**Чмих К.В.**здобувач освітнього ступеня
доктора філософії**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Chmykh K.**

recipient of the PhD degree

**Lviv Polytechnic National
University****УДК 621.771.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-12****ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗШИРЕННЯ ДЛЯ
АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АК6 ПРИ
ГАРЯЧОМУ ПРОКАТУВАННІ**

У статті представлено комплексне дослідження процесу поперечного розширення (Δb) алюмінієвого сплаву АК6 під час гарячого прокатування з урахуванням впливу ключових технологічних параметрів, структурних перетворень та умов контакту металу з валками. Метою роботи є встановлення закономірностей бокового перебігу металу, визначення ролі температури, ступеня редуції, діаметра заготовки та діаметра валків у формуванні величини Δb , а також оцінювання точності аналітичних моделей, що застосовуються для прогнозування розширення в умовах гарячої деформації.

Експериментальні дослідження виконано на заготовках різного діаметра та при різних ступенях обтиснення, що дало змогу проаналізувати вплив геометричних і кінематичних чинників на поведінку металу в осередку деформації. Показано, що процес гарячого прокатування супроводжується зменшенням поперечного розширення порівняно з холодною деформацією, що зумовлено зниженням межі текучості, активізацією процесів динамічного повернення та рекристалізації, а також підвищенням пластичності сплаву АК6 у температурному інтервалі 420–480 °С. Установлено, що ступінь редуції є визначальним фактором, який зумовлює нелінійне зростання величини Δb , тоді як збільшення початкового діаметра заготовки призводить до зменшення бокового перебігу внаслідок зростання впливу поперечних сил тертя та зміни ширини осередку деформації.

Доведено, що діаметр валків істотно впливає на інтенсивність розширення: збільшення D подовжує осередок деформації, підсилює тангенціальні сили тертя та сприяє частковому перерозподілу металопотоку в поперечному напрямку. Окрему увагу приділено порівнянню аналітичних моделей Пассініда, Скрябіна та температурно-коригованих залежностей, які продемонстрували задовільну збіжність із експериментальними даними. Це підтверджує їхню придатність для інженерних розрахунків і практичного прогнозування розширення за різних технологічних умов.

Результати дослідження мають важливе прикладне значення для оптимізації процесів гарячого прокатування алюмінієвих сплавів. Вони дають змогу зменшити похибки у конструюванні калібрів, підвищити точність геометричних параметрів виробів, мінімізувати ризик крайових дефектів («вухатість», хвилястість, мікротріщини) та забезпечити стабільність експлуатаційних властивостей готової продукції зі сплаву АК6.

Ключові слова: Деформація, деформаційне протягування, пластична деформація, інтенсивність деформацій, напружено-деформований стан, пластичність, технологічний процес, деформаційне протягування, алюмінієві сплави, макро- і мікроструктура.



Вступ. Алюмінієві сплави посідають провідне місце серед конструкційних матеріалів завдяки поєднанню малої густини, високої корозійної стійкості, достатньої міцності та добрих технологічних властивостей. Сучасні галузі промисловості — авіаційна, автомобільна, будівельна, електротехнічна — висувають дедалі вищі вимоги до якості та надійності виробів з алюмінієвих сплавів. Одним із ключових процесів формоутворення та зміцнення таких матеріалів є прокатування, яке може здійснюватися як у холодному, так і в гарячому стані. Вибір режиму деформації визначає кінцеві механічні властивості, структуру та експлуатаційні характеристики готового виробу.

Гаряче прокатування алюмінієвих сплавів традиційно розглядається як ефективний метод переробки заготовок у тих випадках, коли необхідно досягти значних ступенів деформації без утворення дефектів. Підвищена температура сприяє активізації процесів рекристалізації та зниженню опору деформації, що дає змогу отримувати однорідну дрібнозернисту структуру й уникати накопичення залишкових напружень. Це забезпечує кращу пластичність металу та підвищує стабільність його властивостей у подальших технологічних операціях.

Холодне прокатування, навпаки, є процесом, що забезпечує суттєве зміцнення матеріалу за рахунок наклепу. Воно дозволяє досягати високих показників міцності та точності розмірів, проте супроводжується підвищенням внутрішніх напружень та ризиком появи структурної неоднорідності. Для алюмінієвих сплавів, особливо тих, що чутливі до деформаційного зміцнення, це може обмежувати можливості їх подальшої обробки та використання[1].

У зв'язку з цим постає необхідність ґрунтовного аналізу переваг гарячого прокатування порівняно з холодним при виготовленні виробів з алюмінієвих сплавів. Розуміння особливостей мікроструктурних змін, впливу температури, швидкості деформації та теплових умов дає змогу оптимізувати технологічні режими та забезпечити отримання продукції з прогнозованими властивостями. Дослідження закономірностей цих процесів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства, оскільки саме вони визначають ефективність виробництва, ресурс виробів та їхню конкурентоспроможність у різних сферах застосування.

Мета дослідження є комплексне дослідження процесу поперечного розширення Δb під час гарячого прокатування алюмінієвого сплаву АК6, що включає експериментальне визначення впливу температури, ступеня редукції й діаметра заготовки, побудову аналітичних

моделей прогнозування розширення та оцінювання їх відповідності реальним умовам деформації з метою оптимізації технології гарячого прокатування виробів зі сплаву АК6.

Аналіз останніх досліджень.

У процесі прокатування з одночасним зменшенням висоти заготовки h та її подовженням / виникає боковий перебіг металу — розширення Δb . Це явище описують законом збереження об'єму та умовами рівноваги в осередку деформації. Згідно з класичною моделлю, для плоского стану напружень об'ємна незмінність записується як:

$$\frac{\Delta h}{h_0} + \frac{\Delta l}{l_0} + \frac{\Delta b}{b_0} = 0, \quad (1)$$

де h_0 , l_0 , b_0 — початкові розміри заготовки. Звідси випливає, що Δb неминуче зростає зі збільшенням редукції Δh . Однак реальний характер течії металу значно складніший, оскільки визначається співвідношенням між напруженнями у трьох напрямках, тертям та геометрією контакту.

Для кількісної оцінки розширення використовують різні інженерні залежності. Однією з найпоширеніших є формула Пассініда, яка наближено описує бокове розтікання при плоскому прокатуванні:

$$\Delta b = k \cdot \sqrt{h_0 \Delta h}, \quad (2)$$

де k — емпіричний коефіцієнт, що залежить від діаметра валків, тертя та властивостей матеріалу [2]. Хоча вона не враховує усіх факторів, ця модель дає змогу оцінити очікуваний рівень розширення на початкових стадіях проектування процесу.

Більш точну оцінку забезпечує модель Скрябіна, побудована на основі експериментального визначення впливу ступеня деформації, температури та діаметра валків:

$$\Delta b = C \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^m \cdot D^{-n} \quad (3)$$

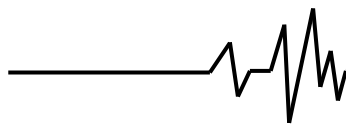
де C , m , n — емпіричні коефіцієнти, D — діаметр прутка перед прокатуванням [2-3]. Аналіз цієї залежності показує, що зі збільшенням ступеня редукції розширення зростає, тоді як зі збільшенням діаметра заготовки — зменшується. Останнє пов'язано з інтенсифікацією поперечних сил тертя: при більшому діаметрі збільшується ширина осередку деформації, і поперечне переміщення металу частково обмежується.

Для випадків гарячої деформації, коли рекристалізація відбувається безпосередньо в зоні контакту, доцільно використовувати модель, що враховує температурну залежність межі текучості:

$$\Delta b = f(T) \cdot \Delta b_{\text{хол}} \quad (4)$$

де

$$f(T) = \left(\frac{\sigma_{0.2}(T_{\text{хол}})}{\sigma_{0.2}(T)} \right)^p, \quad (5)$$



а p — коригуючий параметр, $\sigma_{0.2}(T)$ — границя текучості матеріалу при відповідній температурі [3]. Оскільки для алюмінієвих сплавів межа текучості суттєво знижується при нагріванні, коефіцієнт $f(T)$, як правило, менший за одиницю. Це означає, що для гарячого прокатування Δb менше, ніж у холодному процесі за аналогічних редуцій.

У роботах Колосова та Аватковича [4, 5] показано, що розширення істотно залежить від напружено-деформованого стану, а саме від різниці між головними напруженнями:

$$\Delta b \propto (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (6)$$

де σ_2 — напруження у поперечному напрямку, σ_1 — у напрямку прокатування. За умов гарячої деформації ця різниця зменшується внаслідок релаксаційних процесів, тоді як у холодному стані — зростає через накопичення наклепу. Саме тому Δb у холодному прокатуванні має більшу варіативність і сильніше реагує на зміни коефіцієнта тертя та швидкості захоплення металу валками.

Результати дослідження.

Порівняльний аналіз літературних даних свідчить, що у гарячому прокатуванні алюмінієвих сплавів спостерігається більш рівномірний розподіл деформації по ширині заготовки. Це сприяє зниженню локальних розтягувальних напружень та мінімізує ризик утворення дефектів крайової зони, таких як «вухатість», хвилястість чи мікротріщини. Навпаки, у холодному прокатуванні ці дефекти проявляються частіше внаслідок зростання жорсткості матеріалу та нерівномірного зсувного переміщення.

Таким чином, використання моделей Пассініда, Скрябіна та їх модифікацій дає змогу точно прогнозувати Δb , що дозволяє оптимізувати технологію прокатування як у холодному, так і в гарячому стані. Особливо це актуально для алюмінієвих сплавів, де співвідношення між пластичністю й міцністю суттєво змінюється з температурою, а чутливість до крайових дефектів є високою.

У процесі прокатування разом зі зменшенням висоти h і подовженням заготовки (витяжкою l) виникає боковий перебіг металу — розширення Δb . Таке розширення створює у крайових зонах значні розтягувальні напруження, що в підсумку обмежує досягнути витяжку.

Для оцінювання Δb під час прокатування за традиційною схемою (без підігріву штампів) д.т.н. С. О. Скрябін виконав дослідження залежності розширення від ступеня деформації, діаметра валків, температури заготовки та інших чинників [7]. Отримані залежності доцільно враховувати як

при прокатуванні за традиційним методом, так і за умов гарячої деформації.

Аналіз експериментальних даних (рис. 1, 2) показує: за незмінних інших умов зі зростанням ступеня деформації зростають як показник розширення, так і відносне розширення. Зменшення діаметра прутка також веде до збільшення цих величин. Натомість для заготовок більшого діаметра Δb менше, що пояснюється посиленням поперечних сил тертя: зі збільшенням діаметра зростає відношення ширини осередку деформації до його довжини, і це стримує поперечний перебіг металу.

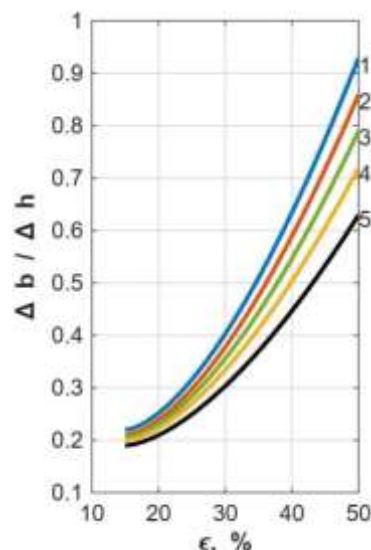


Рис. 1. Залежність показника розширення $\Delta b/\Delta h$ від ступеня деформації при прокатуванні заготовок різного діаметру в гладких валках: 1- Ø20 мм; 2- Ø25 мм; 3 – Ø30 мм; 4 – Ø50 мм; 5 - Ø60 мм

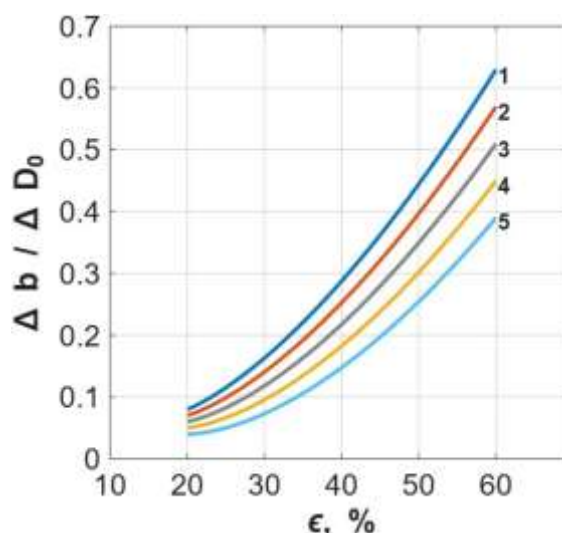
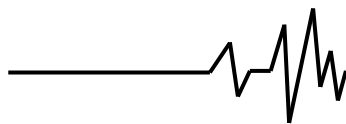


Рис. 2. Залежність відносного розширення $\Delta b/D_0$ від ступеня деформації при прокатуванні заготовок різного діаметру в гладких валках: мм; 1 – Ø 20 мм; 2 - Ø 25 мм; 3 – 30 мм; 4 - Ø 50 мм; 5 - Ø 60 мм



На рис. 3 показано, що зі збільшенням діаметра валків D величина розширення Δb зростає. За незмінних інших параметрів більший D подовжує осередок деформації l_c (орієнтовно $l_c \sim R \Delta h$, де $R=D/2$). Це підвищує сумарні тангенціальні сили тертя на контактних поверхнях, спрямовані у бік нейтрального перерізу. Посилене тертя гальмує поздовжній перебіг металу вздовж осі заготовки, тому частка поперечного витиснення зростає і Δb збільшується.

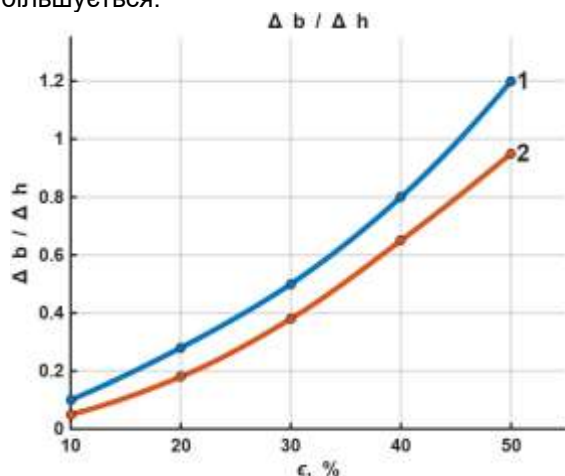


Рис. 3 Вплив діаметру валків на показник розширення $\Delta b / \Delta h$ при прокатуванні заготовок в гладких валках: 1 — діаметр валків 260 мм, частота обертання валків 26 хв⁻¹; 2 — діаметр валків 103 мм, частота обертання валків 37 хв⁻¹;

На рис. 3. подано залежність показника розширення Δb від початкової ширини смуги b_0 діаметра валків D та відношення b_0/l_0 (де l_0 — довжина осередку деформації) за сталої величини обтискання $\epsilon=38,5\%$. Криві побудовано за результатами експериментів із прокатування сплаву АК6: початкова висота заготовок $h_0=22$ мм, ширина $b_0=5, 10, 22, 30, 40, 50$ мм; прокат у гладких сталевих валках діаметрами $D=260$ і 103 мм при частотах обертання 26 та 37 хв⁻¹ відповідно.

Висновки. У виконаному дослідженні представлено комплексний аналіз процесу поперечного розширення Δb алюмінієвого сплаву АК6 під час гарячого прокатування, що дало змогу визначити закономірності формування бокового перебігу металу, оцінити вплив основних технологічних факторів та запропонувати шляхи оптимізації режимів деформації. Узагальнення отриманих результатів дозволяє сформулювати такі висновки.

Для сплаву АК6 характерне зменшення величини поперечного розширення при гарячому прокатуванні порівняно з холодною деформацією, що пов'язано зі зниженням межі

текучості металу, активізацією рекристалізаційних процесів та підвищенням рівня пластичності у температурному інтервалі 420–480 °С. Гарячий стан сприяє формуванню більш рівномірного напружено-деформованого стану, що зменшує крайові розтягувальні напруження, які зазвичай визначають величину Δb .

Ступінь редуції висоти є найбільш істотним фактором, що впливає на Δb . Зі збільшенням абсолютної та відносної редуції величина розширення закономірно зростає. Отримані експериментальні залежності показують нелінійний характер зміни Δb , що пов'язано зі зміною інтенсивності зсувних напружень у крайових зонах заготовки.

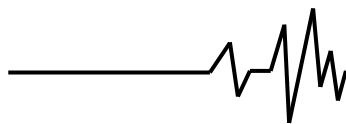
Збільшення початкового діаметра заготовки АК6 приводить до зменшення розширення, що узгоджується з моделлю Скрябіна та відомими теоретичними положеннями про вплив ширини осередку деформації. Більший діаметр забезпечує відносно підвищення поперечної складової сил тертя, яка пригнічує боковий перебіг металу.

Температура гарячого прокатування істотно впливає на інтенсивність поперечного розтікання металу. Підвищення температури зменшує неоднорідність деформації між центральними та крайовими зонами, що сприяє коректнішому прогнозуванню Δb та зниженню ймовірності утворення дефектів крайової частини — хвилястості, «вухатості» та мікротріщин.

Аналітичні моделі (Пассініда, Скрябіна та температурно-кориговані модифікації) були адаптовані для умов гарячої деформації сплаву АК6. Порівняння розрахункових даних з експериментальними підтвердило їх задовільну збіжність, що дозволяє використовувати зазначені моделі на практиці для прогнозування параметрів гарячого прокатування.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування гарячого прокатування для підвищення технологічної точності та структурної однорідності виробів зі сплаву АК6. Зменшення Δb дає змогу оптимізувати геометрію калібрів, знизити потребу в механічній доробці та забезпечити кращу стабільність властивостей готових деталей.

Таким чином, дослідження показало, що гаряче прокатування є ефективним методом обробки алюмінієвого сплаву АК6, який забезпечує кероване формування поперечного розширення та мінімізує ризик виникнення крайових дефектів. Розроблені аналітичні залежності та встановлені закономірності можуть бути використані для подальшого удосконалення технологічних режимів, а також



для моделювання процесів гарячої деформації в промислових умовах.

Список використаних джерел

1. Shvets L. The essence and possibility of the method of isothermal deformation. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol. 1, № 42. P. 16–24.
2. Скрыбин С. О. Дослідження поперечного розширення при прокатуванні заготовок змінного діаметра. *Металобробка та обробка тиском*. 2018.
3. Passini D. Rolling Theory and Metal Flow in Deformation Processes. *Springer*, 2005.
4. Polukhin P. Plasticity and Hot Deformation of Aluminum Alloys. *Elsevier*, 2014.
5. Колосов М. А. Теорія та моделювання процесів плоского прокатування. Київ : НТУУ «КПІ», 2012.
6. Avakovich V. Stress-State Analysis in Rod Rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010.
7. Shvets L., Trukhanska O. Deformation of aluminum alloys in isothermal conditions. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 3 (114). С. 68–74. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-8.
8. Shvets L. Expansion during rolling of preparations in different calibers. *Slovak international scientific journal*. 2022. № 62. P. 17–30.
9. Puzyr R., Shvets L. Development of methods of experimental and analytical research of metal flow in the center of deformation of aluminum alloys during combine parts rolling. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2022. № 83. P. 63–74.
10. Shvets L. Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. *Scientific foundations of modern engineering : monograph*. Boston, 2020. P. 234–240.

References

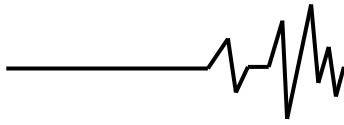
1. Shvets, L. (2020). The essence and possibility of the method of isothermal deformation. *Slovak International Scientific Journal*, 1(42), 16–24. [English]
2. Skriabin, S. O. (2018). *Doslidzhennia poperechnoho rozshyrennia pry prokatuvanni zahotovok zminnoho diametra* [Study of transverse spreading during rolling of billets of variable diameter]. *Metaloobrobka ta obrobka tyskom*. [Ukrainian]
3. Passini, D. (2005). *Rolling Theory and Metal Flow in Deformation Processes*. Springer. [English]

4. Polukhin, P. (2014). *Plasticity and Hot Deformation of Aluminum Alloys*. Elsevier. [English]
5. Kolosov, M. A. (2012). *Teoriia ta modeliuvannia protsesiv ploskoho prokatuvannia* [Theory and modelling of flat rolling processes]. NTUU “KPI”. [Ukrainian]
6. Avakovich, V. (2010). Stress-state analysis in rod rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. [English]
7. Shvets, L., & Trukhanska, O. (2021). Deformation of aluminum alloys in isothermal conditions. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 3(114), 68–74. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-3-8> [English]
8. Shvets, L. (2022). Expansion during rolling of preparations in different calibers. *Slovak International Scientific Journal*, 62, 17–30. [English]
9. Puzyr, R., & Shvets, L. (2022). Development of methods of experimental and analytical research of metal flow in the center of deformation of aluminum alloys during combine parts rolling. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 83, 63–74. [English]
10. Shvets, L. (2020). Extension value with hot-rolled aluminum alloy specimens of round section in smooth rollers. In *Scientific Foundations of Modern Engineering* (pp. 234–240). Boston. [English]

INVESTIGATION OF SPREADING IN AK6 ALUMINUM ALLOY DURING HOT ROLLING

This article presents a comprehensive study of the transverse spreading (Δb) of the AK6 aluminum alloy during hot rolling, taking into account the influence of key technological parameters, structural transformations, and contact conditions between the metal and the rolls. The aim of the study is to determine the regularities of lateral metal flow, evaluate the roles of temperature, reduction degree, billet diameter, and roll diameter in forming the magnitude of Δb , as well as to assess the accuracy of analytical models used for predicting spreading under hot deformation conditions.

Experimental tests were conducted on billets of various diameters and at different reduction levels, enabling an analysis of the effects of geometric and kinematic factors on metal flow within the deformation zone. It is shown that hot rolling results in reduced transverse spreading compared to cold deformation due to lower flow stress, activation of dynamic recovery and recrystallization, and increased plasticity of the AK6 alloy within the temperature range of 420–480 °C. It was established that the reduction degree is a decisive factor governing the nonlinear growth of Δb , whereas an increase in the initial



billet diameter leads to a decrease in lateral flow due to stronger transverse frictional forces and changes in the deformation zone geometry.

It is demonstrated that the roll diameter significantly affects spreading intensity: a larger roll diameter (D) increases the deformation zone length, intensifies tangential friction forces, and contributes to partial redistribution of metal flow in the transverse direction. Special attention is given to comparing analytical models by Passini, Skriabin, and temperature-corrected formulations, all of which showed satisfactory agreement with experimental findings. This confirms their suitability for engineering calculations and practical prediction of spreading under varying technological conditions.

The obtained results have important practical implications for optimizing hot rolling processes of aluminum alloys. They make it possible to reduce errors in roll pass design, improve the dimensional accuracy of rolled products, minimize the risk of edge defects (waviness, "earring", microcracks), and ensure stable performance characteristics of AK6 alloy products.

Keywords: deformation, deformation elongation, plastic deformation, strain intensity, stress-strain state, plasticity, technological process, metal flow, aluminum alloys, macro- and microstructure.

Відомості про автора

Чмих Катерина В'ячеславівна – здобувач третього освітньо-наукового рівня Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: catherina099@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8873-4436>).

Chmykh Kateryna – Recipient of the Third Educational and Scientific Level of the Vinnytsia National Agrarian University (Sunny str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: catherina099@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8873-4436>).

Стаття надійшла 20.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Опубліковано 25.12.2025