

О.В. Ноговіцин, докт. техн. наук, ст. наук. співроб., зав. відділу;
e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

І.Р. Баранов, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
e-mail: ntc-technologies@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5692-5297>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ КОНВЕРСІЇ ПРОМИСЛОВОГО КАЛАНДРА В ДВОВАЛКОВУ ЛИВАРНО-ПРОКАТНУ МАШИНУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВОЇ ШТАБИ

Об'єктивні умови які склалися нині в промисловості України, а саме скорочення кількості металургійних підприємств, зменшення обсягу виробництва металопродукції для народного господарства, брак коштів для капітального будівництва нових підприємств та впровадження новітніх технологій, що особливо важливо для майбутньої післявоєнної розбудови промисловості, вимагають нестандартних рішень. Одним із варіантів таких рішень є перебудова застарілого або непотрібного наявного технологічного парку обладнань для вирішення нагальних потреб ливарного виробництва. У статті на основі аналізу та проведених розрахунків розглянуто можливість застосування технологічних машин, які використовують валки як робочий інструмент, зокрема промислові каландри або вальцеві стани, для їх конверсії та перебудови в двовалкові ливарно-прокатні машини, що зможуть в подальшому бути застосовані в ливарному виробництві для одержання алюмінієвої штаби. Потреба в забезпеченні тонким алюмінієвим прокатом ринка металопродукції України, який використовується майже в усіх галузях промисловості, а саме машинобудівництві, ракетній та авіаційній техніці, харчовій промисловості, є сьогодні дуже гострою. Успішно вирішити це завдання можна, застосовуючи сучасну технологію двовалкового лиття-прокатки, яка забезпечує одержання тонкого листового прокату безпосередньо з розплаву. Технологічний процес двовалкової розливки-прокатки реалізує найбільш економічне виробництво металопродукату за витратам матеріалу, забезпечує значне зниження трудо- та енерговитрат. Враховуючи те, що капітальні витрати на запуск виробництва будуть обмежені коштами, потрібними на конверсію та перебудову наявного промислового обладнання, можна буде отримати максимальну економічну вигоду та економію часу на запуск виробництва. Поряд із цими перевагами двовалкова розливка-прокатка алюмінію забезпечить оптимальне співвідношення якості прокату та його собівартості.

Ключові слова: промисловий каландр, двовалкова розливка-прокатка, алюмінієвий прокат, швидкість лиття, охолодження валків-кристалізаторів.

Двовалкова розливка-прокатка є одним із найбільш перспективних та ефективних процесів виробництва тонкого металевого прокату. До переваг цієї технології можна віднести компактність промислової ливарної машини, а також економію до 80 % енергоресурсів за рахунок скорочення або взагалі усунення проміжних технологічних операцій [1]. Головна економічна перевага технології двовалкового лиття-прокатування полягає в збереженні конкурентної собівартості прокату при малих об'ємах виробництва, що при паралельному використанні з класичною слябовою технологією дає максимальну економічну ефективність підприємства.

В алюмінієвій промисловості технологія двовалкової розливки-прокатки була впроваджена у серійне виробництво металопродукції в 1950-х рр. [1]. Із того часу

ця технологія стала одним з основних методів виробництва тонкого алюмінієвого листа та фольги. Основним оброблювальним матеріалом двовалкової розливки-прокатки був технічно чистий алюміній, який використовується переважно для виробництва харчової фольги. З початку 1980-х рр. на двовалкових ливарних агрегатах почали успішно розливати термічно не зміцнювані сплави систем Al–Mn та Al–Mg [2]. До 1990-х рр. у світі в алюмінієвій промисловості працювало близько 170 ливарних машин із поєднанням лиття та прокатки. Зараз кількість цих машин перевищує 300 одиниць

Технологічна лінія двовалкового лиття-прокатки алюмінію (рис. 1) потужністю 100–150кВт для смуги завтовшки 5–10 мм (виробництва Китаю) на світовому ринку має досить велику вартість і коштує близько 10 млн грн.

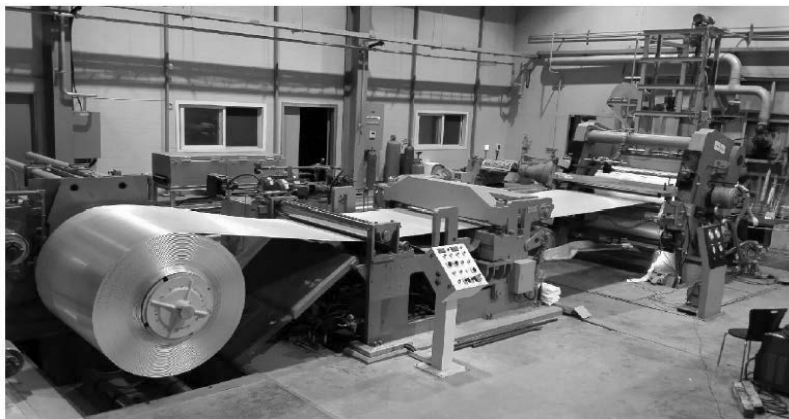


Рис.1. Технологічна лінія двовалкового лиття-прокатування алюмінієвої смуги

Двовалкові машини для лиття алюмінієвих смуг можуть відрізнятися за способом подачі рідкого металу у валки-кристалізатори (рис. 2). Виділяють три основні типи: горизонтальна подача розплаву (рис. 2,б), вертикальна подача зверху (рис. 2,а) та подача знизу (рис. 2,в).

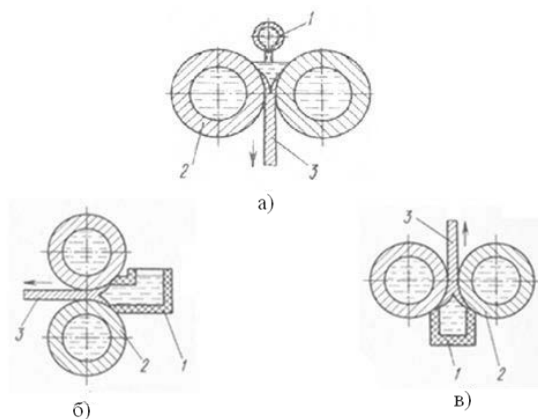


Рис. 2 Схеми лиття у валки-кристалізатори [3]
1 — розподілювач розплаву (живильник); 2 — валок-кристалізатор; 3 — смуга

У харчовій промисловості для переробки насіння використовують вальцеві стани, робочим інструментом яких є чавунні валки. Для виготовлення гум і пластмас у хімічному виробництві застосовують двовалкові промислові каландри (рис. 3). Наявність доволі великої кількості двовалкових машин різного призначення з близькими до потреб металургійного виробництва технічними характеристиками (матеріал валків, геометричні розміри, наявність системи охолодження)

Різні конструкції ливарних двовалкових машин передбачають розташування валків-кристалізаторів як на одній вісі, так і під кутом один до одного. В останньому випадку геометрія поперечного перетину робочої зони міжвалкового простору буде мати інший вигляд, ніж на рис. 1, що має значення для розрахунку основних параметрів технологічного процесу, таких як швидкість прокатування, об'єм рідкого металу, що подається до валків-кристалізаторів, ступінь деформації прокату тощо.

У технологічних лініях багатьох галузей промисловості використовують двовалкові машини різного призначення.

відкриває широкий потенціал для конверсії (перебудови) наявних валкових промислових машин у машини двовалкового лиття-прокатування для виробництва тонкого алюмінієвого прокату. У зв'язку з цим виникає потреба попередньої технологічної й технічної оцінки можливості цих машин лиття алюмінієвих штаб необхідних розмірів (товщини, ширини). Для оцінювання необхідно мати розрахунки максимальної швидкості обертання валків, при якій розплав металу твердне в штабу, кількості води потрібної для охолодження валків-кристалізаторів та необхідної потужності водяного насосу, навантаження на валки і лінію привода.



Рис. 3 Промисловий каландр

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України розроблено методику проведення розрахунків оптимальних параметрів двовалкового лиття — прокатування для бездефектного отримання листа, різної товщини та ширини, зі сплавів на основі заліза та алюмінію [4,5]. Особливість технологічного процесу двовалкової розливки-прокатування полягає в суміщенні процесу тверднення металу та його подальшої пластичної деформації в просторі між двома валками-кристалізаторами в одній технологічній операції. Схему поперечного перетину робочої зони двовалкової машини з основними технологічними параметрами валків-кристалізаторів показано на рис. 4.

Методика враховує технологічні параметри ливарної двовалкової машини, а саме радіус валків R , кут меніска рідкого металу α , необхідну товщину листа на виході з валків-кристалізаторів h_n , а також фізичні характеристики металу, що розливається, та дозволяє розрахувати найважливіший параметр технології двовалкової розливки, який визначає якість смуги та продуктивність промислової установки — швидкість обертання валків-кристалізаторів V_v . Зауважимо, що швидкість обертання валків-кристалізаторів визначає довжину зони деформації $\ell_{об}$ міжвалкового простору, яка, у свою чергу, забезпечує необхідний ступінь деформації алюмінієвого листа на виході з валків. Для забезпечення прокату необхідної якості, згідно з даними [1] для алюмінію та його сплавів, затверділу смугу необхідно обтиснути як мінімум на 20–30 %.

Розрахунок усіх вищенаведених параметрів у комплексі дозволить оцінити можливість використання двовалкової машини для отримання

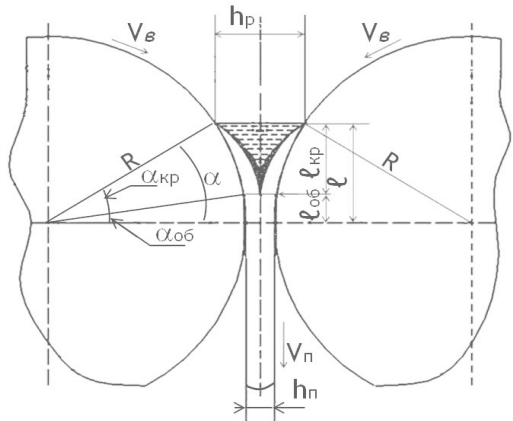


Рис. 4. Схема поперечного перетину двовалкової розливки-прокатки: R — зовнішній радіус валка; ℓ — загальна довжина зони кристалізації-деформації; α — кут контакту металу з валком; $\ell_{кр}$ — довжина зони кристалізації; $\alpha_{кр}$ — кут зони кристалізації; $\ell_{об}$ — довжина зони деформації; $\alpha_{об}$ — кут зони деформації (ділянка прокатки); h_p — поперековий розмір ванни рідкого металу; h_0 — товщина смуги на початку зони деформації; h_n — товщина листа на виході з валків; V_n — швидкість виходу листа з валків

Нові методи та прогресивні технології лиття

алюмінієвого прокату заданих розмірів та необхідної якості, а також визначити виробничу потужність ливарної машини.

На прикладі реального промислового каландра проведемо технічну й технологічну оцінку можливості його перебудови в двовалкову машину лиття-прокатування алюмінієвої штаби. У табл. 1 наведено його технічні й технологічні параметри. Як силову установку в каландрі використовується електродвигун АО102-6М потужністю 125 кВт та максимальною швидкістю 1000 об/хв.

Таблиця 1
Технічні параметри каландра

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Довжина бочки валків	мм	1500
Радіус валків	мм	330
Макс. сила на валках	кН	2250
Макс. сум. момент на валках	кН·м	60
Макс. потужність на валках	кВт	125
Макс. швидкість валків	об/хв	20

Технологічні параметри вихідної смуги наведено в табл. 2.

Валок каландра має порожнисту конструкцію, яка передбачає подачу води для охолодження. У нашому випадку при реконструкції агрегату також необхідним є охолодження валків, на яких буде подаватися розплав алюмінію температурою близько 700°C. Охолодження валків можна здійснювати як проточною водою, так і оборотною. У першому випадку вода подається у валки від постійно діючого насоса,

Таблиця 2
Параметри смуги

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Матеріал смуги	–	Al
Товщина смуги	мм	6-8
Ширина смуги	мм	1000-1500
Вихідна межа текучості	Н/мм ²	10
Коефіцієнт зміцнення при деформації	–	2
Коефіцієнт тертя між валком і смугою	–	0,5
Коефіцієнт напруж. стану при деформації	–	2.5

тиск води незмінний, а її температура, як правило, вища за проточну і впродовж року не змінюється. Підприємства витрачають різну кількість води для охолодження валків; наприклад, при використанні оборотної води витрати становлять близько 600 л/хв, а проточною 150–170 л/хв. Для розрахунку необхідного об'єму води для охолодження використаємо такі вихідні параметри:

Потужність машини Р, т/ч	1,2
Температура металу на виході з насадки t ₁ , °C	700
Температура плавлення алюмінію t ₂ , °C	658
Температура тверднення смуги t ₃ , °C	450
Теплоємність рідкого алюмінію q ₁ , кал/(г. град)	0,308
Теплоємність твердого алюмінію q ₂ , кал/(г. град)	0,214
Скрита теплота плавлення алюмінію q ₃ , кал/град	93
Температура охолоджувальної води t _в , °C	15
Температура води, що відводиться t _{в2} , °C	23

Використано припущення, що все тепло відводиться водою, а теплопровідність сталі дорівнює 50 ккал/(м. ч. град). Розрахунки показали, що витрати води становитимуть 5540 л / т прокату.

Значення технологічних параметрів валкового лиття, наведено в табл. 3.

Таблиця 3
Розрахункові параметри двовалкової машини

Товщ. смуги, мм	Висота насадки, мм	Довжина контакту металу з валком, мм	Швидкість лиття, мм/мин	Потужність валків, т/час	Кількість відвед. тепла, ккал/час	Оберти валка, об/хв	Оберти ел. двиг., об/хв	Потужність лиття- прокатки, кВт	Витрата води, л/хв
6	11	40	0,75	0,732	110122	0,36	18	21	183.5
			1,50	1,46	219642	0,72	36	35	366
			2,25	2,19	329463	1,08	54	42	549
7	12	40	0,75	0,85	128174	0,36	18	21	213.6
			1,50	1,7	255748	0,72	36	32	426
			2,25	2,55	383622	1,08	54	37	639
8	13	40	0,75	0,97	146227	0,36	18	20	243.7
			1,50	1,9	285836	0,72	36	28	476.4
			2,25	2,9	436276	1,08	54	26	727

Розрахунки показують, що необхідна величина обертів валків-кристалізаторів, яка дозволяє виробляти бездефектний алюмінієвий прокат заданих розмірів та з необхідною виробничою потужністю, є вищою за фактичне максимальне значення обертів валків каландра. Тому потрібна заміна встановленого на електродвигун редуктора для забезпечення обертів валків. Загалом отриманні значення свідчать

про можливість виробництва алюмінієвої штаби товщиною 6–8 мм на конверсійній двовалковій машині.

Висновки

Аналіз розрахункових значень технологічних параметрів двовалкової розливки-прокатки показав, що одержання алюмінієвої смуги товщиною 6–8 мм із застосуванням промислового каландра є цілком можливий, за умови незначної реконструкції машини. Загальні рекомендації з переобладнання машини та формування повноцінної технологічної лінії двовалкового лиття-прокатування виглядають так:

- встановлення пристрою подачі розплаву у валки-кристалізатори;
- заміна редуктора електродвигуна з меншим значенням передаточного числа;
- встановлення після валків-кристалізаторів гільйотини для обрізки нерівного або бракованого листа;
- встановлення пристрою для намотування алюмінієвого листа в рулон, який є розтискним валом від 350 до 500 мм з одного боку жорстко закріпленим з обертовим приводом, з іншого боку — відкидною опорою для зняття рулону.

Список літератури

- 1 Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, -006. 292p.. -ISBN 978-1-84569-049-6.
- 2 Гридин А.Ю., Шапер М., Данченко В.Н. Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой. *Обработка металлов давлением*. 2011. № 3 (28). С. 184–194. -ISSN 2076-2151.
- 3 Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н. и др. Специальные способы литья: Справочник. Москва: Машиностроение, 1991. 436 с.
- 4 Ноговицын А.В., Баранов И.Р. Скорость литья алюминиевых и стальных полос на двухвалковых машинах. *Процессы литья*. 2013. №2. С. 54–59.
- 5 Ноговицын А.В., Баранов И.Р. Физическое и математическое моделирование процессов тепломассопереноса затвердевания и деформации при валковой разливке-прокатке стальной полосы. Пластична деформація металів. Колективна монографія. ISBN978-966-291-124. 2017. С. 11–16.

Надійшла 23.04.2025

References

- 1 Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 2006. 292p. ISBN 978-1-84569-049-6 [in English].
- 2 Gridin A.Yu., Shaper M., Danchenko V.N. Production of strips from high-strength aluminum alloys by roller casting-rolling. *Metal processing under pressure*. 2011. No. 3 (28). P. 184–194. - ISSN 2076-2151 [in Russian].
- 3 Efimov V.A., Anisovich G.A., Babich V.N. et al. Pod. total ed. V.A. Efimova. Special casting methods: Handbook. Moskva: Mashinostroenie, 1991. 436 p. [in Russian]
- 4 Nogovitsyn A.V., Baranov I.R. Casting speed of aluminum and steel strips on two-roll machines. *Casting processes*. 2013. No. 2. P. 54–59 [in Russian].
- 5 Nogovitsyn A.V., Baranov I.R. Physical and mathematical modeling of heat and mass transfer processes, solidification and deformation during roll casting and rolling of steel strip. Plastic deformation of metals. Collective monograph. ISBN978-966-291-124. 2017. pp. 11–16 [in Russian].

Received 23.04.2025

A.V. Nogovitsyn, Doctor of Science (Engineering), Senior Research Scientist, Department Chair; e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com;_

<https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

I.R. Baranov, Candidate of Science (Engineering), Senior Research Scientist;

e-mail: ntc-technologies@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5692-5297>

Physico-technological institute of Metal and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF CONVERTING AN INDUSTRIAL CALENDAR INTO A TWIN-ROLL CASTING MACHINE FOR THE PRODUCTION OF ALUMINUM STRIP

Objective conditions that have developed at the present time in the industry of Ukraine, namely the reduction in the number of metallurgical enterprises, the reduction in the volume of production of metal products for the national economy, the lack of funds for the capital construction of new enterprises and the introduction of new technologies, which is especially important for the future post-war development of industry, require non-standard solutions. One of the options for such solutions is the reconstruction of the outdated or unnecessary existing technological park of equipment to meet the urgent needs of foundry production. In this article, based on the analysis and calculations, the possibility of using technological machines that use rolls as a working tool, in particular industrial calendars or rolling mills, for their conversion and reconstruction into two-roll casting and rolling machines that can subsequently be used in foundry production to obtain aluminum billets, is considered. The need for the Ukrainian metal products market to be supplied with thin aluminum rolled products, which is used in almost all industries, namely mechanical engineering, rocket and aviation technology, and the food industry, is currently very acute. This task can be successfully solved using modern twin-roll casting technology, which ensures the production of thin sheet metal directly from the melt. The technological process of twin-roll casting implements the most economical production of metal products in terms of material costs, provides a significant reduction in labor and energy costs. Along with the fact that capital costs for starting production will be limited by the funds required for the conversion and reconstruction of existing industrial equipment, it will be possible to obtain maximum economic benefits and save time for starting production. Along with these advantages, twin-roll casting of aluminum will provide an optimal ratio of rolled product quality and its cost.

Keywords: Industrial calendar, twin-roll casting, aluminum rolling, casting speed, cooling of crystallizer rolls.