

УДК 621.74.47

DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.1

О.О. Кравчук

аспірант Кафедри технології виробництва літальних апаратів (ТВЛА), ММІ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, griffi_one@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-7328-0846

РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ-ПРОКАТУ НАДТОНКОГО АЛЮМІНІЄВОГО ЛИСТА

У статті розкрито принципи реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа. Описано механізми реалізації технології безперервного лиття-прокату та обґрунтовано переваги такого процесу. Зазначається, що одним із перспективних варіантів створення поєднаних процесів безперервного лиття-прокату є застосування у складі ливарно-прокатного комплексу принципово нових машин безперервного лиття заготовок, що дозволяють отримати заготовки вироблені за допомогою безперервної технології, близькі по формі та розмірам до готового прокату. Описано головні складові технології безперервного лиття-прокату, це процеси затвердіння розливу та гаряча прокатка між валками при безперервному розливанні та прокатці. Візуально представлено схему головної лінії реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа та загальну схему реалізації технології безперервного лиття-прокату. Наголошено, що зміна параметрів процесу реалізації технології, таких як швидкість зачистки, температура заливки розплавленого алюмінію, довжина ливарно-прокатної зони і температура попереднього нагрівання безпосередньо впливає на розподіл трьох фаз в ливарно-прокатній зоні. Описано принципи реалізації теплообміну, який відбувається трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. У цьому дослідженні товщина алюмінієвого виходу становить 0,3 мм, а також швидкість заготівлі, температура лиття, довжина зони розливу та прокатки беруться як змінні для обґрунтування дієвості запропонованої технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа. Обґрунтовано технологію безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа та визначено, що для отримання надтонкого алюмінієвого листа відношення глибини рідинної порожнини до всього інтервалу розливу-прокатки становить менше ніж 50%, швидкість переміщення заготовки 0,4-0,6 м хв., довжина ливарно-прокатної зони 55-95 мм та температура заливки 933-993 К. З врахуванням того, що температура заливки мало впливає на затвердіння, а відповідний коефіцієнт глибини порожнини для рідини становить близько 50% вибір діапазону температур заливки може бути пом'якшений.

Ключові слова: лиття, прокат, алюміній, супертонкий лист, валок, металургія, технологія, безперервність.

О. Kravchuk

DEVELOPMENT AND JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY OF CONTINUOUS CASTING-ROLLING OVER A THIN ALUMINUM SHEET

The article discloses the principles of implementing the technology of continuous casting and rolling of ultra-thin aluminum sheet. The mechanisms of implementation of the technology of continuous casting and rolling are described and the advantages of such a process are substantiated. It is noted that one of the promising options for creating combined processes of continuous casting and rolling is the use of fundamentally new machines for continuous casting of blanks as part of the casting and rolling complex, which allow obtaining blanks produced using continuous technology, close in shape and size to finished rolled products. The main components of continuous casting-rolling technology are described, which are the processes of solidification of the melt and hot rolling between rolls during continuous casting and rolling. The scheme of the main line of implementation of the technology of continuous casting and rolling of ultra-thin aluminum sheet and the general scheme of the implementation of the technology of continuous casting and rolling are visually presented. It is emphasized that changing the parameters of the technology implementation process, such as the speed of stripping, the temperature of pouring molten aluminum, the length of the casting and rolling zone and the preheating temperature directly affects the distribution of the three phases in the casting and rolling zone. The principles of implementing heat exchange, which occurs in three ways: heat conduction, convection, and radiation, are described. In this study, the thickness of the aluminum output is 0.3 mm, and the blanking speed, casting temperature, pouring and rolling zone length are taken as variables to substantiate the effectiveness of the proposed technology of continuous casting and rolling of ultra-thin aluminum sheet. The technology of continuous casting-rolling of ultra-thin aluminum sheet is substantiated and it is determined that to obtain ultra-thin aluminum sheet, the ratio of the depth of the liquid cavity to the entire pouring-rolling interval is less than 50%, the speed of movement of the workpiece is 0.4-0.6 m min., the length of the foundry-rolled zone 55-95 mm and pouring temperature 933-993 K. Taking into account that the pouring temperature has little effect on solidification, and the corresponding cavity depth coefficient for the liquid is about 50%, the choice of the pouring temperature range can be softened.

Key words: casting, rolling, aluminum, ultra-thin sheet, coil, metallurgy, technology, continuity.

Вступ та постановка проблеми. В умовах сучасного розвитку металургійного виробництва все більшого поширення набувають процеси безперервного лиття-прокату, які дозволяють отримати як заготівлі за формою та розмірами близькими до готових виробів, так і готовий прокат, тим самим знижуючи енергоємність технологічних процесів, металоємність обладнання, капітальні та експлуатаційні витрати [1]. Однак сумісне використання процесів

безперервного лиття-прокату слід розглядати не тільки з точки зору узгодження продуктивності цих процесів, а що не менше важливо, також і з точки зору отримання якісного прокату, оскільки заготовки отримані за допомогою безперервної технології мають поверхневі та внутрішні дефекти. У зв'язку з цим, агрегати, що входять до складу ливарно-прокатних комплексів, повинні забезпечити отримання прокату високої якості та збільшення якісного виходу кінцевої продукції.

Одним із перспективних варіантів створення поєднаних процесів безперервного лиття-прокату є застосування у складі ливарно-прокатного комплексу принципово нових машин безперервного лиття заготовок, що дозволяють отримати заготовки отримані за допомогою безперервної технології, близькі по формі та розмірам до готового прокату [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки з'являється все більше робіт, в яких описуються механізми та принципи застосування технології безперервного лиття-прокату у металургійному виробництві.

У [1] наведено історичні дані та технологічні параметри одного з головних досягнень в галузі металургії в ХХ сторіччі – безперервного лиття. Наведено причини, які передують появі безперервного лиття. Одним з перших вчених, який запропонував принцип безперервного лиття, був Генрі Бесемер.

В. А. Чубенко та А. А. Хіноцька [2] запропонували механізм підвищення ефективності процесів суміщення литтяпрокатування за рахунок утворення суспензійної розливки сталі в машини безперервного лиття заготовок для збільшення виходу металу. М. Ю. Кузьменко [3] розкрив принципи автоматизації процесів узгодженого керування розкромом прокату на безперервних сортових прокатних станах. Автором проведено системний аналіз технологічної схеми виробництва заготовок і дрібносортового прокату. У дисертаційному дослідженні показано, що на заключному етапі прокатного виробництва, при виробництві товарної продукції на безперервних прокатних станах, виникають втрати металу за рахунок немірних залишків і наднормативної обрізі, яка виникає, з одного боку, внаслідок того, що довжина заготовки, яка подається на вхід прокатного стану не є раціональною для цього профілю, а з іншого – через особливості обладнання прокатних станів, що реалізують операції розкрому.

А. М. Верховлюк, Р. В. Петровський та І. Ф. Червоний [4] розглянули залучення вторинної сировини в металургійний цикл виробництва виробів з міді з метою економного використання природних ресурсів та зниженню техногенного навантаження на навколишнє середовище. Науковцями приділено увагу ливарним процесам без використання спеціальних форм, що дозволяє значно скоротити тривалість технологічного циклу, поліпшити умови праці та знизити вартість процесу.

У [5] розглянуто технологічні особливості переведення металургійних підприємств, орієнтованих на випуск дрібносортової і дротяної металопродукції, на безперервне розливання і ключові фактори, такі як переріз заготовки, вибір місця розташування машини безперервного лиття заготовок, схеми передачі безперервнолитих заготовок до дрібносортових і дровових станів.

Робота [6] спрямована на вирішення важливої науково-технічної та практичної проблеми розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що виробляється на товстолистових та широкоштабових станах на підставі розвитку наукових основ процесу термомеханічної прокатки і розробки методик вдосконалення технології з різним конструктивним та структурним складом основного прокатного устаткування.

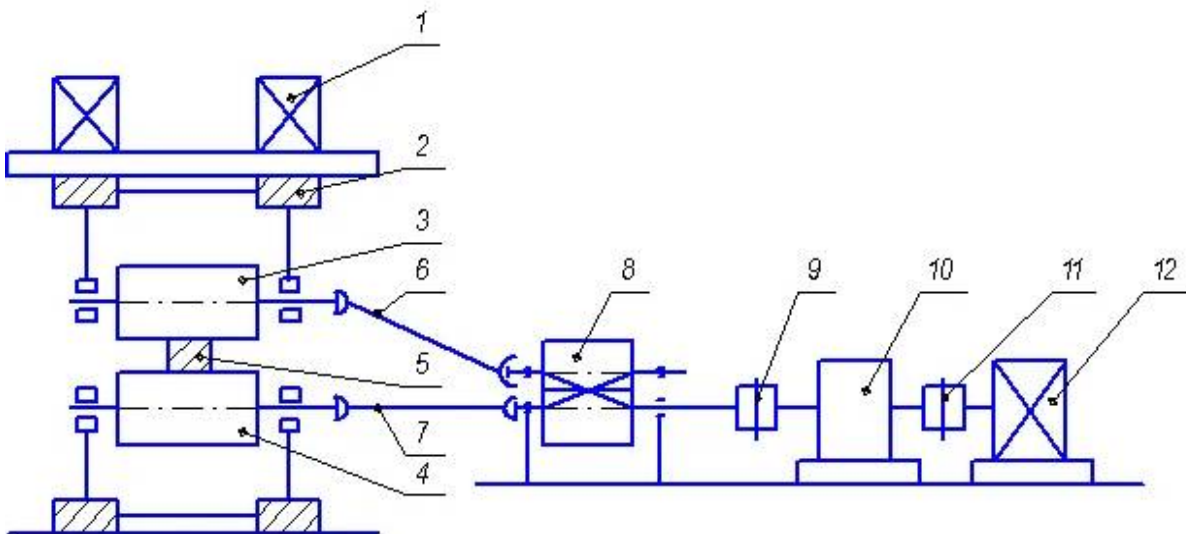
Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Bubonyi, Tamás & Zs, Bánóczy & Barkóczy, Péter & Buza, Gábor [7], Benferrah, M. & Montheillet, F. & Jonas, John [8], Shu, Da & Sun, Bao [9], Chen, Gang & You, Tao & Xu, Guangming [10], Gondo, Shiori & Arai, Hirohiko & Kajino, Satoshi & Nakano, Shizuka [11], Kholiavik, O.V. & Nogovitsyn, Alexey & Kravchuk, Alexey & Samoylenko, Alexey & Boris, Ruslan [12], El'darkhanov, A.S. & Nuradinov, A.S. & Kondrat'ev, Yu.I. & Nuradinov, I.A. [13], Zhang, D. & Chang, Q. & Pan, C. & Zhang, S. & Wu, Z. & He, Z [14], Chen, Yao & Wang, Ai Qin & Tian, Hanwei & Xie, Jingpei & Wang, Xiang [15], Berge, Franz & Ullmann, Madlen & Krbetschek, Christina & Kieslich, Martin & Kawalla, R. [16], Henseler, Thorsten & Ullmann, Madlen & Kawalla, R. & Berge, Franz [17], Stenqvist, Torkel & Hektor, Johan & Bylund, Sara & Moberg, Robert & Edwards, Mårten & Hall та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розкриття технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розробити та обґрунтувати технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа.

Викладення основного матеріалу дослідження. Технологія безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа ґрунтується на двох основних процесах: затвердіння розплаву та гаряча прокатка між валками при безперервному розливанні та прокатці. Це швидка та високоефективна технологія виготовлення надтонких алюмінієвих листів.

Схема головної лінії реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа наведена на рисунку 1. Загальна схема реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа наведена на рисунку 2.



1 – привод переміщення по вертикалі верхнього робочого валка, 2 – станина, 3 – верхній робочий валок, 4 – нижній робочий валок, 5 – алюмінієвий лист, 6 – верхній шпандель, 7 – нижній шпандель, 8 – синхронізатор обертання валків, 9 – муфта, 10 – кліть, 11 – моторна муфта, 12 – електродвигун

Рис. 1. Схема головної лінії реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа

Зону розливу прокатки можна розділити на три фази: зону рідкої фази, зону рідкої та твердої фаз і зону твердої фази [3]. Зміна параметрів процесу реалізації технології, таких як швидкість зачистки, температура заливки розплавленого алюмінію, довжина ливарно-прокатної зони і температура попереднього нагрівання безпосередньо впливає на розподіл трьох фаз в ливарно-прокатній зоні.

Ливарно-прокатний процес є нестационарним процесом тепломасоперенесення, і традиційний аналітичний метод рішення рівняння у приватних похідних не може задовольнити вимогам, що висуваються.

Теплообмін при реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа у ливарно-прокатному процесі відбувається трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням, а рівняння збереження енергії має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right] + S_h$$

де k_{eff} – ефективна теплопровідність; \vec{j}_j – дифузійний потік матеріалу; j – матеріал;

\vec{v} – швидкість; $\frac{\partial}{\partial t}$ – дифузія матеріалу; ρE – кондуктивна теплопередача; p – в'язка дисипація; S_h – джерело тепла.

У процесі реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа існує безліч факторів, що впливають на розподіл температури в зоні рідинно-алюмінієвого лиття-прокату та на розподіл рідкої, рідко-твердої та твердої фаз у внутрішній частині прокату

ливарно-прокатної ділянки. У цьому дослідженні товщина алюмінієвого виходу становить 0,3 мм, а також швидкість заготівлі (V), температура лиття (T_{Al}), довжина зони розливу та прокатки (L) беруться як змінні для обґрунтування дієвості запропонованої технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа. Між цими змінними існує взаємодія. Тому для дослідження було використано метод ортогонального аналізу, а також організовано багатофакторність. Для пошуку оптимального поєднання рівня та діапазону застосований метод елементного імітаційного аналізу. У таблиці 1 наведено рівні факторів для аналізу ортогонального моделювання.



Рис. 2. Загальна схема реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа

Табл. 1.

Параметри рівнів та факторів

№ рівня	Швидкість заготівлі, (м*хв ⁻¹)	Температура лиття, (К)	Довжина зони розливу та прокатки, (мм)
1	0,6	933	40
2	1	953	55
3	1,2	973	70
4	0,4	993	95

Головним фактором отримання якісного надтонкого алюмінієвого листа є суворе регулювання відношення глибини рідинної порожнини до довжини ливарно-прокатної зони у певному діапазоні та визначення відношення глибини рідинної порожнини як важливого показника. Математичного це:

$$\alpha = \frac{L_{\text{рід.пор.}}}{L}$$

де $L_{\text{рід.пор.}}$ – це відстань від входу в ливарно-прокатну зону до точки повного затвердіння;
 L – довжина ливарно-прокатної зони.

Аналіз ортогонального моделювання показаний у таблиці 2. Він показує, що чим більший діапазон даних R , отриманих з таблиці спостережень, тим більшим є вплив зміни параметра фактора на глибину рідинної порожнини. Навпаки, чим менше значення R , тим менше вплив зміни параметра фактора на глибину рідинної порожнини. Таким чином, порядок кожного важливого чинника впливу на процес реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа можна одержати так: швидкість заготівлі, довжина ливарно-прокатної ділянки, температура попереднього нагріву та температура розливання.

Табл. 2.

Аналіз ортогонального моделювання

	1	2	3
k_1	0,4358	0,4998	0,7756
k_2	0,681	0,5598	0,6821
k_3	0,719	0,5244	0,3324
k_4	0,2778	0,501	0,3012
R	0,446	0,0298	0,402

На рис. 3 представлена крива залежності між факторами та показниками. В основі аналізу лежать дані k_1, k_2, k_3, k_4 та співвідношення глибини рідини з таблиці 2.

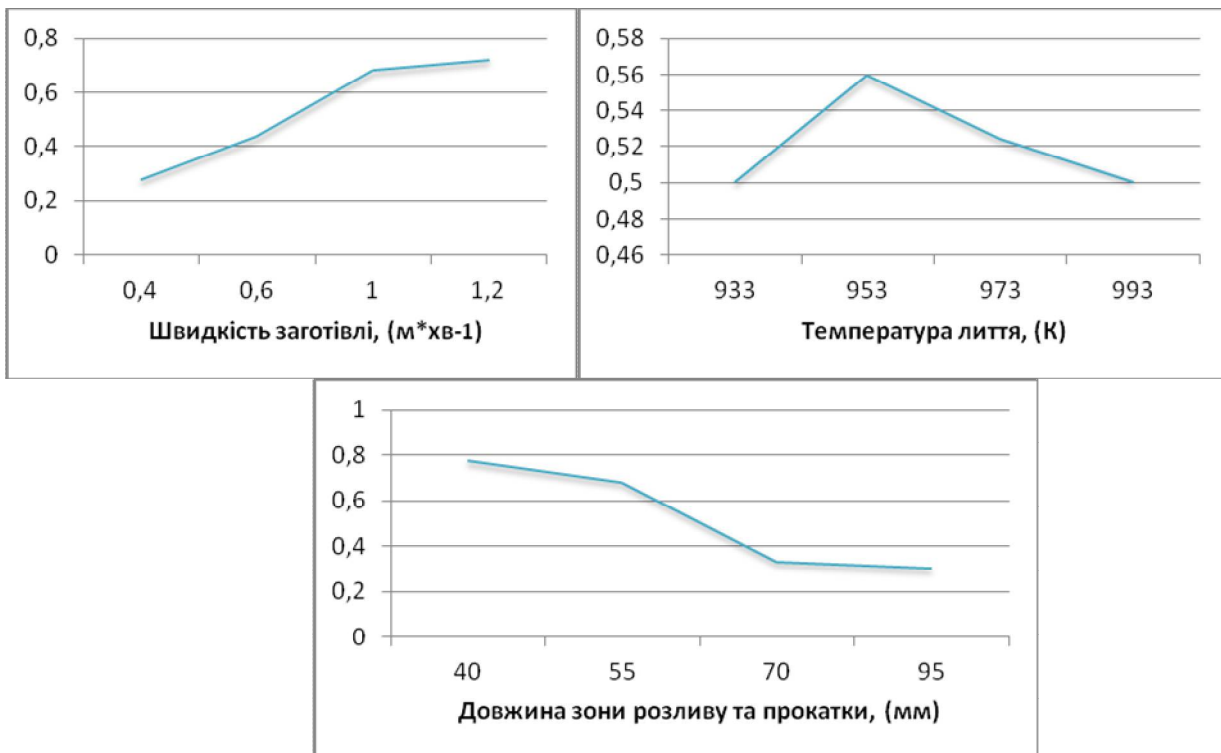


Рис. 3. Графіки залежності факторів та показників

Як показано на рис. 3, зі збільшенням швидкості заготівлі та температури попереднього нагріву відношення глибини рідинної порожнини збільшується поступово. Зі збільшенням довжини ливарно-прокатної зони коефіцієнт глибини рідинної порожнини поступово зменшується. Коли температура заливки та температура попереднього нагріву збільшуються до певного значення, коефіцієнт глибини рідинної порожнини збільшується повільно. Збільшення зони розливу-прокатки може зменшити коефіцієнт глибини отворів для рідини та збільшити коефіцієнт глибини.

Для отримання надтонкого алюмінієвого листа відношення глибини рідинної порожнини до всього інтервалу розливу-прокатки становить менше ніж 50%. Оскільки температура заливки мало впливає на затвердіння, а відповідний коефіцієнт глибини порожнини для рідини становить близько 50%, вибір діапазону заливки може бути пом'якшеним. По кривій на рис. 3 було визначено відповідний діапазон параметрів процесу: швидкість переміщення заготовки 0,4-0,6 м

хв. Оскільки температура заливки мало впливає на затвердіння, а відповідний коефіцієнт глибини порожнини для рідини становить близько 50% вибір діапазону температур заливки може бути пом'якшений.

По кривій на рис. 3 було визначено відповідний діапазон параметрів процесу: швидкість переміщення заготовки $0,4-0,6 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$, довжина ливарно-прокатної зони 55-95 мм та температура заливки 933-993 К.

Висновки. У роботі розкрито та обґрунтовано технологію безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа. Вивчено вплив температури розливання, довжини ливарно-прокатної зони, швидкості руху заготовки та температури попереднього нагріву на процес формування надтонкого алюмінієвого листа. Використовувався метод ортогонального аналізу. Визначено схему моделювання та відповідний діапазон параметрів процесу, який був обраний шляхом аналізу рідкофазного розподілу алюмінію, а результати моделювання були перевірені експериментально. Результати моделювання мають важливе орієнтовне значення для працівників промислового виробництва у сфері металургії.

Перспективами подальшого дослідження є цифрове моделювання процесу реалізації технології безперервного лиття-прокату надтонкого алюмінієвого листа з метою візуалізації останнього та підвищення якості кінцевого результату.

Література

1. Zhurilo D. Scientific and organizational activity of Ukrainian scientists in the field of continuous casting in the 70 years of the twentieth century. *History of Science and Biographical Studies*. 2020. No. 2. P. 92–114. URL: <https://doi.org/10.31073/istnauka202002-06> (date of access: 12.08.2022).
2. Chubenko V. A., Khinotska A. A. Efficiency improvement of casting-rolling process through increased metal crystallization rate in the continuous casting machine. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2018. No. 103. P. 22–27. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2018-1-103-22-27> (date of access: 12.08.2022).
3. Kuzmenko M., Rybalchenko M., Boyko O., Beshta D. Active control system of mill products take-up in output of roughing train in continuous light-section mill. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 5. S. 122-129
4. Chervonyi I. F., Petrovskij R. V., Verhovlyuk A. M. Получение непрерывно литых изделий из сплава на основе вторичной меди. *Научный взгляд в будущее*. 2017. № 13-01. С. 22–38. URL: <https://doi.org/10.30888/2415-7538.2019-13-01-009> (дата звернення: 12.08.2022).
5. Conceptual technological solutions for the production of small-section products from continuously cast billets / V. H. Herasymenko et al. *Metal and Casting of Ukraine*. 2021. Vol. 29, no. 2. P. 41–51. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.041> (date of access: 12.08.2022).
6. Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing According to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills “1700” / O. Kurpe et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2019. P. 418–429. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42 (date of access: 12.08.2022).
7. Local Annealing of Cold Rolled Aluminum Sheets by LASER Treatment / T. Bubonyi et al. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. 2019. Vol. 4, no. 1. P. 21–26. URL: <https://doi.org/10.21791/ijems.2019.1.3> (date of access: 12.08.2022).
8. Montheillet F., Jonas J. J., Benferrah M. Development of anisotropy during the cold rolling of aluminium sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1991. Vol. 33, no. 3. P. 197–209. URL: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(91\)90046-6](https://doi.org/10.1016/0020-7403(91)90046-6) (date of access: 12.08.2022).
9. Shu D., Wang J., Sun B. D. Performance of Electromagnetic Purification System in Continuous Twin Roll Casting of Aluminum Sheet. *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 546-549. P. 1043–1048. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.1043> (date of access: 12.08.2022).
10. Chen G., You T., Xu G. Abating recrystallization inhomogeneity in twin-roll cast 3003 aluminum sheet by electromagnetic fields. *Applied Physics A*. 2017. Vol. 124, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1449-5> (date of access: 12.08.2022).
11. Texture Evolution of a Rolled Aluminum Sheet in Multi-Pass Conventional Spinning / S. Gondo et al. *Metals*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 793. URL: <https://doi.org/10.3390/met10060793> (date of access: 12.08.2022).

12. Rheological characteristics of steel in continuous roll casting-rolling / O. V. Kholiavik et al. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. Vol. 5, no. 3. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250182> (date of access: 12.08.2022).

13. Formation of structure and properties of aluminum alloys during roll casting-rolling / A. S. El'darkhanov et al. *Metallurg*. 2022. No. 2. P. 26–32. URL: https://doi.org/10.52351/00260827_2022_02_26 (date of access: 12.08.2022).

14. Tamm E. R., Braunger B. M., Fuchshofer R. Intraocular Pressure and the Mechanisms Involved in Resistance of the Aqueous Humor Flow in the Trabecular Meshwork Outflow Pathways. *Progress in Molecular Biology and Translational Science*. 2015. P. 301–314. URL: <https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2015.06.007> (date of access: 12.08.2022).

15. Study on optimization of nozzle for copper-aluminium clad plate twin-roll cast-rolling / Y. Chen et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.088> (date of access: 12.08.2022).

16. Influence of Temperature, Strain Rate, and Sheet Thickness on the Deformation Behaviour of Twin-Roll Cast, Rolled and Heat-Treated AZ31 under Uniaxial Loading / F. Berge et al. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 684. P. 29–34. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.684.29> (date of access: 12.08.2022).

17. 3D X-Ray Diffraction Characterization of Grain Growth and Recrystallization in Rolled Braze Clad Aluminum Sheet / T. Stenqvist et al. *Advanced Engineering Materials*. 2021. P. 2100126. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.202100126> (date of access: 12.08.2022).