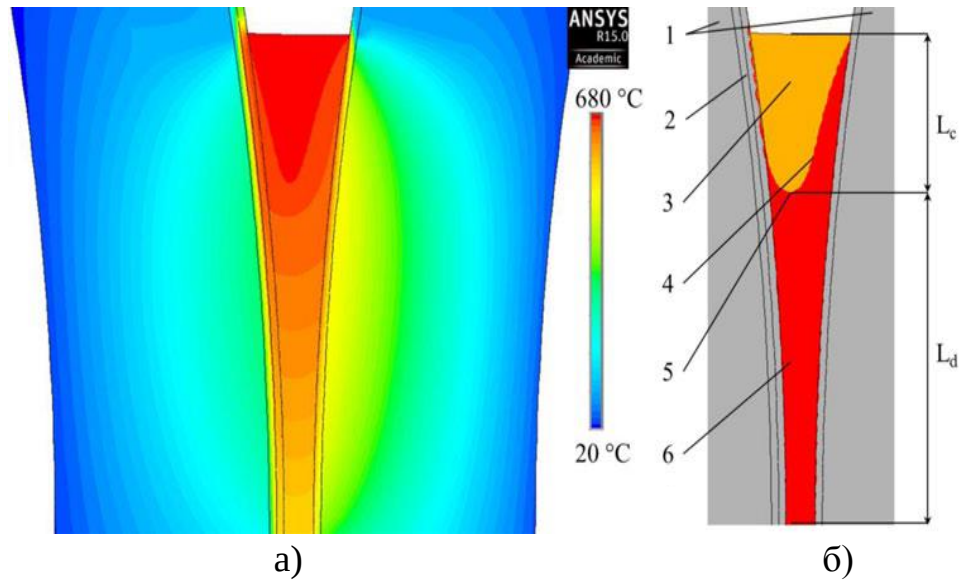


Рис. 1.16. Температурні поля (а) та форма фронту кристалізації (б), що отримані шляхом математичного моделювання: 1 – валки-кристалізатори, 2 – сталеві штаби, 3 – розплав, 4 – фронт кристалізації, 5 – «kissing point», 6 – закристалізована штаба; L_s – довжина зони кристалізації, L_d – довжина зони деформації [61]

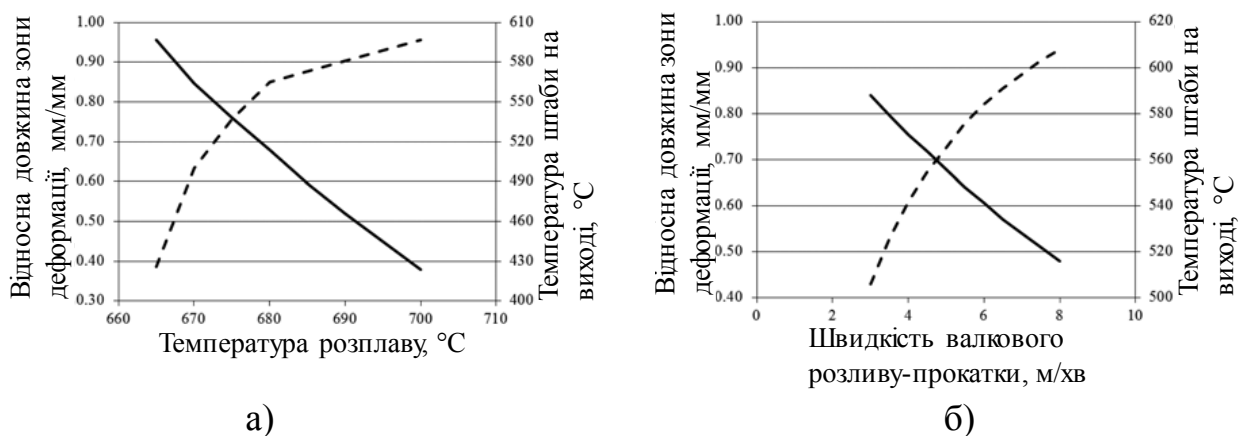


Рис. 1.17. Графіки залежності відносної довжини зони деформації (суцільна лінія) та температури біметалевої штаби (пунктирна лінія) в залежності від температури розплаву (а) та швидкості ведення процесу (б) [61]

Наведені дані дозволяють зробити висновок про те, що наявність додаткового теплового опору на межі метал-валок, з боку одного з валків-кристалізаторів, в цілому не змінює характер залежності ступеня деформації металу від параметрів процесу, в порівнянні з процесом виробництва монолітних тонких штаб (див. рис. 1.15). При збільшенні температури розплаву та швидкості валкового розливу-прокатки ступінь деформації штаби знижується, а її температури на виході зростає. Це, в свою чергу, свідчить про зниження сили, що діє на валки-кристалізатори в ході ведення процесу.

Окрім описаних вище робіт, також опубліковані дані про вплив коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок на швидкість кристалізації штаби. Однак, слід зазначити, що єдиного універсального значення даного коефіцієнта не існує. Таким чином, в літературних джерелах величина даного коефіцієнта варіюється від $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Наприклад, в роботі К. Sarioglu і Р. Thevoz [62] при чисельному аналізі процесу валкового розливу-прокатки використовували коефіцієнти рівний $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Однак автори не виконали перевірку власної моделі на адекватність шляхом порівняння отриманих даних з іншими літературними джерелами чи своїми експериментальними даними.

В іншій роботі, С. А. Santos, Ж. А. Spim і А. Garcia [63] для моделювання процесу виготовлення сталевих штаб з розплаву використали коефіцієнт, що дорівнює $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. За допомогою цієї ж моделі автори провели моделювання валкового розливу-прокатки сплаву олова зі свинцем, з подальшим порівнянням результатів, при різних величинах коефіцієнта тепловіддачі, з іншими літературними даними. Також для моделювання процесу валкового розливу-прокатки сталевих штаб в роботі М. А. Cruchaga, Д. Ж. Celentano і Р. В. Lewis [64] було використано три різних коефіцієнта тепловіддачі: $4000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та $6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Як бачимо, на практиці застосовують різні коефіцієнти тепловіддачі [65,66]. Однак в жодній з робіт не зазначено на підставі чого застосовувалися використані величини даного параметра.

Подібна ситуація спостерігається й при моделюванні процесу валкового розливу-прокатки штаб з магнієвих сплавів. Наприклад, в роботі X.-D. Hu і D.-Y. Ju [67], для магнієвого сплаву AZ31 використовували коефіцієнт тепловіддачі рівний $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В іншій роботі, J. Zeng і R. Koitzsch [68] спільно з іншими авторами, запропонували використовувати різні коефіцієнти тепловіддачі для штаб різної товщини. Так, для випадку виготовлення штаби товщиною 3 мм використовували величину коефіцієнта тепловіддачі рівну $4000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а для 4 мм - $3300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результати проведених досліджень також були порівняні з власними експериментальними даними, що показало досить високу точність отриманого чисельного рішення.

Ще однією роботою, цікавою з точки зору опису граничних умов на межі метал-валок, є робота співробітників Інституту досліджень індустріальних наук та технологій Південної Кореї [69]. В ній автори проводили дослідження з визначення впливу різних параметрів процесу валкового розливу-прокатки на тепловий стан валків-кристалізаторів. В цій же роботі проведене експериментальне визначення теплового потоку при використанні сталі в якості матеріалу на промисловому агрегаті фірми POSCO, який становив $7,55 \text{ мВт}/\text{м}^2$.

В роботі A. Saxena і Y. Sahai [70], яка присвячена моделюванню плинності та теплового стану рідкого металу при валковому розливі-прокатці алюмінієвих сплавів Al-4,5%Cu та Al-1,1%Mg, коефіцієнт тепловіддачі також варіювали в діапазоні від $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Опубліковані дані показали суттєвий вплив на результати математичного моделювання величини такого показника як коефіцієнт тепловіддачі. Однак висновків про адекватне значення даного параметра зроблено не було.

Висновки до розділу 1

1. Штаби з профільованим поперечним перерізом та штаби з гетерогенними властивостями, що виготовлені з різноманітних сталей та сплавів легких металів, є найбільш багатообіцяючими видами продукції, які

дозволяють зменшити вагу конструкцій, але при цьому зберегти або збільшити їх жорсткість. Так, застосування Tailor Welded Blank, Patchwork Blanks, Tailor Rolled Blanks и Tailor Heat Treated Blanks при виготовленні автомобілів, дозволяє знизити споживання палива даними автомобілями, тим самим, знизити кількість шкідливих викидів в атмосферу. Дані штаби, однак, мають свої недоліки, що викликані, насамперед, способами їх виробництва. Загальним недоліком даних штаб є висока собівартість. Тому перспективним напрямом є розробка технології виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом безпосередньо з розплаву, що дозволить значно скоротити кількість технологічних операцій і знизити енерговитрати виробничого процесу.

2. Проведено аналіз існуючих способів прямого виготовлення штаб з розплаву та їх технологічних схем. Показано, що з точки зору конкурентоспроможності виготовленої продукції раціональним рішенням для беззлиткового виробництва штаб є процес валкового розливу-прокатки. До його переваг відносяться екологічність виробничого процесу та низькі енергетичні витрати на технологічний цикл виробництва готової тонкої гарячекатаної штаби. Все це дозволило технології валкового розливу-прокатки плоских штаб отримати широке застосування на практиці. Розглянуто існуюче технологічне рішення з валкового розливу-прокатки профільованих штаб, яке має декілька недоліків, а саме: низька стійкість профільованої за допомогою нікелю поверхні, у зв'язку з різними окружними швидкостями на різних ділянках бочки валка-кристалізатора, та тривалість і вартість самого процесу профілювання. Однак, у зв'язку з малою кількістю дослідницьких робіт, присвячених технології виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з розплаву, та недоліками існуючого технологічного рішення виробництва профільованих штаб, дана технологія для виробництва подібного виду продукції не отримала розповсюдження

3. Проаналізовано існуючі експериментальні та теоретичні залежності впливу таких технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки, як швидкість обертання валків-кристалізаторів, температура розплаву, довжина

зони кристалізації-деформації та величина коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок на умови формування штаби, а саме, довжину зони деформації та ступінь деформації штаби. Проведено аналіз існуючих даних з впливу технологічних параметрів валкового розливу-прокатки на силу, що діє на валки-кристалізатори в ході розливу-прокатки. Показано, що існуючі залежності, отримані як експериментальним шляхом, так і за допомогою математичного моделювання в скінченно-елементних середовищах, стосуються лише випадків застосування технології валкового розливу-прокатки для виробництва плоских штаб з різних сталей та сплавів. Відомі залежності не дозволяють кількісно описати закономірності формування профільованих штаб в цілому. Відсутність відповідних даних ускладнює розробку нової перспективної технології прямого виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом безпосередньо з розплаву.

4. Проаналізовано існуючі літературні дані, що присвячені питанню визначення величини коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок. Даний параметр процесу є одним з ключових, з точки зору визначення умов формування штаби, й залежить від матеріалу валків-кристалізаторів, а також від інтенсивності їх охолодження. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що єдиного значення даного коефіцієнта не існує. Так, в літературних джерелах значення даного коефіцієнта варіюється від $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ до $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Також наведено дані про залежність величини коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок від товщини виготовлюваної штаби. Однак, кількісні дані про значення даного коефіцієнта при валковому розливі-прокатці штаб різної товщини з алюмінієвих сплавів в літературі відсутні. Все це ускладнює розробку нової технології й робить розглянуту в дисертаційній роботі задачу актуальною.

РОЗДІЛ 2

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

Виходячи зі зростаючого попиту на штаби й листи зі змінними по ширині параметрами, а також з недоліків відомих з літератури технологічних рішень, що використовуються для виробництва подібних виробів, які описані в розділі 1, в роботі вперше запропоновано новий метод виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом на машинах валкового розливу-прокатки з використанням в якості додаткового деформуючого інструмента сталеві профілюючої стрічки. Схема запропонованого способу профілювання поверхні бандажів валків-кристалізаторів в рамках технології що розробляється, наведена на рисунку 2.1.



Рис. 2.1. Принципова схема запропонованого методу виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом на машинах валкового розливу-прокатки

Дана технологія дасть змогу реалізувати усі переваги процесу прямого виготовлення штаб з розплаву і уникнути недоліків вже існуючого рішення з профілюванням валків-кристалізаторів за допомогою додаткового нікелевого шару змінної товщини. Для вивчення закономірностей формування штаби в

новому процесі обрано відносно простий вид профілю поперечного перерізу штаби (рис. 2.2) з різницею між h_{Π} і h'_{Π} рівною 0,5 мм.

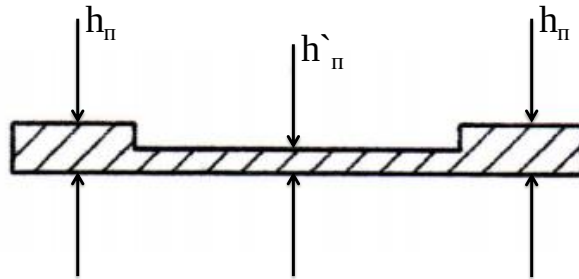


Рис. 2.2. Профіль штаби, що обрано для аналізу нової технології виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом шляхом валкового розливу-прокатки

Виходячи з наведеної вище принципової схеми процесу важливо зазначити, що зона кристалізації-деформації по довжині бочки валків-кристалізаторів, при виготовленні штаб з профільованим поперечним перерізом, складається з різних ділянок, кількість яких для даного виду профілю штаби рівне трьом. Дві ділянки, прилеглі до кромek валків, аналогічні зоні кристалізації-деформації при традиційній схемі формування плоских тонких штаб валковим розливом-прокаткою, а на третій ділянці, що розташована по середині бочки валка-кристалізатора, присутній додатковий деформуючий інструмент, а саме - сталева профілююча стрічка, яка охоплює один з валків-кристалізаторів і виступає додатковим тепловим опором на межі метал-інструмент.

Через наявність додаткового деформуючого інструмента (профілюючої стрічки), а також зміни товщини штаби по ширині (наявність профільованого поперечного перерізу), умови кристалізації та деформації штаби, що формується, змінюються уздовж бочки валка-кристалізатора. Невідповідність ступенів деформації різних елементів штаби, яка впливає з відмінності товщин і довжини відповідних зон деформації – для елементів з додатковим тепловим опором та для елементів без нього – може призвести до утворення дефектів у

вигляді тріщин поблизу ділянок переходу профілю, або в критичних випадках до її руйнування. Даний ризик спричинений різними коефіцієнтами витяжки по різних елементах профільованої штаби та прагненням до виникнення різниці швидкостей виходу відповідних елементів із зони деформації. Виходячи з цього, незалежний аналіз швидкостей виходу окремих елементів штаби з валків є принципово важливим з точки зору виготовлення валковим розливом-прокаткою бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом.

При розробці нових технологій, або для визначення раціональних параметрів ведення процесів, прийнято використовувати математичне моделювання спільно з експериментальними дослідженнями. Останнє, в більшості випадків, використовують для перевірки адекватності розроблених чисельних теоретичних моделей. Валковий розлив-прокатка не є винятком і математичне моделювання є необхідним для її дослідження, у зв'язку зі складністю процесу та відсутністю візуального контакту із зоною кристалізації-деформації, на відміну від процесу, наприклад, поздовжньої прокатки. Це викликано суміщенням в одній технологічній операції двох процесів: кристалізації та деформації. Експериментальне вивчення валкового розливу-прокатки ускладнюється ще й у зв'язку з великою швидкістю протікання даних процесів, коли час формування на поверхні валків тонкої плівки закристалізованого матеріалу складає соті долі секунди, а час наскрізної кристалізації та деформації – декілька десятих долей секунди. Для більшої наочності на рисунку 2.3 наведена схема процесу валкового розливу-прокатки штаби з профільованим поперечним перерізом для елемента без додаткового теплового опору. Як вказувалося раніше, схема для даного елемента аналогічна схемі при виготовленні тонких плоских штаб. Розплав подається через сопло 4 в простір між валками-кристалізаторами 1. Через бандажі валків-кристалізаторів відбувається відбір тепла від розплаву, що знаходиться в зазорі між валками-кристалізаторами. В початковий момент часу даний розплав починає кристалізуватися біля поверхні кожного з валків-кристалізаторів, утворюючи дві кірки. Дані кірки по мірі просування по зоні кристалізації-деформації,

нарощуються і в певний момент часу з'єднуються. Охолодження бандажів валків-кристалізаторів здійснюється охолоджуючою рідиною з внутрішньої сторони (див. рис. 2.3).

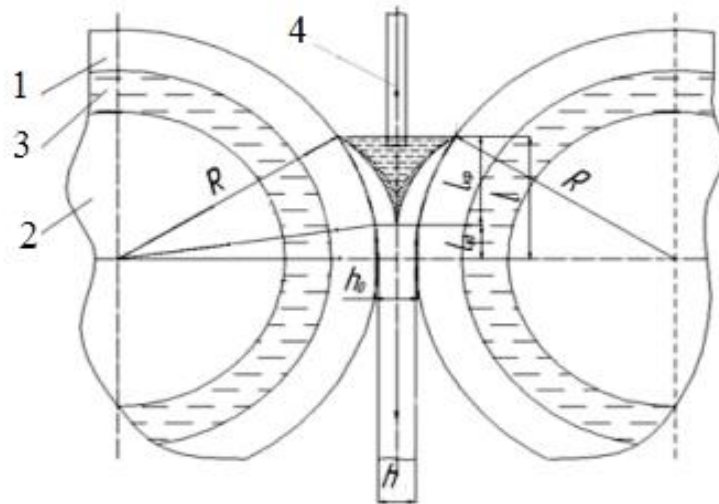


Рис. 2.3. Схема процесу валкового розливу-прокатки (без додаткового деформуючого інструмента): 1 – бандаж валка-кристалізатора; 2 – ось валка-кристалізатора; 3 – охолоджуюча рідина; 4 – сопло; R – радіус валка-кристалізатора; l – довжина ванни розплаву; $l_{кр}$ – довжина зони кристалізації; l_d – довжина зони деформації; h_0 – товщина штаби на початку зони деформації; h – товщина штаби на виході з валків [84]

2.1 Математичне моделювання процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб

Усе вищезазначене говорить про необхідність створення математичної моделі, яка могла б описувати процеси кристалізації та деформації для усіх елементів профільованої штаби. В світовій практиці використовуються декілька підходів для вирішення цієї задачі. Першою і найбільш трудомісткою, є розробка «з нуля» власної математичної моделі процесу та її реалізація у вигляді комп'ютерної програми. Другий варіант – використання комерційних вузькоспрямованих програм, що призводить до меншої універсальності даного

рішення. Третім варіантом є використання спеціалізованих скінченно-елементних програмних пакетів, які дозволяють побудувати геометрію моделі, задати необхідні властивості й провести розрахунок за певними критеріями користувача.

Одним з таких програмних комплексів є пакет ANSYS американської компанії Ansys Inc. Перевагою даного комплексу є наявність спеціалізованого гідрогазодинамічного модуля (ANSYS Flotran). Таке рішення дозволяє розглядати рух металу як потік рідини зі змінної в'язкістю та поєднати рішення теплової задачі в одній моделі.

Одним з популярних шляхів при сучасному теоретичному аналізі процесів обробки металів тиском є побудова тривимірних повнорозмірних моделей. Однак результати подібних розрахунків нерідко мають великі відхилення від експериментальних даних. Для підвищення точності розрахунків доводиться подрібнювати скінченно-елементну сітку, що неминуче призводить до значного збільшення тривалості розрахунку й знижує стійкість розрахунку чисельного рішення. На основі вищесказаного для аналізу процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом було використане моделювання за допомогою двовимірних моделей. Одна з моделей була використана для описання процесів кристалізації та деформації «товстого» елемента профільованої штаби на ділянці валків-кристалізаторів без додаткового теплового опору. Друга модель описує умови кристалізації-деформації «тонкого» елемента профільованої штаби на ділянці з додатковим тепловим опором. Зовнішній вигляд геометрії розроблених моделей в області зони кристалізації-деформації наведено на рисунку 2.4.

В якості матеріалу для проведення математичного моделювання й послідууючої експериментальної перевірки результатів розрахунків було обрано алюмінієвий сплав EN AW-1050, хімічний склад якого наведено у таблиці 2.1 [71].

Фізичні властивості розплавленого матеріалу, використані в розроблених моделях, наступні: густина матеріалу, що розливається – 2300 кг/м^3 , густина

закристалізованого металу – 2700 кг/м^3 , теплопровідність матеріалу який розливається – $200 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, питома теплоємність металу що розливається – $880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ [72, 73]. В розрахунках також використовувалися наступні критичні температури даного сплаву: температура солідус – 930 К , температура ліквідус – 919 К

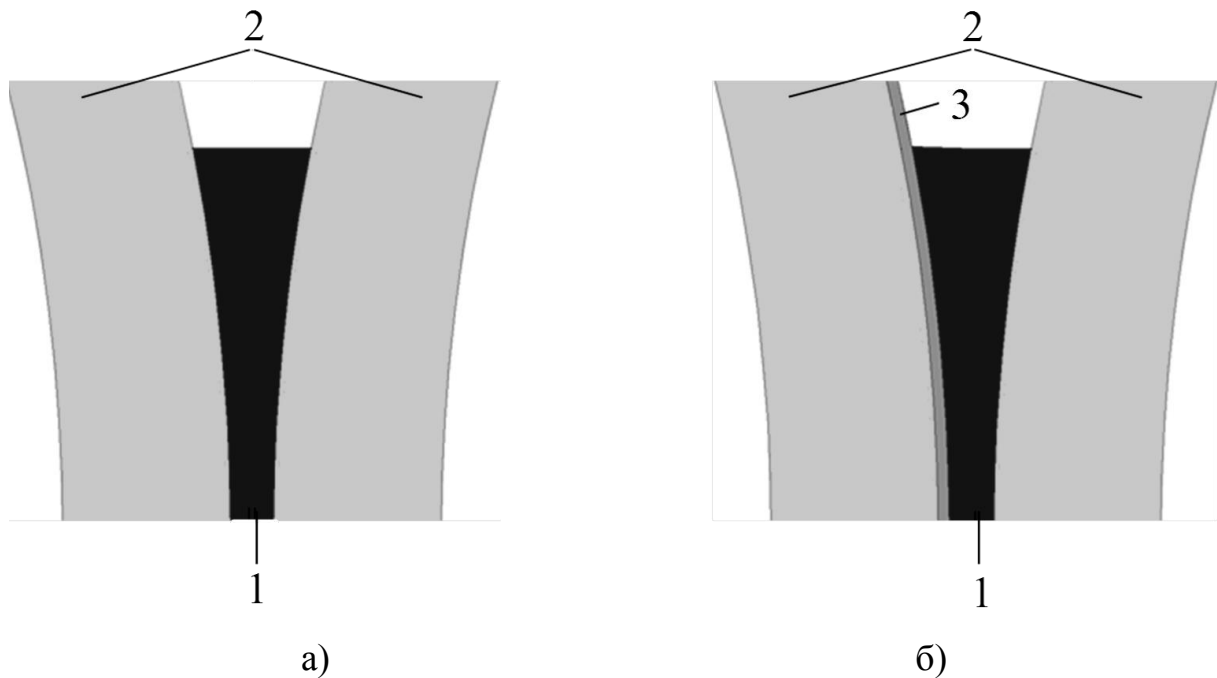


Рис. 2.4. Геометрія двовимірних моделей в області зони кристалізації-деформації, обрана для математичного моделювання валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом: для формування «товстого» елемента профільованої штаби (а), для формування «тонкого» елемента профільованої штаби (б): 1 – розплав; 2 – бандажі валків-кристалізаторів; 3 – сталева профілююча стрічка

Таблиця 2.1

Хімічний склад сплаву, що використовується для математичного моделювання

Позначення сплаву	Хімічний склад, %								
	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Інші	Останнє
EN AW-1050	<0.40	<0.25	<0.05	<0.05	<0.05	<0.07	<0.05	<0.03	Al

В'язкість матеріалу штаби задавалася в табличному вигляді. Так, для розплавленого матеріалу вона була прийнята рівною 0,012 Па·с [74]. Для повністю закристалізованого металу в'язкість становила 100 Па·с [75].

Матеріалом бандажів валків-кристалізаторів та профілюючої стрічки є сталь, з наступними фізичними властивостями: густина – 7800 кг/м³, теплопровідність – 35 Вт/ м²·К, питома теплоємність – 462 Дж/кг·К [76]. Таким чином, в даній моделі розплав розглядається, як в'язкотекуча нестислива рідина для якої вирішується рівняння балансу енергії та плинину в потоці в'язкого середовища. В загальному вигляді рівняння балансу енергії (2.1), що використовується, має вигляд [77]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z C_p T) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(K \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q_v \end{aligned} \quad (2.1)$$

де ρ – густина; C_p – питома теплоємність; T - температура; V – швидкість; K – теплопровідність; Q_v – об'ємний тепловий потік.

Швидкість в зоні кристалізації-деформації розраховується відповідно до закону збереження імпульсу, а температура і тиск – відповідно законам збереження енергії і маси, відповідно. В зоні бандажа валка-кристалізатора вирішується тільки рівняння збереження енергії. Охолодження розплаву відбувається шляхом конвекції на межі метал-валок і валок-охолоджуюча рідина та теплопровідності, які встановлюються законом Фур'є (2.2) [77]:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

де ρ – густина; c – питома теплоємність; T – температура; t – час; V – швидкість; $\ddot{q}$ – швидкість генерації тепла на одиницю об'єму (у відповідності до першого закону термодинаміки); K_x, K_y, K_z – теплопровідність елемента в напрямку осей x, y и z .

При створенні моделей з метою полегшення й прискорення швидкості розрахунків були зроблені наступні припущення: бандажі валків-кристалізаторів не деформуються, плин розплаву турбулентний. В якості моделі турбулентності було використано стандартну $k-\epsilon$ модель турбулентності [77, 78]. Також, в якості припущення, прийнято повне прилипання по всій площині контакту розплаву з поверхнею бандажів валків-кристалізаторів.

В якості граничних умов вказані: з внутрішньої сторони бандажів валків-кристалізаторів охолодження відбувається за допомогою конвекції, ззовні бандажів валків-кристалізаторів і штаби вільна конвекція, температура розплаву на поверхні зони кристалізації-деформації постійна. Коефіцієнт тепловіддачі ззовні бандажів валків-кристалізаторів прийнятий рівним $400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній стороні бандажів валків-кристалізаторів дорівнює $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Також, в створеній математичній моделі, використовується гранична умова першого роду, яка служить для врахування нагріву поверхні бандажів валків-кристалізаторів від розплаву під час валкового розливу-прокатки.

В якості елементів даної моделі використовується стандартний елемент середовища Ansys - fluid141. Даний елемент є двовимірним чотирьох вузловим скінченним елементом, який можна використовувати для моделювання перехідних або стаціонарних задач, що складаються з рідких та/або твердих тіл [77].

Розроблена на базі скінченно-елементного середовища Ansys математична модель валкового розливу-прокатки була використана в подальшому для проведення розрахунків з метою аналізу закономірностей формування штаб з профільованим поперечним перерізом при валковому розливі-прокатці з використанням нового методу виготовлення профільованих штаб.

2.2 Експериментальні дослідження процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб

2.2.1 Пристрій для профілювання гладких валків-кристалізаторів

Використання валкового розливу-прокатки для виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом є одним з найбільш цікавих і перспективних напрямів розвитку способів прямого виготовлення штаб з розплаву. На сьогоднішній день існує тільки один метод виготовлення профільованих штаб валковим розливом-прокаткою який має ряд недоліків, що ускладнюють його промислове поширення (див. підрозділ 1.2). Однак, на сьогоднішній день не існує технологій і пристроїв, що здатні виготовляти штаби з профільованим поперечним перерізом за схемою наведеною в роботі (див. рис. 2.1). Тому, поряд з комп'ютерним моделюванням процесу та визначенням раціональних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки існує необхідність в розробці відповідного пристрою, який дозволить реалізувати валковий розлив-прокатку профільованих штаб на валках з гладкою бочкою, що найбільш часто використовуються в якості стандартного інструменту на даному обладнанні. Одним з можливих шляхів вирішення цієї задачі є застосування однієї або декількох – в залежності від необхідної форми профілю поперечного перерізу штаби – профілюючих стрічок, які охоплюють один або обидва валки-кристалізатори. Таким чином, досягається профілювання поверхні циліндричних валків-кристалізаторів, яке відповідає необхідному виду профілю штаби. Описаний принцип було покладено в роботу оригінального пристрою для валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом. Схема розробленого пристрою наведена на рисунку 2.5. На даний пристрій був отриманий патент України на винахід [79].

Принцип дії пристрою полягає в наступному: сталева профілююча стрічка 3 охоплює валок-кристалізатор 1 і натяжний ролик 2. За допомогою даного натяжного ролика 2 відбувається попереднє натягнення профілюючої

стрічки 3 для більш щільного її прилягання до валка-кристалізатора 1. Від небажаного переміщення уздовж бочки валка-кристалізатора 1 профільююча стрічка 3 утримується двома парами профільованих роликів 4. При розробці пристрою був прийнятий до уваги розігрів сталевोї профільюючої стрічки від якого вона збільшує свою довжину. Для компенсації термічного подовження передбачено два компенсаційно-натяжних ролики 5, які під час ведення процесу підтримують натяг профільюючої стрічки 3. З метою запобігання налипання алюмінію, в ході валкового розливу-прокатки на поверхню профільюючої стрічки повинен наноситись розділовий шар, в ролі якого може виступати бор-нітрид.

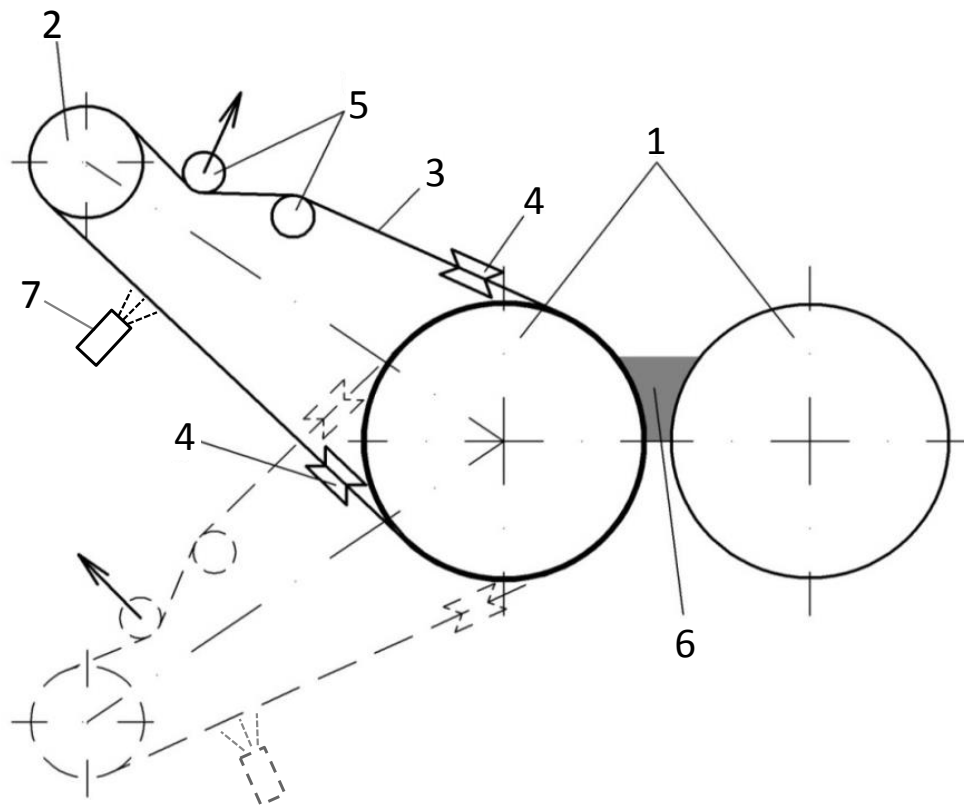


Рис. 2.5. Схема пристрою для валкового розливу-прокатки профільованих штаб (випадок профільювання одного з валків-кристалізаторів): 1 – валок-кристалізатор; 2 – натяжний ролик; 3 – профільююча стрічка; 4 – профільовані ролики; 5 – компенсаційно-натяжні ролики; 6 – метал в зоні кристалізації-деформації; 7 – нанесення розділового шару на профільюючу стрічку

Для забезпечення більшої універсальності розробленого пристрою передбачена можливість синхронного повороту натяжного, профільованих і компенсаційно-натяжних роликів в площині, що перпендикулярна до осі обертання валків-кристалізаторів. Таке виконання пристрою для валкового розливу-прокатки дозволяє виготовляти різні види профілів поперечного перерізу штаб, приклади виконання деяких з них представлені на рисунку 2.6

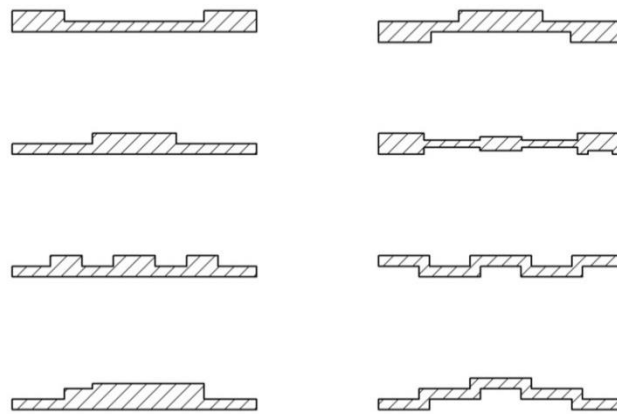


Рис. 2.6. Деякі можливі види поперечного перерізу профільованих штаб, що можна реалізувати за допомогою розробленого пристрою валкового розливу-прокатки

Згідно з наведеною схемою (рис. 2.5), з урахуванням коректувань, які забезпечують практичну реалізацію на конкретній лабораторній установці валкового розливу-прокатки, було спроектовано та виготовлено експериментальний пристрій для валкового розливу-прокатки профільованих штаб. Корпус розробленого пристрою складається з двох кронштейнів (рис. 2.7), за допомогою яких даний пристрій кріпиться до кліті установки валкового розливу-прокатки.

Дані кронштейни утримують два горизонтальних профільованих ролики (рис. 2.8-а) за допомогою яких забезпечується стабілізація профілюючої стрічки під час розливу-прокатки. Ролики спільно з двома парами вертикальних роликів (рис 2.8-б) забезпечують відсутність переміщення профілюючої стрічки уздовж

бочки валка-кристалізатора в процесі розливу-прокатки, що гарантує постійну геометрію профілю по всій довжині штаби.

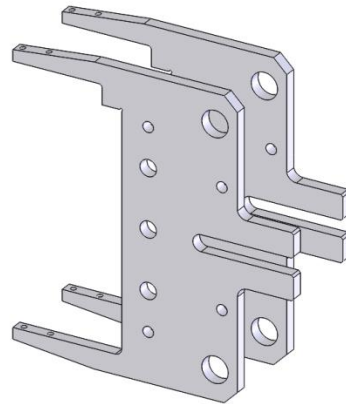
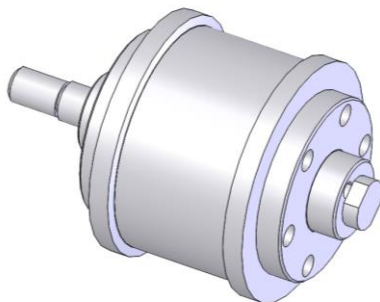
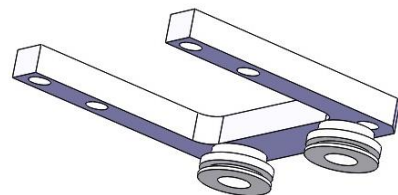


Рис. 2.7. Тривимірне зображення кронштейнів, які виконують функцію корпусу пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб



а)



б)

Рис. 2.8. Тривимірне зображення горизонтального профільованого ролика (а) і пари вертикальних роликів (б), які використовуються в пристрої валкового розливу-прокатки профільованих штаб

На якість профільованих штаб також впливає натяг профілюючої стрічки. Величина даного натягу повинна забезпечувати щільне прилягання профілюючої стрічки до поверхні бандажа валка-кристалізатора в ході всього процесу валкового розливу-прокатки. Для забезпечення натягу профілюючої стрічки в конструкції пристрою передбачено горизонтальний натяжний ролик,

який компенсує подовження профільюючої стрічки в результаті впливу високих температур (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Горизонтальний натяжний ролик пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб

Тривимірне зображення розробленого пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб в зборі представлено на рисунку 2.10-а. На рисунку 2.10-б наведено схематичний вигляд лабораторної установки валкового розливу-прокатки зі встановленою піччю для підготовки розплаву, а також, з зафіксованим на кліті пристроєм валкового розливу-прокатки профільованих штаб з профільюючою стрічкою.

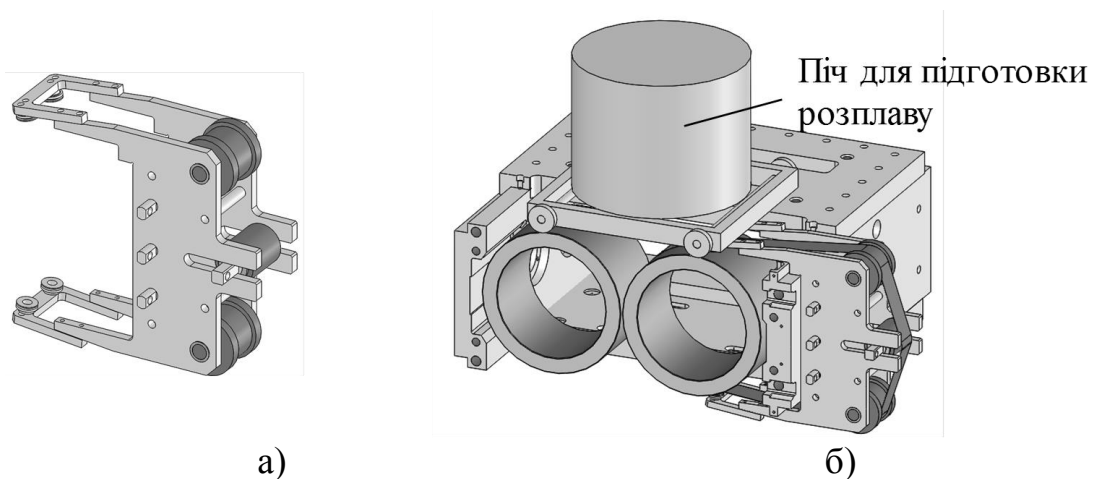


Рис. 2.10. Тривимірне зображення пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб (а) і кліті машини валкового розливу-прокатки з встановленим пристроєм валкового розливу-прокатки профільованих штаб та профільюючою стрічкою (б)

Слід зазначити, що конструкція розробленого пристрою дозволяє використовувати його на агрегатах валкового розливу-прокатки з обмеженим вільним простором (див. рис. 2.10-б).

Виготовлений пристрій для валкового розливу-прокатки профільованих штаб було використано в подальшому для проведення натурних експериментів з прямого виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з розплаву в рамках розробки нової технології

2.2.2 Експериментальна установка валкового розливу-прокатки, яка була використана для виготовлення профільованих штаб

Всі експериментальні дослідження, з розробки нової технології виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з використанням валків-кристалізаторів з гладкою бочкою, виконувалися на машині валкового розливу-прокатки, яка встановлена на кафедрі матеріалознавства Падерборнського Університету (м. Падерборн, ФРН). Дана установка для виготовлення тонких штаб безпосередньо з розплаву була спроектована, виготовлена та введена в експлуатацію в рамках спільної науково-дослідницької роботи між кафедрою обробки металів тиском НМетАУ і німецьким Університетом. Схема машини валкового розливу-прокатки з основними габаритними розмірами представлена на рисунку 2.11.

Установка була успішно використана при проведенні експериментальних досліджень з валкового розливу-прокатки тонких штаб з таких алюмінієвих сплавів, як EN AW-1050, EN AW-6082, EN AW-7020 та ін., а також біметалевих алюміній-сталевих штаб.

Основні технічні характеристики лабораторної машини валкового розливу-прокатки, що використовується, наведені в таблиці 2.2. Також слід зазначити, що особливістю даного агрегату є можливість ведення процесу валкового розливу-прокатки як за вертикальною схемою, так і за горизонтальною [80, 81].

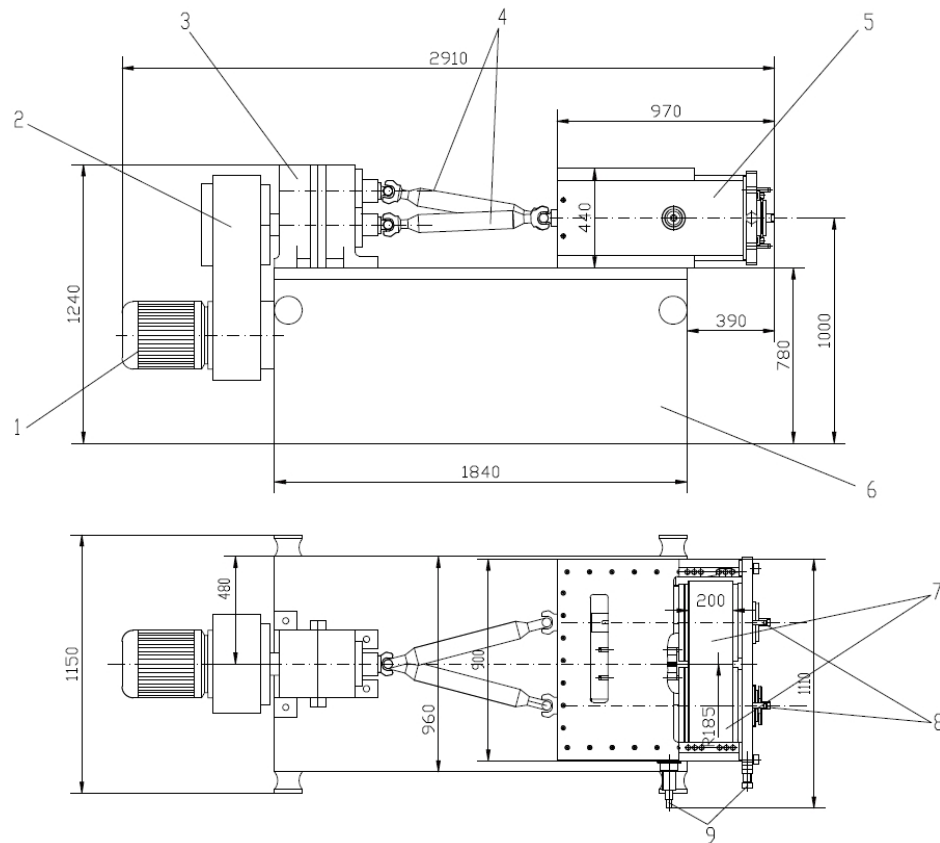


Рис. 2.11. Експериментальна установка валкового розливу-прокатки в Падерборнському Університеті: 1 – двигун; 2 - редуктор; 3 – шестеренна кліть; 4 - шпинделі; 5 – кліть валкового розливу-прокатки; 6 - стіл; 7 – валки-кристалізатори; 8 – патрубки подачі і відведення охолоджуючої рідини; 9 – регулювальні гвинти [80]

Таблиця 2.2

Характеристика лабораторної машини валкового розливу-прокатки [80,81]

Найменування характеристики	Значення
Зовнішній діаметр бандажів валків-кристалізаторів, мм	370
Товщина бандажів валків-кристалізаторів, мм	15
Довжина бочки валків-кристалізаторів, мм	200
Потужність двигуна, кВт	4,4
Максимальна швидкість валкового розливу-прокатки, м/хв	8
Витрата охолоджуючої рідини, л/хв	112
Товщина штаб, мм	1...5

2.2.3 Обладнання, використане при проведенні експериментів з виготовлення плоских штаб з гетерогенними механічними властивостями

Для визначення технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб та дослідження можливості виготовлення плоских штаб з різними по ширині механічними властивостями з профільованих штаб шляхом прокатки на гладкій бочці було використано прокатний стан дуо. Робоча кліть даного стана є безстанинною попередньо навантаженою і має можливість використання двох видів навантажень – механічного та гідромеханічного [80]. На рисунку 2.12 представлена фотографія використаного стана з кліттю дуо і встановленою системою гідромеханічного навантаження кліті.



Рис. 2.12. Фотографія прокатного стана дуо кафедри матеріалознавства Падерборнського Університету (м.Падерборн, ФРН) зі встановленою системою гідромеханічного навантаження кліті [80]

Діаметр прокатних валків даного прокатного стана може варіюватися від 190 мм до 400 мм. Довжина бочки валка рівна 300 мм. Відстань між валками може варіюватися в діапазоні від 0 мм до 25 мм. Особливістю даного прокатного стана є те, що кожний з валків оснащений індивідуальним електродвигуном, загальна потужність яких становить 22кВт з можливістю індивідуального регулювання числа обертів в діапазоні від 0 об/хв до 15 об/хв. Максимальна розрахункова сила прокатки кліті дуо, що використовується, становить 1200 кН.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено новий метод прямого виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом з розплаву шляхом валкового розливу-прокатки в валках з гладкою бочкою. Даний метод дозволяє використати усі переваги цього процесу, основними з яких є малі виробничі площі, екологічність виробництва та малі енергетичні витрати на виробничий процес. Застосування даної технології дозволить знизити собівартість профільованих штаб, що приведе до розширення галузей їх застосування й дасть поштовх до подальшого розвитку інших галузей промисловості.

2. Спроековано та виготовлено пристрій для реалізації валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом. Використання цього пристрою на машинах валкового розливу-прокатки з циліндричними валками-кристалізаторами дозволяє уникнути основних недоліків існуючого способу профілювання валків-кристалізаторів за допомогою нанесення покриття у вигляді шару нікелю змінної товщини. Основні переваги запропонованої технологічної схеми полягають у відсутності необхідності наявності великого парку валків-кристалізаторів для різних видів профілів, профілюванні валків-кристалізаторів у більш короткі терміни, можливості швидкої заміни і ремонту запропонованого пристрою.

3. Створена математична модель процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб в скінченно-елементному середовищі Ansys Flotran, в основі якої лежать рівняння балансу енергії та закон Фур'є. Наведені значення основних параметрів, які використані в чисельній моделі, та граничні умови вирішення суміщених задач в'язкого плину металу й розподілу температури в інструменті та в зоні кристалізації-деформації. Дана модель використовується в подальшому для чисельного аналізу закономірностей формування штаб з профільованим поперечним перерізом в процесі валкового розливу-прокатки.

РОЗДІЛ 3

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

Як відомо, на ключові фактори, які визначають якість штаб, що формуються безпосередньо з розплаву - довжину зони деформації і пластичне обтиснення матеріалу при валковому розливі-прокатці – впливають ряд технологічних параметрів.

Основними технологічними параметрами, які встановлюються в ході розробки процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб, є швидкість валкового розливу-прокатки, температура розплаву, товщина різних елементів профільованої штаби та довжина зони кристалізації-деформації. На умови кристалізації також впливають такі параметри як температура рідини, за допомогою якої відбувається охолодження валків-кристалізаторів, матеріал і товщина бандажів валків-кристалізаторів. Однак варіювання цих параметрів не є можливим, через те, що вони закладаються ще на стадії проектування відповідного технологічного обладнання.

Проведення даного дослідження за допомогою розробленої та описаної в розділі 2 математичної моделі, спрямоване на аналіз закономірностей зміни ступеня деформації, швидкості та температури елементів штаби з профільованим поперечним перерізом в залежності від основних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки. Додатковою задачею математичного моделювання процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб стало уточнення коефіцієнтів тепловіддачі на межі метал-валок, яке було реалізоване за допомогою інверсного аналізу експериментальних даних з метою підвищення точності результатів розрахунків.

3.1 Визначення значень коефіцієнтів тепловіддачі при валковому розливі-прокатці штаб різної товщини за допомогою інверсного аналізу

Одним з параметрів ведення процесу валкового розливу-прокатки, який впливає на точність і якість розрахунків при математичному моделюванні з використанням граничних умов третього роду є коефіцієнт тепловіддачі на межі метал-валок. Тому, з метою підвищення точності послідовних розрахунків створеної моделі, спочатку необхідно встановити значення даного показника. Також такі дослідження дозволять фізично обґрунтувати значення використаних коефіцієнтів тепловіддачі на межі метал-валок та провести перевірку створеної математичної моделі на адекватність.

У зв'язку з вищезазначеним, для уточнення значень коефіцієнта тепловіддачі для агрегату валкового розливу-прокатки, що знаходиться в умовах Університету м. Падерборн (ФРН), було прийнято рішення провести спільно з експериментальними дослідженнями математичне моделювання процесу валкового розливу-прокатки штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-6082.

Спочатку для визначення впливу коефіцієнта тепловіддачі на умови кристалізації штаби і, як наслідок, подальшу її деформацію, була проведена серія математичних моделювань. Для цього використовувалися наступні значення коефіцієнтів тепловіддачі: 1000 Вт/(м²·К), 3000 Вт/(м²·К), 5000 Вт/(м²·К), 10000 Вт/(м²·К), 13000 Вт/(м²·К) та 15000 Вт/(м²·К). Отримані графічні результати, у вигляді залежностей зміни температури уздовж середньої лінії зони кристалізації-деформації від коефіцієнта тепловіддачі, приведені на рисунку 3.1

З цих даних видно, що варіювання коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок в області менших його значень при прийнятих умовах, значно впливає на швидкість охолодження і кристалізації металу. І навпаки, його підвищення в межах від 13000 Вт/(м²·К) до 15000 Вт/(м²·К) має лише незначний вплив на температуру штаби на виході з валків-кристалізаторів.

Наступним кроком стало проведення серії експериментів з валкового розливу-прокатки тонких штаб з алюмінієвого сплаву з низкою варійованих технологічних параметрів процесу. Показники, що були використані, наведені в таблиці 3.1

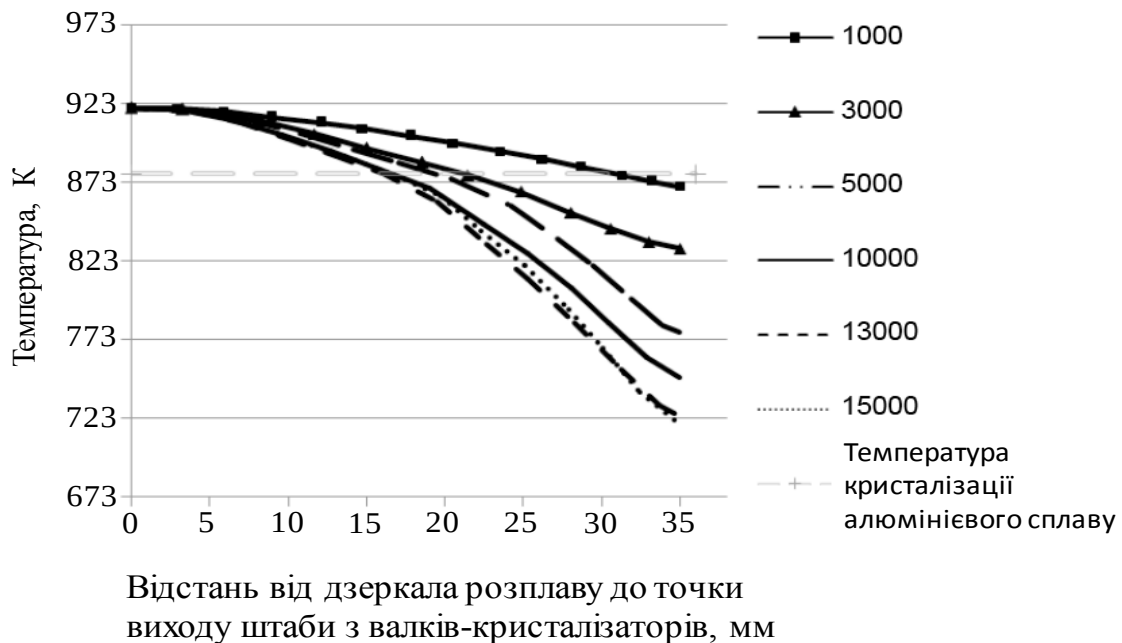


Рис. 3.1. Характер зміни температури металу уздовж серединної лінії зони кристалізації-деформації в залежності від величини коефіцієнта тепловіддачі при валковому розливі-прокатці алюмінієвого сплаву

Таблиця 3.1

Основні технологічні параметри валкового розливу-прокатки при визначенні коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок

Товщина штаби, мм	2	3	4
Загальна довжина зони кристалізації-деформації, мм	30	35	50
Швидкість валкового розливу-прокатки, м/хв	5,21	4,07	4,18
Температура початку розливу-прокатки, К	993	963	963
Максимальна температура розплаву в зоні кристалізації-деформації, К	918	920	915
Температура охолоджуючої рідини, К:			
на вході у валки-кристалізатори	287,7	289,1	289,5
на виході з валків-кристалізаторів	294,5	297,0	297,5

Для визначення зміни температури по довжині зони кристалізації-деформації в ході виконання експериментів використовувався термоелемент діаметром 0,5 мм і довжиною 1500 мм. В ході проведення кожної з розливок-прокаток, на стадії сталого процесу, в зону кристалізації-деформації вводився термоелемент. В ході протікання процесу термоелемент захоплювався закристалізованим металом і виходив з валків-кристалізаторів разом із штабою в її серединній частині.

Паралельно з проведенням експериментальних досліджень проводилося чисельне моделювання з вихідними даними аналогічними до експериментальних і геометрією ідентичною геометрії експериментальної установки. При цьому коефіцієнт тепловіддачі варіювався в межах від 3000 Вт/(м²·К) до 15000 Вт/(м²·К).

В якості результатів серії моделювань було отримано розподіл температур уздовж серединної лінії зони кристалізації-деформації для усіх експериментальних умов протікання процесу. Після чого було проведено порівняння результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання. Декотрі з отриманих результатів представлені на рисунку 3.2.

Порівняння графіків було проведено за двома критеріями: температура штаби на виході з валків-кристалізаторів і швидкість зміни температури уздовж серединної лінії в зоні кристалізації-деформації. Наявна, в деяких випадках, розбіжність експериментальних і теоретичних кривих викликана скоріш за все, змінними (в реальності), а не постійним значенням коефіцієнта тепловіддачі уздовж зони контакту матеріалу з поверхнею валка-кристалізатора, що ілюструє, наприклад, робота L. Strezov, J. Herbertson [82], а також L. Strezov, J. Herbertson за участі G. R. Belton [83]. Аналіз отриманих даних показав, що найкращий збіг результатів експериментальних та теоретичних досліджень, виконаних за допомогою математичного моделювання, забезпечується коефіцієнтами тепловіддачі на межі метал-валок для штаби товщиною 2 мм – 17800 Вт/(м²·К), для 3 мм – 15000 Вт/(м²·К), і для 4 мм – 13100 Вт/(м²·К).

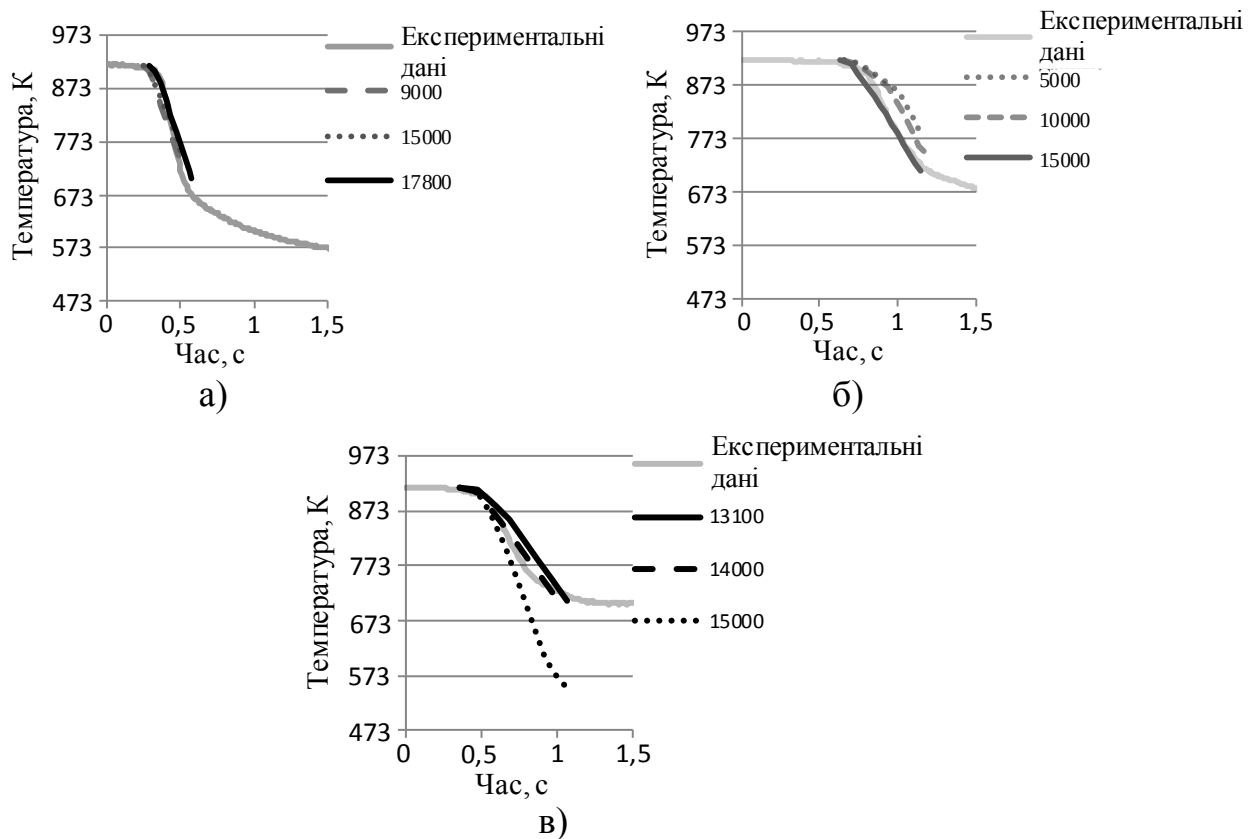


Рис. 3.2. Зіставлення експериментальних даних і результатів математичного моделювання температури уздовж серединної лінії штаби в зоні кристалізації-деформації при виробництві штаб товщиною 2 мм (а), 3 мм (б) і 4 мм (в) з алюмінієвого сплаву

Відносне відхилення прогнозованої температури виходу штаби при порівнянні експериментальних і розрахункових значень, для наведених вище уточнених коефіцієнтів тепловіддачі, становить: для штаби товщиною 2 мм – 5,3 %, 3 мм – 1,4 %, 4 мм – 0,7 %.

Отримані уточнені значення коефіцієнтів тепловіддачі відповідають верхньому діапазону даних з літературних джерел і, в деяких випадках, перевищують їх. Це можна пояснити тим, що в ході проведення експериментів не виконувалося розповсюджене на практиці покриття поверхні валків графітовою емульсією (на поверхню бандажів валків-кристалізаторів нанесено мікрорельєф), а їх конструкція передбачає контакт бандаж валка-кристалізатора з охолоджуючою рідиною по всій його внутрішній поверхні.

Сукупність зазначених чинників приводить до інтенсифікації теплообміну між металом і валками-кристалізаторами в ході валкового розливу-прокатки.

В результаті проведених експериментів з опису теплового стану системи метал-валок при валковому розливі-прокатці, в поєднанні зі зворотнім аналізом з використанням скінченно-елементного моделювання, були вперше визначені та фізично обґрунтовані значення коефіцієнтів тепловіддачі при виготовленні тонких штаб з алюмінієвих сплавів на експериментальній установці з двовалковим кристалізатором. Уточнені значення коефіцієнтів тепловіддачі становлять: для штаб товщиною 2 мм – $17800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 3 мм – $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, 4 мм – $13100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [84].

Уточнені дані при описі граничних умов під час моделювання валкового розливу-прокатки дозволяють більш якісно прогнозувати умови формування штаби в ході ведення процесу. Також отримані дані дозволяють більш точно описувати процеси кристалізації і послідууючої деформації окремих елементів профільованих штаб. Порівняння кривих зміни температури уздовж серединної лінії в зоні кристалізації-деформації дозволяє зробити висновок про адекватність математичної моделі і високу точність результатів розрахунків.

3.2 Аналіз впливу швидкості валкового розливу-прокатки на закономірності формування профільованих штаб з розплаву

Одним з параметрів валкового розливу-прокатки, за допомогою якого можна впливати на якість виготовленої продукції, є швидкість ведення процесу. Зміна швидкості ведення процесу призводить до зміни умов кристалізації металу в просторі між валками-кристалізаторами, що спричиняє зміну довжини зони деформації і, відповідно, ступеня деформації штаби та швидкості її виходу з валків-кристалізаторів. Таким чином, швидкість обертання валків-кристалізаторів є одним з ключових параметрів за допомогою якого можна керувати процесом кристалізації і деформації різних елементів профільованих штаб.

Як вже зазначалося раніше, процес валкового розливу-прокатки не дозволяє проводити всі дослідження експериментальним шляхом у зв'язку з неможливістю прямого доступу до зони кристалізації-деформації. З іншого боку, вимірювання впливу швидкості розливу-прокатки на швидкість виходу штаби з валків-кристалізаторів можливо експериментально, шляхом заміру відповідних показників. Однак, такий метод не підходить для виробництва штаб зі змінної по ширині товщиною, бо в даному випадку елементи штаби будуть мати різні швидкості, що викликано товщиною штаби та різними окружними швидкостями на поверхні валків-кристалізаторів і профільуючої стрічки. В такому випадку, елементи профільованої штаби, які мають більшу швидкість, будуть тягнути за собою інша елементи штаби, а останні в свою чергу, навпаки будуть намагатися загальмувати перші.

У зв'язку з цим, найбільш раціональним рішенням для аналізу впливу швидкості ведення процесу на швидкість штаби на виході з валків-кристалізаторів, є використання математичного моделювання. З цією метою, в рамках розробки нової технології виготовлення штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою було проведено ряд теоретичних досліджень з використанням створеної в скінченно-елементному середовищі Ansys математичної моделі.

В якості вихідних даних для математичного моделювання використовувалися експериментально визначені технологічні параметри ведення процесу, які є раціональними для виготовлення плоских тонких штаб з алюмінієвих сплавів з заданною товщиною на лабораторній машині валкового розливу-прокатки. Таким чином, температура розплаву була встановлена на рівні 933 К. Моделювання виконувалося для профільованої штаби з товщинами товстих та тонкого елементів 1.5 мм і 1 мм, відповідно. Коефіцієнт тепловіддачі на межі метал-валок, відповідно до уточнених даних, був встановлений рівним 17800 Вт/м²К, як найбільш близький для заданої товщини. Довжина зони кристалізації-деформації становила 35 мм, як найбільш універсальна величина, яка в більшості випадків дозволяє забезпечити повну кристалізацію розплаву.

В математичній моделі в якості вихідної швидкості встановлюється швидкість обертання шпинделя двигуна, яка варіюється в межах 700...1200 об/хв. Шляхом простого перерахунку (3.1), отримуємо, що швидкість ведення процесу (яка відповідає лінійній швидкості на поверхні бандажів валків-кристалізаторів) варіювалася в межах від 3,25 м/хв до 5,57 м/хв.

$$V_B = \frac{V_D}{u} \times 2\pi R \quad (3.1)$$

де V_B – лінійна швидкість валків-кристалізаторів; V_D – швидкість обертання шпинделя двигуна; u – передатне число понижуючого редуктора, рівне 250; R – радіус валка-кристалізатора, рівний 0,185 м; π – число Пі = 3,14.

Перша серія теоретичних досліджень була присвячена визначенню впливу швидкості ведення процесу на ступінь деформації товстого елемента штаби.

Для оцінки ступеня деформація, в якості результатів моделювання було отримано розподіл температур в зоні кристалізації-деформації (рис. 3.3).

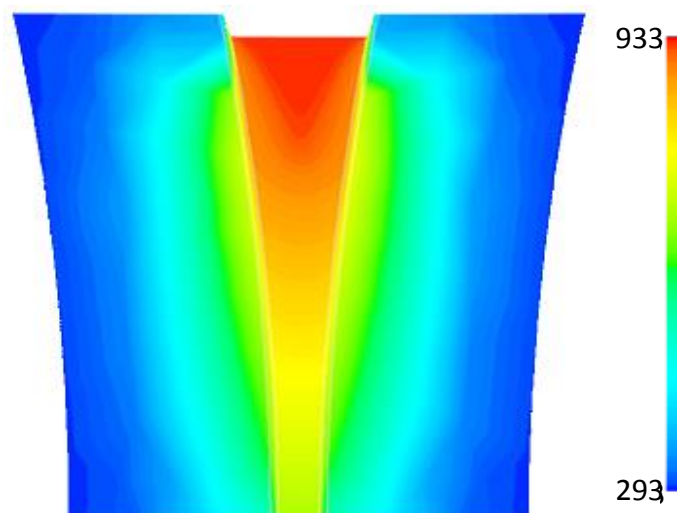


Рис. 3.3. Приклад розподілу температур в зоні кристалізації-деформації для товстого елемента профільованої штаби, який отримано шляхом математичного моделювання в скінченно-елементному середовищі Ansys Flotran

Шляхом зіставлення температур і в'язкостей металу при даних температурах були отримані координати точки повної кристалізації товстого елемента профільованої штаби, тобто точки початку зони деформації товстого елемента. Виходячи з геометрії зони кристалізації-деформації було виведено рівняння для розрахунку товщини товстого елемента профільованої штаби в площині початку зони деформації (3.2):

$$s_0 = \left(R + \frac{s}{2} - \sqrt{R^2 - l_{\text{деф.}}^2} \right) * 2 \quad (3.2)$$

де s_0 — товщина товстого елемента профільованої штаби в точці початку зони деформації; s — товщина товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів; R — радіус валка-кристалізатора; $l_{\text{деф.}}$ — довжина зони деформації.

З використанням наведеного рівняння (3.2) було проведено розрахунок ступеня деформації даного елемента штаби при різних значеннях швидкості ведення процесу (рис. 3.4). Отримані результати показали, що ступінь деформації товстого елемента штаби зменшується по мірі зростання швидкості ведення процесу. Насамперед, це викликано зменшенням тривалості контакту між валками-кристалізаторами і розплавленим та повністю кристалізованим металом, що призводить до збільшення середньої температури в зоні кристалізації-деформації, про що свідчить зростання температури даного елемента штаби на виході з валків-кристалізаторів.

Слід зазначити, що для прийнятих умов і товщини елемента штаби, навіть при великих швидкостях ведення процесу, ступінь деформації товстого елемента штаби значно перевищує мінімально необхідний показник, що дорівнює 20...30%. Це, зі свого боку, дозволяє зробити висновок про високу якість даного елемента профільованої штаби у зв'язку з повною проробкою литої мікроструктури в ході прокатки валками-кристалізаторами.

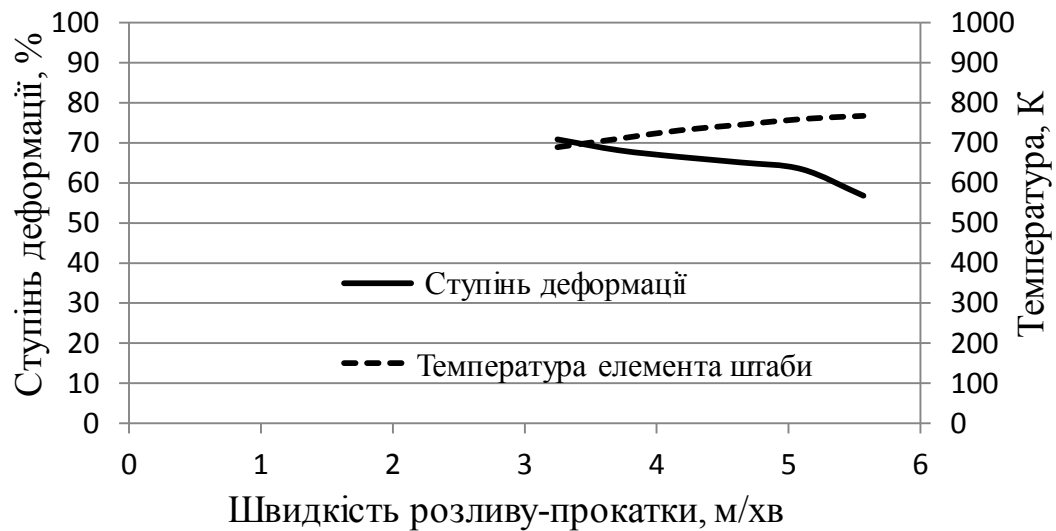


Рис. 3.4. Графік залежності ступеня деформації і середньомасової температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від швидкості ведення процесу

Наведена залежність була апроксимована з метою отримання функції ступеня деформації (y) від швидкості ведення процесу (V) (3.3). Величина достовірності отриманої поліноміальної апроксимації становить 0,99.

$$y = (-a_1 \times V^4 + a_2 \times V^3 - a_3 \times V^2 + a_4 \times V - 2,9749) \times 100 \quad (3.3)$$

Коефіцієнт	$a_1, \text{хв}^4/\text{м}^4$	$a_2, \text{хв}^3/\text{м}^3$	$a_3, \text{хв}^2/\text{м}^2$	$a_4, \text{хв}/\text{м}$
Значення	0,0169	0,2692	1,5788	4,0016

Отримана залежність дозволяє в подальшому використовувати її для більш детального дослідження впливу швидкості валкового розливу-прокатки на ступінь деформації штаби для температури розплаву рівної 933 К і при умові відсутності додаткового теплового опору на межі метал-валок

Аналогічні теоретичні дослідження були виконані для тонкого елемента профільованої штаби. Вихідні дані математичного моделювання були ідентичними, за винятком врахування в граничних умовах додаткового теплового опору з боку лівого валка-кристалізатора, яким є сталева профільююча стрічка. Теоретично даний додатковий тепловий опір зменшує

швидкість кристалізації штаби і як наслідок, довжину зони деформації, що призводить до зниження ступеня деформації тонкого елемента штаби.

Однак у зв'язку з використанням сталеві профілюючої стрічки, для профілювання поверхні валків-кристалізаторів, зменшується товщина елемента профільованої штаби. Цей фактор має протилежний вплив на умови кристалізації штаби на даній ділянці і послідуєчій його деформації: швидкість кристалізації даного елемента штаби і довжина зони деформації збільшується. Зважаючи на суперечливий вплив різних факторів на умови формування профільованого елемента штаби, для визначення раціональних параметрів нової технології є доцільним окремо проаналізувати вплив швидкості валкового розливу-прокатки на параметри формування тонкого елемента профільованої штаби.

Для проведення теоретичних досліджень було прийнято рішення моделювати використання профілюючої стрічки товщиною 0,5 мм. В якості результатів моделювання, аналогічно випадку моделювання процесу валкового розливу-прокатки штаби на товстому елементі профілю, було отримано розподіл температур в зоні кристалізації-деформації, один з яких наведено на рисунку 3.5.

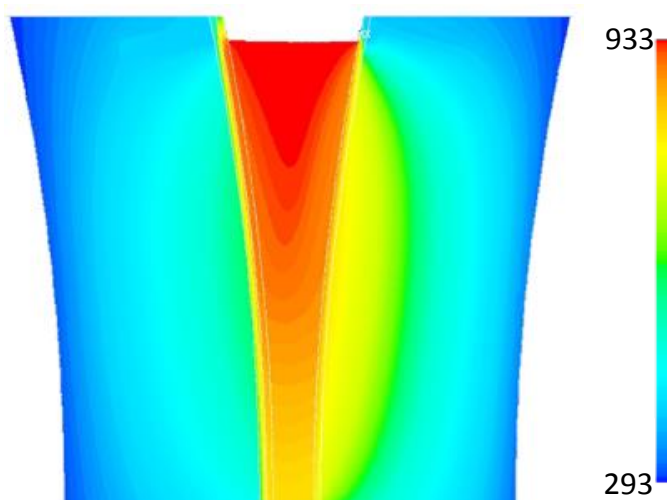


Рис. 3.5. Приклад розподілу температур в зоні кристалізації-деформації для тонкого елемента профільованої штаби, що отримано шляхом математичного моделювання в скінченно-елементному середовищі Ansys Flotran

Наявність профілюючої стрічки на поверхні одного з валків-кристалізаторів призводить до появи асиметричності температурних полів і, відповідно, форми фронту кристалізації відносно середньої лінії валків на даній ділянці (див. рис. 3.5). В той же час, на ділянках валків-кристалізаторів без профілюючої стрічки форма фронту кристалізації і температурні поля симетричні відносно середньої лінії валків (див. рис. 3.3). Дана особливість підтверджується схожими результатами досліджень умов формування біметалевих алюміній-сталевих штаб, яка описана в роботі [49].

У зв'язку із впливом профілюючої стрічки на формування тонкого елемента штаби, в подальших розрахунках ступеня деформації даного елемента необхідно враховувати змінений на величину товщини профілюючої стрічки, діаметр одного з валків-кристалізаторів. Враховуючи все вищезазначене, було виведене рівняння (3.4) для розрахунку товщини тонкого елемента штаби на початку зони деформації:

$$s_{0,T} = 2 \times R + s_T + s_L - \left(\sqrt{R^2 - l_{\text{деф.}}^2} + \sqrt{(R + s_L)^2 - l_{\text{деф.}}^2} \right), \quad (3.4)$$

де $s_{0,T}$ — товщина тонкого елемента профільованої штаби в точці початку зони деформації, мм; s_T — товщина тонкого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів, мм; s_L — товщина профілюючої стрічки яка використовуються, мм.

Використовуючи отримані результати було проведено перерахунок ступеня деформації тонкого елемента штаби в залежності від лінійної швидкості ведення процесу (рис. 3.6). Для полегшення подальшої роботи з отриманими даними залежність ступеня деформації, як одного з основних показників якості виготовленої штаби, від швидкості процесу валкового розливу-прокатки, також була апроксимована (3.5). Відношення кореляції отриманої поліноміальної функції також становило 0,99.

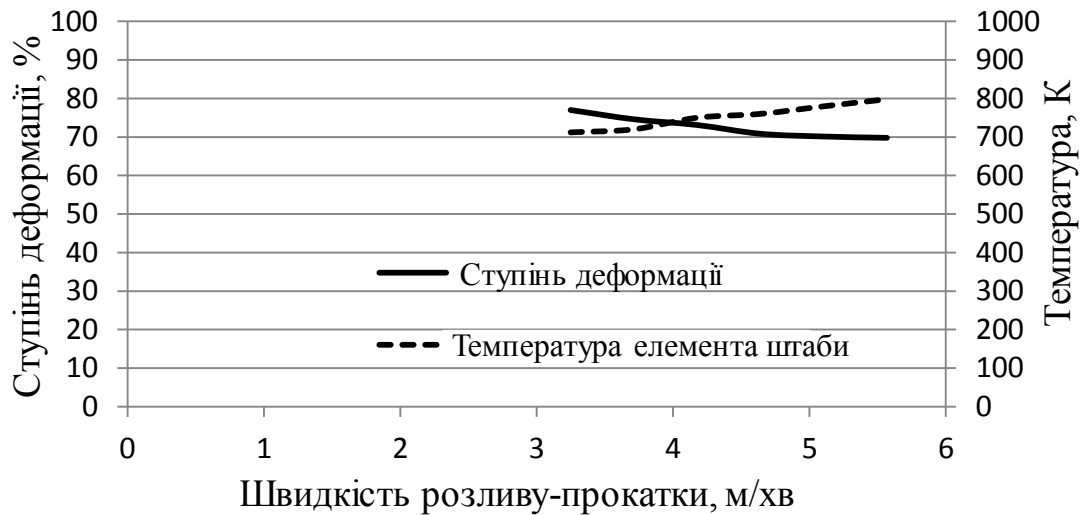


Рис. 3.6. Графік залежності ступеня деформації і середньомасової температури елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від швидкості валкового розливу-прокатки

$$y = (a_5 \times V^4 - a_6 \times V^3 + a_7 \times V^2 - a_8 \times V + 1,5374) \times 100 \quad (3.5)$$

Коефіцієнт	$a_5, \text{хв}^4/\text{м}^4$	$a_6, \text{хв}^3/\text{м}^3$	$a_7, \text{хв}^2/\text{м}^2$	$a_8, \text{хв}/\text{м}$
Значення	0,0022	0,0355	0,2165	0,6416

Характер зміни ступеня деформації тонкого елемента профільованої штаби в залежності від швидкості обертання валків-кристалізаторів, аналогічний зміні ступеня деформації товстого елемента: при збільшенні швидкості валкового розливу-прокатки ступінь деформації тонкого елемента знижується, що свідчить про зменшення довжини зони деформації. Характер зміни температури тонкого елемента подібний аналогічній залежності для товстого елемента. Для тонкого елемента профільованої штаби також виконується вимога, щодо мінімального ступеня деформації для всіх значень швидкостей з досліджуваного інтервалу. Це дозволяє зробити висновок про те, що швидкість валкового розливу-прокатки для прийнятих базових умов реалізації процесу не є критичним показником, який може істотно погіршити якість сформованої з розплаву штаби з профільованим поперечним перерізом та заданими товщинами елементів профілю.

Аналіз отриманих даних показав, що максимальна різниця в абсолютних значеннях відносного ступеня деформації між товстим та тонким елементами становить 13 %, а мінімальна 5,75 %, що відповідають швидкостям валкового розливу-прокатки 4,6 м/хв та 5,56 м/хв, відповідно. Відомо, що при збільшенні ступеня деформації штаби збільшується об'єм металу, який зміщується. Приймаючи цей факт до уваги, а також закон сталості секундних об'ємів, можна зробити висновок про те, що швидкість виходу елемента штаби разом зі збільшенням ступеня його деформації, також прагне до збільшення. З метою забезпечення високої якості виготовлених профільованих штаб слід використовувати в якості критерію її якості не тільки ступінь деформації по різних елементах штаби, а також швидкість виходу різних елементів штаби з валків-кристалізаторів при їх незалежному розгляді.

Виходячи з вищесказаного, результати математичного моделювання були додатково проаналізовані з метою вивчення впливу швидкості валкового розливу-прокатки на швидкість виходу різних елементів штаби з валків-кристалізаторів. Оскільки найбільш явно на швидкість окремих елементів штаби, при незалежному їх розгляді, впливають швидкості, що спрямовані в напрямі осі прокатки, для аналізу використовувався саме цей показник. На рисунку 3.7, в загальному вигляді, представлені графіки відповідних залежностей для товстого та тонкого елементів профілю.

Аналіз положення кривих на графіку (див. рис. 3.7) показує, що вплив лінійної швидкості валків-кристалізаторів на швидкість виходу елементів штаби з валкового зазору несе монотонний і практично лінійний характер: по мірі росту швидкості розливу-прокатки швидкості елементів профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів також зростають. В якості швидкості елемента штаби в даній роботі прийнято вважати середню арифметичну швидкість елемента штаби по її товщині в перерізі виходу з валків-кристалізаторів. Слід зазначити, що при збільшенні швидкості процесу швидкість виходу елементів профільованої штаби зростає, незважаючи на зменшення довжини зони деформації і ступеня деформації елементів штаби. Це

може бути пов'язане з переважаючим впливом зростання окружної швидкості валків-кристалізаторів, в умовах прийнятого допущення про наявність повного прилипання металу до поверхні валків-кристалізаторів по всій довжині зони кристалізації-деформації, на швидкість виходу штаби з валків.



Рис. 3.7. Залежність середньої швидкості елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів від швидкості ведення процесу

Як може здатися на перший погляд, відмінність в швидкостях виходу товстого та тонкого елемента незначна і становить, в абсолютних значеннях, близько 0,01...0,14 м/хв. Однак, навіть незначні неузгодження швидкостей по елементах профілю є критичними, оскільки можуть призвести до викривлення форми або появи тріщин на поверхні виготовленої штаби в ході її формування з розплаву. Точка перетину отриманих кривих, що відповідає швидкості 3,78 м/хв, є раціональною швидкістю валкового розливу-прокатки, яка дозволяє забезпечити виконання умови ідентичності швидкостей виходу різних елементів профільованої штаби в перерізі їх виходу з валків-кристалізаторів. Дотримання цієї умови гарантує мінімальний рівень додаткових розтягуючих напружень і зменшує пов'язаний з ними ризик дефектоутворення.

Таким чином, для розглянутого випадку виготовлення профільованої штаби з описаним вище профілем за допомогою нового способу валкового

розливу-прокатки з використанням розробленого пристрою, температурою розплаву 933 К і довжиною зони кристалізації-деформації рівною 35 мм, слід встановлювати швидкість валкового розливу-прокатки на рівні 3,78 м/хв. Дане значення швидкості процесу забезпечить оптимальні умови кристалізації та деформації різних елементів профільованої штаби, які так само гарантують достатні ступені деформації елементів штаби і забезпечать ідентичність швидкостей виходу елементів штаби з валків-кристалізаторів, що гарантує високу якість готової профільованої штаби.

3.3 Аналіз впливу температури розплаву на закономірності формування профільованих штаб з розплаву

Іншим важливим параметром, що визначає умови формування штаб при валковому розливі-прокатці, є температура розплаву, який подається в зазор між валками-кристалізаторами. Дослідження впливу температури розплаву можливе й експериментальним шляхом, однак проведення натурних експериментів пов'язане з великими витратами часу, що ускладнює аналіз умов кристалізації і формозміни штаби в великому діапазоні температур. Саме тому було прийняте рішення використати для проведення подібного типу аналізу розрахунки за допомогою чисельного математичного моделювання, яке дозволяє провести дослідження для великої кількості варіантів вихідних даних при менших витратах часу.

З метою дослідження впливу температури розплаву використовувалися базові вихідні дані, аналогічні описаним вище в підрозділі 3.2. Базове значення швидкості ведення процесу було прийняте рівним 3,25 м/хв. Значення температури розплаву в ході математичного моделювання варіювалося в межах 933...973 К. Вибір нижньої межі області варіювання температури рівної 933 К обумовлено необхідністю гарантованого забезпечення відсутності передчасної кристалізації елементів штаби, оскільки при проведенні експериментальних досліджень передчасна кристалізація штаби призведе до зростання довжини

зони деформації і значному збільшенню сили, що діє на валки-кристалізатори. Це, зі свого боку, може призвести до зупинки процесу чи, в критичному випадку, до виходу з ладу окремих елементів обладнання. Перевищення верхньої межі температури більше 973 К призводить до перегріву розплаву і викликає підвищену швидкість дифузії водню в розплавлений алюміній, що при послідуєчій кристалізації металу збільшує ризик утворення пористості та тріщин [85-87].

Перша частина теоретичного аналізу процесу була виконана з метою дослідження впливу температури розплаву на умови кристалізації-деформації товстого елемента штаби. В якості результатів чисельних рішень були також отримані поля розподілу температур в області кристалізації-деформації, завдяки яким були отримані координати межі між зонами кристалізації та деформації для всіх досліджуваних значень температури розплаву. Для перерахунку ступеня деформації штаби, як однієї з характеристик якості виготовленої штаби, була використана раніше наведена формула (3.2). В результаті розрахунків, після обробки даних температурних досліджень, були отримані криві, які описують характер впливу температури розплаву на ступінь деформації і температуру товстого елемента профільованої штаби (див. рис. 3.8).

При збільшенні температури розплаву, який подається в простір між валками-кристалізаторами, ступінь деформації товстого елемента профільованої штаби знижується, що підтверджує зростання температури даного елемента в площині виходу з валків-кристалізаторів. Тобто, по мірі зростання температури розплаву зростає середньомасова температура металу в зоні кристалізації-деформації, що призводить до більш пізньої наскрізної кристалізації матеріалу і зменшенню довжини зони деформації даного елемента штаби. Зростання температури елемента профільованої штаби у випадку використання для виготовлення профільованих штаб алюмінієвих сплавів відмінних від EN AW-1050 може призвести до появи на них гарячих тріщин.

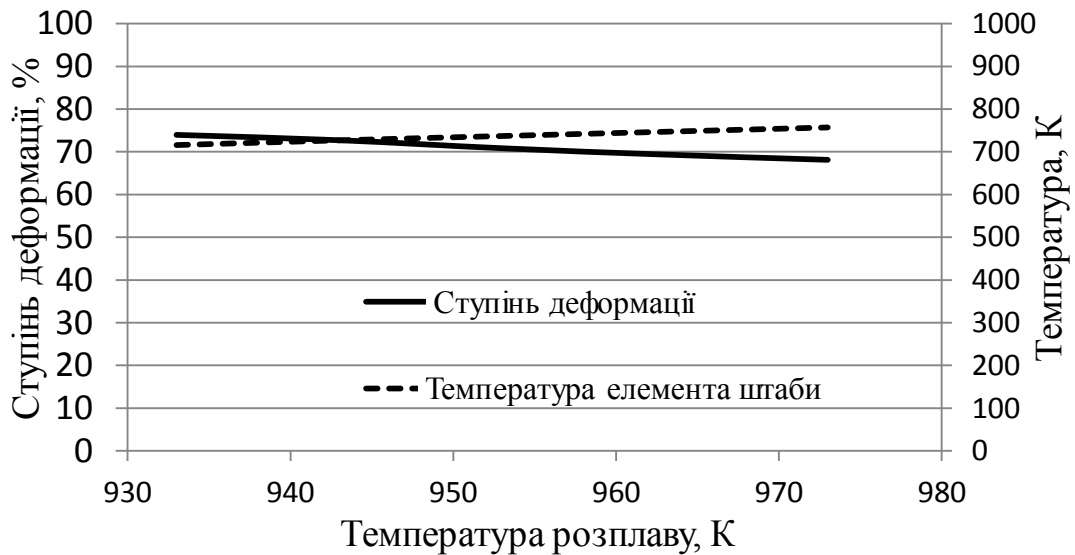


Рис. 3.8. Графіки залежності ступеня деформації і середньомасової температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від температури розплаву

Отримані залежності показали, що за обраних базових умов реалізації процесу температура розплаву має значно менший вплив на ступінь деформації товстого елемента штаби і температуру даного елемента на виході з валків-кристалізаторів, ніж швидкість обертання валків-кристалізаторів.

Не дивлячись на те, що дана залежність має майже лінійний характер, для полегшення подальшої роботи з експериментальними даними, вона також була апроксимована і описана поліноміальною функцією (3.6). Точність проведеного кореляційного аналізу складає 0,99.

$$y = (b_1 \times T^3 - b_2 \times T^2 - b_3 \times T + 631.03) \times 100 \quad (3.6)$$

Коефіцієнт	b_1, K^{-3}	b_2, K^{-2}	$b_3, 1/K$
Значення	7×10^{-7}	0,0021	1,9952

Слід врахувати, що інтенсивність впливу температури розплаву на ступінь деформації товстого елемента профільованої штаби змінюється по мірі зміни товщини даного елемента. Це обумовлено збільшенням об'єму металу в

зазорі між валками-кристалізаторами і значним збільшенням кількості тепла, яке необхідно відвести від розплаву на контакті метал-валок.

Проведені дослідження показали, що зміна температури розплаву у встановлених межах не призводить до зниження ступеня деформацій товстого елемента нижче 20...30%, що гарантує повну проробку мікроструктури і отримання штаби високої якості. Подібні дослідження були виконані також для тонкого елемента профільованої штаби. Для розрахунків ступеня деформація, в даному випадку, використовувалась наведена вище формула (3.4). В результаті, було отримано криві, які описують характер зміни ступеня деформації і температури тонкого елемента в залежності від температури розплаву (рис. 3.9).

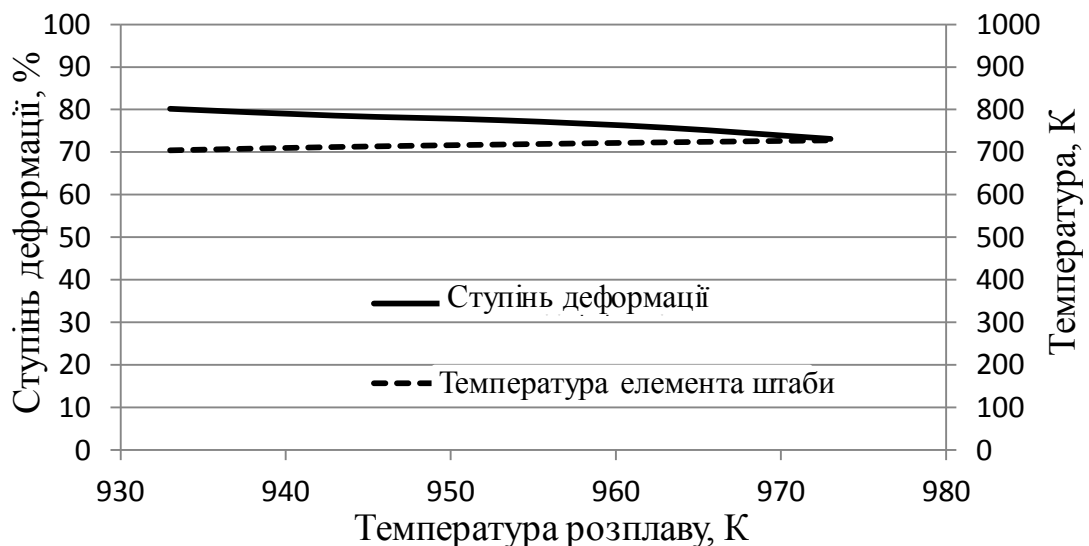


Рис. 3.9. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури тонкого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від початкової температури розплаву

За отриманими даними була виведена поліноміальна функція, яка описує характер зміни ступеня деформації тонкого елемента профільованої штаби від температури розплаву (3.7).

Дослідження показали, що характер зміни ступеня деформації і температури тонкого елемента профільованої штаби аналогічний до такої ж

залежності для товстого елемента. Відмінності між ними полягають тільки в абсолютних значеннях даних показників. Ступінь деформації тонкого елемента профільованої штаби при 933 К становить 80 %, що у 1,1 рази вище мінімального значення при 973 К. При цьому ступінь деформації тонкого елемента профільованої штаби більше ступеня деформації товстого елемента штаби на 4,98...6,65%. Температура тонкого елемента штаби вище температури товстого елемента профільованої штаби, що викликано наявністю додаткового теплового опору на межі метал-валок, яким і є профілююча стрічка. Через цей додатковий тепловий опір відбір тепла валками-кристалізаторами від розплаву ускладнений і наскрізна кристалізація штаби займає більш тривалий час.

$$y = (-b_4 \times T^3 + b_5 \times T^2 - b_6 \times T + 1000,3) \times 100 \quad (3.7)$$

Коефіцієнт	b_4, K^{-3}	b_5, K^{-2}	$b_6, 1/K$
Значення	1×10^{-6}	0,0033	3,1624

Описані вище закономірності залежностей ступеня деформації і температури виходу штаби від температури розплаву подібні як для товстого елемента, так і для тонкого. Отримані залежності показали, що зміна температури розплаву в прийнятих межах та при обраних базових умовах реалізації валкового розливу-прокатки не призводить до зниження ступеня деформації елементів профільованої штаби нижче мінімально необхідної величини. В подальшому, при визначенні раціональних умов ведення процесу, можна приймати до уваги тільки незалежно розглянуті швидкості виходу різних елементів штаби з валків. Виходячи з цього, було реалізовано аналіз даних математичного моделювання з метою дослідження впливу початкової температури розплаву на середню швидкість виходу з валків-кристалізаторів для товстого та тонкого елемента профільованої штаби. В результаті узагальнення розрахункових даних, отриманих шляхом математичного моделювання в середовищі ANSYS Flotran, були побудовані криві, які

описують залежності швидкості елементів профільованої штаби від початкової температури розплаву при їх незалежному розгляді (див. рис 3.10).

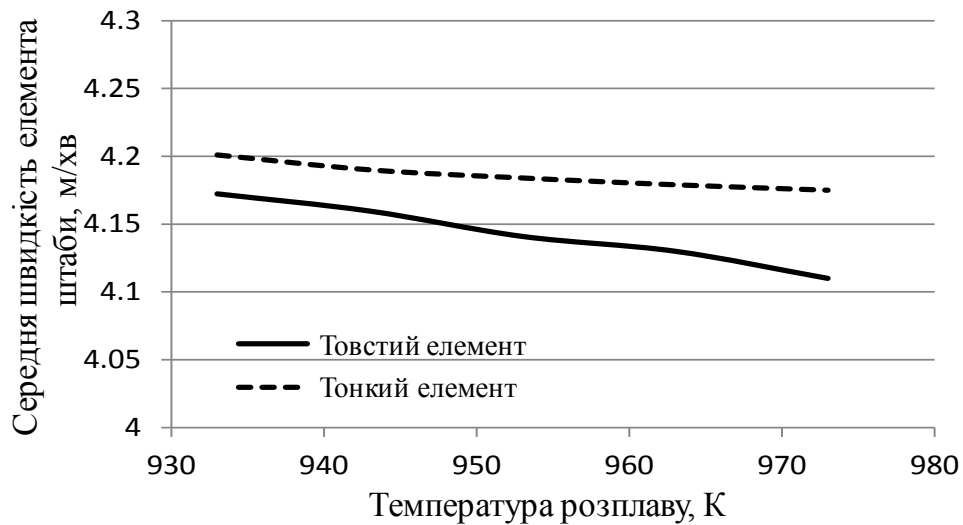


Рис. 3.10. Залежність середньої швидкості елемента профільованої штаби в площині виходу з валків від початкової температури розплаву

Аналіз графіків на рисунку 3.10 свідчить про те, що при збільшенні початкової температури розплаву швидкість виходу тонкого та товстого елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів знижується. Це пояснюється зменшенням довжини зони деформації і, відповідно, ступеня деформації, якого метал зазнає в міжвалковому просторі. При цьому зменшення швидкості товстого елемента, зі зростанням температури розплаву, відбувається більш інтенсивно, ніж швидкості тонкого елемента профілю. Це можна пояснити більшим об'ємом металу на ділянці формування товстого елемента штаби, що призводить до збільшення кількості тепла, яке необхідно відвести від розплаву для його наскрізної кристалізації від взаємодії з поверхнею валків-кристалізаторів. Подібна закономірність формування товстого та тонкого елементів штаби також спостерігалась в першій серії експериментів при проведенні досліджень залежності швидкості елементів профільованої штаби від швидкості процесу (див. рис.3.7), хоча і не мала такого явного прояву.

Порівняння положення кривих на рисунках 3.8-3.10 дозволяє зробити висновок про те, що швидкість наскрізної кристалізації тонкого елемента профільованої штаби, при обраних умовах її формування, перевищує швидкість наскрізної кристалізації товстого елемента штаби. Відповідно, довжина зони деформації тонкого елемента, як і ступінь деформації, також вища. Це дозволяє зробити припущення про те, що наявність додаткового теплового опору відіграє меншу роль у формуванні зони деформації, ніж товщина елемента штаби.

З одного боку, на практиці досить складно досягти різної температури розплаву на окремих ділянках зони кристалізації-деформації, що відповідають різним елементам профільованої штаби. Крім того, з'являється ризик того що контакт валів-кристалізаторів з металом, який має різну температуру уздовж бочки валка-кристалізатора, призведе до зміни їх теплового балансу, який не зможе бути прийнятим до уваги при моделюванні з використанням двовимірної моделі процесу. Це може призвести до помилок в розрахунках основних параметрів, що характеризують умови формування штаб з розплаву такі, як ступінь деформації та швидкість виходу по різних її елементах.

З іншого боку, при аналізі отриманих залежностей нескладно помітити відсутність точок перетину відповідних кривих (див. рис. 3.10). Таким чином, виключно шляхом зміни початкової температури розплаву неможливо домогтися повного узгодження швидкостей виходу елементів профільованої штаби. Отже відсутній механізм, який дозволяє виготовити штаби з профільованим поперечним перерізом з мінімальним рівнем внутрішніх розтягуючих напружень шляхом зміни температури розплаву. Тому ризик дефектоутворення, в області сполучення елементів профільованої штаби різної товщини, залишається великим.

Для перевірки повторюваності результатів розрахунків, здійснених за допомогою створеної математичної моделі, було проведено порівняння даних, отриманих в двох серіях чисельних експериментів при дослідженні впливу на середню швидкість виходу елементів профільованої штаби швидкості

обертання валків і температури розплаву, для базових умов математичного моделювання. Оскільки в обох випадках здійснювалися незалежні розрахунки для швидкості валкового розливу-прокатки 3,25 м/хв, порівняння результатів проводилося саме для цього її значення. Як в першому, так і в другому випадку, швидкість товстого елемента профільованої штаби, при ідентичних умовах моделювання, становила 4,172 м/хв, а тонкого - 4,201 м/хв, що говорить про прецизійність результатів математичного моделювання і стабільність роботи розрахункового модуля програми.

Підводячи підсумок на підставі аналізу отриманих даних про вплив температури розплаву на ступінь деформації, температуру і швидкість виходу елементів штаби з профільованим поперечним перерізом з валків-кристалізаторів, можна зробити висновок про те, що варіювання температури розплаву не є технологічним параметром процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб, використовуючи який можна досягти поліпшення їх якості. Пояснюється це тим, що різниця швидкостей, яка становить від 0,003 м/хв до 0,09 м/хв, з великою часткою імовірності призведе до дефектоутворення на ділянках сполучення елементів профільованої штаби.

3.4 Аналіз впливу довжини зони кристалізації-деформації на закономірності формування профільованих штаб з розплаву

Як вже зазначалося раніше, третім технологічним параметром процесу валкового розливу-прокатки є довжина зони кристалізації деформації (довжина ванни розплаву). Даний параметр процесу визначає об'єм металу, що знаходиться в зазорі між валками-кристалізаторами і розмір поверхні тепловідбору, завдяки чому з'являється додаткова можливість управління процесом валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом.

Для дослідження впливу довжини зони кристалізації-деформації також раціонально використовувати математичне моделювання, причиною цього

також є складність доступу до неї і неможливість виконання замірів і варіювання її довжини безпосередньо в ході процесу.

В якості вихідних даних для математичного моделювання були використані наступні технологічні параметри процесу безлиткового виробництва штаб: температура розплаву була встановлена рівною 933 К, швидкість валкового розливу-прокатки – 3,25 м/хв.

Під час валкового розливу-прокатки в зоні кристалізації-деформації знаходиться метал, агрегатний стан якого змінюється по мірі його просування уздовж середньої лінії по ходу обертання валків від розплаву до повністю закристалізованої штаби. Відповідно, збільшення довжини зони кристалізації-деформації призводить до збільшення об'єму металу, що знаходиться в ній. Збільшення об'єму металу, зі свого боку, призводить до збільшення кількості тепла, яке необхідно відвести від нього для забезпечення повної його кристалізації. Разом з тим, збільшення довжини зони кристалізації-деформації призводить до росту площі контакту валків-кристалізаторів з металом. Відповідно, збільшується площа поверхні теплообміну, що забезпечує прискорену кристалізацію матеріалу. Тобто, варіювання такого параметру як довжина зони кристалізації-деформації має неоднозначний вплив на умови формування елементів профільованих штаб. У зв'язку з цим, найбільш раціональним рішенням для аналізу впливу довжини зони кристалізації-деформації на умови формування профільованих штаб є використання математичного моделювання.

Для дослідження впливу довжини зони кристалізації-деформації було обрано діапазон її варіювання, мінімальною величиною в якому є 25 мм, а максимальною – 60 мм. Обраний діапазон величин пояснюється конструкційними особливостями лабораторної машини валкового розливу-прокатки.

За аналогією з вже проведеними теоретичними дослідженнями, спочатку, за результатами чисельних експериментів, було проаналізовано вплив довжини зони кристалізації-деформації на ступінь деформації в двовалковому

кристалізаторі і температуру виходу товстого елемента профільованої штаби з валків. В результаті обробки отриманих даних були побудовані криві, що характеризують зміну ступеня деформації і температури товстого елемента профільованої штаби, як показників якості виготовлених штаб в залежності від довжини зони кристалізації-деформації (рис. 3.11).

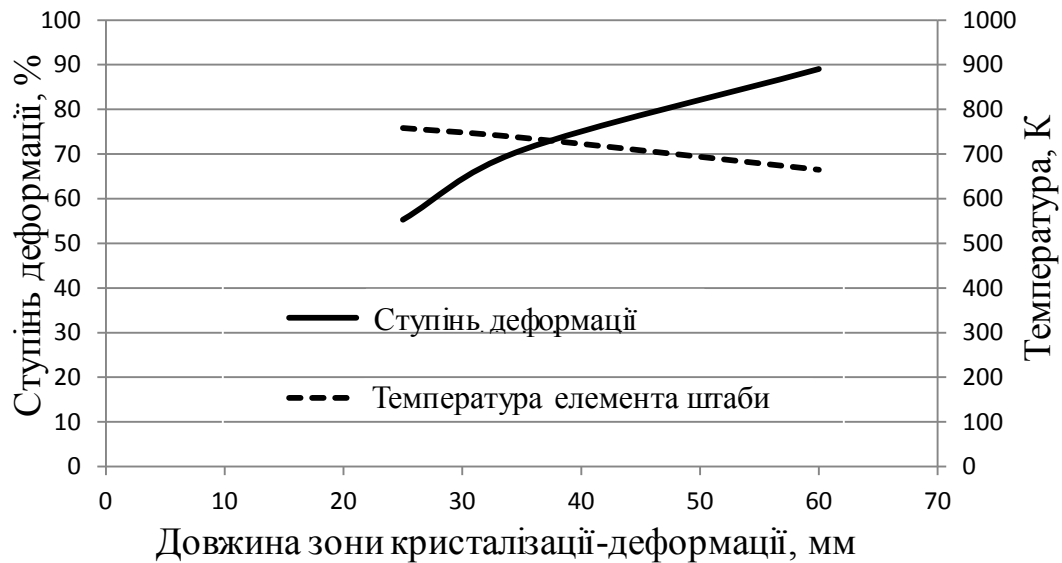


Рис. 3.11. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від довжини зони кристалізації-деформації

Аналіз отриманих даних показав, що по мірі росту довжини зони кристалізації-деформації довжина зони деформації також збільшується. Причиною цього є збільшення площі контакту поверхні валків-кристалізаторів з металом в зоні кристалізації-деформації, яка в обраному інтервалі довжин зони кристалізації-деформації відіграє більшу роль ніж збільшення об'єму розплаву, який подається в міжвалковий простір, що призводить до збільшення кількості тепла, яке необхідно відвести від розплаву для наскрізної кристалізації штаби. Для аналітичного опису даної залежності, отримані дані були апроксимовані за допомогою поліноміальної функції (3.8). Відношення кореляції отриманої функції, становить 0,99

$$y = (c_1 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}}^3 - c_2 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}}^2 + c_3 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} + 0,4566) \times 100 \quad (3.8)$$

Коефіцієнт	$c_1, \text{мм}^{-3}$	$c_2, \text{мм}^{-2}$	$c_3, 1/\text{мм}$
Значення	8×10^{-6}	0,0012	0,0652

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок про те, що, при виготовленні профільованої штаби зі сплаву EN AW-1050 з заданими геометричними розмірами, зміна довжини зони кристалізації-деформації в обраному інтервалі для ділянки валка-кристалізатора, на якому формується товстий елемент профільованої штаби, не може призвести до критичного зниження рівня обтиснення. Відповідно, початкова лита мікроструктура даного елемента штаби буде перероблена в рекристалізовану дрібнозернисту структуру, що орієнтована в напрямі осі ведення процесу і характерна для мікроструктури гарячекатаного металу.

В наступній серії розрахунків було виконано моделювання валкового розливу-прокатки тонкого елемента штаби з профільованим поперечним перерізом. Вихідні дані теоретичного аналізу, які відповідають характерним технологічним параметрам процесу, були прийняті ідентичними до умов чисельного експерименту, що було проведено раніше для товстого елемента штаби.

В результаті математичного моделювання були отримані дані, після обробки яких були побудовані залежності ступеня деформації і температури тонкого елемента профільованої штаби від довжини зони кристалізації-деформації (див. рис. 3.12).

Для спрощення подальшого використання отриманої залежності вона була апроксимована поліноміальною функцією, що описує зміну ступеня деформації в залежності від довжини зони кристалізації-деформації. (3.9). Точність розрахунків за допомогою даної функції по досліджених точках становить 0,99.

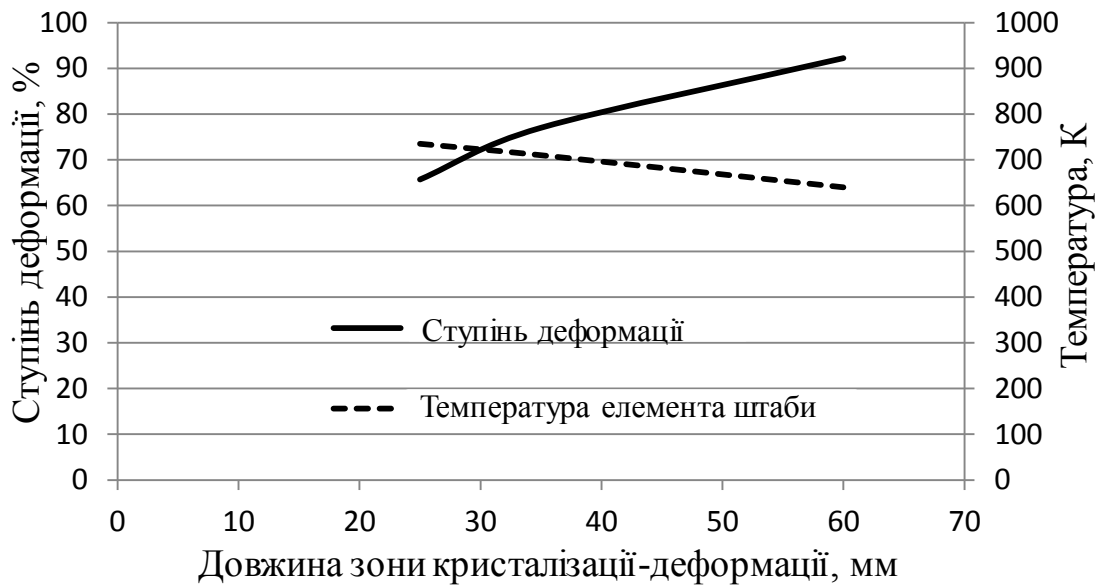


Рис. 3.12. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури тонкого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від довжини зони кристалізації-деформації

$$y = (c_4 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}}^3 - c_5 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}}^2 + c_6 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - 0,068702) \times 100 \quad (3.9)$$

Коефіцієнт	$c_4, \text{мм}^{-3}$	$c_5, \text{мм}^{-2}$	$c_6, 1/\text{мм}$
Значення	6×10^{-6}	0,0009	0,0471

Отримана залежність показала схожий характер зміни ступеня деформації і температури тонкого елемента профільованої штаби в порівнянні з її товстим елементом. Ступінь деформації тонкого елемента штаби також зростає по мірі збільшення довжини зони кристалізації-деформації, що корелює зі збільшенням довжини зони деформації. Про це також, свідчать зменшення середньої температури даного елемента штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів.

Слід зазначити, що зі зміною довжини зони кристалізації-деформації ступінь деформації тонкого елемента, за прийнятих умов, вище ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби в абсолютних величинах на 3...10,4%, що може проявитись в відмінності швидкостей виходу даних елементів з валків-кристалізаторів і призвести до дефектоутворення в області сполучення елементів штаби різної товщини. Виходячи з цього, за аналогією з

вже проведеними теоретичними дослідженнями, було проведено незалежний аналіз характеру зміни середньої швидкості виходу товстого та тонкого елемента профільованої штаби з валків-кристалізаторів при варіюванні довжини зони кристалізації-деформації. За результатами отриманого масиву розрахункових даних, були побудовані криві, що характеризують зміну середньої швидкості елементів профільованих штаб в площині виходу з валків-кристалізаторів (рис. 3.13).

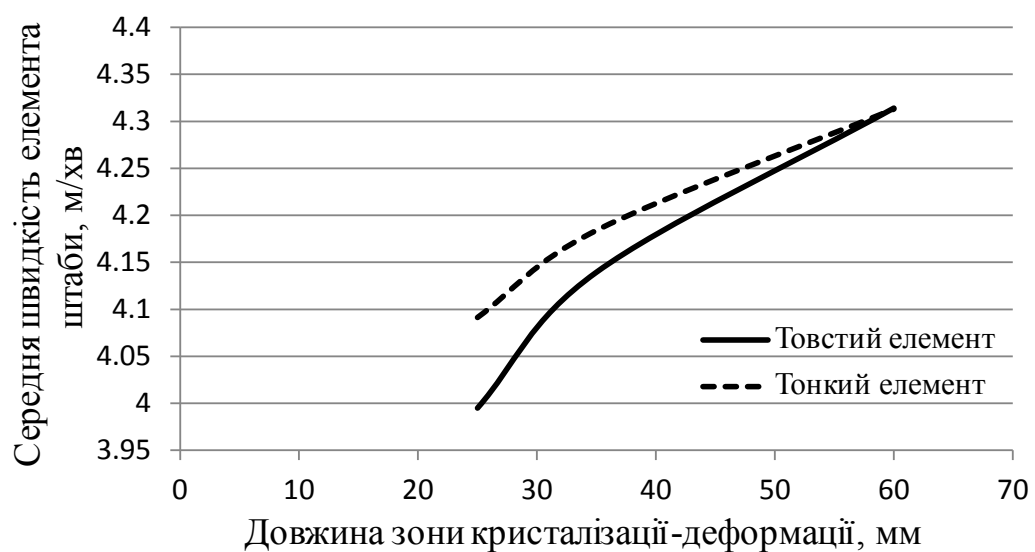


Рис. 3.13. Залежність середньої швидкості елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів від довжини зони кристалізації-деформації

Отримані залежності показали схожий характер зміни швидкості елементів профільованої штаби. При збільшенні довжини зони кристалізації-деформації швидкість кожного елемента профільованої штаби зростає, що відповідає аналогічним залежностям ступенів деформації даних елементів.

Аналізуючи отримані криві ми бачимо, що при максимальній довжині зони кристалізації-деформації рівній 60 мм швидкості виходу елементів профільованої штаби вирівнюються, що забезпечує відсутність додаткових розтягуючих напружень, які здатні призвести до дефектоутворення на поверхні

штаби. Однак, слід врахувати, що при даному значенні довжини зони кристалізації-деформації ступінь деформації тонкого елемента профільованої штаби становить 92%, а товстого 89%. Подібна пластична деформація є надмірною і може призвести до критичного росту сили, що діє на валки-кристалізатори в ході процесу, яка може призвести до виходу з ладу елементів машини валкового розливу-прокатки.

Для підтвердження стабільності розрахунків, було проведено порівняння показників ступеня деформації, отриманих в ході даної та попередніх серій теоретичних досліджень. Відхилення відносного ступеня деформації в абсолютних значеннях склало 0,2 %. Таке відхилення при розрахунку ступеня деформації можна порівняти з похибкою розрахунку з визначення довжини зони деформації за результатами математичного моделювання. Подібна повторюваність результатів теоретичного аналізу дозволяє зробити висновок про стабільність скінченно-елементних розрахунків на основі створеної моделі.

3.5 Аналіз впливу товщини елементів профільованої штаби на закономірності їх формування

Четвертим параметром, що має вплив на умови формування елементів профільованої штаби при валковому розливі-прокатці є товщина штаби по різних її елементах. За аналогією з довжиною зони кристалізації-деформації, даний параметр визначає об'єм металу, що знаходиться в просторі між валками-кристалізаторами. В якості вихідних даних для математичного моделювання були використані наступні технологічні параметри процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб: температура розплаву була прийнята рівна 933 К, швидкість валкового розливу-прокатки – 3,25 м/хв, довжина зони кристалізації-деформації – 35 мм. Для дослідження впливу товщини елементів профільованої штаби було обрано діапазон її варіювання від 0,5 мм до 3 мм для тонкого елемента та від 1,0 мм до 3,5 мм для товстого елемента.

За аналогією з раніше описаними теоретичними дослідженнями, спочатку за результатами математичного моделювання було проаналізовано вплив товщини товстого елемента профільованої штаби на ступінь деформації і температуру виходу товстого елемента профільованої штаби з валків-кристалізаторів [88]. За отриманими теоретичними даними були побудовані криві, які описують характер зміни ступеня деформації і температури товстого елемента профільованої штаби в залежності від товщини даного елемента штаби (рис. 3.14).

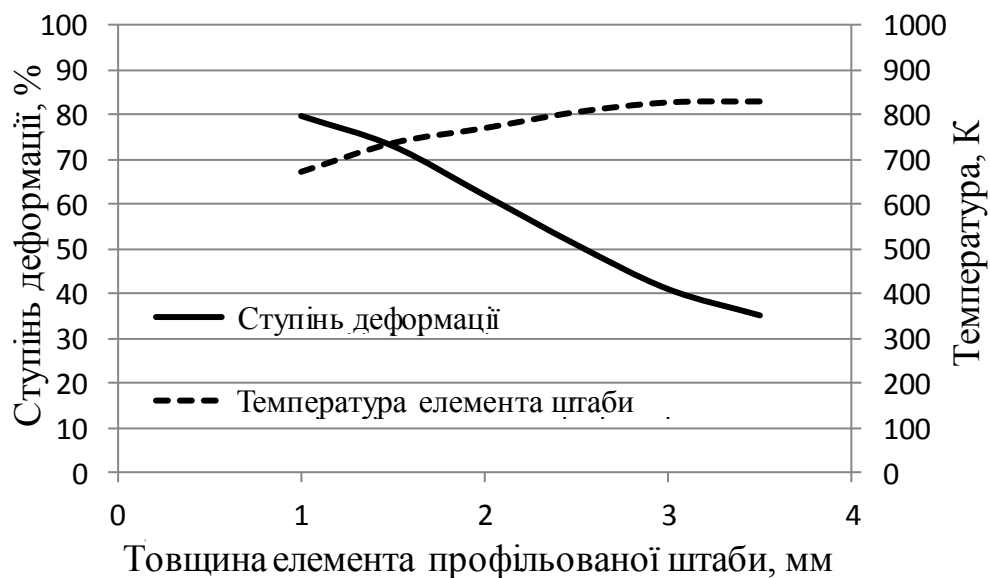


Рис. 3.14. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від товщини товстого елемента профільованої штаби

Отримані дані показують, що, по мірі збільшення товщини товстого елемента профільованої штаби, ступінь деформації даного елемента зменшується. Таким чином, довжина зони деформації зменшується, про що також свідчить зростання температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів. Дана залежність пояснюється збільшенням кількості матеріалу, що знаходиться в міжвалковому просторі і, відповідно, збільшенням кількості тепла, яке необхідно відвести від металу для його

наскрізної кристалізації. Однак, на відміну від дослідженої вище залежності характерної для збільшення довжини зони кристалізації-деформації у випадку збільшення товщини штаби площа контакту металу з поверхнею бандажів валків-кристалізаторів залишається незмінною. Підводячи підсумок вищесказаному, можна зробити висновок про те, що збільшення товщини товстого елемента профільованої штаби призводить до значного зниження ступеня деформації і істотного підвищення температури товстого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів.

Для зручності використання отриманої залежності вона була апроксимована поліноміальною функцією, що описує залежність ступеня деформації від товщини товстого елемента профільованої штаби (3.10). Величина відношення кореляції отриманої регресійної залежності становить 0,99

$$y = (d_1 \times h_{\Pi}^3 - d_2 \times h_{\Pi}^2 + d_3 \times h_{\Pi} + 0,7336) \quad (3.10)$$

Коефіцієнт	$d_1, \text{мм}^{-3}$	$d_2, \text{мм}^{-2}$	$d_3, 1/\text{мм}$
Значення	0,0336	0,2204	0,2511

де h_{Π} – товщина товстого елемента профільованої штаби

Аналіз отриманих в ході теоретичних досліджень даних показав, що зміна товщини товстого елемента в діапазоні від 1 мм до 3,5 мм не призводить до зниження ступеня деформації товстого елемента нижче 35 %, яка перевищує мінімально необхідну величину пластичної деформації і гарантує повну проробку мікроструктури та високу якість виготовленої штаби.

Друга серія досліджень із застосуванням математичної моделі в скінченно-елементному середовищі Ansys Flotran була виконана з метою вивчення характеру впливу товщини тонкого елемента профільованої штаби на ступінь деформації і температуру даного елемента штаби на виході з валків-кристалізаторів. В якості вихідних даних для математичного моделювання використовувалися характерні технологічні параметри процесу, які були

прийняті ідентичними до випадку чисельного експерименту з дослідження впливу товщини товстого елемента профільованої штаби на закономірності її формування. Відмінність в вихідних даних полягала лише в діапазоні варіювання товщини елемента профільованої штаби, який для тонкого елемента становив 0,5...3,0 мм, та наявності додаткового теплового опору на межі метал – валок.

Після обробки отриманих в результаті математичного моделювання даних було побудовано криві залежності ступеня деформації і температури тонкого елемента профільованої штаби від товщини тонкого елемента (див. рис. 3.15).

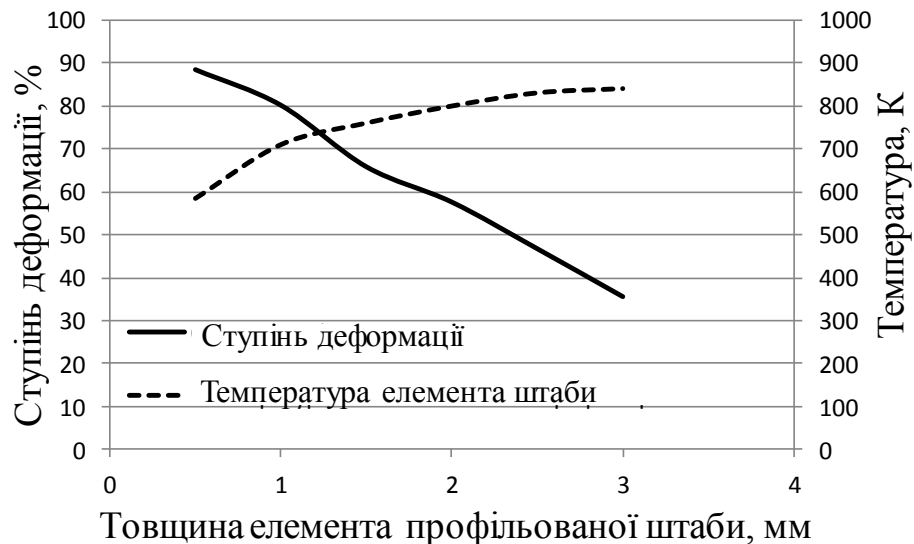


Рис. 3.15. Залежність ступеня деформації і середньомасової температури тонкого елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів від товщини тонкого елемента профільованої штаби

Отримана залежність ступеня деформації тонкого елемента профільованої штаби в залежності від його товщини, також була апроксимована поліноміальною функцією з метою полегшення її подальшого використання (3.11). Відношення кореляції функції, побудованої за даними рисунку 3.15, становить 0,998.

$$y = (-d_4 \times h_{\text{п}}^4 + d_5 \times h_{\text{п}}^3 - d_6 \times h_{\text{п}}^2 + d_7 \times h_{\text{п}} + 0,8437) \times 100 \quad (3.11)$$

Коефіцієнт	$d_4, \text{мм}^{-4}$	$d_5, \text{мм}^{-3}$	$d_6, \text{мм}^{-2}$	$d_7, 1/\text{мм}$
Значення	0,0326	0,2301	0,5539	0,3081

де $h_{\text{п}}$ – товщина тонкого елемента профільованої штаби.

Порівняння отриманих даних (рис. 3.14 та рис. 3.15) дозволяє зробити висновок про схожий характер зміни ступеня деформації і температури тонкого елемента профільованої штаби в залежності від його товщини в порівнянні з аналогічною залежністю для товстого елемента штаби. Ступінь деформації тонкого елемента також зменшується по мірі збільшення його товщини, що відповідає зменшенню довжини зони деформації [89]. Про це, також, свідчить збільшення середньомасової температури тонкого елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів.

Збільшення товщини тонкого елемента профільованої штаби до 3 мм призводить до зменшення його ступеня деформації до 36%. Однак, цей показник ступеня деформації тонкого елемента перевищує мінімально необхідні 30%, що гарантує високу якість штаби у зв'язку з проробкою мікроструктури тонкого елемента в ході валкового розливу-прокатки.

Порівняння отриманих даних показало, що, при різниці товщин товстого та тонкого елемента рівній 0,5 мм, різниця в абсолютних значеннях ступенів деформації даних елементів коливається в діапазоні 0,5...8,8 %. Мінімальна різниця в ступенях деформації елементів профільованої штаби спостерігається при товщині товстого елемента 3,5 мм і товщині тонкого елемента – 3 мм. Однак, навіть така невелика відмінність ступеня деформації призведе до неузгодженості швидкостей елементів профільованої штаби. В зв'язку з чим було проведено додаткові теоретичні дослідження з метою визначення впливу товщини елементів профільованої штаби на швидкість виходу даних елементів профілю з валків-кристалізаторів.

В результаті проведених досліджень, було отримано масив розрахункових даних, що описують зміну швидкості кожного елемента профільованої штаби в

залежності від товщини даного елемента профілю. Для спрощення аналізу отриманих даних були побудовані криві, що описують характер зміни середньої швидкості товстого та тонкого елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів при незалежному їх розгляді, (рис. 3.16).

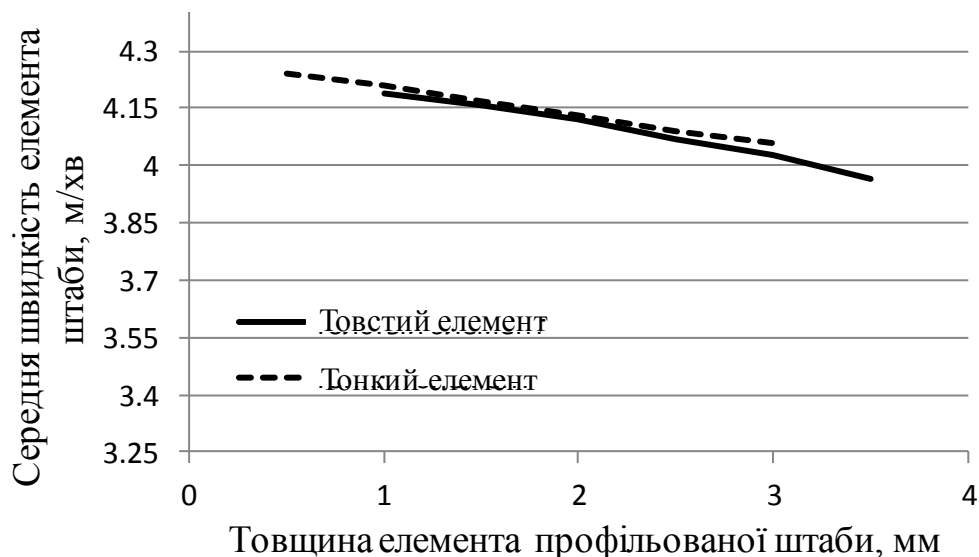


Рис. 3.16. Залежність середньої швидкості елементів профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів від їх товщини

Аналіз отриманих кривих показав, що середня швидкість тонкого елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів дещо перевищує аналогічні показники для товстого елемента профільованої штаби при ідентичній його товщині, а абсолютна різниця їх швидкостей знаходиться в межах 0,04...0,11 м/хв. Це пояснюється тим, що на ділянці формування тонкого елемента профільованої штаби на поверхні валка-кристалізатора присутня профілююча стрічка, лінійна швидкість якої вище лінійної швидкості бандажів валків-кристалізаторів, що призводить до зростання швидкості тонкого елемента штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів.

Характер і інтенсивність зміни швидкості тонкого елемента аналогічний подібній залежності для товстого елемента профільованої штаби. Однак, слід врахувати той факт, що товщина елементів профільованої штаби визначається

необхідними розмірами профілю, що не дозволяє використовувати цей параметр в якості технологічного для забезпечення рівності швидкостей даних елементів.

Висновки до розділу 3

1. Досліджено вплив товщини алюмінієвої штаби на температуру металу в зоні кристалізації-деформації та умови тепловіддачі на межі метал-валок при валковому розливі-прокатці алюмінієвих сплавів при відсутності на поверхні валків-кристалізаторів розділового змащувального шару. На прикладі валкового розливу-прокатки алюмінієвого сплаву EN AW-6082 встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі має великий вплив на точність теоретичних розрахунків які стосуються розподілу температур в зоні кристалізації-деформації і, як наслідок, послідує розрахунок ступеня деформації штаби. Проведені дослідження з використанням інверсного аналізу дозволили вперше визначити та фізично обґрунтувати значення коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок для деяких товщин штаб: для товщини 2 мм коефіцієнт тепловіддачі має становити $17800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для 3 мм – $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і для 4 мм – $13100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Максимальна похибка розрахунку розподілу температур уздовж серединної лінії штаби за допомогою скінченно-елементної моделі з використанням уточнених значень коефіцієнта тепловіддачі на межі метал-валок склала 5,3 %. Особливістю отриманих результатів є можливість їх використання як для випадку виготовлення профільованих штаб, так і для випадку валкового розливу-прокатки тонких плоских штаб з алюмінієвих сплавів.

2. За допомогою створеної математичної моделі визначено, що варіювання швидкості ведення процесу при валковому розливі-прокатці алюмінієвого сплаву EN AW-1050, в діапазоні від 3,25 м/хв до 5,56 м/хв і сталості інших технологічних параметрів, призводить до зменшення ступенів деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби. Ступінь

деформації товстого елемента при швидкості валкового розливу-прокатки 3,25 м/хв в 1,25 рази вище швидкості даного елемента при швидкості ведення процесу 5,56 м/хв і становить 70,8 %. Ступінь деформації тонкого елемента профільованої штаби при швидкості валкового розливу-прокатки 3,25 м/хв становить 77 %, що в 1,1 рази вище ніж при швидкості валкового розливу-прокатки 5,56 м/хв. Також, дослідження показали, що максимальна різниця в абсолютних значеннях відносного ступеня деформації між товстим та тонким елементом становить 13 %, а мінімальна – 5,75 %, які відповідають швидкості обертання валків-кристалізаторів 4,6 м/хв і 5,56 м/хв, відповідно. Визначено, що збільшення швидкості валкового розливу-прокатки призводить до зростання швидкості елементів профільованої штаби. Характер зміни швидкості товстого та тонкого елемента профільованої штаби схожий і має майже лінійний характер, а різниця швидкостей елементів штаби знаходиться в діапазоні 0,01...0,14 м/хв.

3. Встановлено, що збільшення температури розплаву з 933 К до 973 К призводить до зниження ступеня деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби і підвищення температури даних елементів штаби на виході з валків-кристалізаторів. Максимальне значення ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби становить 74 %, що в 1,08 рази вище відносно мінімального значення. Для тонкого елемента профільованої штаби ступінь деформації при 933 К становить 80 %, що у 1,1 рази вище мінімального значення при 973 К. Водночас ступінь деформації тонкого елемента профільованої штаби більше ступеня деформації товстого елемента штаби на 4,98...6,65%. Також встановлено, що швидкість елементів профільованої штаби зменшується по мірі збільшення температури розплаву, при цьому різниця швидкостей елементів штаби становить від 0,003 м/хв до 0,09 м/хв. Отримані дані дозволяють стверджувати, що варіювання температури розплаву не є технологічним параметром процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб, використовуючи який можна досягти поліпшення їх

якості за рахунок вирівнювання швидкостей виходу елементів штаби при незалежному їх розгляді.

4. Визначено, що збільшення довжини зони кристалізації-деформації при валковому розливі-прокатці профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 від 25 мм до 60 мм призводить до збільшення ступеня деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби. Таким чином, ступінь деформації товстого елемента при довжині зони кристалізації деформації 60 мм у 1,61 рази більше відносного ступеня деформації цього елемента при довжині зони кристалізації-деформації рівній 25 мм і становить 89%. Для тонкого елемента профільованої штаби ця різниця становить 1.4 рази, а абсолютне значення ступеня деформації - 92%. Різниця між ступенями деформації елементів штаби, в абсолютних значеннях, становить 3...10,4%. Також встановлено, що збільшення довжини зони кристалізації-деформації призводить до зростання швидкості елементів профільованої штаби: для товстого елемента з 3,99 м/хв до 4,31 м/хв і для тонкого – з 4,09 м/хв до 4,31 м/хв. Абсолютна різниця між швидкостями елементів профільованої штаби знаходиться в межах 0...0,09 м/хв. Отримані дані показали можливість вирівнювання швидкостей елементів профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів між собою шляхом використання зони кристалізації-деформації довжиною 60 мм, що позитивно вплине на якість виготовлених штаб.

5. Проаналізовано вплив товщини товстого і тонкого елемента профільованої штаби на ступінь деформації, температуру та швидкість виходу даних елементів з валків-кристалізаторів при валковому розливі-прокатці профільованих штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-1050. Отримані дані показали, що зменшення товщини товстого елемента профільованої штаби в діапазоні від 3,5 мм до 1 мм призводить до збільшення його ступеня деформації в 2,28 рази відносно мінімального значення рівного 35 % при товщині 3,5 мм. Зміна товщини тонкого елемента профільованої штаби в діапазоні 3...0,5 мм призводить до збільшення ступеня деформації в 2,5 рази відносно мінімального значення рівного 35,6% при товщині 3 мм. Аналіз впливу товщини елементів

профільованої штаби на швидкість виходу елементів з валків-кристалізаторів показав, що зменшення товщини елементів штаби призводить до зростання їх швидкості виходу з валків-кристалізаторів, а абсолютна різниця їх швидкостей знаходиться в межах 0,04...0,11 м/хв.

6. Визначено, що найбільш ефективним інструментом для впливу на умови формування елементів профільованих штаб при валковому розлив-прокатці є довжина зони кристалізації-деформації, оскільки зміна її довжини в діапазоні від 25 мм до 60 мм найбільш інтенсивно впливає як на ступінь деформації елементів штаби, так і на швидкість їх виходу з валків-кристалізаторів. Другим технологічним параметром, який значно впливає на умови формування елементів профільованих штаб є товщина елементів профільованої штаби, однак значення даного параметру є величиною постійною і визначається необхідними розмірами профілю штаби. На основі отриманих розрахункових даних отримано емпіричні функції, що описують зміну ступеня деформації елементів профільованих штаб в залежності від варійованих технологічних параметрів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Валковий розлив-прокатка профільованих штаб

Наступним кроком після аналізу даних, отриманих під час теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів валкового розливу-прокатки на умови формування елементів профільованих штаб, є проведення експериментальних досліджень з виробництва профільованих штаб. Експерименти з валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом з алюмінієвих сплавів проводились на експериментальній машині валкового розливу-прокатки в умовах кафедри матеріалознавства Падерборнського університету (м.Падерборн, ФРН).

В ході підготовки машини до проведення експериментальних досліджень та виробництва подібного виду штаб за запатентованою раніше схемою [79] було спроектовано та виготовлено пристрій для безперервної подачі в зону кристалізації-деформації профілюючої стрічки, описаний раніше у підрозділі 2.2.1. Зовнішній вигляд даного пристрою, встановленого на агрегат валкового розливу-прокатки, представлено на рисунку 4.1.

Першим кроком при підготовці експериментальної процедури є визначення розмірів та встановлення профілюючої стрічки. Для першого експерименту було обрано профілюючу стрічку шириною 59 мм та товщиною 0,5 мм. Обрана ширина профілюючої стрічки є максимально допустимою шириною стрічки, яку можна стабілізувати у виготовленому пристрої для її подачі. Довжина профілюючої стрічки склала 2000 мм, що забезпечує в подальшому можливість її натягу, а також більше охолодження при валковому розливі-прокатці.

Другим кроком перед натягненням профілюючої стрічки на одному з валків-кристалізаторів є з'єднання її кінців для отримання нескінченної

профілюючої стрічки, яку можна використовувати в безперервному процесі валкового розливу-прокатки.

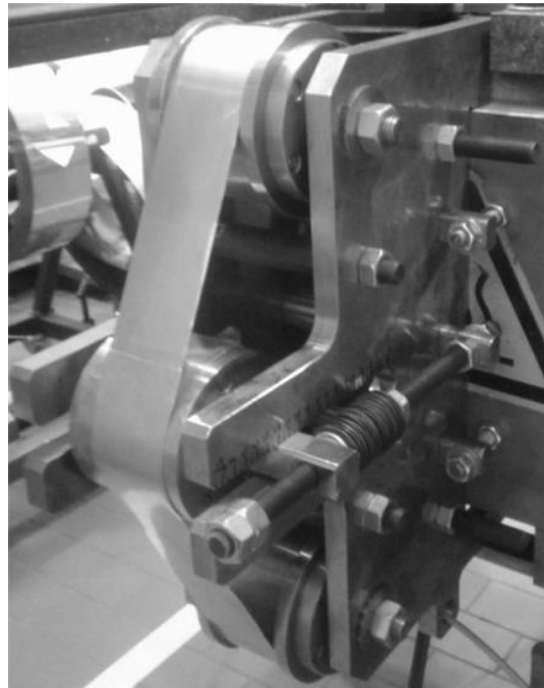


Рис. 4.1. Пристрій для безперервної подачі в зону кристалізації-деформації сталевих стрічки, встановлений на лабораторну машину валкового розливу-прокатки

Здійснення з'єднання кінців стрічки можливе декількома способами. Рациональним методом з'єднання кінців профілюючої стрічки є зварювання встик, яке дозволяє отримати нескінченну профілюючу стрічку з постійними геометричними розмірами. Однак, даний спосіб з'єднання має і недолік, а саме складність реалізації зварювання встик тонкої штаби товщиною 0,5 мм. Окрім того, простір для виконання процедури зварювання безпосередньо на лабораторній машині валкового розливу-прокатки обмежений. Виходячи з вищезазначеного, при підготовці до проведення лабораторних експериментів було вирішено використати другий спосіб з'єднання, а саме замкове механічне з'єднання. Для надання більшої міцності виконаному з'єднанню у відповідному місці були встановлені сталеві заклепки (рис. 4.2).



Рис. 4.2. З'єднання профільюючої стрічки з використанням замка та заклепок

Недоліком такого способу з'єднання кінців профільюючої стрічки є локальне збільшення товщини у місці замка (в зазначеному випадку вона склала 2 мм), що обмежує мінімальну товщину виготовляємої штаби та призводить до виникнення повздовжньої різнотовщинності на виготовленій штабі.

Наступним кроком при натягненні стрічки є забезпечення відсутності переміщення профільюючої стрічки уздовж бочки валка-кристалізатора. З цією метою в пристрої передбачені дві пари профільованих вертикальних роликів, що знаходяться в безпосередній близькості до валків-кристалізаторів. Дані профільовані вертикальні ролики розташовуються з торців профільюючої стрічки, тим самим запобігаючи її переміщенню уздовж бочки валка-кристалізатора (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Вертикальні профільовані ролики, що обмежують переміщення профільюючої стрічки уздовж бочки валка-кристалізатора

Останнім кроком при підготовці пристрою для валкового розливу-прокатки профільованих штаб є натягнення профільюючої стрічки, яке повинно забезпечити її щільне прилягання до валка-кристалізатора. Первинне натягнення профільюючої стрічки та підтримування сили натягу на постійному рівні в ході валкового розливу-прокатки профільованих штаб було виконано за допомогою попередньо стиснених тарілчастих пружин та натяжного ролика (рис. 4.4).

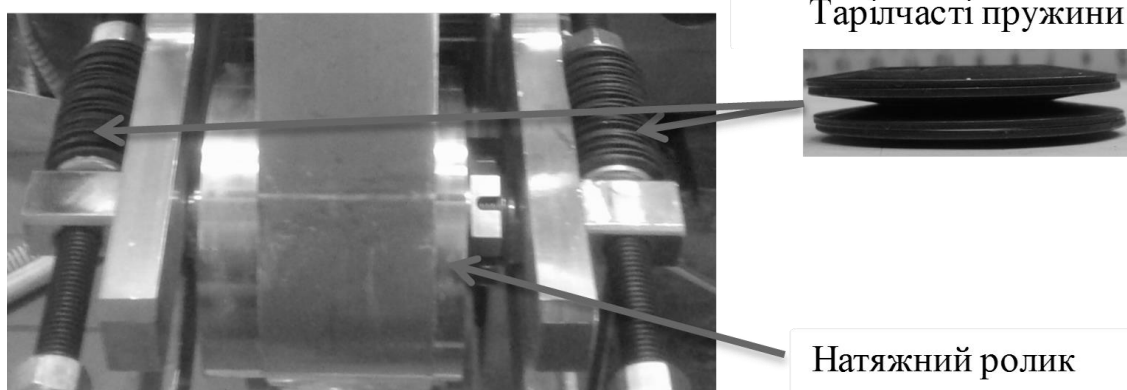


Рис. 4.4. Елементи, що використовуються для натягнення профільюючої стрічки

Потім, для запобігання налипання на поверхню профільюючої стрічки алюмінію, на неї було нанесено розділовий шар. В якості антиадгезійного матеріалу при початковому налаштуванні машини використовувався борнітрид, який по мірі зменшення його кількості на стрічці в ході валкового розливу-прокатки було замінено на графітову емульсію.

Аналіз даних, отриманих в ході теоретичних досліджень впливу технологічних параметрів на умови формування штаби та геометричних розмірів профільюючої стрічки, дозволив обрати наступні технологічні параметри для реалізації експерименту: швидкість валкового розливу-прокатки, температура розплаву та довжина зони кристалізації-деформації (табл. 4.1). Форма профілю виготовляємої штаби наведена у розділі 2 (рис. 2.2).

Таблиця 4.1

Основні технологічні параметри реалізації експериментів з валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом

Товщина товстого елемента профільованої штаби, мм	2,7
Товщина тонкого елемента профільованої штаби, мм	2,2
Температура розплаву, К	933
Довжина зони кристалізації-деформації, мм	60
Об'єм охолоджуючої рідини, л/хв	110
Швидкість валкового розливу-прокатки, м/хв	3,25

В ході проведення даного експерименту була виготовлена профільована штаба, зовнішній вигляд якої наведено на рисунку 4.5. Основні геометричні розміри виготовленої штаби наведені в таблиці 4.2



а)



б)

Рис. 4.5. Зовнішній вигляд профільованої штаби, що була виготовлена в ході експерименту з валкового розливу-прокатки профільованих штаб (а) та зовнішній вигляд поперечного перерізу виготовленої штаби (б)

Здійсненні в ході експериментального валкового розливу-прокатки профільованих штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 вимірювання сили показали, що сила прокатки при гарячій деформації закристалізованого

матеріалу становила 185 кН. Після проведення експерименту були виконані контрольні вимірювання профілю профілюючої стрічки, які підтвердили стабільність її геометричних розмірів.

Таблиця 4.2

Характеристики виготовленої в ході експериментального валкового розливу-прокатки профільованої штаби

Середня товщина товстого елемента профільованої штаби, мм	2,7
Середня товщина тонкого елемента профільованої штаби, мм	2,2
Ширина тонкого елемента профільованої штаби, мм	59
Довжина профільованої штаби, мм	5830

Окрім здійснення вимірювань геометричних розмірів виготовленої профільованої штаби, з неї також були відібрані зразки для проведення аналізу мікроструктури. Зразки було відібрано з ділянок, що відповідають товстому та тонкому елементу профільованої штаби, а також в області сполучення цих елементів. В ході підготовки зразки було піддано шліфуванню, поліруванню та травленню. Зеренна структура отриманих зразків з ділянки товстого та тонкого елемента профільованої штаби виготовленої валковим розливом-прокаткою, наведено на рисунку 4.6-а та 4.6-б, відповідно. Положення більших зерен на знімку мікроструктури товстого елемента профільованої штаби (рис.4.6-а) симетрично відносно обох площин даного елемента штаби свідчать про те, що кристалізація даного елемента профілю штаби відбувалась симетрично відносно осі валкового розливу-прокатки. Водночас зона рекристалізованих рівноосних зерен, що відповідає металургійній середині штаби, на знімку мікроструктури тонкого елемента профільованої штаби (рис. 4.6-б) зміщена до поверхні елемента, яка формувалась на профілюючій стрічці. Даний факт говорить про те, що фронт кристалізації тонкого елемента профільованої штаби при валковому розливі-прокатці був асиметричним відносно осі розливу-прокатки. На рисунку 4.7 наведено зовнішній вигляд області сполучення

товстого та тонкого елемента профільованої штаби, що отримано з використанням профілюючої стрічки з кутом бокової кромки, якої становив близька 145° .

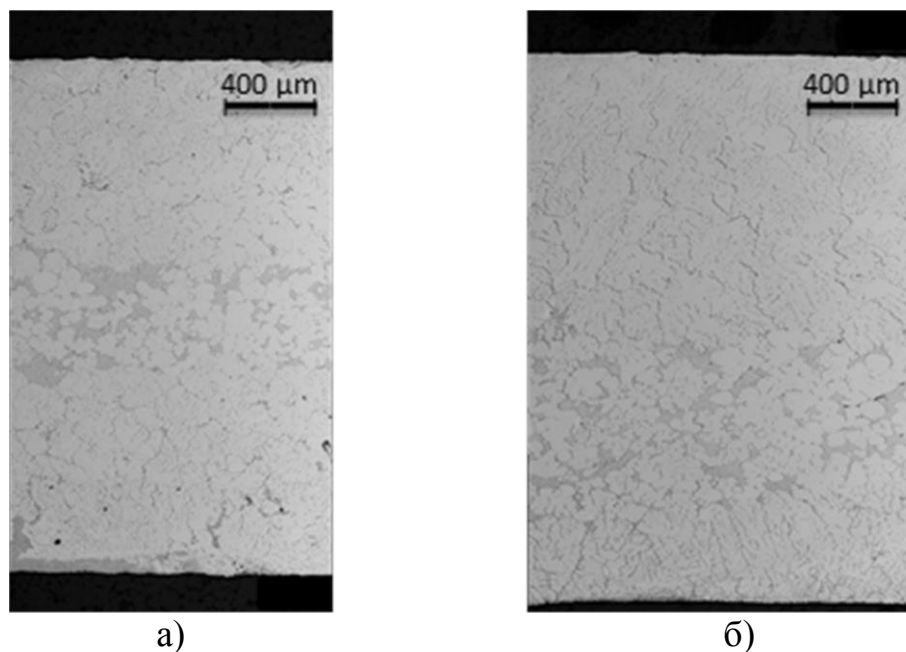


Рис. 4.6. Мікроструктура товстого (а) та тонкого (б) елемента профільованої штаби в поперечному, відносно напрямку розливу-прокатки, напрямі.

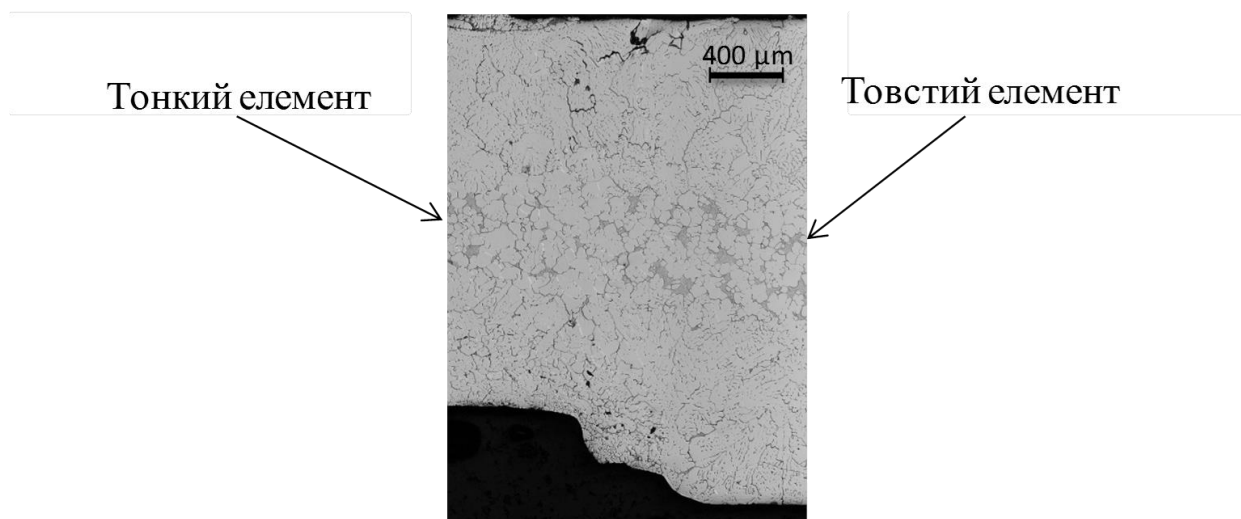


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд мікроструктури в області сполучення товстого та тонкого елемента профільованої штаби (кут бокової кромки профілюючої стрічки близько 145°).

Отримані в ході аналізу мікроструктури результати підтверджують дані теоретичних розрахунків, щодо положення точки наскрізної кристалізації товстого та тонкого елемента профільованої штаби, виготовленої з використанням розробленого пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб (див. підрозділ 3.2).

Додатково, з товстого та тонкого елемента виготовленої профільованої штаби, були відібрані зразки для проведення досліджень їх механічних властивостей шляхом випробувань на розривній машині. Усереднені показники отриманих механічних властивостей наведені у таблиці 4.3. Аналіз даних свідчить про високу якість виготовленої профільованої штаби, оскільки механічні властивості елементів даної штаби відповідають вимогам стандарту DIN EN 485-2:2009-01 [90], який регламентує мінімальне значення межі міцності на рівні 60 МПа.

Таблиця 4.3

Механічні властивості профільованої штаби, виготовленої валковим розливом-прокаткою

	Межа міцності, МПа	Межа плинності, МПа	Максимальне подовження, %
Товстий елемент штаби	78,7	66	57,7
Тонкий елемент штаби	82,8	67	55

Одержані результати засвідчили працездатність обраних технологічних параметрів процесу, тому повторні експериментальні дослідження були спрямовані на визначення температури штаби на товстому та тонкому елементах при тих самих умовах проведення експериментів.

Підготовку відповідних експериментів з валкового розливу-прокатки профільованих штаб було виконано за ідентичною схемою з використанням аналогічної профілюючої стрічки.

Для полегшення умов підведення термоелемента, за допомогою якої здійснювалося вимірювання температури на поверхні профілюючої стрічки, остання не була зафіксована вертикальними профільованими роликами.

Вимірювання температури було виконано за допомогою двох термоелементів типу "К". Вимірювання температури на товстому елементі профільованої штаби здійснювалося шляхом занурення термоелемента діаметром 0,75 мм у ванну розплаву на сталій стадії процесу. Після занурення в розплав даний термоелемент захоплювався та втягувався в зону деформації корками закристалізованої штаби. З даного термоелемента з частотою 50 Гц знімалися показники температури в серединній частині товстого елемента профільованої штаби. Результати відповідних вимірів наведені на рисунку 4.8.

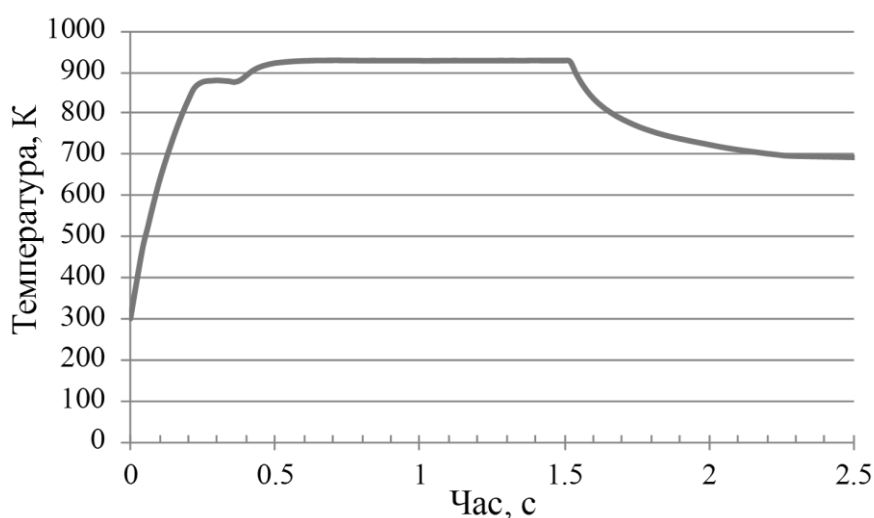


Рис. 4.8. Результати експериментального визначення температури в серединній частині товстого елемента профільованої штаби

За показниками термоелемента максимальна температура розплаву в зоні кристалізації-деформації становила 933 К, що відповідає температурним умовам прийнятим при математичному моделюванні, які були використані в якості базових при проведенні теоретичних досліджень описаних в розділі 3. Температура товстого елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів склала 706 К.

Для вимірювання температури тонкого елемента профільованої штаби використовувався термоелемент, який був закріплений на профілюючій стрічці (рис. 4.9). Даний термоелемент також потрапляв у зону кристалізацій-деформації на сталій стадії процесу та проходив через зону кристалізацій-деформації разом з профілюючою стрічкою. З даного термоелемента знімали показники температури металу тонкого елемента на контакті з профільованою стрічкою з частотою 50 Гц. Результати відповідних вимірів наведені на рисунку 4.10



Рис. 4.9. Термоелемент на профілюючій стрічці для вимірювання температури тонкого елемента профільованої штаби

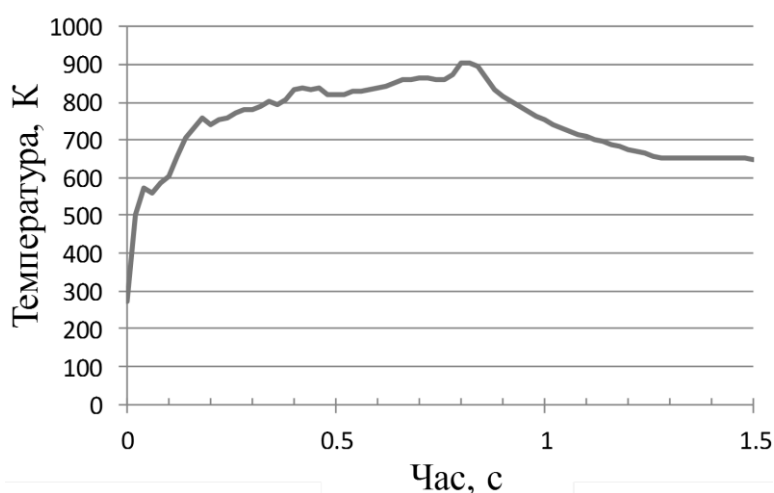


Рис. 4.10. Результати експериментального визначення температури в тонкому елементі профільованої штаби

За показниками термоелемента максимальна температура розплаву в зоні кристалізації-деформації становила 904 К. Незначне відхилення показника максимальної температури розплаву (3%) викликане місцем розташування термоелемента, а саме на поверхні профілюючої стрічки в безпосередній близькості до поверхні валка-кристалізатора, через що відбувалось його більш інтенсивне охолодження. Експериментальним шляхом визначено температуру тонкого елемента профільованої штаби в площині виходу з валків-кристалізаторів, яка склала 657 К.

Зовнішній вигляд виготовленої профільованої штаби та її поперечного перерізу наведені на рисунку 4.11. Зафіксована в ході проведення експериментального дослідження сила прокатки знаходилась на рівні 229 кН. Основні геометричні розміри виготовленої шляхом валкового розливу-прокатки профільованої штаби наведені в таблиці 4.4.

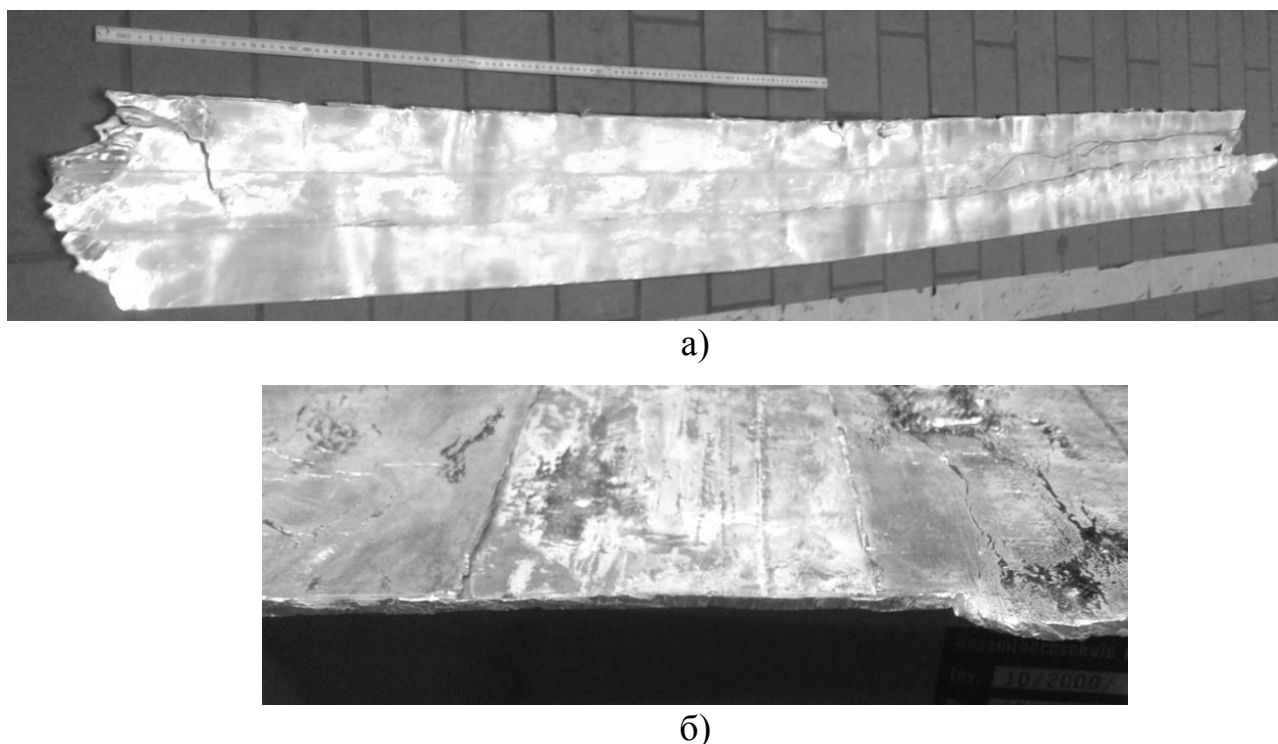


Рис. 4.11. Зовнішній вигляд профільованої штаби, що була виготовлена в ході повторного експерименту з валкового розливу-прокатки профільованої штаби (а) та зовнішній вигляд поперечного перерізу виготовленої штаби (б)

Характеристики виготовленої в ході повторного експериментального валкового розливу-прокатки профільованої штаби зі сплаву EN AW-1050

Середня товщина товстого елемента профільованої штаби, мм	2,66
Середня товщина тонкого елемента профільованої штаби, мм	2,14
Ширина тонкого елемента профільованої штаби, мм	59
Довжина профільованої штаби, мм	4350

Як видно з фотографії на рисунку 4.11, тонкий елемент штаби наприкінці процесу змістився уздовж бочки валка-кристалізатора відносно свого початкового положення. Це явище викликано тим, що в ході експериментального дослідження не використовувалися вертикальні профільовані ролики, які мали зафіксувати профільуючу стрічку та обмежити її переміщення уздовж бочки валка-кристалізатора. Дане спостереження вказує на необхідність обов'язкового використання вертикальних роликів, які передбачені конструкцією пристрою, забезпечують відсутність переміщення профільуючої стрічки уздовж бочки валка-кристалізатора та забезпечують більшу стабільність процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб.

Порівняння показників температури елементів профільованої штаби у площині виходу з валків-кристалізаторів, що отримано експериментальним та теоретичним шляхом, виявило відносну похибку розрахунків, яка становить для товстого елемента – 4 %, а для тонкого елемента – 12,3 %. Відносно висока розбіжність визначеного експериментально та теоретично показника температури тонкого елемента профільованої штаби пояснюється тим, що в експериментальній процедурі вимірювання температури виконувалося в зоні контакту профільуючої стрічки та розплаву, а під час теоретичних досліджень визначалась середньомасова температура тонкого елемента профільованої штаби.

Приймаючи до уваги все вищезазначене, можна зробити висновок про досить високу збіжність теоретичних та експериментальних результатів, що

говорить про адекватність та високу точність розрахунків за допомогою розробленої математичної моделі.

4.2 Вплив параметрів холодної прокатки на формування градієнту механічних властивостей у виготовлених валковим розливом-прокаткою штабах з профільованим поперечним перерізом

Штаби з профільованим поперечним перерізом, виготовлені за розробленою технологією, можуть використовуватись як готовий вид продукції та як напівфабрикат для послідувочої обробки тиском шляхом холодної прокатки. Шляхом прокатки на гладкій бочці штаб з профільованим поперечним перерізом, виготовлених валковим розливом-прокаткою, можливо виготовляти тонкий плоский продукт з різними по ширині властивостями. Отже, з профільованих штаб можна виготовляти ще один інноваційний вид продукції подібний до Tailor Heat Treated Blanks. Однак в даному випадку локальне збільшення міцності металу досягається шляхом деформаційного зміцнення, саме тому для нового виду продукції доцільним є використовувати оригінальну назву: Tailor Rolled Flat Blanks (TRFB).

В якості модельного матеріалу для експериментального вивчення впливу формозміни з різними по елементах профільованої штаби ступенями деформації на локальну зміну механічних властивостей використовувався алюмінієвий сплав EN AW-1050. Механічні властивості даного сплаву, які регламентуються стандартом ISO 6361-2:2014 [91], наведені в таблиці 4.5.

В ході підготовки до експерименту були відібрані зразки довжиною 420 мм та шириною 180 мм. Товщина зразків становила 2,9 мм. Для першої серії експериментів профілювання алюмінієвих зразків виконувалось шляхом вкатування в них сталеві стрічки шириною 80 мм, товщиною 2 мм та довжиною, рівною довжині алюмінієвого зразка. У другій серії експериментів використовувалась сталева стрічка шириною 80 мм та довжиною рівною довжині алюмінієвого зразка, однак товщина її становила 0,55 мм. З метою

запобігання налипанню алюмінію на сталеву стрічку в ході прокатки, одна з її сторін (що контактує з алюмінієм) була покрита тонким шаром графіту [92].

Таблиця 4.5

Механічні властивості алюмінієвого сплаву EN AW-1050

Стан поставки	Товщина, мм	Межа плинності, МПа		Межа міцності, МПа		Подовження, %
		мін.	макс.	мін.	макс.	
О	1,3...6,5	20	-	60	95	30

В ході першого етапу холодної прокатки, який виконувався при кімнатній температурі, сталева стрічка вкатувалась в алюмінієвий зразок, утворюючи в ньому заглиблення з розмірами, що відповідають габаритам сталевій стрічки та ступеню деформації за прохід. За такої умови деформація інших елементів алюмінієвих зразків була відсутня. Профілювання підготовлених зразків проводилося за один прохід.

Після профілювання алюмінієвих зразків шляхом вкатування в них сталевій стрічки проводилася їх термічна обробка з метою усунення деформаційного зміцнення та зняття залишкових напружень, які були наведені холодною прокаткою з нерівномірним обтисненням. В якості режиму термічної обробки було обрано відпал при температурі 375 °С з витримкою тривалістю 1 година. Послідуюче охолодження зразків відбувалося на повітрі. Як підсумок в результаті холодної прокатки й термообробки були виготовлені штаби з профільованим поперечним перерізом та початковими гомогенними механічними властивостями, які є аналогічними до профільованих штаб, виготовлених на машині валкового розливу-прокатки.

В порівнянні з валковим розливом-прокаткою штаб з профільованим поперечним перерізом використаний спосіб є малоефективним й не становить цікавості з точки зору практичного застосування в промислових умовах. З іншого боку, продуктом односторонньої холодної прокатки алюмінієвих штаб з накладкою сталевій стрічки менших розмірів стали штаби з профільованим

поперечним перерізом, що є аналогічними за своїми геометричними розмірами до профільованих штаб, які можуть бути отримані за розробленою технологією на машинах валкового розливу-прокатки. Все це дозволяє використовувати їх для подальшої холодної прокатки в валках з гладкою бочкою з метою дослідження можливості щодо встановлення механічних властивостей різного рівня по ширині штаби (TRFB).

Описаним вище способом були підготовлені 5 зразків з профільованим поперечним перерізом з різною глибиною профілю, а також 3 зразка з однаковою глибиною профільованої ділянки.

Потім зразки були прокатані в холодному стані у валках з гладкою бочкою. Прокатка усіх зразків виконувалась за один прохід в тому ж напрямі, що й попередні проходи холодної прокатки на етапі підготовки зразків з профільованим поперечним перерізом. В ході виконання експериментів змінювався лише зазор між валками, всі інші параметри процесу залишались незмінними. В результаті даної серії експериментів з холодної прокатки були виготовлені тонкі плоскі штаби постійної товщини як по ширині, так і по довжині. У зв'язку з різними величинами ступеня деформації різних елементів попередньо профільованих зразків, в штабах були встановлені гетерогенні механічні властивості. Схематично експериментальна процедура і зовнішній вигляд зразків на етапі їх підготовки та послідууючої холодної прокатки на гладкій бочці наведені на рисунку 4.12.

В першій серії експериментів п'ять алюмінієвих зразків з профільованим поперечним перерізом з різною глибиною профілю були прокатані на гладкій бочці. Величина обтиснення для кожного із зразків була рівна величині різниці між товщиною товстого та тонкого елемента профіля h_1 й h'_1 . У відповідності до цієї умови, в даній серії експериментів деформації підлягали тільки товсті елементи профільованої штаби, що в подальшому дозволило порівняти механічні властивості деформованих та недеформованих областей штаби й визначити вплив різниці між ступенями деформації елементів профілю профільованої штаби на гетерогенність сформованих механічних властивостей.

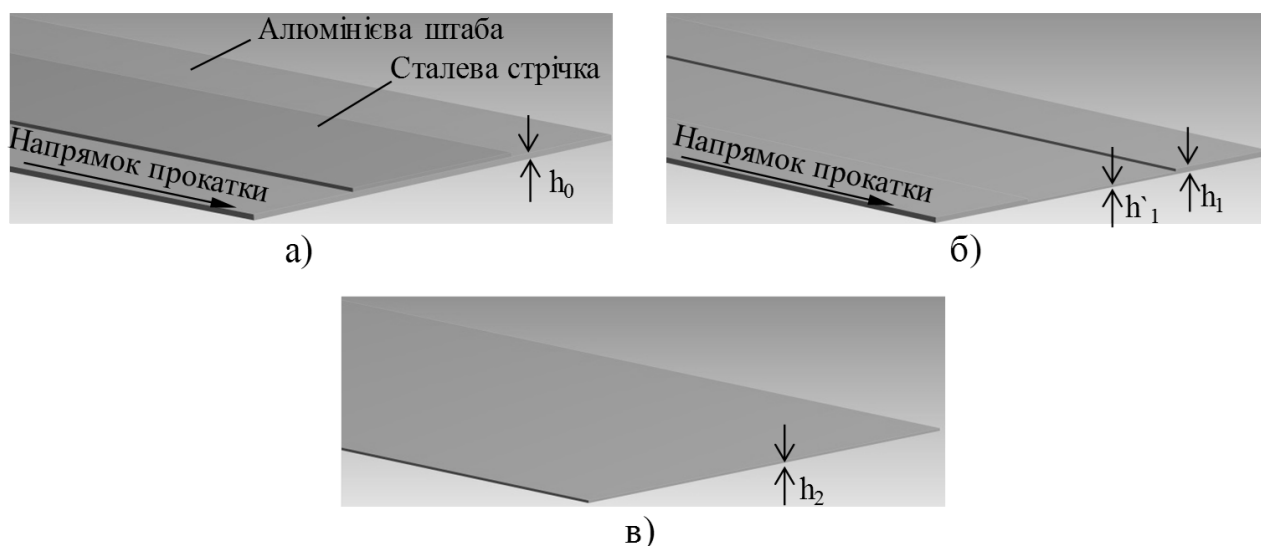


Рис. 4.12. Схема експерименту з прокатки TRFB: а) початковий плоский зразок, підготовлений до холодної прокатки; б) попередньо профільований зразок після першої прокатки та термічної обробки; в) плоска штаба з різними механічними властивостями по ширині

У другій серії експериментів зразки з однаковою глибиною профілю були прокатані з різними ступенями деформації. Різниця між товщинами елементів профільованої штаби була постійною й становила 0,55 мм, що відповідає різниці істинних деформацій, що дорівнює 0,232. Відповідно, різниця значень абсолютного обтиснення Δh для елементів профільованих штаб була однаковою.

Параметри холодної прокатки попередньо профільованих штаб у валках з гладкою бочкою наведені у таблиці 4.6.

Усі експерименти з прокатки були виконані на прокатному стані дуо кафедри матеріалознавства університету м. Падерборн (ФРН) [80]. Для прокатки на гладкій бочці використовувалися валки діаметром 210 мм. Довжина бочки валка становила 300 мм. Перед початком прокатки кліть прокатного стану була попередньо навантажена за допомогою вбудованої гідромеханічної системи. Таким чином були вибрані усі існуючі зазори й значно зменшена пружина кліті, яка становила 0,2 мм.

Таблиця 4.6

Параметри прокатки профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050

№	Початкові розміри		Після прокатки	e ₁	e ₂	Δe
	h ₁ , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм			
Перша серія експериментів						
1	2,8	2,9	2,602	-0,073	-0,108	0,035
2	2,5	2,9	2,459	-0,016	-0,165	0,149
3	2,3	2,9	2,294	-0,002	-0,234	0,232
4	2,1	2,9	2,093	-0,003	-0,326	0,323
5	2,0	2,9	1,989	-0,005	-0,377	0,372
Друга серія експериментів						
6	2,1	2,65	2,1	0	0,232	0,232
7	2,1	2,65	2,02	0,039	0,271	0,232
8	2,1	2,65	1,7	0,211	0,443	0,232

Після здійснення експериментів з прокатки TRFB було виконано відбір зразків для оцінювання механічних властивостей й аналізу мікроструктури. Випробування на розтягнення були виконані у відповідності до міжнародного стандарту ISO 6892-1:2009 [93] на зразках, які були відібрані у напрямку прокатки. Випробування на твердість по Брінеллю проводились у відповідності до стандарту ISO 6506-1:2014 [94] на шліфованих зразках. Узагальнені показники, які були отримані в результаті виконаних досліджень наведені у таблиці 4.7

Таблиця 4.7

Узагальнені показники механічних властивостей профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 після прокатки на гладкій бочці

Товщина, мм	Межа плинності, МПа		Межа міцності, МПа		Твердість, HBW 2.5/31.25	
	мін.	макс.	мін.	макс.	мін.	макс.
2,0...2,9	63,5	89,0	80,0	100,1	24	29

Порівняльні результати випробувань на розтягнення та твердість наведені на рисунку 4.13 для першої серії експериментів, та на рисунку 4.14 - для другої серії експериментів.

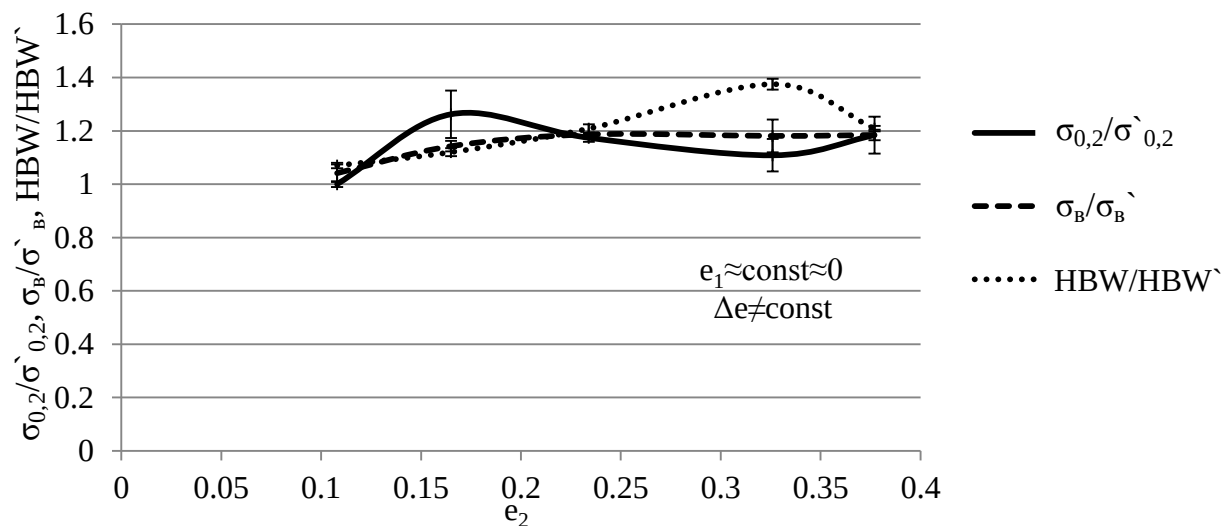


Рис. 4.13. Порівняння механічних властивостей деформованого та недеформованого елемента профільованої штаби зі сплаву EN AW-1050 після прокатки на гладкій бочці, при умові $e_1 \approx \text{const} \approx 0$

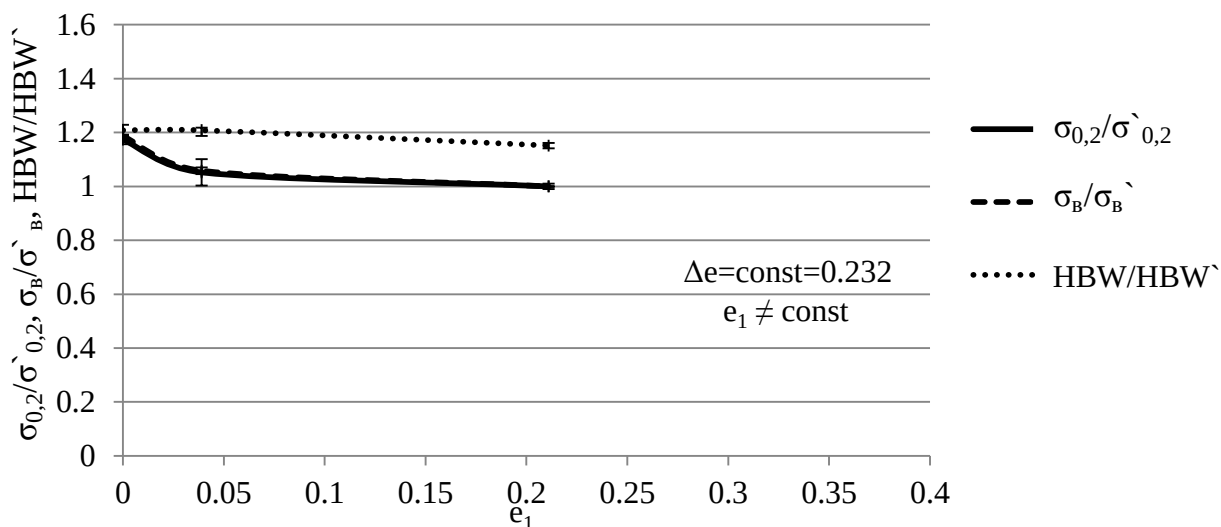


Рис. 4.14. Порівняння механічних властивостей різних елементів попередньо профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 після прокатки на гладкій бочці, при умові $\Delta e = \text{const} = 0.232$.

Показники механічних властивостей для тонких елементів штаб, які зазнали меншої (друга серія експериментів) або майже нульової (перша серія експериментів) деформації, позначені як $\sigma'_{0,2}$, σ'_B и HBW' . Показники

механічних властивостей товстих елементів штаб, які зазнали значної деформації: $\sigma_{0.2}$, σ_B и HBW.

Данні, отримані в ході проведення першої серії досліджень (рис. 4.13), показали, що такий показник механічних властивостей, як межа плинності є найбільш чутливим до умов деформації. Різниця усереднених значень відношення межі плинності товстого та тонкого елемента профільованої штаби після прокатки на гладкій бочці склала 28%. Максимальне значення приросту межі плинності в залежності від ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби становить 35%. Подальше збільшення ступеня деформації товстого елемента, при умові деформації тонкого елемента близькій до 0, призводить до вирівнювання показників межі плинності, межі міцності та твердості на рівні 20%. Усереднене значення приросту межі міцності профільованої штаби після холодної прокатки на гладкій бочці склало 20%, що відповідає істинній деформації товстого елемента рівній 0,234.

Максимальна різниця в твердості між елементами TRFB, після прокатки профільованої штаби на гладкій бочці, склала 40%, що відповідає значенню істинної деформації товстого елемента штаби - 0,326. З рисунку 4.13 видно основний ефект від індивідуального зміцнення елементів профільованої штаби в ході прокатки її на гладкій бочці. Цим ефектом є інтенсивне зміцнення початково більш товстого елемента, який був підданий більшій деформації.

Друга серія експериментів (див. рис. 4.14) показала, що деформація усіх елементів профільованої штаби при прокатці на гладкій бочці є небажаною. Це викликано тим, що з одночасним збільшенням деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби різниця в показниках міцності даних елементів знижується. Так, при значенні істинної деформації тонкого елемента профільованої штаби 0,211, різниці між характерними показниками міцності не спостерігається, проте на графіках все ще помітний приріст твердості на різних елементах TRFB на рівні близько 18%. Однак, даний приріст твердості знижується по мірі зростання ступеня деформації тонкого елемента профільованої штаби в ході прокатки на гладкій бочці.

Окрім проведених випробувань на механічні властивості з виготовлених TRFB були відібрані зразки для проведення аналізу мікроструктури. Зразки було відібрано з ділянок, які відповідають початковому товстому та тонкому елементу профільованої штаби після прокатки на гладкій бочці.. Зеренна структура отриманого зразка з ділянки початково тонкого елемента TRFB, який було отримано в результаті першої серії експериментів та який практично не був деформованим в ході прокатки на гладкій бочці, наведено на рисунку 4.15-а. Зеренна структура початково товстого елемента, який зазнав значної пластичної деформації, наведено на рисунку 4.15-б.

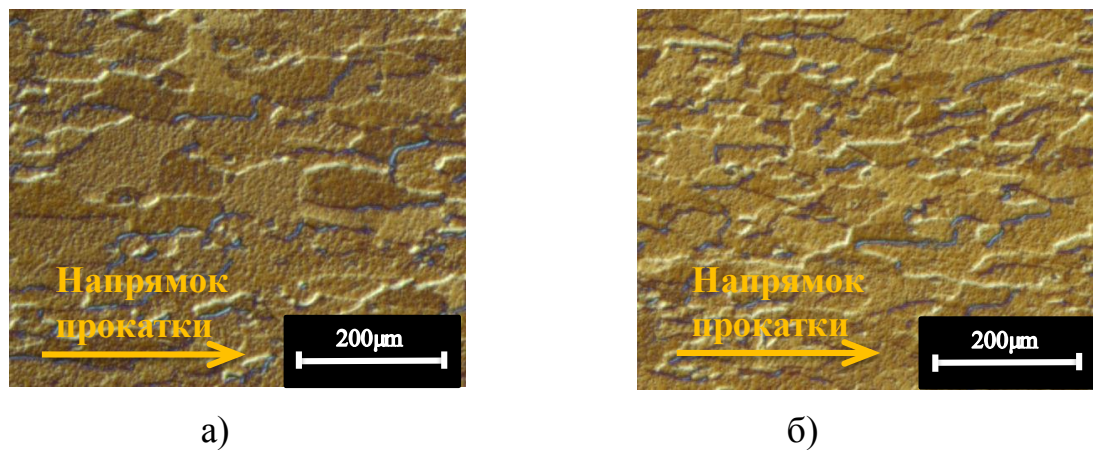


Рис. 4.15. Мікроструктура різних елементів TRFB штаби зі сплаву EN AW-1050 після холодної прокатки: а) початково тонкий елемент штаби, істинна деформацією якого $e_1=0.002$; б) початково товстий елемент, істинна деформація якого $e_2=0.232$

Зерна в зразку відібраному з початково тонкого елемента штаби, який практично не зазнавав пластичної деформації, більш великі. Це може бути викликано зростанням зерна в профільованій штабі під час її рекристалізаційного відпалу. Зерна в зразку з початково товстого елемента TRFB, який зазнавав значної пластичної деформації, дрібніші та витягнуті в напрямку прокатки. Така мікроструктура є характерною для виробів, які піддаються холодній прокатці з відносно невисокими ступенями деформації.

Відмінності мікроструктури на різних елементах штаби відповідають даним, які були отримані в ході виконання випробувань зразків на механічні властивості

Крім цього, було встановлено що при прокатці профільованих штаб з метою виготовлення TRFB слід запобігати деформації тонкого елемента профільованої штаби, оскільки в цьому випадку рівень механічних властивостей окремих елементів штаби вирівнюється.

Додатково було проведено експериментальні дослідження з метою визначення впливу параметрів холодної прокатки на гетерогенність механічних властивостей попередньо профільованих штаб зі сплаву EN AW-6082. Механічні властивості даного сплаву, що регламентуються стандартом DIN EN 485-2:2009-01, наведені у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Механічні властивості алюмінієвого сплаву EN AW-6082

Стан поставки	Товщина, мм	Межа міцності, МПа		Межа плинності, МПа		Подовження, %
		мін.	макс.	мін.	макс.	
О	1,5...3,0	-	150	-	85	16

Схема експериментальної процедури дослідження можливості виготовлення TRFB зі сплаву EN AW-6082 аналогічна описаній раніше схемі, що була застосована для випадку використання сплаву EN AW-1050 (див. рис. 4.12). Спочатку проводилося профілювання зразків шляхом вкатування в них сталеві стрічки, після чого проводилася термічна обробка виготовлених профільованих зразків для зняття внутрішніх напружень. В якості термічної обробки був застосований відпал з витримкою в печі при 420 °C протягом 1 години та подальшим охолодженням разом з піччю до кімнатної температури зі швидкістю 27 °C/год. Після цього попередньо профільовані зразки були прокатані в холодному стані на гладкій бочці. Параметри холодної прокатки попередньо профільованих штаб в валках з гладкою бочкою наведені у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Параметри прокатки профільованих штаб зі сплаву EN AW-6082

№	Початкові розміри		Після прокатки	e_1	e_2	Δe
	h_1 , мм	h_2 , мм	h_2 , мм			
1	2,76	2,9	2,76	0	-0,049	0,049
2	2,6	2,9	2,6	0	-0,109	0,109
3	2,3	2,9	2,3	0	-0,232	0,232
4	2,1	2,9	2,1	0	-0,322	0,322

Прокатка всіх профільованих зразків виконувалася за один прохід в тому ж напрямі, що й попередні проходи холодної прокатки на етапі профілювання. В ході експериментів усі параметри процесу, окрім зазору між валками, залишались незмінними. В результаті даної серії експериментів були виготовлені тонкі плоскі штаби зі сплаву EN AW-6082 постійної товщини. Після останньої холодної прокатки з виготовлених штаб у напрямі прокатки були відібрані зразки для проведення досліджень з оцінки механічних властивостей. Випробування були виконані у відповідності до міжнародних стандартів ISO 6892-1:2009 [93] та ISO 6506-1:2014 [94]. Узагальнені показники, які були отримані в результаті виконаних випробувань, наведені у таблиці 4.10

Таблиця 4.10

Узагальнені показники механічних властивостей профільованих штаб зі сплаву EN AW-6082 після прокатки на гладкій бочці

Товщина, мм	Межа плинності, МПа		Межа міцності, МПа		Твердість, HBW 2.5/31.25	
	мін.	макс.	мін.	макс.	мін.	макс.
2,1...2,8	51	124	104,5	137	31	45

Порівняльні результати механічних випробувань штаб з гетерогенними по ширині властивостями наведені на рисунку 4.16 [95]. Показники механічних властивостей для тонких елементів штаб, які не зазнали пластичної деформації,

позначені як $\sigma'_{0,2}$, σ'_B та HBW' . Показники механічних властивостей товстих елементів штаб, які зазнали значної пластичної деформації: $\sigma_{0,2}$, σ_B и HBW .

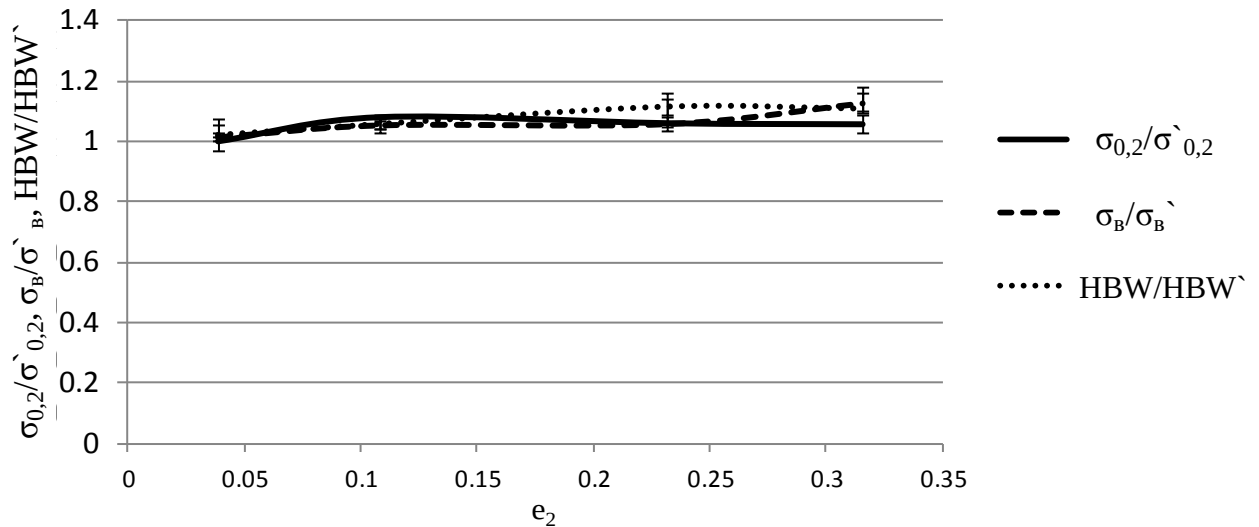


Рис. 4.16. Порівняння механічних властивостей деформованого та недеформованого елемента профільованої штаби зі сплаву EN AW-6082 після прокатки на гладкій бочці, при умові $e_1 \approx \text{const} \approx 0$

Аналіз отриманих даних показав, що збільшення ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби зі сплаву EN AW-6082 за умови відсутності деформації тонкого елемента приводить до приросту механічних властивостей на окремих елементах профільованої штаби. Максимальний приріст показника межі плинності на товстому елементі, в розмірі 12%, спостерігається при його істинній деформації рівній 0,109 та відсутності деформації тонкого елемента, що відповідає різниці між товщинами елементів штаби рівній 0,3 мм. Водночас межа міцності безперервно збільшується по мірі зростання ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби від 0,049 до 0,322. Максимальний приріст межі міцності становить 15,9 % при значенні істинного ступеня деформації товстого елемента $e_2=0,322$.

Показник твердості також збільшується по мірі зростання ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби та досягає максимального значення, що становить 14%, при істинній деформації товстого елемента рівній

0,232 і істинній деформації тонкого елемента – 0. Тобто максимальний приріст твердості досягається при різниці між товщиною товстого та тонкого елемента профільованої штаби рівної 0,6 мм.

Слід зазначити, що при прокатці профільованих штаб на гладкій бочці існує ризик викривлення їх форми через різні коефіцієнти витяжки товстого та тонкого елементів профільованої штаби. Візуальний огляд зразків під час проведення експериментальних досліджень з холодної прокатки профільованих штаб на гладкій бочці дозволив зробити висновок про те, що збільшення ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби, за умови відсутності пластичної деформації тонкого елемента, призводить до збільшення ступеня викривлення форми готової штаби зі змінними механічними властивостями по ширині. Проведені експерименти з прокатки профільованих штаб на гладкій бочці дозволили визначити, що викривлення форми готової штаби можна усунути шляхом коректного налаштування ввідних та вихідних провідок прокатного стану. Однак, отримані дані показали, що даний спосіб виправлення геометрії штаб з гетерогенними властивостями працює лише до певного значення різниці між товщинами елементів профільованої штаби, яке відповідає певній різниці між ступенями деформації даних елементів. Для більшої наочності отриманих результатів, на рисунку 4.17 наведено зовнішній вигляд виготовлених штаб з гетерогенними властивостями зі сплаву EN AW-1050, вихідні геометричні розміри яких наведено у таблиці 4.6.

В умовах проведених експериментальних досліджень з прокатки профільованих штаб з алюмінієвих сплавів EN AW-6082 та EN AW-1050 встановлено, що максимальна різниця між товщинами товстого та тонкого елементів профільованої штаби, яка дозволяє досягти істотного зменшення викривлення форми плоскої штаби з гетерогенними властивостями, що виготовляється шляхом холодної прокатки, становить 0,6 мм. Це значення різниці між товщинами елементів профільованої штаби відповідає різниці істинних ступенів деформації цих елементів рівній 0,232.

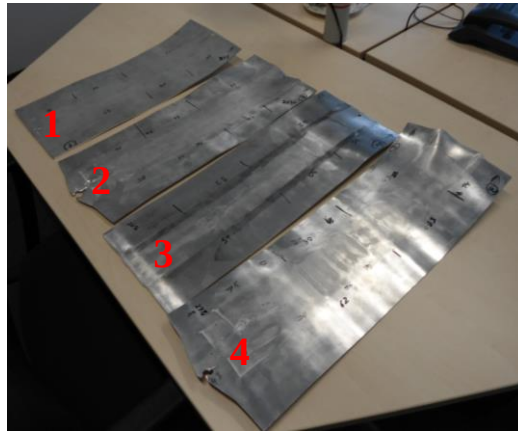


Рис. 4.17. Зовнішній вигляд попередньо профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 після прокатки на гладкій бочці: 1 – різниця товщин елементів 0,1 мм, 2 - різниця товщин елементів 0,4 мм, 3 - різниця товщин елементів 0,6 мм, 4 - різниця товщин елементів 0,8 мм

Підводячи підсумок проведеного аналізу отриманих даних, можна зробити висновок про те, що раціональна різниця між товщиною товстого та тонкого елемента знаходиться в діапазоні 0,3...0,6 мм. Саме така різниця товщин елементів профільованої штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-6082 дозволяє отримати максимальний приріст межі міцності, межі плинності та твердості при виготовленні плоских штаб з гетерогенними властивостями (TRFB), що може сягати, по деяких показниках, 14%.

Проведені експериментальні дослідження процесу холодної прокатки на гладкій бочці профільованих штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 та EN AW-6082 показали можливість отримання гетерогенних механічних властивостей плоских штаб за рахунок різних ступенів деформації окремих її елементів. Отримані з використанням алюмінієвого сплаву EN AW-1050 та EN AW-6082 дані показали, що з ростом ступеня деформації товстого елемента штаби та відсутності деформації тонкого елемента штаби різниця в межі плинності, межі міцності та твердості цих елементів збільшується. Так, для сплаву EN AW-1050 максимальне значення межі плинності спостерігається при істинній деформації товстого елемента профільованої штаби 0,165, що відповідає різниці між товщинами товстого та тонкого елемента рівній 0,6 мм.

Водночас, максимальне збільшення показника межі міцності відбувається за умови відсутності деформації тонкого елемента штаби та значенні істинної деформації товстого елемента профільованої штаби рівної 0,234, що відповідає різниці між товщинами товстого та тонкого елемента рівній 0,4 мм. Подальше збільшення ступеня деформації товстого елемента призводить до вирівнювання приросту межі міцності та плинності на рівні 20 % і може призвести до хвилеутворення внаслідок значної різниці в коефіцієнтах витяжки окремих елементів штаби.

Аналогічні результати для сплаву EN AW-6082 показали, що максимальний приріст межі плинності на рівні близько 12% спостерігається при істинній деформації товстого елемента 0,109, що відповідає різниці між товщиною товстого та тонкого елемента профільованої штаби рівній 0,3 мм. Максимальний приріст межі міцності в розмірі 15,9% в розглянутому діапазоні спостерігається при істинній деформації товстого елемента профільованої штаби 0,322, що відповідає різниці між товщинами елементів – 0,8 мм. Максимальний приріст показника твердості для штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 на рівні біля 40% досягається при істинній деформації товстого елемента 0,326 та істинній деформації тонкого елемента близькій до нуля, що відповідає різниці між товщинами елементів 0,8 мм. Характер зміни показника твердості для профільованої штаби зі сплаву EN AW-6082 схожий, а максимальний приріст складає 11,5% при істинній деформації товстого елемента 0,232, що відповідає різниці товщин елементів профільованої штаби рівній 0,6 мм.

Таким чином, раціональна різниця між товщинами товстого та тонкого елемента профільованої штаби, яка дозволяє отримати максимальний приріст усіх показників механічних властивостей на окремих елементах профільованої штаби з алюмінієвих сплавів, знаходиться в діапазоні від 0,4 мм до 0,6 мм. Окрім цього, максимальне значення різниці між товщиною товстого та тонкого елемента профільованої штаби викликано можливістю виправлення викривлення форми готової штаби шляхом коректного налаштування ввідних і

вихідних проводок стану, якщо ця різниця не перевищує 0,6 мм, що відповідає різниці істинних ступенів деформації елементів штаби рівній 0,232. Більш висока різниця між ступенями деформації елементів профільованої штаби призводить до істотної зміни геометрії готових штаб (див. рис. 4.17),

4.3 Вплив кута бокової кромки профілюючої стрічки пристрою для виробництва профільованих штаб на формування дефектів при послідуєчій холодній прокатці штаб з профільованим поперечним перерізом

При розробці технології валкового розливу-прокатки профільованих штаб слід враховувати, що на якість штаб впливають не тільки технологічні параметри процесу, які можуть бути оперативно змінені, а саме швидкість процесу, довжина зони кристалізації-деформації та температура розплаву. На якість штаб також впливає кут сполучення елементів профільованої штаби різної товщини. Даний кут впливає на якість штаб з точки зору можливості дефектоутворення як при самому процесі валкового розливу-прокатки, так і при послідуєчій холодній прокатці з метою виготовлення TRFB.

Кут сполучення між товстими та тонкими елементами профільованої штаби відповідає куту бокової кромки сталеві профілюючої стрічки, яка використовується на машині валкового розливу-прокатки з метою виготовлення профільованих штаб. З одного боку, сталеву профілюючу стрічку з великими кутами бокової кромки, близькими до 90° , простіше утримувати в натяжному пристрої без побоювань за її пошкодження, що позитивно позначиться на якості виготовлених штаб з профільованим поперечним перерізом. З іншого боку, кути бокових кромки сталеві профілюючої стрічки близькі до 90° можуть призвести до утворення дефектів у вигляді закатів при послідуєчій прокатці даних профільованих штаб з метою виготовлення на їх основі штаб з гетерогенними по ширині механічними властивостями.

У зв'язку з вищезазначеним було вирішено виконати експериментальні дослідження, присвячені визначенню впливу величини кута бокової кромки

профілюючої стрічки на дефектоутворення в ході прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом на гладкій бочці.

Схема проведення експерименту схожа зі схемою експериментальних досліджень, присвячених визначенню впливу параметрів холодної прокатки на гладкій бочці на гетерогенність властивостей попередньо профільованих штаб. Однак, в даному випадку, варіювалася величина кута бокової кромки (кут α) профілюючої сталевий стрічки, що використовувалася в експериментальних дослідженнях (див. рис. 4.18).

В якості модельного матеріалу для даних експериментальних досліджень також був обраний алюмінієвий сплав EN AW-1050. Параметри прокатки наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

Параметри прокатки профільованих штаб

№	Початкові розміри		Після прокатки	e ₁	e ₂	Δe	$\frac{e_2}{e_1}$
	h` ₁ , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм				
Перша серія експериментів							
1	2,3	2,9	2,294	-0,002	-0,234	0,232	117
2	2,1	2,9	2,093	-0,003	-0,326	0,323	108,67
3	2,0	2,9	1,989	-0,005	-0,377	0,372	75,4
Друга серія експериментів							
4	2,1	2,65	2,1	0	-0,232	0,232	232
5	2,1	2,65	2,02	-0,039	-0,271	0,232	6,95
6	2,1	2,65	1,7	-0,211	-0,443	0,232	2,09

В ході експериментів були використані наступні величини кута бокової кромки профілюючої стрічки α (див. рис.4.18б): 166°, 147°, 137°, 118°, 105°, 90° [96].

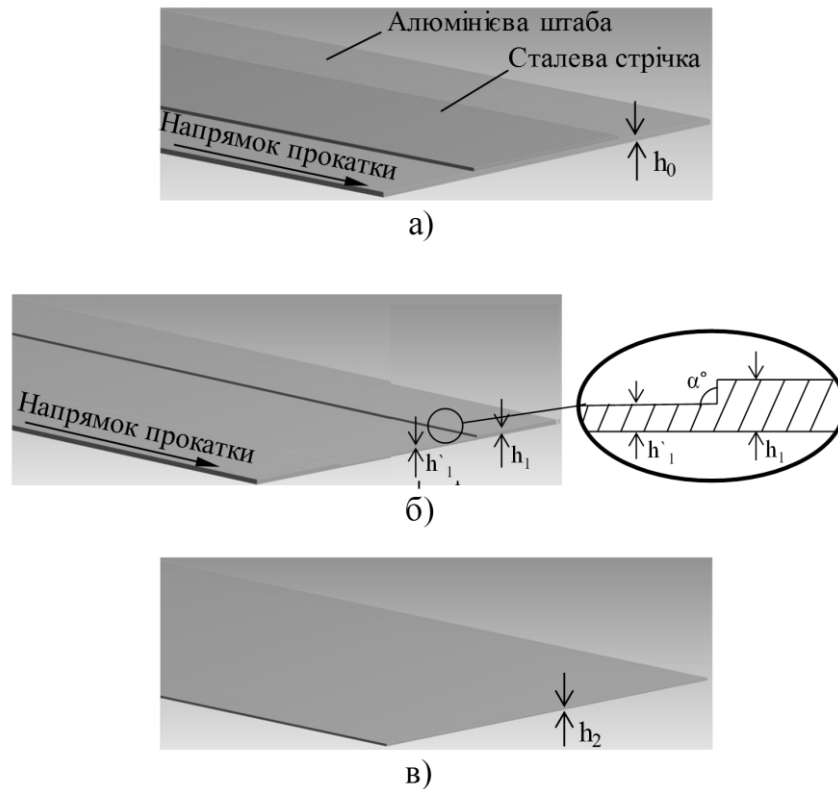


Рис. 4.18. Схема експерименту з визначення впливу величини кута бокової кромки профільюючої стрічки на дефектоутворення в ході послідууючої прокатки на гладкій бочці: а) початковий плоский зразок, підготовлений до холодної прокатки; б) попередньо профільований зразок після першої прокатки та термічної обробки; в) плоска штаба з різними механічними властивостями по ширині; α – кут сполучення елементів профільованої штаби різної товщини

Після прокатки на гладкій бочці зразків з різними кутами сполучення елементів штаби з них були відібрані зразки й проведено аналіз їх поперечної по відношенню до напрямку прокатки поверхні в світловому мікроскопі з метою пошуку дефектів у приповерхневих зонах штаби.

В ході першої серії експериментів пластичної деформації зазнавали лише товсті елементи профільованих штаб. Розмір різниці товщин між товстим та тонким елементом профільованої штаби варіювався від 0,6 мм до 0,9 мм. Один з прикладів утворення характерного дефекту у вигляді закату наведено на рисунку 4.19.

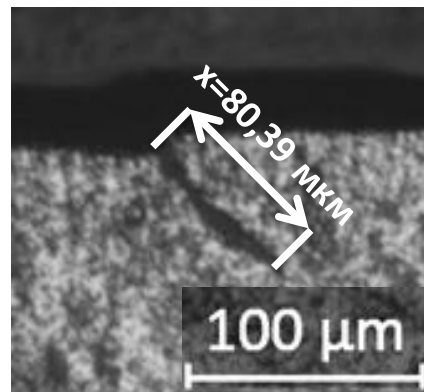


Рис. 4.19. Закат, що утворився при прокатці профільованої штаби в валках з гладкою бочкою на прикладі зразка №2, кут $\alpha=105^\circ$

Для аналізу отриманих даних в якості критерію оцінювання величини дефектів було вирішено використовувати довжину закату (x). Узагальнені результати відповідних досліджень наведені у вигляді графіків на рисунку 4.20

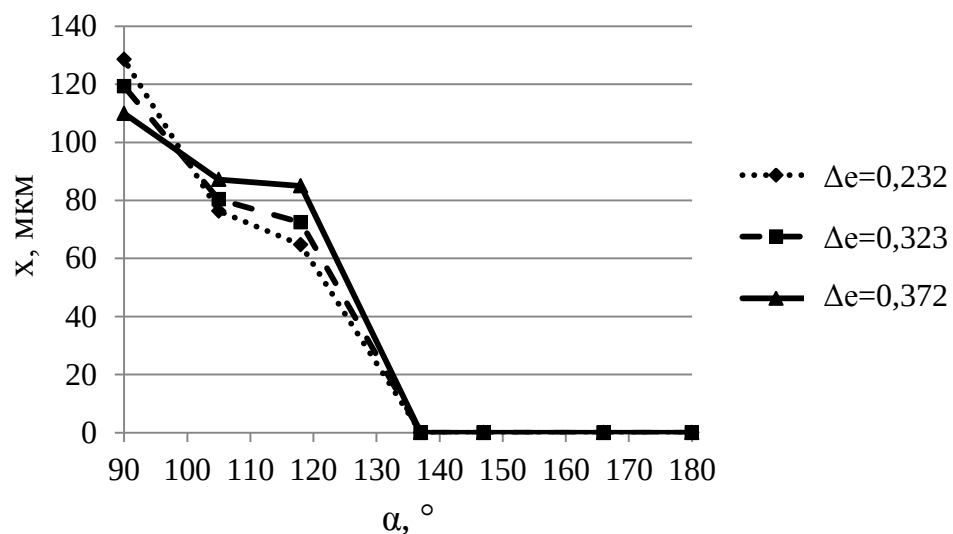


Рис. 4.20. Залежність довжини дефекту x від величини кута сполучення товстого та тонкого елемента профільованої штаби α , що утворюється в ході прокатки на гладкій бочці ($e_1 \rightarrow 0$)

Отримані дані свідчать про те, що за умови деформації товстого елемента й відсутності деформації тонкого елемента профільованої штаби, розмір дефекту зменшується по мірі збільшення величини кута сполучення товстого та тонкого елемента профілю штаби від 90° до 137° . Водночас зміна величини

різниці між товщинами товстого та тонкого елемента в діапазоні від 0,6 мм до 0,9 мм має незначний вплив на характер зміни розміру дефекту, що утворюється під час прокатки на гладкій бочці.

Аналіз отриманих результатів показав, що при валковому розливі-прокатці штаб з профільованим поперечним перерізом слід використовувати профілюючі стрічки, які забезпечать кут сполучення елементів профільованої штаби рівний 137° та більше. Тільки при цих значеннях кута бокової кромки профілюючої стрічки дефекти не утворюються при послідуєчій прокатці на гладкій бочці.

В другій серії експериментів було встановлено вплив відношення істинної деформації товстого елемента до істинної деформації тонкого елемента профільованої штаби (e_2/e_1) на розмір дефекту (x) при постійній різниці істинних деформацій даних елементів штаби, рівній 0,232, що відповідає різниці між товщиною товстого та тонкого елемента рівній 0,55 мм. Для даної серії експериментів було використано лише одне значення величини кута бокової кромки профілюючої стрічки, яке дорівнює 90° . Приклад зовнішнього вигляду одного з характерних закатів, отриманого в ході другої серії експериментів, наведено на рисунку 4.21.

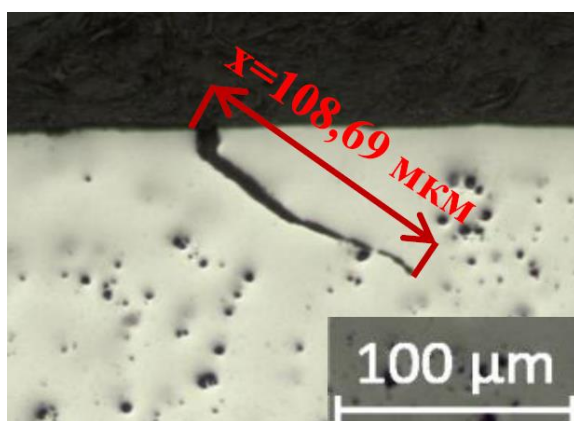


Рис. 4.21. Закат, що утворився в ході прокатки профільованої штаби на гладкій бочці (зразок № 5, кут $\alpha=90^\circ$)

Виходячи з отриманих даних була побудована залежність, яка наведена на рисунку 4.22.

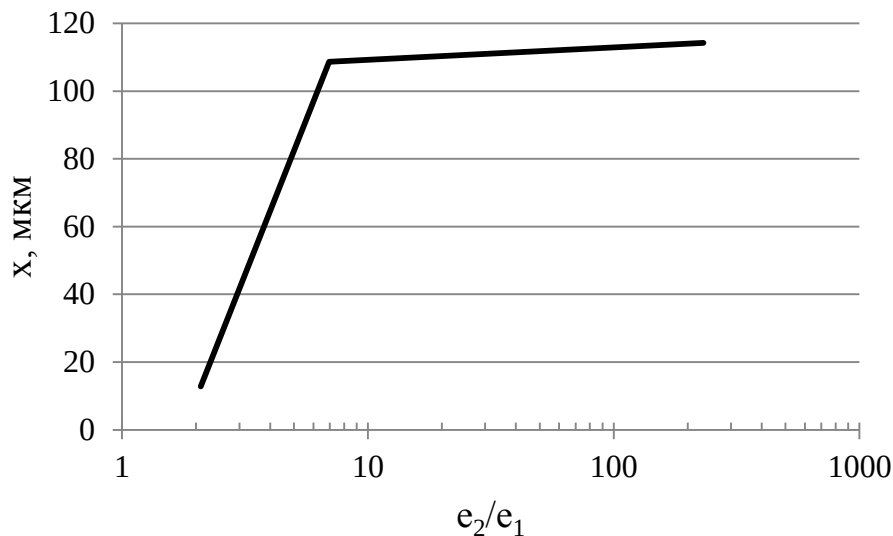


Рис. 4.22. Залежність розміру дефекту (x) від співвідношення істинних деформацій товстого (e_1) та тонкого (e_2) елемента профільованої штаби, що утворюється при прокатці на гладкій бочці ($\Delta e = \text{const} = 0,232$ та $\alpha = 90^\circ$)

Завдяки отриманій залежності можна зробити висновок про те, що розмір утвореного дефекту зменшується по мірі наближення відношення істинних деформацій товстого та тонкого елемента профільованої штаби до одиниці. Тобто найбільший розмір дефекту спостерігається при значенні відношення істинних деформацій рівному 232, що відповідає відсутності пластичної деформації тонкого елемента профільованої штаби. По мірі зростання ступеня деформації тонкого елемента профільованої штаби одночасно зі зростанням ступеня деформації товстого елемента розмір дефекту зменшується.

Таким чином, для зменшення розмірів закатів в ході холодної прокатки на гладкій бочці ступінь деформації тонкого елемента штаби необхідно збільшувати. В умовах проведеного експерименту зменшення розміру дефекту викликано використаним матеріалом. У зв'язку з тим, що в якості модельного матеріалу використовувався алюмінієвий сплав EN AW-1050, при великих ступенях деформації спостерігалася часткове заварювання дефектів.

Висновки до розділу 4

1. За допомогою запатентованої схеми пристрою валкового розливу-прокатки профільованих штаб на прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050 проведені натурні експерименти з реалізації розробленого методу валкового розливу-прокатки профільованих штаб з товщиною товстого елемента 2,7 мм та тонкого елемента - 2,2 мм. Виготовлені в ході експериментальних досліджень профільовані штаби відповідають за своїми властивостями вимогам стандарту DIN EN 485-2:2009-01. Експериментально доведена необхідність використання вертикальних роликів, які обмежують переміщення сталеві профілюючої стрічки уздовж бочки валка-кристалізатора.

2. Експериментально перевірено адекватність та точність розробленої математичної моделі, що використовувалася для теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки на умови формування елементів профільованої штаби. Перевірка математичної моделі виконана шляхом порівняння температури товстого та тонкого елемента профільованої штаби у площині виходу з валків-кристалізаторів отриманої експериментальним та теоретичним шляхом. Порівняння температур показало відхилення теоретичних показників, щодо визначених експериментально, в розмірі: для товстого елемента – 4%, для тонкого елемента – 12,3%. Аналіз мікроструктури виготовленої розливом-прокаткою штаби підтвердив асиметричність умов формування тонкого елемента штаби відносно середньої лінії валків, яка викликана наявністю додаткового теплового опору на контакті металу та профілюючої стрічки. Водночас, кристалізація товстого елемента штаби відбувається симетрично. Такі самі закономірності умов формування штаб с профільованим поперечним перерізом були отримані і шляхом теоретичного аналізу. Порівняння отриманих експериментальних і розрахункових даних дозволяє у сукупності зробити висновок про досить високу збіжність результатів теоретичних розрахунків та експериментальних

показників, що свідчить про адекватність і точність розробленої математичної моделі.

3. Експериментально отримано дані, що дозволяють визначити раціональні параметри холодної прокатки алюмінієвих штаб при виробництві тонких плоских штаб з гетерогенними по ширині властивостями. Встановлено, що досягнення максимального приросту показників механічних властивостей, а саме межі плинності, межі міцності та твердості, досягається за умови відсутності пластичної деформації тонких елементів профілю. Максимальне значення приросту межі плинності в розмірі 12% для сплаву EN AW-6082 та 35% для сплаву EN AW-1050 спостерігається при істинній деформації товстих елементів профілю 0,109 і 0,165, відповідно. Максимальний приріст межі міцності в розмірі 15,9% для сплаву EN AW-6082 та 20% для EN AW-1050 спостерігається при істинній деформації товстих елементів профілю 0,322 та 0,234, відповідно. Максимальний приріст показника твердості в розмірі, 11,5% і 40% спостерігається при істинній деформації товстого елемента 0,232 при обробці алюмінієвого сплаву EN AW-6082 та 0,326 при обробці сплаву EN AW-1050.

На прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050 експериментально встановлено, що одночасна деформація товстого та тонкого елемента профілю призводить до зниження різниці в показниках механічних властивостей металу у відповідних елементах, аж до її нівелювання. Останнє свідчить про необхідність запобігання деформації тонких елементів профільованих штаб при виробництві Tailor Rolled Flat Blanks (TRFB).

4. На основі експериментальних даних визначено абсолютне значення раціональної різниці між товщинами товстого та тонкого елемента профільованої штаби, яка забезпечується товщиною сталеві профілюючої стрічки пристрою для валкового розливу-прокатки профільованих штаб, яка повинна складати від 0,4 мм до 0,6 мм. Забезпечення даної різниці товщин елементів профільованої штаби гарантує максимальний приріст усіх показників механічних властивостей на окремих елементах профільованої штаби після її

холодної прокатки на гладкій бочці в рамках технології виготовлення плоских штаб з гетерогенними по ширині властивостями та дає можливість нівелювати викривлення форми готового продукту шляхом коректного налаштування проводок прокатного стану.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що зростання кута бокової кромки профілюючої стрічки, який визначає кут сполучення товстого та тонкого елемента профільованої штаби при розливі-прокатці, від 90° до 137° , приводить до зменшення розміру утвореного в ході послідууючої холодної прокатки дефекту, а саме закату, від 130 мкм до 0 мкм. На прикладі алюмінієвого сплаву EN AW-1050 експериментально доведено, що використання профілюючих стрічок з кутом бокової кромки 137° та більше забезпечує відсутність дефектоутворення в області сполучення елементів профілю різної товщини в ході послідууючої прокатки. Визначено характер впливу спільної деформації тонкого та товстого елемента профільованої штаби за умови постійної різниці істинних деформацій даних елементів рівної 0,232 та величині кута сполучення елементів штаби рівного 90° на утворення дефектів в ході холодної прокатки. Встановлено, що при прокатці профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 на гладкій бочці збільшення ступеня деформації профільованої штаби приводить до зменшення розміру дефекту в області сполучення елементів профільованої штаби.

РОЗДІЛ 5

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

Аналіз даних, отриманих в ході теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей впливу таких технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки, як швидкість валкового розливу-прокатки, температура розплаву, довжина зони кристалізації-деформації і товщина елемента профіля штаби на ступінь деформації, температуру і швидкість виходу елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів, при незалежному їх розгляді свідчить про те, що умови формування штаби з розплаву на елементах профілю штаби різної товщини неоднорідні. Дана неоднорідність може призвести до виникнення внутрішніх напружень в матеріалі, які, в свою чергу, призведуть до появи таких дефектів, як викривлення форми профільованої штаби або утворення тріщин. Найбільш імовірним місцем виникнення тріщин є область сполучення елементів профільованої штаби різної товщини. З метою зменшення ризику утворення вищезазначених дефектів необхідно розробити новий технологічний підхід до реалізації валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом, який дозволить зменшити неоднорідність умов формування профільованих штаб по ширині, а також метод розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу. Це, в свою чергу, дозволить розширити сортамент валкового розливу-прокатки на виготолвлення профільованих штаб [97].

5.1 Розробка технології виготовлення бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою

Завдяки результатам теоретичних досліджень впливу товщини елементів штаби і наявності додаткового теплового опору на межі метал-валок на

параметри формування штаби з розплаву стало відомо, що зміна товщини елементів штаби впливає не тільки на температуру і ступінь деформації кожного елемента, а також на швидкість їх на виході з валків-кристалізаторів. Прагнення металу у різних елементах профілю штаби до плину з різною поздовжньою швидкістю призводить до виникнення розтягуючих напружень в області їх сполучення, що може призвести до дефектоутворення. При розробці технологічного способу виготовлення бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою в якості показника, що забезпечує відсутність розтягуючих внутрішніх напружень, була використана умова узгодження швидкостей виходу елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів. Досягнення схожості швидкостей виходу елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів, при незалежному їх розгляді, можливе шляхом встановлення різних технологічних параметрів валкового розливу-прокатки по елементах профільованих штаб. Подібний підхід використовується при розробці конструкцій для прямого пресування профілів з легких сплавів зі складною формою поперечного перерізу. У випадку пресування для запобігання викривлення профілю або його руйнування змінюють довжину калібруючого пояса матриці для різних елементів профілю. В даному випадку, для спрощення розрахунків складний профіль ділять на декілька простих. В послідовному, конструювання матриці проводять з метою забезпечення узгодженості лінійних швидкостей виходу всіх елементів складного профілю, що дозволяє позбавитися від виникнення додаткових напружень в виготовленій продукції, які призводить до утворення дефектів та її викривленню [98-100].

Першим технологічним параметром, за допомогою якого можна впливати на ступінь деформації і швидкість виходу елемента профільованої штаби з валків-кристалізаторів є швидкість процесу. Однак, на практиці забезпечення різних швидкостей обертання валків-кристалізаторів і профілюючої стрічки досить складно реалізувати. Однією з основних

причин цього є те, що однією з умов стабільного протікання процесу валкового розливу-прокатки профільованих штаб є щільне прилягання профілюючої стрічки до поверхні валка-кристалізатора, що дозволяє забезпечити її стабільність. В умовах дії сили прокатки в зоні деформації сили тертя між валком-кристалізатором і сталеною профілюючою стрічкою настільки значні, що прагнення до забезпечення різних швидкостей на поверхні профілюючої стрічки і валку призведе до появи розтягуючих напружень в стрічці, що може викликати її пластичну деформацію або навіть руйнування. Нанесення додаткового розділового шару між валком-кристалізатором і профілюючою стрічкою, який здатен зменшити тертя в умовах високотемпературного впливу, призведе до різкого зниження тепловідбору від розплаву, що тільки посилить неоднорідність умов формування штаби з розплаву на елементах різної товщини. Виходячи з вищезазначеного, використання різних швидкостей руху інструмента для досягнення узгодженості між швидкостями товстого та тонкого елемента профільованої штаби є нераціональним.

Другим параметром, що впливає на умови формування штаб з розплаву є температура розплаву, що подається в міжвалковий простір. Проведені теоретичні дослідження показали можливість забезпечення рівності швидкостей елементів профільованої штаби шляхом зміни початкової температури розплаву. Досягти локальної різниці у температурах розплаву на різних елементах штаби можна шляхом використання сопел для подачі розплаву спеціальної конструкції. Однак практична доцільність такого підходу є сумнівною у зв'язку з необхідністю наявності двох або більше нагрівальних печей, кожна з яких повинна забезпечувати розплаву температуру, що є раціональним з точки зору умови узгодження швидкостей виходу елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів. Використання додаткових печей потребує збільшення виробничих площ, а це призведе до зростання енергоспоживання, що

нівелює найбільш істотні переваги технології прямого виготовлення штаб з розплаву.

Найбільш ефективним і простим в реалізації способом локального управління умовами формування штаби в двовалковому кристалізаторі є використання для кожного з елементів профільованої штаби своєї довжини зони кристалізації-деформації. На практиці цього можна досягти шляхом застосування спеціальних сопел для подачі розплаву в міжвалковий простір. Найлегшим способом реалізації даного технологічного підходу є використання ступінчатого сопла, яке знаходиться в безпосередній близькості до поверхні валка-кристалізатора і забезпечує необхідну довжину зони кристалізації-деформації на ділянках формування різних елементів профільованої штаби. Схематично подібне ступінчате сопло наведено на рисунку 5.1.

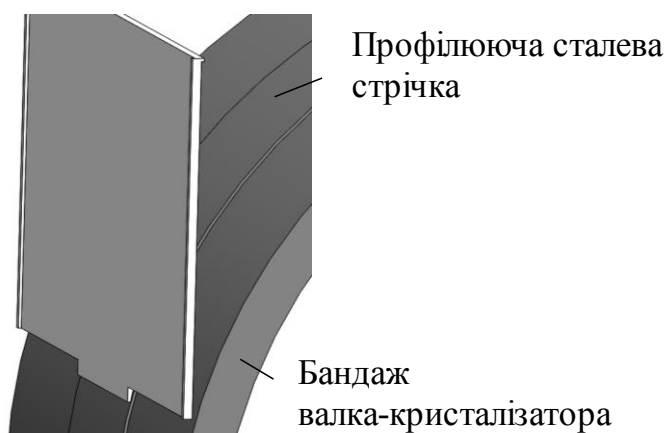


Рис. 5.1. Схематичне зображення частини ступінчатого сопла для подачі розплаву при валковому розлив-прокатці профільованих штаб

Для реалізації обраного технологічного способу виготовлення бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом валковим розливом-прокаткою необхідно розробити метод розрахунку технологічних параметрів процесу, в першу чергу довжини зон кристалізації-деформації елементів штаби різної товщини.

5.2 Розробка методу розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом.

В основу методу визначення раціональних параметрів валкового розливу-прокатки профільованих штаб покладено припущення про те, що для виготовлення бездефектних профільованих штаб високої якості в ході процесу необхідно забезпечувати ступінь деформації кожного елемента штаби на рівні не менше 30 %, а також забезпечити виконання умови рівності швидкостей металу по всіх елементах штаби в площині виходу їх з валків-кристалізаторів при незалежному їх розгляді. Метою методу, що розробляється, є забезпечення таких умов кристалізації-деформації окремих елементів профільованої штаби, які забезпечать відсутність ризику утворення дефектів.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні кроки:

1. Визначення ступеня деформації кожного елемента профільованої штаби при даній температурі розплаву, швидкості ведення процесу і різних значеннях довжини зони кристалізації-деформації. Для розрахунку ступеня деформації в валковому кристалізаторі в залежності від зазначених факторів використовуються рівняння, що були отримані шляхом кореляційного аналізу результатів теоретичних досліджень, описаних в розділі 3 даної роботи. Для елемента штаби, який формується безпосередньо на поверхні валків-кристалізаторів, ця формула має вигляд:

$$\varepsilon = (1,348 - d_1 \times V - d_2 \times T + d_3 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - d_4 \times h_{\text{п}}) \times 100 \quad (5.1)$$

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

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.

Відношення кореляції для отриманого рівняння (5.1) становить 0,957. Максимальна похибка апроксимації в розглянутому інтервалі параметрів рівна 9 %, що свідчить про досить високу точність розрахунків за отриманою емпіричною формулою.

Для елемента штаби, який формується на профілюючій сталевій стрічці, ступінь деформації розраховується за формулою:

$$\varepsilon' = (1,708 - d_5 \times V - d_6 \times T + d_7 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - d_8 \times h_{\text{п}}) \times 100 \quad (5.2)$$

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

де $h_{\text{п}}$ – товщина тонкого елемента профільованої штаби, м.

Відношення кореляції при одержанні формули (5.2) склало 0,978. Максимальна похибка апроксимації в досліджуваному інтервалі параметрів рівна 7 %, що свідчить про досить високу точність рівняння регресії (5.2).

Якщо ступені деформації при обраних значеннях технологічних параметрів на різних елементах профілю штаби не відповідають мінімально необхідній, виконується коректування технологічних параметрів процесу в бік зменшення температури розплаву, зниження швидкості розливу-прокатки і збільшення довжини зони кристалізації-деформації, яка на даному етапі приймається постійною для всіх елементів профільованої штаби. Після виконання коректувань значень технологічних параметрів, розрахунки з використанням формул (5.1) та (5.2) повторюються.

2. Визначення швидкостей виходу кожного елемента профільованої штаби при різних значеннях довжини зони кристалізації деформації.

Розрахунок швидкостей виходу елементів профільованої в поперечному перерізі штаби, для різних її елементів, при обраних на попередньому кроці температурі і швидкості процесу здійснюється за допомогою формул (5.3) і (5.4), що були отримані шляхом кореляційного аналізу результатів

математичного моделювання, які наведені в розділі 3. Для елемента штаби який формується на поверхні валків-кристалізаторів швидкість виходу з валків розраховується за емпіричною формулою:

$$V_{\text{ел.}} = k_1 + k_2 \times V - k_3 \times T + k_4 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - k_5 \times h_{\text{п}} \quad (5.3)$$

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

Відношення кореляції для отриманої формули (5.3) становить 0,998. Максимальна похибка апроксимації в досліджуваному інтервалі параметрів рівна 2 %, що свідчить про досить високу точність розрахунку швидкості виходу даного типу елемента штаби з валків-кристалізаторів.

Для елемента профільованої штаби, що формується на профілюючій сталевій стрічці, формула має вигляд:

$$V'_{\text{ел.}} = k_6 + k_7 \times V - k_8 \times T + k_9 \times l_{\text{кр.}+\text{деф.}} - k_{10} \times h'_{\text{п}} \quad (5.4)$$

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

Відношення кореляції для отриманої формули (5.4) становить 0,998. Максимальна похибка апроксимації в розглянутому інтервалі варійованих параметрів рівна 2 %, що свідчить про досить високу точність отриманої емпіричної формули.

Визначення довжини зони кристалізації деформації далі можна виконати двома способами: графічним та аналітичним. Для більшої наглядності в роботі розглядається графічний спосіб. За отриманими з використанням формули (5.3) даними в осях довжина зони кристалізації-деформації – швидкість виходу елемента штаби з валків-кристалізаторів будується крива, яка описує зміну швидкості елемента профільованої штаби, який формується безпосередньо на

валках-кристалізаторах для обраного на першому кроці діапазону значень довжин зони кристалізації-деформації. Потім, як мінімум для одного значення довжини зони кристалізації-деформації елемента профільованої штаби, що формується на профілюючій сталевій стрічці, також встановленого на попередньому кроці розрахунку, визначається значення швидкості даного елемента профільованої штаби на виході з валків-кристалізаторів у відповідності до формули 5.4. Дане значення швидкості наноситься на графік у вигляді прямої лінії, паралельної до осі абсцис. Точка перетину даної прямої з побудованою раніше кривою, яка описує зміну швидкості елемента профільованої штаби, що формується безпосередньо на валках-кристалізаторах, відповідає раціональному значенню довжини зони кристалізації-деформації для цього елемента штаби.

5.3 Приклад розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом товщиною 1,5 мм × 1,0 мм × 1,5 мм

Розглянемо використання розробленого вище методу розрахунку технологічних параметрів валкового розливу-прокатки на прикладі дослідженого в теоретичній частині роботи профілю штаби (див. розділ 2, рис. 2.2) з заданими геометричними розмірами (1,5 мм...1,0 мм...1,5 мм). Раніше в розділі 3 було визначено, що зміна температури і швидкості ведення процесу в розглянутому температурно-швидкісному інтервалі не призводить до зменшення довжини зони деформації нижче критичного значення. Ступінь деформації кожного елемента профільованої штаби, при розглянутих значеннях даних параметрів, гарантовано перевищує мінімально необхідне значення, яке знаходиться на рівні 20...30%, що забезпечує виготовлення штаби високої якості. Початкова температура розплаву була прийнята рівною 933 К, що гарантує відсутність передчасної кристалізації елементів профільованої штаби, швидкість валкового розливу-прокатки була прийнята рівною 3,25 м/хв, що

гарантує високий ступінь деформації елементів штаби. Довжина зони кристалізації-деформації варіювалася в діапазоні 25...60 мм. Для даного діапазону варіювання довжини зони кристалізації-деформації ступінь деформації елементів штаби, при обраних технологічних параметрах процесу, змінюється від 55% до 92 %. Для наочного розгляду методу визначення раціональної довжини зони кристалізації-деформації далі розглянуто графічний метод її визначення. Використовуючи наведені технологічні параметри процесу валкового розливу-прокатки, шляхом розрахунків за формулами (5.3) та (5.4), були отримані результати, які наведені в графічному вигляді на рисунку 5.2. Подальше визначення раціональних параметрів процесу базується на аналізі отриманих розрахункових даних.

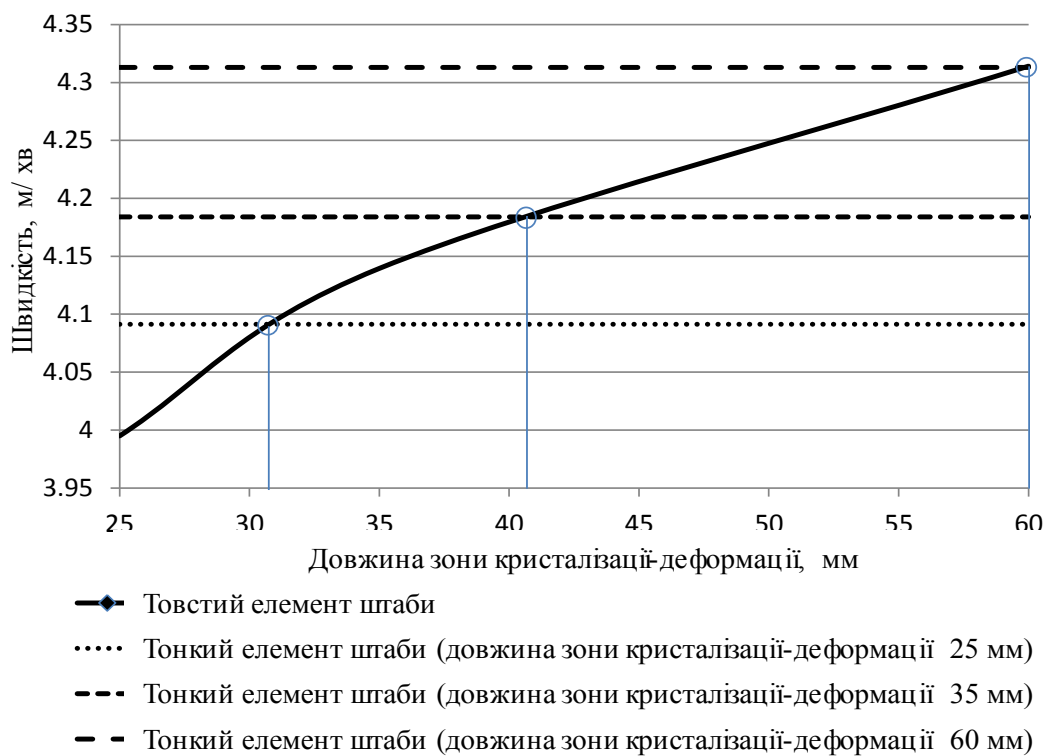


Рис. 5.2. Графік для визначення довжини зони кристалізації-деформації при валковому розливі-прокатці профільованих штаб

На графіку пунктирними лініями позначені швидкості тонкого елемента профільованої штаби для заданих умов валкового розливу-прокатки і обраних значень довжини зони кристалізації-деформації на даному елементі штаби

рівних 25 мм, 35 мм і 60 мм. Суцільна лінія описує зміну швидкості товстого елемента в залежності від довжини зони кристалізації-деформації в обраному діапазоні її варіювання.

В даному випадку, показники довжини зони кристалізації-деформації прийняті рівними 25 мм, 35 мм і 60 мм виходячи з реальних технологічних параметрів реалізації валкового розливу-прокатки алюмінієвих штаб, що використовуються в ході експериментальних досліджень процесу виготовлення плоских та профільованих штаб з розплаву на кафедрі матеріалознавства Падерборнського Університеті (м.Падерборн, ФРН).

З метою визначення раціональної довжини зони кристалізації-деформації, для кожного з елементів профільованої штаби, визначаємо положення точок перетину кривої і ліній, які відповідають певним значенням швидкості виходу тонкого елемента штаби при обраних значеннях довжини зони кристалізації-деформації на даному елементі. Потім визначається значення показника по осі абсцис, який вказує раціональну довжину зони кристалізації-деформації товстого елемента профільованої штаби, що забезпечить рівність швидкостей виходу товстого та тонкого елемента штаби з валків-кристалізаторів між собою. На прикладі розглянутого профілю, при довжині зони кристалізації деформації тонкого елемента профілю рівної 25 мм, для товстого елемента вона повинна становити 30,8 мм, що відповідає першій точці перетину ліній на рисунку 5.2. Іншими парами раціональних значень довжини зони кристалізації-деформації для тонкого та товстого елемента штаби, відповідно, є: 35 мм – 40,6 мм, 60 мм – 60 мм.

З точки зору практичної реалізації, застосування зон кристалізації-деформації довжиною 60 мм для тонкого і 60 мм для товстого елемента профільованої штаби є найбільш зручним. В даному випадку можна використовувати плоске сопло стандартної конструкції. При цьому, відносний ступінь деформації товстого та тонкого елемента для обраних базових умов реалізації валкового розливу-прокатки, що отримана шляхом математичного моделювання, становить 89 % та 88,5 %, відповідно [101]. Ці ж показники

отримані за допомогою формул (5.1) та (5.2) становлять: для товстого елемента - 94 %, для тонкого елемента – 92 %. Дана розбіжність результатів укладається в розмір максимальних похибок формул (5.1) і (5.2) визначених раніше. Настільки висока відносна деформація елементів профільованої штаби є надмірною і підвищує ймовірність передчасного виходу із ладу вузлів агрегату валкового розливу-прокатки через збільшення сили прокатки. Разом з тим, слід уникати використання зони кристалізації-деформації тонкого та товстого елемента профільованої штаби довжиною 25 мм і 30,8 мм, відповідно. Для досягнення таких значень довжини зони кристалізації-деформації необхідно застосовувати ступінчате сопло з тонкими стінками, яке повинно глибоко проникати в простір між валками-кристалізаторами. Поєднання цих факторів, під час практичної реалізації процесу, може призвести до пошкодження елементів сопла через тертя об валки-кристалізатори або навіть внаслідок захвату сопла валками-кристалізаторами.

Виходячи з усього вищезазначеного, для виготовлення профільованої штаби з алюмінієвого сплаву EN AW-1050, при швидкості валкового розливу-прокатки 3,25 м/хв і температурі розплаву рівної 933 К, раціональним є використання довжини зони кристалізації-деформації для тонкого елемента профільованої штаби рівної 35 мм і для товстого - 40,6 мм. При відповідному виборі технологічних параметрів процесу швидкості товстого і тонкого елемента профільованої штаби, при незалежному їх розгляді, будуть рівні між собою і становитимуть 4,19 м/хв, що гарантує відсутність викривлення форми штаби в цілому. Ступінь деформації товстого та тонкого елемента профілю штаби становитиме при цьому 76 % і 80 %.

Висновки до розділу 5

1. Вперше запропоновано технологічний спосіб, який забезпечує можливість виготовлення бездефектних штаб з профільованим поперечним перерізом на агрегатах валкового розливу-прокатки. Основою розробленого

технологічного способу є врахування неоднорідності умов формування елементів профільованої штаби безпосередньо з розплаву. В якості показника, який забезпечує мінімальний рівень або повну відсутність розтягуючих внутрішніх напружень між елементами штаби і відповідно зниження ризику дефектоутворення, прийнята умова узгодження швидкостей виходу елементів профільованої штаби з валків-кристалізаторів при незалежному їх розгляді. Для досягнення даної умови запропоновано встановлювати різні довжини зони кристалізації-деформації по різних елементах профільованої в поперечному перерізі штаби. Практична реалізація даного технологічного способу може бути досягнена шляхом застосування для подачі розплаву ступінчатих сопел, які знаходяться в безпосередньому контакті з поверхнею валків-кристалізаторів і профілюючої сталеві стрічки

2. Розроблено метод розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу валкового розливу-прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом. Сутність розробленого методу полягає у визначенні довжини зони кристалізації-деформації індивідуально для кожного елемента профілю штаби, яка забезпечить ідентичність швидкостей даних елементів на виході з валків-кристалізаторів. Розрахунок ступеня деформації і швидкості кожного елемента профільованої штаби при заданій температурі розплаву, швидкості ведення процесу і різних значеннях довжини зони кристалізації-деформації виконується по емпіричним формулам, що отримані шляхом кореляційного аналізу результатів теоретичних досліджень даної роботи. В подальшому здійснюється аналіз отриманих розрахункових даних з метою визначення значень довжини зони кристалізації-деформації індивідуально для кожного елемента профільованої штаби, які забезпечать рівність швидкостей по елементах профільованої штаби при незалежному їх розгляді.

3. Визначені раціональні технологічні параметри валкового розливу-прокатки профільованої штаби зі сплаву EN AW-1050 з товщинами товстого-тонкого-товстого елементів 1,5 мм...1 мм...1,5 мм. При температурі розплаву рівній 933 К і швидкості ведення процесу 3,25 м/хв визначені значення

довжини зони кристалізації-деформації товстого та тонкого елементів профільованої штаби, які гарантують відсутність дефектоутворення в області сполучення елементів профілю штаби. Раціональною, для реалізації на експериментальній машині валкового розливу-прокатки, довжиною зони кристалізації-деформації для товстого елемента є 40,6 мм, для тонкого елемента профільованої штаби – 35 мм. Застосування отриманих значень довжини зони кристалізації-деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби дозволить забезпечити однакову швидкість виходу даних елементів з валків-кристалізаторів, яка становитиме 4,19 м/хв.

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 розлив-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-валонок» при валковому розлив-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/(м²·К), для 3 мм – 15000 Вт/(м²·К) і для 4 мм – 13100 Вт/(м²·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 профільуючої 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 роликами. 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 - 1,5 мм. 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.).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. USGS: Aluminium - Mineral Yearbook 2016 / U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017. – p. 22-23.
2. Александров Н. Производство первичного алюминия в мире и в России [Электронный ресурс] / Н. Александров // Металл и цены: журнал. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: http://metal4u.ru/articles/by_id/193.
3. A review on tailored blanks. Production, applications and evaluation / M.Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert. // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol.214. – С. 151–164.
4. Geiger M. Aluminum tailored heat treated blanks / M. Geiger, M. Merklein, U. Vogt. // Production Engineering. – 2009. – Vol.3. – P. 401–410.
5. Kinsey B. A novel forming technology for tailor-welded blanks / B. Kinsey, Z. Liu, J. Cao // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – Vol.99. – P. 145-153.
6. Ku T.-W. Tailored blank design and prediction of weld line movement using the backward tracing scheme of finite element method / T.-W. Ku, B.-S. Kang, H.-J. Park // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Vol. 25(1-2). – P. 17–25
7. Naeem M. Welding aluminum tailored blanks with Nd:YAG lasers for automotive applications [Электронный ресурс] / M. Naeem, R. Jessett // Practical welding today. – 2001. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/welding-aluminum-tailored-blanks-with-ndyag-lasers-for-automotive-applications>.
8. Kopp R. A New Rolling Process for Strips with a Defined Cross Section / R. Kopp, P. Böhlke// CIRP Annals. – 2003. – Vol.52(1). – P. 197-200.
9. Kopp R. Flexibly rolled sheet metal and its use in sheet metal forming / R. Kopp, C. Wiedner, A. Meyer // Advanced materials research. – 2005. – Vol.6-8. – P. 81-92

10. Sheng Z. Q. Formability of tailor-welded strips and progressive forming test / Z. Q. Sheng. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol.205 (1-3). – P. 81–88.
11. Olejnik L. Fizyczne i Matematyczne Modelowanie Procesów Obróbki Plastycznej/ L. Olejnik, J. Goliński, A. Rosochowski //, IX konferencja (FIMM'15) 17-19.05.2015, Jabłonna, Prace Naukowe – Mechanika. – 2015. – №267. – P. 155-160.
12. Rosochowski A. New method of producing tailored blanks with constant thickness / A. Rosochowski, L. Olejnik // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol.207. – P. 1433-1438.
13. Schwerdtfeger K. Benefits, Challenges and Limits in New Routes for Hot Strip Production / K. Schwerdtfeger // *ISIJ International*. – 1998. – Vol.38(8). – P. 852-861.
14. Сталінський Д.В. Сучасни рівень технології безперервного валкового лиття-прокатки тонких стрічок та вибір оптимального варіанту суміщеного агрегату для умов України / Д.В. Сталінський, Л.А. Вакула // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. - №5(263). - С. 52-57.
15. Ганжин В. Технология XXI века. Перспективы России [Электронный ресурс] / В. Ганжин, Ю. Киселев // ЭСКО. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: http://journal.esco.co.ua/2005_5/art70.htm.
16. Bessemer H. Improvement in the manufacture iron and steel. US Patent №49053, July 25, 1865. – 4 p.
17. A single roll caster for aluminum alloy strip / T.Haga, K. Akitsu, S. Kumai, H. Watari. // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol.382. – С. 368–371.
18. Дюдкин Д. А. Производство стали. Том 4. Непрерывная разливка металла / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, А. Н. Смирнов. – М.: Теплотехник, 2009. – 528 с.
19. Смирнов А. Н. Современные технологии получения тонкого листа и полосы методами непрерывного литья [Электронный ресурс] / А. Н. Смирнов. –

2010. - Режим доступу до ресурсу:
<http://uas.su/conferences/2010/50let/25/00025.php>.

20. Литейно-прокатные комплексы. [Электронный ресурс]. – 2012. - Режим доступу до ресурсу: <http://metallurgiya.net/metallurgiyastali/191-litejno-prokatnye-kompleksy.html>

21. МНЛЗ для разливки тонких слябов и литейно-прокатные модули [Электронный ресурс]. – 2014. - Режим доступу до ресурсу: http://studopedia.su/5_14066_mnlz-dlya-razlivki-tonkih-slyabov-i-liteyno-prokatnie-moduli.html.

22. Данченко В.Н. Непрерывная валковая разливка-прокатка стальных полос // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Дніпропетровськ: "Системні технології". – 2002. – Т.5. – С. 63-72.

23. Запускалов Н. М. Развитие процесса непрерывного литья тонкой полосы / Н. М. Запускалов // Сталь. - 2002. - № 9. - С. 94-101.

24. Коновалов Ю. В. Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 1. Производство продукции из цветных металлов. / Ю. В. Коновалов // Производство проката. - 2009. – №9. – С. 37-43.

25. Коновалов Ю. В. Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов. Литейно-прокатные агрегаты с валковыми кристаллизаторами. Сообщение 4. / Ю. В. Коновалов // Производство проката. - 2010. – №1. – С. 21-38.

26. The Castrip process – recent developmetns at Nucor steels commercial strip casting plant / [D. J. Sosinsky, P. Campbell, R. Mahapatra та ін.]. // Metallurgist. – 2008. – Vol.52(11-12). – P. 691–699.

27. Матвеев Б. Н. Непрерывная отливка тонких полос на микрозаводах с применением валковых кристаллизаторов / Б. Н. Матвеев // Производство проката. - 2004. - №4. - С. 33-41.

28. Eurostrip - direct strip casting of carbon and stainless steels: latest results from Terni and Krefeld [G. Hohenbichler, P. Tolve, R. Capotosti та ін.]. // STEEL WORLD. – 2002. – Vol.7. – P.40-44.

29. Линденберг Х.-У. Новая технология «Eurostrip» / Х.-У. Линденберг, Ж. Генрион, К. Шваха // Сталь. - 2002. - № 4. - С.61-62.
30. Степанов А.Н. Производство листа из расплава / А.Н. Степанов, Ю.В. Зильберг, А.А. Неуструев. - М.: Metallurgiya, 1978. – 160 с.
31. Лякишев Н. П. Развитие технологии непрерывной разливки стали / Н. П. Лякишев, А. Г. Шалимов. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
32. Э. Герман Непрерывное литье / Э. Герман. - М.: Metallurgizdat, 1961. – 815 с.
33. Рудой Л. С. Литейно-прокатные агрегаты (ЛПА) для производства листовой полосы // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. - 2010. - №7. - С. 247-248.
34. Данченко В. Н. Кардинальные изменения технологии и проблемы производства стального проката / В.Н. Данченко // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. - 2000. - №8-9(Спецвыпуск). - С.13-19.
35. Development of the twin-roll casting process / [R. Cook, P. Grocock, P. Thomas та ін.] // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – Vol.55(2). – С. 76–84.
36. Haga T. Casting of composite strip using a twin-roll caster / T. Haga, K. Takahashi // Journal of materials processing technology. – 2004. – Vol.157-158. - P.701-705.
37. Haga T. Clad strip casting by a twin-roll caster / T. Haga, R. Nakamura, S. Kumai, H. Watari / Archives of Materials Science and Engineering. – 2009. – Vol.37(2). – P. 117-124.
38. Twin roll casting of magnesium alloys with high aluminum contents / [H. Watari, T. Haga, Y. Shibue та ін.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 2006. - №18(1-2). – P.419-422.
39. Haga T. High speed twin roll casting of recycled Al-3Si-0.6Mg strip / T. Haga, M. Ikawa, H. Watari, S. Kumai // Archives of Materials Science and Engineering. – 2007/ - Vol.21(1). – P.7-12.

40. Roll caster for the three-layer clad-strip / [R. Nakamura, T. Yamabayashi, T. Haga и др.] // Archives of Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol.41(2). – P.112-120.
41. Neh K. Twin-Roll-Casting and hot rolling of magnesium alloy WE43 / K. Neh, M. Ullmanna, R. Kawallaa // Procedia Engineering. - 2014. – Vol.81. – P.1553–1558.
42. Daamen M. Experimental and Numerical Investigation of Double Roller Casting of Strip with Profiled Cross Section / M. Daamen, T. Förster, G. Hirt // ICTP 2011. – Vol.2. – P. 93-98.
43. Daamen M. Effects of the variation of profile shape on the geometric accuracy and microstructure in profile strip casting / M. Daamen, M. Vidoni, L. Henke, G. Hirt // Steel Research International. - 2012. – P.1223-1226.
44. Vidoni M. Advances in the Twin-roll Strip Casting of Strip with Profiled Cross Section / M. Vidoni, M. Daamen, G. Hirt // Key Engineering Materials. - 2013. - Vol.554-557. – P.562-571.
45. Vidoni M. Profile Strip Casting with Inline Hot Rolling: Numerical Simulations for the Process Chain Design / M. Vidoni, A. Mendel, G. Hirt // Key Engineering Materials. - 2014. - Vol.611-612. – P.1568-1575.
46. Daamen M. Tailored strips by welding, strip profile rolling and twin roll casting / M. Daamen, D. D. Julca, G. Hirt // Advanced Materials Research. - 2014. - Vol.907. – P. 29-39.
47. Daamen M. Bandgießen und Weiterverarbeitung profilierter Bänder und hochmanganhaltiger Stähle / M. Daamen, M. Vidoni, G. Hirt // 28. ASK Aachener Stahlkolloquium. - 2013. - P 207-216.
48. Николаев, В.Ал. Некоторые особенности процесса бесслитковой прокатки стальных полос / В.Ал. Николаев // Производство проката. - 2007. - № 5. - С.11–13.
49. Бровман М. Я. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке / М. Я. Бровман, В. А. Николаев, В. П. Полухин // Металлы. – 2007. – № 1. – С. 44–49.

50. Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys / M. Ferry . – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. – 292 p.
51. Kang C. G. A thermal elastic-plastic finite-element analysis to roll-life prediction on the twin roll strip continuous casting process / C. G. Kang, Y. D. Kim // Metallurgical and materials transactions B. – 1997. – Vol.28B - P.1213-1225.
52. Bercovici S.J. Optimisation of 3C roll caster by automatic control / S.J. Bercovici // Proc. of conference "Light Metals", TMS, New York. – 1985. – P. 1285-1299.
53. Гридин А. Ю. Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке / А. Ю. Гридин // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – 2010. – № 42. – С. 48-58.
54. Grydin O. Deformation Zone Length and Plastic Strain in Twin-Roll Casting of Strips of Al-Mg-Si Alloy / O. Grydin, M. Stolbchenko, M. Schaper // JOM. - 2017. – Vol.69(12). – P.2648–2652.
55. Lee Y.-S. Effect of Casting Parameters on Roll Separation Force during Twin Roll Casting / Y.-S. Lee, H.-W. Kim, J.-H. Cho // Procedia Engineering. – 2014. – Vol.81. – P.1547–1552.
56. Sahoo S. Review on vertical twin-roll strip casting: a key technology for quality strips / S. Sahoo // Journal of Metallurgy. - 2016. - P.1-13.
57. Saxena A. Modeling of Thermo-Mechanical Stresses in Twin-roll Casting of Aluminum Alloys / A. Saxena, Y. Sahai // Material Transactions, 2002. – Vol. 43 (2). – P. 214-221.
58. Ju D. Y. Inelastic behavior and numerical analysis in twin-roll casting process of AZ31 alloy / D. Y. Ju, X. D. Hu, H. Y. Zhao // Archives of Mechanics. - 2009 – Vol.61(3–4) – P. 229–239.
59. Tavares R. P. Computational fluid dynamics applied to twin-roll casting / R. P. Tavares, R. I. L. Guthrie // Canadian metallurgical Quarterly. – 1998. - Vol.37(3-4). – P.241-250

60. Stolbchenko M. Twin-roll casting and finishing treatment of thin strips of the hardening aluminum alloy EN AW-6082 / M. Stolbchenko, O. Grydin, M. Schaper // *Materials Today: Proceedings* 2015 – Vol.2S – p. 32 – S38
61. Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminium-steel clad strips / [M. Stolbchenko, O. Grydin, A. Samsonenko та ін.] // *Forschung im Ingenieurwesen*. – 2014. – Vol.78(3-4) – P.121–130.
62. Sarioglu K. Simulation of solidification process used in twin roll casting / K. Sarioglu, P. Thevoz // *Light metals. Proceedings*. – Warrendale:TMS, 2003. – P. 747-751.
63. Santos C. A. Modeling of solidification in twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim Jr., A. Garcia // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2000. – Vol.102. – P. 33-39.
64. Cruchaga M. A. Modelling of twin-roll strip casting processes / M. A. Cruchaga, D. J. Celentano, R. W. Lewis // *Communications in numerical methods in engineering*. – 2003. – № 19. – p. 623-635
65. Guthrie R. I. L. Measurements, simulations, and analyses of instantaneous heat fluxes from solidifying steels to the surfaces of twin roll casters and of aluminum to plasma-coated metal substrates / R. I. L. Guthrie, M. Isac, J.S. Kim, R. P. Tavares // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2000. – Vol.31(5). – P.1031–1047 .
66. Tavares R. P. Roll-strip interfacial heat fluxes in twin-roll casting of low-carbon steels and their effects on strip microstructure / R. P. Tavares, M. Isac, R. I. L. Guthrie // *ISIJ International*. – 1998. –Vol.38(12). - P.1353-1361.
67. Hu X.-D. Simulation of inelastic deformation and thermal mechanical stresses in twin-roll casting process of Mg alloy / X.-D. Hu, D.-Y. Ju // *Key Engineering Materials*. – 2007. – Vol.340-341. – P.877-882.
68. Zeng J. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / J. Zeng, R. Koitzsch, H. Pfeifer, B. Friedrich // *Journal of materials processing technology*. – 2009. – № 209. – P.2321-2328.

69. Park C. M. Thermal analysis of the roll in the strip casting process / C. M. Park, W. S. Kim, G. J. Park // *Mechanics Research Communications*.– 2003 – Vol.30. – P. 297-310.

70. Saxena A. Modeling of fluid flow and heat transfer in twin-roll casting of aluminum alloys / A. Saxena, Y. Sahai // *Materials transactions*.– 2002. – Vol.2. – P.206-213.

71. DIN EN 573-3:2013-12 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen

72. Физические величины: Справочник / [А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

73. Davis J. R. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys / J. R. Davis. - 1993. – 784 с.

74. Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин и др.]. - Новосибирск: Наука, 1999. – 438 с.

75. Савенков Г. Г. Динамическая вязкость и время релаксации материалов при ударно-волновом нагружении / Г. Г. Савенков. // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2010. - Т. 51(2) – С. 7–15.

76. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. Издание 2-ое дополненное и переработанное. / Е. И. Казанцев. - Москва:Металлургия,1975. – 368 с.

77. ANSYS, Inc. Release 11.0. Documentation for ANSYS.

78. Launder B. E. The Numerical Computation of Turbulent Flows / B.E. Launder, D.B Spalding // *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*. - 1974. - Vol.3. – P.269-289.

79. 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.

80. Гридин А. Ю. Технологический литейно-прокатный комплекс экспериментальных исследований процесса валковой разливки-прокатки Падерборнского университета / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, М. Шапер // Пластична деформація металів. – 2017. – С. 210-217.

81. Grydin O. Yu. Experimental Twin-Roll Casting Equipment for Production of Thin Strips / O. Yu. Grydin, Y. K. Ogins'kyi, V. M. Danchenko, Fr.-W. Bach // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. - Vol.2(5) – P.348-354.

82. Strezo L. Experimental studies of interfacial heat transfer and initial solidification pertinent to strip casting / L. Strezo, J. Herbertson // ISIJ International. – 1998. – Vol.9. – P.595-966.

83. Strezo L. Mechanisms of Initial Melt. Substrate heat transfer pertinent to strip casting / Strezo L., Herbertson J., Belton G. R. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – №31B(5). – P.1023-1030.

84. 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.

85. Kim M.-S. Solidification Structure and Casting Defects in High-Speed Twin-Roll Cast Al-2mass% Si Alloy Strip / M.-S. Kim, S. Kumai // Materials Transactions. -2013. - Vol. 54(10). - P.1930-1937.

86. Kim M.-S. Formation of Internal Crack in High-Speed Twin-Roll Cast 6022 Aluminum Alloy Strip / M.-S. Kim, Y. Arai, Y. Hori, S. Kumai // Materials Transactions. – 2010. - Vol.51(10). - P.1854-1860.

87. Grydin O. Twin-roll Casting of High-strength Age-hardened Aluminium Alloys / O. Grydin, M. Schaper, V. Danchenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2011. - Vol.3(7). – P.7-16.

88. 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.

89. 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.

90. DIN EN 485-2:2009-01 Aluminium und Aluminiumlegierungen. Bänder, Bleche und Platten. Teil 2: Mechanische Eigenschaften. – 01.2009. – 104 p.

91. ISO 6361-2:2014: Wrought aluminium and aluminium alloys. Sheets, strips and plates. Part 2: Mechanical properties. – 09.2014. – 51 p.

92. Grydin O. Rolling of flat aluminum strips with tailored mechanical properties / O. Grydin, S. Bondarenko, M. Stolbchenko, M. Schaper // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 854. – P. 87-92.

93. EN ISO 6892-1:2009: Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. - 08.2009. – 58 p.

94. EN ISO 6506-1:2014: Metallic materials. Brinell hardness test. Part 1: Test method. – 10.2014. – 16 p.

95. 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.

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

97. Бондаренко С. В. Тенденции и перспективы развития валковой разливки-прокатки / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, А. Н. Головкин // Пластична

деформація металів: збірник наукових праць у 2-х томах. Дніпропетровськ: Акцент ПП. - 2014. – Т.1. - С. 260-263.

98. Hardouin J-P. Bearing Length Calculation by Control of Metal Flow Pressure // Proc. of Fifth International Extrusion Technology Seminar. Vol. 1. – Chicago: Editors Express.- 1992. – P. 291-303.

99. Golovko O. Method for pocket die design on the basis of numerical investigations of aluminium extrusion process / O. Golovko, I. Mamuzić, O. Grydin // Metalurgija 2006 - № 45(3) – P.155-161

100. Ravin A.N. Formoobrazuyuschiy instrument dlya pressovaniya i volocheniya profiley / A.N. Ravin, E.Sh. Suhodrev, L.R. Dudetskaya, V.L. Scherbanyuk // Minsk: Nauka i tehnika, 1988. - 230 p.

101. 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. - DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-1098.

ДОДАТКИ

Додаток А

Затверджую:

Головний інженер

ПрАТ Дніпровський завод

«АЛЮМАШ»

Данченко Ю. В.

«30» 05 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Бондаренка Сергія Валерійовича

в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ»

Для використання в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» передані наступні результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук співробітника національної металургійної академії України Бондаренка Сергія Валерійовича:

1. Дані про новий метод виробництва тонких профільованих штаб з алюмінієвих сплавів з використанням профілюючої стрічки на агрегатах валкової розливки-прокатки.

2. Метод теоретичного визначення оптимальних технологічних параметрів процесу валкової розливки-прокатки профільованих штаб.

3. Дані про вплив геометрії профілю штаб з алюмінієвих сплавів EN AW-1050 і EN AW-6082 на розмір закату та формування градієнту механічних властивостей в плоскій штабі під час прокатки на гладкій бочці.

Головний технолог

С. В. Артеменко

Головний механік

В. П. Метелин



Головний спеціаліст КО

С. Е. Подольский

Додаток Б


 "ЗАТВЕРДЖУЮ"

 Перший проректор
 Національної металургійної
 академії України
 д.т.н., проф. Іващенко В.П.
 « 18 » 05 2018 р.

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Бондаренка С.В.

Отримані молодшим науковим співробітником кафедри обробки металів тиском Бондаренком Сергієм Валерійовичем у рамках дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук нові експериментальні та теоретичні дані щодо впливу технологічних параметрів валкового розливу-прокатки на температурно-деформаційні умови формування алюмінієвих штаб без та за участю додаткового інструменту, методу визначення раціональних параметрів технології валкового розливу-прокатки, можливості використання профільованих штаб з метою виготовлення плоскої продукції з гетерогенними властивостями знайшли використання в навчальному процесі на кафедрі обробки металів тиском.

Вказані вище наукові результати використовуються 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.

Завідувач кафедри ОМТ

д.т.н., проф.



Я. В. Фролов

Додаток В



UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

UNIVERSITÄT PADERBORN | 33095 PADERBORN

FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU



LWK
Lehrstuhl
für Werkstoffkunde

Lehrstuhl für Werkstoffkunde
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schaper

Raum E5.112
Fon 0 52 51 60-38 55
Fax 0 52 51 60-38 54
E-Mail schaper@lwk.upb.de

Paderborn, den 17.05.18

Reference letter

for results of dissertation thesis of Mr. Serhii Bondarenko from the Chair of Metal Forming of the National Metallurgical Academy of Ukraine

With this letter, I would like to confirm that the Chair of Materials Science of the Paderborn University has implemented some results of dissertation work prepared by Mr. Serhii Bondarenko in the lectures for regular and postgraduate students. The following listed below results established by Mr. Serhii Bondarenko were used in our scientific work:

- Data on the heat transfer coefficient on the metal/water cooled roll-interface during twin-roll casting of strips different aluminum alloys;
- Methods and approaches of numerical simulation of twin-roll casting process by means of finite elements method;
- Effect of tailored mechanical properties formation during cold rolling of strips with pre-profiled cross-section in flat rolls.

The established by Mr. Serhii Bondarenko results are on a high scientific level and have good practical applicability.

I would like to thank Mr. Serhii Bondarenko for the successful scientific collaboration and to wish him good luck in his future life and career.

Paderborn, 17.05.18


Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

LWK Lehrstuhl für Werkstoffkunde
Universität Paderborn
Postweg 47-49 · D-33098 Paderborn

Падерборнський університет

Факультет машинобудування
Кафедра матеріалознавства

проф., д.т.н. М. Шапер
кімната E5.112
тел.: +0 5251 60-3855
факс: +0 5251 60-3854
e-mail: schaper@lwk.upb.de

Падерборн, 17.05.2018

Рекомендаційний лист

за результатами дисертаційної роботи пана Сергія Бондаренка з кафедри
обробки металів тиском Національної металургійної академії України

Цим листом, я хотів би підтвердити, що Кафедра матеріалознавства Падерборнського університету впровадила деякі результати дисертаційної роботи, підготовленої паном Сергієм Бондаренком в лекціях для студентів та аспірантів. Наведені нижче результати, отримані паном Сергієм Бондаренком, були використані в нашій науковій роботі:

- Дані стосовно коефіцієнту тепловіддачі на межі метал/водоохолоджуємий валок при валковому розливі-прокатуванні штаб з різних алюмінієвих сплавів;
- Методи та підходи для чисельного моделювання процесу валкового розливу-прокатки за допомогою методу скінченних елементів;
- Ефект формування гетерогенних механічних властивостей під час холодної прокатки штаб з попередньо профільованим поперечним перерізом на гладкій бочці.

Визначені паном Сергієм Бондаренком результати знаходяться на високому науковому рівні та мають хорошу практичну придатність.

Я хотів би подякувати пану Сергію Бондаренку за успішне наукове співробітництво та побажати успіху у майбутньому житті та кар'єрі.

Падерборн, 17.05.2018

Проф., д.т.н. Мірко Шапер

Переклад з англійської мови
на українську виконав



Бондаренко С.В.

Переклад з англійської мови на
українську вірний



А.А. Бондаренко

Додаток Г

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ БОНДАРЕНКА С.В.

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.

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. - DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-1098.

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.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.

X Міжнародна науково-технічна конференція «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 Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2016 р.), XX Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2017 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Пластична деформація металів 2017» (м. Дніпро, 2017 р.), XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2018 р.), Придніпровський науковий семінар «Обробка металів тиском» (м. Дніпро, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 рр.).