

УДК 621.771.8:669.018.9

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-8>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛІЧНИХ ЛИСТІВ З МЕХАНІЧНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Міхєєнко Денис Юрійович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1966-0618

У роботі представлено результати експериментально-теоретичного дослідження процесу формування механічного з'єднання при виготовленні двошарових біметалічних листів методом прокатки. Актуальність дослідження обумовлена зростаючою потребою у сучасних конструкційних матеріалах із заданим комплексом експлуатаційних і технологічних властивостей, що досягається шляхом створення шаруватих композитів. Запропоновано технологічну схему отримання біметалів на основі спільного обтиснення заготовок із попереднім формуванням поздовжніх пазів на більш міцній підкладці, що забезпечує надійний механічний зв'язок за рахунок затікання більш пластичного металу без застосування високотемпературних процесів.

Експериментальні дослідження виконано з використанням промислово-лабораторного прокатного стану та комплексу вимірювального обладнання, що дозволило варіювати основні технологічні параметри процесу, зокрема ступінь обтиснення, геометрію пазів, умови контактної тертя та фізико-механічні властивості матеріалів. Дослідження проводилися у двох напрямках: фізичне моделювання процесу пластичного течіння металу в пази та моделювання реального формування біметалічного з'єднання типу «сталь – м'який метал». Отримано експериментальні залежності енергосилових параметрів прокатки та глибини заповнення пазів від технологічних факторів.

Встановлено, що максимальна ефективність формування механічного зв'язку досягається при куті нахилу стінок пазів близько 30° , що забезпечує оптимальний розподіл напружень у зоні контакту. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів підтвердило адекватність розробленої математичної моделі та високу прогностичну здатність чисельних методів. Показано доцільність використання інтегрованих CAD/CAE-систем і паралельних обчислень (на базі багатоядерних CPU та GPU) для прискорення розрахунків методом скінченних елементів і проведення багатofакторної оптимізації. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні ефективних технологій виробництва біметалічних матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: біметалічні листи, прокатка, механічне з'єднання, затікання металу, поздовжні пази, ступінь обтиснення, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, CAD/CAE-системи, паралельні обчислення, оптимізація технологічних параметрів.

Mikhieienko Denys. Experimental study of the process of obtaining two-layer bimetallic sheets with a mechanical bond

The paper presents the results of an experimental and theoretical study of the formation of mechanical bonding in the production of two-layer bimetallic sheets by rolling. The relevance of the research is обусловлена the growing demand for modern structural materials with a specified set of operational and technological properties, which can be achieved through the development of layered composites. A technological scheme for producing bimetallics based on the joint reduction of workpieces with the preliminary formation of longitudinal grooves on a stronger substrate is proposed, ensuring reliable mechanical bonding due to the flow of a more ductile metal into the grooves without the use of high-temperature processes.

Experimental studies were carried out using an industrial laboratory rolling mill and a set of measuring equipment, which made it possible to vary the main technological parameters of the process, including the reduction ratio, groove geometry, contact friction conditions, and physical and mechanical properties of the materials. The research was conducted in two directions: physical modeling of metal plastic flow into grooves and simulation of the actual formation of a bimetallic joint of the "steel – soft metal" type. Experimental dependencies of rolling force parameters and groove filling depth on technological factors were obtained.

It was established that the maximum efficiency of mechanical bonding is achieved at a groove wall inclination angle of about 30° , which ensures an optimal stress distribution in the contact zone. A comparison of experimental and theoretical results confirmed the adequacy of the developed mathematical model and the high predictive capability of numerical methods. The feasibility of using integrated CAD/CAE systems and parallel computing (based on multi-core CPUs and GPUs) to accelerate finite element analysis and perform multi-parameter optimization is demonstrated. The obtained results can be used in the design of efficient technologies for the production of bimetallic materials with enhanced performance characteristics.

Key words: bimetallic sheets, rolling, mechanical bonding, metal flow, longitudinal grooves, reduction ratio, stress-strain state, finite element method, numerical modeling, CAD/CAE systems, parallel computing, process parameter optimization.

Постійна зростаюча потреба в нових конструкційних матеріалах, які поєднують складний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей, зумовлює необхідність системного підходу до проектування шаруватих композитів і розроблення ефективних технологічних схем їх виробництва.

Одним із перспективних механічних способів з'єднання металів є прокатка. Цим методом можна отримувати двошарові біметалічні листи. Типовим прикладом є спільне обтиснення двох листів, коли на міцнішій підкладці попередньо нарізають поздовжні пази. При цьому м'якіший метал під дією тиску затікає в щілинні порожнини, забезпечуючи надійний механічний зв'язок між шарами без застосування високих температур чи хімічної активації поверхні [1].

Експериментальні дослідження проводилися з метою уточнення вихідних передумов теоретичної моделі, а також всебічної оцінки ступеня достовірності та адекватності отриманих теоретичних рішень.

Для досягнення поставленої мети застосовувався комплекс різних методик, сучасних експериментальних установок і високоточного обладнання. Це дозволило максимально повно охопити весь діапазон можливих умов реалізації розглянутих технологічних процесів – від мінімальних до максимальних значень ступеня обтиснення, коефіцієнтів тертя, геометричних параметрів пазів та фізико-механічних характеристик матеріалів.

Такий системний підхід [2] забезпечив не лише якісну перевірку теоретичних припущень, побудованих на основі чисельних методів [3; 4]: чисельного рекурентного розв'язання конечно-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму, методу полів ліній ковзання, методу кінцевих елементів та варіаційних методів, але й кількісне визначення меж їхньої застосовності, виявлення можливих відхилень у реальних умовах деформування та встановлення оптимальних технологічних режимів отримання двошарових біметалічних листів з надійним механічним зв'язком.

Результати експериментів слугували основою для корекції математичної моделі, підвищення її прогностичної точності та розроблення практичних рекомендацій щодо промислового впровадження запропонованої технології.

Аналіз сучасних літературних джерел, присвячених експериментальним дослідженням процесів прокатного з'єднання та формування багатошарових металевих композитів, показує, що ключові закономірності формування зчеплення встановлені на основі комплексних

експериментів із використанням мікроструктурного аналізу, механічних випробувань та чисельного моделювання: доведено, що утворення міцного інтерфейсу відбувається внаслідок інтенсивної пластичної деформації, руйнування оксидних плівок і контакту «чистих» металевих поверхонь з подальшою дифузійною взаємодією на атомному рівні [5]; експериментальні роботи підтверджують, що ступінь деформації, температура, швидкість прокатування та стан поверхні є визначальними факторами міцності з'єднання, а результати добре узгоджуються з чисельними моделями процесу [6]; при цьому дослідження методів accumulative roll bonding і багатошарового прокатування демонструють суттєве подібнення зерен, формування ультрадрібної та наноструктури і відповідне підвищення міцності матеріалів, що пояснюється поєднанням механічного та металургійного механізмів зчеплення [7]; додатково експериментально встановлено, що оптимізація технологічних параметрів (ступеня обтиснення, температури, кількості циклів) і підготовки поверхні дозволяє значно покращити якість інтерфейсу, тоді як їх невідповідність призводить до дефектів, розшарування та зниження міцності, що підтверджує необхідність комплексного підходу до керування процесом формування багатошарових композитів.

Експериментальні дослідження процесу затікання металу в щілинну порожнину проводилися у двох основних напрямках. Перший напрямок полягав у фізичному моделюванні на свинцевих зразках шляхом прокатки між гладким валком і каліброваним валком з нанесеними на його поверхні поздовжніми пазами. Другий напрямок передбачав пряме моделювання біметалічного з'єднання – спільну холодну прокатку свинцевих зразків зі сталеву плиту, на якій були попередньо фрезеровані поздовжні пази. Таке поєднання методик дозволило окремо вивчити закономірності пластичного течіння металу в пази та оцінити особливості формування механічного зв'язку в реальній біметалічній системі «сталь – м'який метал».

В якості основного обладнання при проведенні досліджень застосовувався промислово-лабораторний стан Донбаської державної машинобудівної академії з типорозміром валкового вузла 260x200, призначений для листової прокатки відносно товстих заготовок. Нижній валок стану був виконаний конструкція представлений на рисунку 1. Також вхід досліджень використовувалася сталева плита, в якій, з метою дослідження впливу поздовжніх пазів з кутами нахилу в діапазоні від 0 до 45° і кроком 5° (рис. 2).

Таблиця 1

Вихідні дані та результати прокатки свинцевих зразків між гладким та каліброваним робочими валками

№	h_0 , мм	l_0 , мм	h_{12} , мм	l_1 , мм	h_{11} , мм	P , кН	M , кН*м
1	10,45	50	10,11	51,75	9,91	2,76	65,3
2	10,35	50	9,96	54,5	9,36	6,57	134
3	10,44	50	9,74	56	8,74	8,64	191
4	10,21	50	9,41	58	8,11	11,76	326
5	10,27	50	9,25	61	7,55	14,52	435
6	10,37	50	9,1	64	7,1	18,33	549
7	10,46	50	8,91	65	6,61	24,21	745
8	10,41	50	8,77	67	6,17	25,59	767
9	10,17	50	8,64	69	5,74	28,36	850
10	10,15	50	8,47	71	5,37	40,12	1396
11	9,94	50	8,05	77	4,75	41,85	1411
12	9,94	50	8,37	72	5,17	41,16	1429
13	10,2	50	8,48	71	5,38	41,16	1438

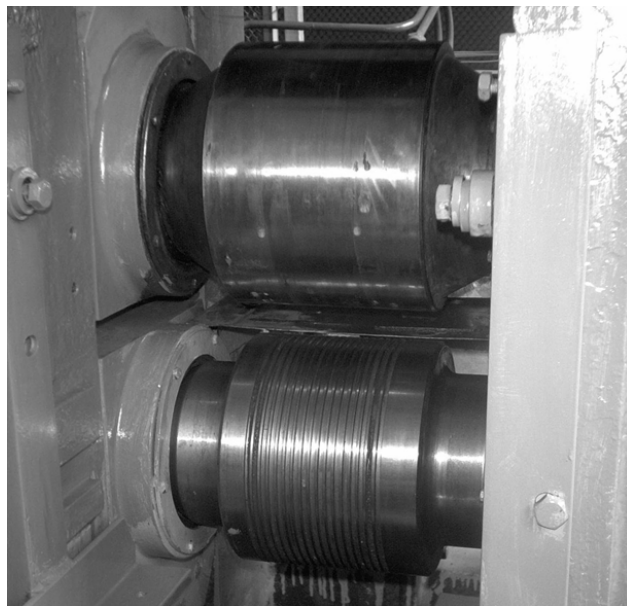


Рис. 1. Загальний вигляд робочої кліті реверсивного прокатного стану 200 ДДМА з новим нижнім каліброваним робочим валком

Енергосилові параметри представлені у вигляді емпіричних та розрахункових розподілів залежностей сили та моменту прокатки від відносного обтиснення, представлені на рисунках 3, а і 3, б відповідно.

Спільна холодна прокатка свинцевих модельних зразків зі сталеву плитою, що мала попередньо фрезеровані поздовжні пази, проводилася з метою експериментального визначення оптимального кута нахилу стінок пазів,

при якому досягається максимальна глибина затікання м'якого металу.

Отримані експериментальні залежності глибини заповнення пазів (h_p) від ступеня обтиснення для різних кутів нахилу стінок пазів (30° , 45° , 60° та 75°) наведено на рисунку 4.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей свідчить, що найбільша глибина затікання м'якого металу в паз спостерігається при куті нахилу його стінки до вертикалі $\alpha = 30^\circ$. При цьому значенні кута паз заповнюється найбільш ефективно в усьому дослідженому діапазоні ступенів обтиснення. Збільшення або зменшення кута α відносно оптимального призводить до зниження глибини затікання.

Висновки:

– порівняльний аналіз картин механіки затікання металу в нахилений паз, одержаних експериментально та розрахунковим шляхом, демонструє достатньо високу ступінь достовірності розробленої математичної моделі. Крім того, результати експериментальних досліджень інтегральних енергосилових характеристик і витяжки при прокатці між гладким і профільованим робочими валками, виконані на

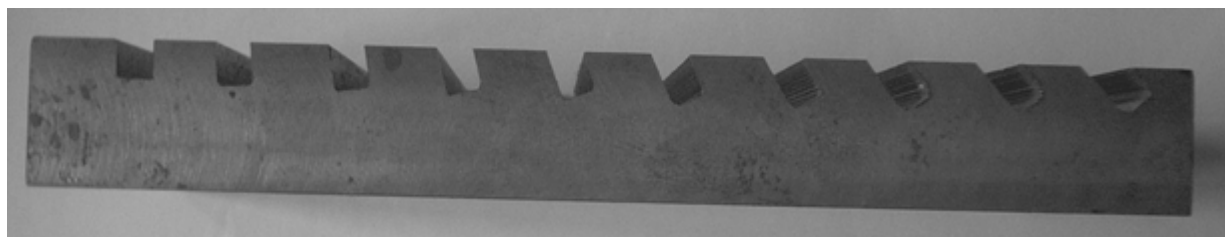


Рис. 2. Загальний вид плити з поздовжніми похилими пазами

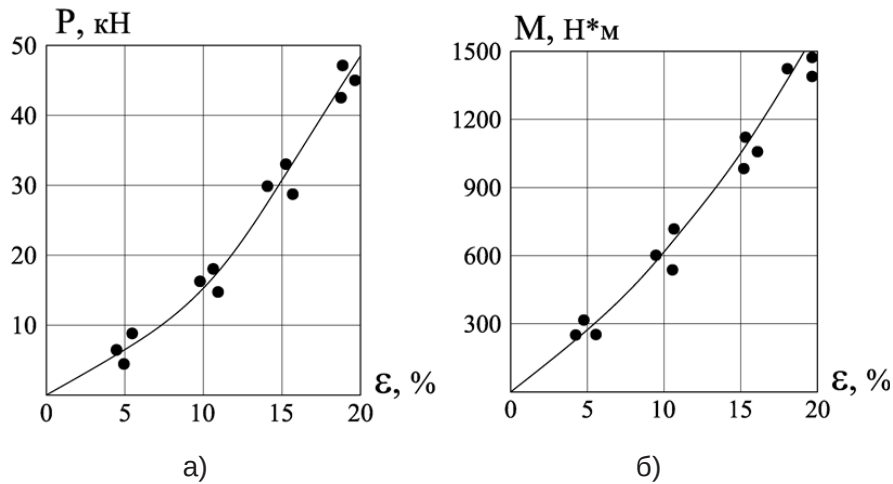


Рис. 3. Емпіричні (●) та розрахункові (—) залежності сили: а) та моменту прокатки б) від відносного обтискування при прокатці між гладким та каліброваними валками

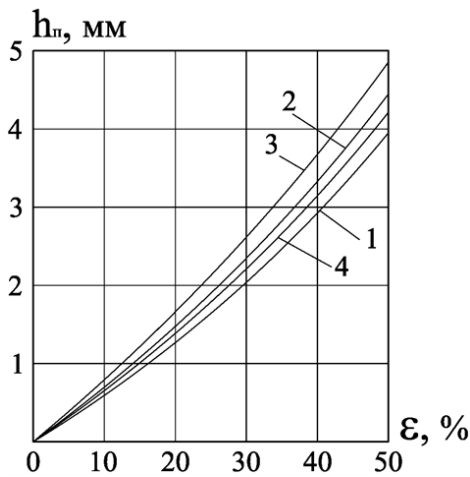


Рис. 4. Емпіричні розподіли залежності глибини заповнення пазів h_n від обтиснення ϵ для пазів з різними кутами нахилу α : 1 – $\alpha=10^\circ$, 2 – $\alpha=20^\circ$, 3 – $\alpha=30^\circ$, 4 – $\alpha=40^\circ$

промислово-лабораторному прокатному стані 260×200 ДГМА, як кількісно, так і якісно добре узгоджуються з даними тривимірного теоретичного аналізу;

– отримані дані підтверджують правильність основних теоретичних припущень, адекватність застосування методу полів ліній ковзання, чисельного рекурентного розв'язання кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги, методу кінцевих елементів та варіаційних методів. Це дозволяє зробити висновок про високу прогностичну здатність розробленої моделі та її придатність для інженерних розрахунків при проектуванні технології виробництва двошарових біметалічних листів з механічним зв'язком;

– у подальшому планується активне використання інтегрованих систем CAD/CAE

(Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering), зокрема програмного комплексу ABAQUS [8-10] у поєднанні з CAD-системами (наприклад, SolidWorks, Creo або CATIA), для віртуального моделювання процесу затікання металу в щілинну порожнину та формування механічного зв'язку. Моделювання на основі методу кінцевих елементів у CAE-середовищі дозволить проводити швидко багатofакторну оптимізацію геометричних параметрів пазів (кута розкриття, глибини, кроку), ступеня обтиснення, умов контактного тертя та інших технологічних режимів уже на стадії проектування. Інтеграція CAD і CAE забезпечить безшовний перехід від параметричного 3D-моделювання геометрії інструменту та заготовки безпосередньо до детального аналізу напружено-деформованого стану, що суттєво скоротить обсяг натурних експериментів, знизить матеріальні та часові витрати й значно прискорить впровадження технології виробництва двошарових біметалічних листів у промислове виробництво. Додатково слід зазначити, що задачі, які розв'язуються в рамках методу скінченних елементів, характеризуються значною обчислювальною складністю та великою кількістю ітераційних операцій, що обумовлює доцільність застосування паралельних обчислень. Використання багатоядерних центральних процесорів (CPU) та графічних процесорів (GPU) дозволяє ефективно розпаралелювати обчислення, скоротити час розрахунку складних термомеханічних задач і забезпечити можливість проведення багатоваріантного чисельного експерименту в режимі, наближеному до реального часу, що є важливим для оптимізації технологічних параметрів і впровадження концепції цифрового проектування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент 21238 України МПК В 23 К 20/04. Спосіб виробництва двошарових біметалевих листових композицій / В.А. Федорінов, О.В. Сатонін, А.О. Сатонін, Д.Ю. Міхеєнко; Донбаська державна машинобудівна академія. No 2006 07687; заявл. 10.07.06; опубл. 15.03.07, Бюл. No 3. 8 с.
2. Основи системного аналізу. Конспект лекцій : Методичні рекомендації з дисципліни "Системний аналіз" / укладачі: Цишко Г.Ю., Горошко Ю.В. Чернігів: НУЧК, 2025, 117 с.
3. Міхеєнко Д. Ю., Грудкіна Н. С. Теоретичні дослідження процесу виробництва прокаткою відносно товстих двошарових біметалевих листових заготовок з механічним з'єднанням. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 7–12. URL: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1>
4. Міхеєнко Д. Ю., Грудкіна Н. С., Герасименко О. В. Комп'ютерне та чисельне моделювання термомеханічного стану біметалевих конструктивних елементів. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-16>
5. Li Z.et al. Recent advances and trends in roll bonding c bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
6. Rezaii A.et al. Experimental & theoretical investigation of roll bonding process of multilayer strips by finite element method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 54. P. 54–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.044>
7. Ghalehbandi S. M., Malaki M., Gupta M. Accumulative Roll Bonding—A Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 17. P. 3627. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9173627>
8. Che J.et al. Prediction Model Study of Rolling Force and Thickness Ratio of the Bimetallic Composite Plate. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 38, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01201-1>
9. Wu S.et al. Simulation and Experiment of Stainless Steel - Carbon Steel Cladding Rebar Rolling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 740. P. 012178. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/740/1/012178>
10. Song J. et al. Finite Element Simulation and Microstructural Analysis of Roll Forming for DP590 High-Strength Dual-Phase Steel Wheel Rims. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 15. P. 3795. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17153795>

REFERENCES:

1. Fedorinov, V. A., Satonin, O. V., Satonin, A. O., & Mikheienko, D. Yu. (2007). *Sposib vyrobnystva dvosharovykh bimetalovykh lystovykh kompozitsii* [Method for production of double-layer bimetallic sheet compositions] (UA Patent No. 21238). Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian].
2. Tsybko, H. Yu., & Horoshko, Yu. V. (2025). *Osvony systemnoho analizu. Konspekt leksii: Metodychni rekomendatsii z dystsypliny "Systemnyi analiz"* [Fundamentals of systems analysis. Lecture notes: Methodological recommendations for the discipline "Systems Analysis"]. NUCHK. [in Ukrainian].
3. Mikheienko, D. Yu., & Hrudkina, N. S. (2024). Teoretychni doslidzhennia protsesu vyrobnystva prokatkoiu vidnosno tovstykh dvosharovykh bimetalovykh lystovykh zahotivok z mekhanichnym ziednanniam [Theoretical studies of the production process by rolling relatively thick two-layer bimetallic sheet blanks with a mechanical joint]. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, (1), 7–12. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1> [in Ukrainian].
4. Mikheienko, D. Yu., Hrudkina, N. S., & Herasymenko, O. V. (2025). Kompiuterne ta chyselne modeliuвання termomekhanichnoho stanu bimetalovykh konstruktivnykh elementiv [Computer and numerical modeling of the thermomechanical state of bimetallic structural elements]. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, (5), 145–150. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-16> [in Ukrainian].
5. Li, Z., Guo, L., Huang, H., Yu, H., & Zhao, J. (2022). Recent advances and trends in roll bonding bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
6. Rezaii, A., Salehi, M. T., & Seyedein, S. H. (2020). Experimental & theoretical investigation of roll bonding process of multilayer strips by finite element method. *Journal of Manufacturing Processes*, 54, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.044>
7. Ghalehbandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative roll bonding—A review. *Applied Sciences*, 9(17), 3627. <https://doi.org/10.3390/app9173627>
8. Che, J., Zhao, J., & Ma, L. (2025). Prediction model study of rolling force and thickness ratio of the bimetallic composite plate. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1). <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01201-1>
9. Wu, S., Jiang, Z., & Wei, D. (2020). Simulation and experiment of stainless steel - carbon steel cladding rebar rolling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 740(1), 012178. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/740/1/012178>
10. Song, J., Wang, Y., & Liu, X. (2024). Finite element simulation and microstructural analysis of roll forming for DP590 high-strength dual-phase steel wheel rims. *Materials*, 17(15), 3795. <https://doi.org/10.3390/ma17153795>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026