

<https://doi.org/10.15407/plit2026.01.037>

УДК 621.771.23.669.71

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

В.М. Баранова, канд. техн. наук, ст. наук. співр.;
e-mail: ntc-technologies@hotmail.com

І.Р. Баранов, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;
e-mail: ntc-technologies@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5692-297>

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

ТЕХНОЛОГІЧНА ПЛАСТИЧНІСТЬ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ В УМОВАХ ДВОВАЛКОВОГО ЛИТТЯ-ПРОКАТУВАННЯ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Відбудова та переозброєння народного господарства України гостро потребує забезпечення промисловості тонким листовим прокатом із чорних та кольорових металів, у тому числі зі спеціальних сталей і сплавів. Успішно виконати це завдання можна з використанням сучасної технології двовалкового лиття-прокатування, яка забезпечує одержання тонкого листового прокату безпосередньо з розплаву. Цей технологічний процес реалізує найбільш економічне виробництво металопрокату за витратами матеріалу, значне зниження трудота енерговитрат, що нині дуже актуально. Поряд із цими перевагами збільшується вихід придатної продукції, а завдяки одержанню дрібнозернистої структури та значному зменшенню ліквідації забезпечується новий, більш високий рівень якості металу, з'являється можливість виготовлення деформованої металопродукції зі сталей та спецсплавів, які важко чи навіть неможливо виготовити традиційними методами. Ресурсозберігаючий та екологічно чистий процес двовалкового лиття-прокатування давно запроваджується в багатьох країнах світу, що зумовлено його високими техніко-економічними перевагами, попитом і вимогами сучасного ринку металу та широким спектром його застосування в різних галузях промисловості. Важливо також, що двовалкового лиття-прокатування забезпечує оптимальне співвідношення якості і собівартості металопродукції, що визначає глобальну світову тенденцію розвитку технології. Дослідження, спрямовані на вдосконалення технології двовалкового лиття-прокатування і як результат отримання тонкого бездефектного прокату підвищеної якості, актуальні у світі та сприяють широкому впровадженню технології в промисловість.

Ключові слова: двовалкового лиття-прокатування, швидкість деформації, напружено-деформований стан, технологічна пластичність, тонкий листовий прокат, позапічна обробка.

Суттєвий внесок у розвиток теорії і технології валкової розливки-прокатки та її реалізації в промисловому виробництві зробили закордонні та вітчизняні вчені, дослідники й промисловці. Відомі компанії та науково-дослідні організації в цій галузі (США, Японія, Австралія, Німеччина, Китай та ін.) досягнули значних результатів у

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

розробці технологічних схем, конструкційному оснащенні машин валкової розливки-прокатки та їх впровадженні в промисловість. Українські дослідники також провели чимало теоретичних, експериментальних, промислових досліджень, а також ізико-математичне моделювання валкового лиття-прокатування чорних і кольорових металів. Запропоновано низку концепцій валкових ливарних машин, які дозволяють отримувати ливарну металопродукцію з розмірами, близькими до кінцевого виробу. Серед вітчизняних науково-дослідних установ, які зробили вагомий внесок у розвиток технології валкового лиття відзначимо Науково-дослідний інститут спеціального лиття (Одеса), Національну металургійну академію України (Дніпро), Донецький державний технічний університет України (Донецьк), Фізико-технологічний інститут металів та сплавів (Київ), Криворізький державний університет (Кривий Ріг).

Аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду роботи двовалкових установок в технології прямого одержання тонкого листа з розплаву показав, що вирішено цілу низку конструкторських і технологічних проблем валкової розливки, що на довгі роки затримували широке застосування цієї технології у світі. Нині і в подальшому в металургійній галузі світу, у тому числі і в Україні, найбільш економічна та екологічно чиста двовалкового лиття-прокатування активно розвивається, вдосконалюється та зазнає масштабного впровадження в промисловість. Зауважимо, що основні технологічні параметри й режими ведення процесу двовалкової розливки-прокатки, які суттєво впливають на формування якісного металопрокату і підлягають оперативному регулюванню та при яких можна отримувати металопродукцію заданих розмірів і заданої якості, успішно впроваджено в промислове виробництво. Однак, незважаючи на досягнуті успіхи з реалізації цієї технології, залишається вагома загальна проблема низької стабільності отримання якісного тонкого листа як зі сталі, так і з алюмінію. На сьогодні, за даними провідних компаній, які реалізують двовалкове лиття-прокатування в промисловості, виявлено основні дефекти тонкого листового прокату [1]. Наведено також причини й гіпотези, які пояснюють появи дефектів та пропонують шляхи їх запобігання [1, 2]. Однак окремі дефекти металопрокату та механізми їх утворення залишаються незрозумілими, що перешкоджає досягненню стабільної якості продукції і потребує подальшого дослідження їх формування в екстремальних умовах зони пластичної деформації (прокатки) з урахуванням фізико-технологічних параметрів розплаву металів та сплавів, які прокатуються методом двовалкового лиття-прокатування.

Проблема формування якісного тонкого листа з розплаву — це комплекс складних теоретичних і технологічних задач і конструкторських розробок. Особливість процесу формування листа в умовах високих градієнтів температур та швидкостей двовалкового лиття-прокатування вимагають глибокого вивчення кожного етапу технологічного ланцюга. Велика кількість взаємозалежних технологічних параметрів, які впливають на якість металопрокату, отриманого в умовах двовалкової розливки, та найменше їх розходження призводить до негативного впливу на якість поверхні і однорідність структури прокату. Тому для реалізації в масштабному промисловому виробництві двовалкового лиття-прокатування та отримання стійкої якості тонкого металопрокату необхідна інформація про перебіг процесів кристалізації та подальшої пластичної формозміни. Однак труднощі дослідження експериментальним шляхом зони «кристалізації-деформації», у якій протікають головні процеси двовалкового лиття-прокатування, пов'язані з його надзвичайно високою динамікою та неможливістю прямого спостереження у зв'язку з її закритістю. Створені нині методи фізичного та математичного моделювання, їх успішний розвиток, удосконалення та використання комплексних програмних пакетів дозволило вирішити багато задач теплової та гідродинамічної течії металу між валками-кристалізаторами, отримати поля температур, швидкостей у зоні «кристалізації-деформації» [3]. Важливо, що з'явилася можливість при розв'язанні гідродинамічної і теплової задач враховувати метал як рідину з динамічною в'язкістю, установити залежності довжини зони

деформації від температурно-швидкісних параметрів процесу двовалкового лиття-прокатування, визначити один із головних факторів, рівень деформації, який отримує метал у цьому процесі та значно впливає на мікроструктуру, механічні властивості і якість металопродукції [4]. Зауважимо, що сумісні рішення систем двовалкового прокатування фізико-математичними методами моделювання дозволило врахувати велику кількість технологічних і конструктивних параметрів, які підлягають оперативному регулюванню та враховуються при проектуванні ливарних агрегатів.

Однак аналіз і узагальнення відомих вітчизняних та зарубіжних теоретичних, експериментальних та промислових результатів реалізації технології вовалкового лиття-прокатування вказують на те, що один із головних показників деформування металів і сплавів, а саме їх технологічна пластичність у цих умовах та її вплив на формування тонколистового прокату, досліджено недостатньо.

Пластичність належить до числа характерних властивостей металевих матеріалів, що вирізняють їх серед інших, зокрема неметалевих. Одне з визначень пластичності формулюється як властивість матеріалу зазнавати необоротних деформацій за певних значень термомеханічних параметрів без втрати цілісності у вигляді макроскопічних дефектів; кількісною мірою пластичності вважають ступень деформації, накопиченої матеріалом до моменту його руйнування [5]. Із фізичної точки зору пластичність — це здатність кристалів та їх конгломерату забезпечувати значні відносні переміщення елементів кристалічної ґратки без її руйнування за допомогою того чи іншого механізмів [6]. Існують різні погляди на характеристику пластичності. У деяких роботах пластичність розглядають як властивість матеріалу [7], що залежить від таких фізико-хімічних факторів матеріалу: тип кристалічної структури ($\Phi_{кр}$), характер міжатомного зв'язку ($\Phi_{а.з.}$), хімічний склад ($\Phi_{х}$), структурний стан ($\Phi_{с.с.}$), чистота межі зерен ($\Phi_{ч.м.}$), високий гідростатичний тиск ($\Phi_{г.т.}$), температурний фактор ($\Phi_{т}$), швидкість випробовування ($\Phi_{ш.в.}$), тобто

$$\Pi = \Phi_{кр} + \Phi_{а.з.} + \Phi_{х} + \Phi_{с.с.} + \Phi_{ч.м.} + \Phi_{г.т.} + \Phi_{т} + \Phi_{ш.в.}, \quad (1)$$

де Π — пластичність.

В інших роботах пластичність розглядають як стан матеріалу, який залежить від способу та умов деформації [8]:

$$\Pi = f(x, c, T, \epsilon, \eta), \quad (2)$$

де Π — пластичність; x — вплив хімічного складу; c — вплив структури; T — вплив температури та швидкості деформації; η — вплив напруженого стану.

Головний висновок, як можна побачити, незважаючи на різні підходи до такої властивості, як пластичність, полягає в її прямій залежності від хімічного складу та характеристик мікроструктури металів і сплавів.

Відомо, що пластичність та опір деформації визначають здатність металів і сплавів до пластичної деформації, а їх властивість в умовах високих температур, швидкостей, дії різного виду силових напруг зберігати залишкову деформацію без руйнування має велике практичне значення в технологічних процесах металургійного та ливарного виробництва металопродукції і особливо при застосуванні технології двовалкового лиття-прокатування. У цьому технологічному процесі в зоні деформації виникають складні просторові розподілення напруг, які включають в себе осьові, радіальні й дотичні компоненти, а також деформацію розтягнення та стискання, що утворює комплексну картину напруженодеформованого стану зливка (рис. 1).

Важливо, що ефект отримання металопрокату стійкої якості супроводжується особливою зміною мікроструктури металів та сплавів і проявляє себе тільки при дотриманні відповідних умов. Головна з них: метал і сплави, що прокатуються, мають бути «чистими» (за хімічним складом, неметалевим включенням та їх розподілом в об'ємі розплаву та шкідливими домішками). Без цього, за законом прокатування, неможливо отримати бездефектну металопродукцію стійкої якості.



Рис. 1. Розподіл напружень у зазорі між валками (зона деформації)
 σ_x — напруження у напрямку прокати; σ_y — поперечне напруження; σ_z — напруження за товщиною; σ_1 — напруження на вході в зону деформації; σ_2 — напруження на виході із зони деформації

Досвід нашої та зарубіжної промисловості однозначно свідчить про те, що якість металопродукції при всіх інших рівних умовах перебуває в прямій залежності від якості початкового металу. Існує генетичний зв'язок між структурою і властивостями рідкого й твердого металів [9]. Фізична та хімічна неоднорідність металів і сплавів передається наслідковим зв'язком відповідній металопродукції: труби, прокат тощо. Чим вища однорідність металу, тим вища однорідність металопродукції. Тому ефект отримання стійкої якості бездефектного тонколистового прокату методом двовалкового лиття-прокатування може бути досягнутий використанням металів і сплавів, розплави яких пройшли комплексну позапічну обробку, що зумовлює їх фізичну та хімічну однорідність і визначає рівень механічних властивостей металопродукції. Комплексна позапічна обробка розплаву металів і сплавів до заливки його у валки-кристалізатори забезпечує показники їх технологічної пластичності, яка є одним із найважливіших факторів впливу на формування тонколистового прокату в умовах високої температури, швидкості, дії напруг сил видовження та обтискання в зоні пластичної деформації технологічного процесу двовалкового лиття-прокатування. У цих умовах при деформації напруження в металі зростає настільки швидко, що навіть верхньої межі міцності металу недостатньо для запобігання дефектів. При достатній пластичності напруження, що виникають в металі, будуть стискатися завдяки пластичному розширенню, що забезпечує отримання бездефектної металопродукції стабільної якості. Цей прогнозувальний фактор отримання бездефектної металопродукції та дії сил опору металу в зоні пластичної деформації зобов'язані своїм існуванням пластичній деформації, точніше, тим змінам, що їх пластичність вносить в структуру металів і сплавів.

Важливо, що рівень технологічної пластичності металів і сплавів, які прокатуються методом двовалкового лиття-прокатування, впливає і на можливість протікання дифузійної рекристалізації, яка залежить не тільки від температури, швидкості, рівня деформації, але, головнo, від рівня чистоти металів та сплавів, що визначає їх пластичність [10].

Привертає увагу той факт, що відомі в літературі результати показників механічних властивостей металопродукції, отриманої методом двовалкового лиття-прокатування міцності і твердості, перебувають на значно високому рівні, тоді як відносне видовження, показник пластичності перебувають на низькому рівні традиційного методу виробництва металопродукату [11].

На жаль, на сьогодні питання співвідношення між рівнем міцності та пластичності для процесу двовалкового лиття не вирішене і потребує подальших промислових і лабораторних досліджень.

Висновки

1. Визначено, що значну роль у формуванні бездефектного металевого листа стійкої якості в умовах двовалкового лиття відіграють пластичні властивості металів та сплавів, що розливаються.
2. Оптимальний рівень пластичності металів і сплавів значною мірою гарантує отримання методом двовалкового лиття, металопрокату стійкої якості за умов, що метал пройшов якісну обробку до розливання розливки у валки-кристалізатори.
3. Пластичні властивості металу, що розливається, визначаються його мікроструктурними характеристиками та хімічним складом, тому обробка розплаву перед розливкою в кристалізатор має вирішальне значення для отримання металопродукції прогнозованої якості.
4. Установлено, що головною проблемою в отриманні металопродукції стійкої якості методом двовалкового лиття є недостатньо визначенні оптимальні значення технологічних параметрів ливарних властивостей розплаву і металевого листа, що прокатується, які потребують чіткого контролю в технологічному процесі.

Список літератури

- 1 Kumar S., Singh R. Defects in rolled sheets: A review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 8, № 6. P. 2456–2462.
- 2 Li Q., Wang Z., Zhao J. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 12. Article 5451. – <https://doi.org/10.3390/app11125451>.
- 3 Guthrie R. I. L., Tavares R. P. Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin-roll/horizontal belt thin strip casting machines. *Proceedings of the International Conference on CFD in Minerals & Metals Processing and Power Generation*. CSIRO, 1997. P. 41–54.
- 4 Nogovitsyn A. V., Podoltsev A. D., Kucheriavaia I. N., Baranov I. R. Mathematical and physical simulation of the melt flow at roll casting of steel bars. *Metallurgical and Mining Industry*. 2018. №1. P. 41–44.
- 5 Колмогоров В. А., Богатов А. А., Мигачев Б. А. та ін. Пластичність і руйнування. Москва: Металургія, 1977. 336 с.
- 6 Дзугутов М. Я. Пластична деформація високолегованих сталей і сплавів. Москва: Металургія, 1977. 480 с.
- 7 Courtney T. H. *Mechanical Behavior of Materials*. Long Grove : Waveland Press, 2005. 733 p.
- 8 Hosford W. F., Caddell R. M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 356 p.
- 9 Кондратюк С. Є. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі: наукове видання. Київ: Наук. думка, 2010. 177 с.
- 10 Alaneme K. K., Okotete E. A. Recrystallization mechanisms and microstructure development in emerging metallic materials: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, № 3. P. 3307–3320.
- 11 Campbell J. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 329 p.

References

- 1 Kumar S., Singh R. Defects in rolled sheets: A review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 8, No. 6. P. 2456–2462 [in English].
- 2 Li Q., Wang Z., Zhao J. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 12. Article 5451. <https://doi.org/10.3390/app11125451> [in English].
- 3 Guthrie R. I. L., Tavares R. P. Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin-roll/horizontal belt thin strip casting machines. *Proceedings of the International Conference on CFD in Minerals & Metals Processing and Power Generation*. SIRO, 1997. P. 41–54 [in English].

- 5 Kolmogorov V.A., Bogatov A.A., Migachev B.A., et al. Plasticity and destruction. Moscow: Metallurgy, 1977. 336 p. [in Russian].
- 6 Dzugutov M.Ya. Plastic deformation of high-alloy steels and alloys. Moscow: Metallurgy, 1977. 480 p. [in Russian].
- 7 Courtney T. H. Mechanical Behavior of Materials. Long Grove: Waveland Press, 2005. 733 p. [in English].
- 8 Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 356 p. [in English].
- 9 Kondratyuk S.Ye. Structure formation, heredity, and properties of cast steel : scientific edition. Kyiv: Nauk. dumka, 2010. 177 p. [in Ukrainian].
- 10 Alaneme K. K., Okotete E. A. Recrystallization mechanisms and microstructure development in emerging metallic materials: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, № 3. P. 3307–3320.
- 11 Campbell J. Castings. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 329 p. [in English].

Одержано / Received 09.02.2026

Прийнято / Accepted 17.02.2026

Опубліковано / Published 17.03.2026

A.V. Nogovitsyn, *Dr. Sci. (Engin), Senior Research Scientist, Department Chair;*
e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

V.M. Baranova, *Candidate of Science (Engineering), Senior Research Scientist;*
e-mail: ntc-technologies@hotmail.com

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)

TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF METALS AND ALLOYS UNDER TWIN-ROLL CASTING CONDITIONS AND ITS EFFECT ON THE QUALITY OF METAL PRODUCTS

The reconstruction and modernisation of Ukraine's national economy urgently require the supply of industry with thin sheet products made from ferrous and non-ferrous metals, including special steels and alloys. This task can be successfully addressed through the application of advanced twin-roll casting technology, which enables the production of thin sheet products directly from the melt. The technological process of twin-roll casting provides the most economical production of rolled metal in terms of material consumption, while significantly reducing labour and energy costs, which is particularly important under current conditions. In addition to these advantages, the yield of acceptable products is increased, and owing to the formation of a fine-grained structure and a substantial reduction in segregation, a new and higher level of metal quality is achieved. This creates opportunities for manufacturing wrought metal products from steels and special alloys that are difficult or even impossible to produce using conventional methods. The resource-efficient and environmentally friendly twin-roll casting–rolling process has been implemented for a long time in many countries worldwide, due to its high technical and economic advantages, strong market demand, compliance with modern metal market requirements, and its wide range of applications across various industrial sectors. It is also important that twin-roll casting–rolling technology ensures an optimal balance between product quality and production cost, which determines the global trend in the development of this technology. Research aimed at improving twin-roll casting–rolling technology and, consequently, at producing thin, defect-free rolled products of enhanced quality is of high relevance worldwide and contributes to the widespread industrial adoption of this technology.

Keywords: twin-roll casting, deformation rate, stress–strain state, technological plasticity, thin sheet rolling, secondary (off-furnace) treatment.