

**Чмих К. В.**

аспірантка

Волковський І. В.

асистент

*Вінницький національний
аграрний університет***Chmykh K.**

postgraduate

Volkovskiy I.

assistant

*Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 669.018.292.2:004.942.2****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-12****МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС
ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ З
ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО
КОМПЛЕКСУ DEFORM**

Дослідження структурної еволюції алюмінієвих сплавів під час гарячої прокатки є актуальною проблемою у сучасній металургії. У даній роботі здійснюється моделювання процесу формування структури алюмінієвих сплавів під час гарячої прокатки з використанням програмного комплексу DEFORM-3D. Програмний комплекс дозволяє відтворити реальні умови процесу прокатки та прогнозувати зміни в структурі сплаві.

У статті проведено моделювання еволюційних структур під час гарячого прокату алюмінієвого сплаву 5182 БТ (Al-Mg4,5 %) в п'ятиклетевій безперервній групі станів гарячого прокату. Для математичного моделювання було використано програмний продукт DEFORM-3D, а для врахування кінетики рекристалізації було використано рівняння Джонсона–Мела–Аврамі–Колмогорова.

Результатом розрахунків було обчислено обсяг рекристалізованих зерен та їх розміри на протязі всього процесу прокату. Однак важливо відзначити, що зміна розмірів зерен при прокатці алюмінієвих сплавів є складним процесом і не підлягає сталій закономірності. Це пояснюється впливом багатьох факторів, пов'язаних як із внутрішньою структурою металу, так і з особливостями конкретних технологічних процесів. Тому результати моделювання потребують подальшої перевірки за допомогою промислових експериментів.

У цьому контексті, для порівняння використовувалися дані щодо еволюції текстури та структури, які були отримані під час примусового стану гарячого прокату разом із подальшим різьбовим охолодженням металу.

У підсумку, ця стаття сприяє глибшому розумінню процесів, які відбуваються під час гарячої прокатки алюмінієвих сплавів, і надає цінний внесок у вивчення впливу рекристалізації на кінцеву структуру та властивості матеріалу.

Ключові слова. *Моделювання, гаряча прокатка, структура, алюміній, деформація, анізотропія, рекристалізація, параметр Зеннера–Холомона, рівняння Колмогорова–Аврами.*

Вступ. В сучасному світі алюміній є одним з найбільш оптимальних матеріалів для виготовлення харчових контейнерів. Він має багато переваг, таких як легкість, корозійна

стійкість, можливість переробки та висока теплопровідність. Однак, існує деяка складність у виробництві алюмінієвих контейнерів через



анізотропію холоднокатаних алюмінієвих листів і рулонів.

Анізотропія вказує на те, що механічні властивості матеріалу залежать від напрямку. У випадку алюмінію, це може спричинити нерівномірну деформацію та механічні властивості в різних напрямках. Це особливо важливо під час процесу штампування, де деталі можуть бути піддані складним деформаціям та розтягам.

Для зменшення впливу анізотропії при виготовленні алюмінієвих харчових контейнерів та покращення їх якості, виробники можуть вживати кілька заходів:

- Оптимізація напрямку катання: процес катання може бути налаштований так, щоб зменшити анізотропію. Це може досягатися за допомогою контрольованого впливу на напрямки катання та температуру обробки.

- Механічна обробка: після катання алюмінієві листи можуть бути піддані механічній обробці, такій як холодне деформування або вирівнювання, що допомагає знизити анізотропію.

- Оптимізація процесу штампування: виробники можуть вдосконалити процес штампування, враховуючи особливості анізотропії алюмінію. Це може включати оптимізацію напрямку деформації, вибір оптимальних параметрів швидкості та тиску, а також використання спеціальних інструментів.

- Використання композитних матеріалів: іноді виробники можуть поєднувати алюміній з іншими матеріалами, такими як пластик або склоепоксидні композити, для створення матеріалу з меншою анізотропією.

- Моделювання та імітація процесів: застосування комп'ютерного моделювання може допомогти передбачити вплив анізотропії на процеси виготовлення та виявити можливі дефекти ще до фактичного виробництва.

Загалом, виробництво харчових контейнерів з алюмінію є важким завданням, яке вимагає поєднання оптимізації матеріалу, процесів та технологій, щоб забезпечити якість і відповідність стандартам у глобальній конкурентній сфері.

Аналіз останніх досліджень.

Алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів в програмних комплексах, таких як DEFORM-3D, включає послідовні етапи для детального аналізу та вдосконалення виробничих процесів:

Визначення геометрії: Спершу визначається геометрія об'єкта або деталі, яка буде піддана технологічному процесу. Це може бути точна репрезентація геометрії або її апроксимація для моделювання[1-2].

Встановлення матеріальних властивостей: Для матеріалу, з якого

виготовлена деталь, задаються характеристики, такі як міцність, деформація, теплопровідність тощо. Це дозволяє точно враховувати поведінку матеріалу під час процесу.

Задання межових умов: Встановлюються умови, що впливають на процес, такі як температура, навантаження, швидкість руху тощо. Це важливо для реалістичного моделювання відповідних умов.

Математичне моделювання: За допомогою методу скінчених елементів геометрія деталі розділяється на малий набір скінчених елементів. Рівняння, що описують фізичні процеси, такі як деформація або теплопередача, розв'язуються для кожного елемента.

Симуляція процесу: Проводиться симуляція технологічного процесу, де враховуються взаємодії між елементами, властивості матеріалу, умови середовища та межові умови. Це дозволяє прогнозувати поведінку деталі під час реального процесу.

Аналіз результатів: Після завершення симуляції аналізуються дані, такі як напруження, деформація, розподіл температур, переміщення тощо. Цей аналіз допомагає зрозуміти вплив процесу на деталь та порівнює результати зі специфікаціями.

Оптимізація: У разі необхідності виконується оптимізація параметрів процесу або геометрії для досягнення певних цілей, таких як підвищення міцності або зменшення витрат матеріалу[2-3].

Отримані результати та аналіз сприяють кращому розумінню ефективності та придатності технологічного процесу для виробництва деталі чи продукту. Загалом, алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів у програмних комплексах, таких як DEFORM-3D, забезпечує детальний аналіз і можливість вдосконалення виробничих процесів.

Алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів виробництва в програмних комплексах, зокрема DEFORM-3D, включає наступні кроки:

Моделювання геометрії: Спочатку визначається геометрія об'єкта або деталі, яка буде піддана технологічному процесу. Це може бути реальна геометрія або її апроксимація.

Визначення матеріальних властивостей: Для матеріалу, з якого виготовлена деталь, задаються матеріальні властивості, такі як міцність, деформація, теплопровідність тощо.

Встановлення межових умов: Задаються умови, які впливають на процес, наприклад, температура, обтяження, швидкість руху тощо.



Математичне моделювання: Використовуючи метод скінчених елементів, геометрія деталі розділяється на малий набір скінчених елементів. Рівняння, що описують фізичні процеси (наприклад, механічне деформування або теплопередачу), розв'язуються для кожного елемента.

Симуляція процесу: Проводиться симуляція технологічного процесу, де враховуються взаємодії між елементами, властивості матеріалу, умови навколишнього середовища та межові умови.

Аналіз результатів: Після завершення симуляції аналізуються результати, такі як напруження, деформація, температурні розподіли, швидкості зміщень тощо. Це допомагає зрозуміти, як процес впливає на деталь і чи відповідає заданим специфікаціям.

Оптимізація: В разі необхідності може бути виконана оптимізація параметрів процесу

або геометрії з метою досягнення певних цілей, таких як покращення міцності або зниження витрат матеріалу.

Отримані результати та аналіз допомагають зробити висновки щодо ефективності та придатності технологічного процесу для виробництва деталі чи об'єкта.

Загалом, алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів виробництва в програмних комплексах скінчено-елементного моделювання, наприклад DEFORM-3D, дозволяє детально вивчити вплив різних факторів на процес і результати виробництва, що сприяє вдосконаленню та оптимізації технологічних процесів.

Алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів в програмних комплексах скінчено-елементного моделювання типу DEFORM-3D [5]



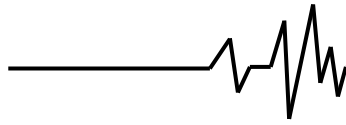
Рис. 1. Алгоритм моделювання наскрізних технологічних процесів виробництва в програмних комплексах скінчено-елементного моделювання типу DEFORM-3D [5].

Контроль над текстурою металу [1-4] є важливим фактором для зменшення анізотропії і поліпшення якості металевих виробів. Розглядаючи цю проблему, настає необхідність вивчення еволюції структури металу на різних етапах листового виробництва. Зокрема, важливими аспектами є аналіз рекристалізації в міждеформаційних інтервалах, коли матеріал піддається механічній обробці з наступним самовідпалом після гарячої прокатки. Щоб досягти цієї мети, вчені використовують різні моделі, які дозволяють описати кінетику рекристалізації алюмінієвих сплавів. Більшість з цих моделей були розроблені протягом останніх 20 років [6-8].

Ці моделі в основному базуються на рівнянні Колмогорова-Аврамі, яке відображає

процес перерозподілу деформаційної енергії і відновлення кристалічної структури. Проте вони мають свої обмеження, основним з яких є відсутність підтвердження на практиці, на реальному промисловому обладнанні. Суттєвим аспектом також є той факт, що ці моделі, як правило, побудовані на основі даних, отриманих з випробувань на стиск, тоді як деформовано-напружений стан під час прокату значно відрізняється від умов випробувань.

Основною метою даного дослідження є перевірка придатності моделі кінетики рекристалізації алюмінієвого сплаву 5182 для процесу гарячої прокатки, яка була запропонована в роботі [8]. З цією метою було використано програмний продукт DEFORM для моделювання формування структури металу в



різних станах гарячої прокатки. Отримані результати моделювання порівнювалися з попередньо отриманими даними з реальних промислових експериментів. Це дозволило зробити оцінку придатності моделі для передбачення процесів рекристалізації під час гарячої прокатки алюмінієвого сплаву 5182, що є важливим кроком у розробці більш точних та практичних методів виробництва металевих виробів з бажаною текстурою та анізотропією.

Мета дослідження. Перевірка придатності моделі кінетики рекристалізації алюмінієвого сплаву 5182 для процесу гарячої прокатки.

Результати дослідження. Провівши аналіз останніх досліджень відзначимо, наступне, що в більшості сплавів швидкість деформації під час гарячої прокатки недостатньо велика для того, щоб спостерігалася динамічна або метадинамічна рекристалізація. Тому в даному випадку ми розглядали лише статичну рекристалізацію, розвиток якої описується рівнянням Аврамі в DEFORM:

$$X_{SRX} = 1 - \exp \left[-\beta_s \cdot \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^{ks} \right] \quad (1)$$

де X_{SRX} —частка рекристалізованого об'єму; t – час витримки; $t_{0.5}$ — час, за який рекристалізовується 50% об'єму металу.

β_s — коефіцієнт пропорційності, а ks відображає вплив просторового фактора утворення та зростання зародків для рекристалізації сплаву 5182 згідно з [6], $\beta_s=0,693$, $ks=2$.

Для отримання t пропонується використовувати наведене нижче рівняння

$$t_{0.5} = a_3 d^{h_3} \varepsilon^{n_3} \exp \left(\frac{Q_3}{RT} \right) \quad (2)$$

де Q_3 — енергія активації рекристалізації для сплаву 5182, що дорівнює 230000 згідно [8]; T –температура матеріалу; R –універсальна газова стала;

Однак згідно з роботою [8] час розвитку рекристалізації не залежить ні від розміру зерна, ні від рівня попередньої деформації, тому коефіцієнти h_3 і n_3 встановлюються на нуль. Сам процес рекристалізації можна описати відповідно до рівняння (3).

$$T_{0.5} = a \cdot Z^b \cdot \exp \left(\frac{E_r}{RT_r} \right) \quad (3)$$

де E_r це також енергія активації рекристалізації. Коефіцієнти в рівнянні (2) знаходяться шляхом прирівнювання правих частин (2) і (3). Тоді припускаючи, що $m_3=b$ і $a_3=a$

$$a_3 \varepsilon^{m_3} = a Z^b \quad (4)$$

де, Z – параметр Зенера-Холломона;

Параметр Зенера-Холломона - це швидкість деформації з температурною компенсацією, яка визначається наступним чином:

$$Z = \varepsilon \cdot \exp \left(\frac{Q_{def}}{RT_{def}} \right) \quad (5)$$

Де Q_{def} енергія активації деформації = 174200; T_{def} температура деформації.

Тоді отримуємо:

$$m_3 = b = -1.267 \quad (6)$$

$$a_3 = 7.777 \cdot \left[\exp \cdot \left(\frac{174200}{8.314 \cdot T_{def}} \right) \right] - 1.267 \quad (7)$$

Отже, коефіцієнт a_3 залежить від температури деформації і може бути представлений у DEFORM у вигляді таблиці.

Таблиця 1. Графік прокатки злитків сплаву 5182 у 5 групі клітей

Стенд №	Товщина, мм		Швидкість стояння, м/с	Температура, °C	Час між запуском стендів, с
	Вхід	Вихід			
1	35	19.55	0,53	450	11
2	19.55	11.79	1	400	
3	11.79	6,99	1.75	375	6
4	6,99	4.1	3.12	360	3

Розрахунки листів зі сплаву 5182 для гарячої прокатки в безперервній групі станів були проведені з урахуванням конкретних параметрів рекристалізації, які визначалися відповідно до графіка прокатки (див. табл. 1). За використання параметрів, які були вже застосовані у попередніх промислових

експериментах [9], моделювання передбачало, що всі зерна, які раніше пройшли процес рекристалізації, під час подальшої пластичної деформації структурно змінюються. Всі параметри, що використовувалися в процесі моделювання, відповідали значенням



параметрів, визначеним під час промислових експериментів.

Важливо відзначити, що безперервний прокатний стан, який був змодельований в програмному продукті DEFORM, включав п'ять клітей. Однак останній кліть, ситуація з якою була детально змодельована, не має практичного значення для аналізу. Це пов'язано з тим, що після цього етапу відбувається

процес самовідпалу, під час якого відбувається повна рекристалізація.

Аналіз результатів розрахунку сплаву 5182 (див. рис. 2) показує, що вони досить передбачувані та в загальному відповідають уявленням про статичну рекристалізацію алюмінієвих сплавів з високим вмістом магнію, де відсутні малорозчинні домішки [3-4].

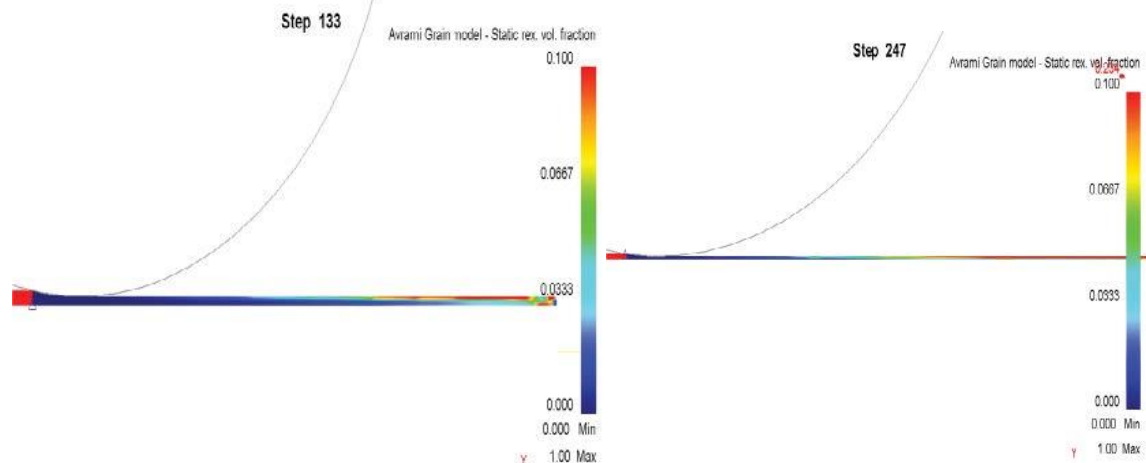


Рис. 2. Кінетика рекристалізації: а) 5182 перехідна мікроструктура калібрувального листа після 2-го стану суцільної групи; б) після 4-го стану суцільної групи.

Цю тенденцію можна пояснити високою енергією дефекту упаковки (SFE), яка сприяє активізації рекристалізаційних подій у таких сплавах.

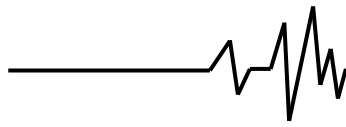
Однак, незважаючи на те, що загальні принципи кінетики рекристалізації для сплаву 5182 є вірними, фактичні параметри рекристалізації не можуть бути безпосередньо застосовані для інженерних розрахунків процесів прокатки. Ця відмінність стає очевидною під час порівняння даних моделювання з реальними результатами промислового експерименту. Зокрема, основна розбіжність полягає в переоцінці швидкості рекристалізації, яка була визначена у роботі [8]. Хоча невеликі відхилення можуть бути толеровані при розрахунках для перших двох стендів, вони стають неприйнятними для інженерних розрахунків для третього та четвертого стендів через значні розбіжності між результатами моделювання та експерименту.

Такий стан речей, очевидно, є результатом недооцінки впливу швидкості деформації на кінетику рекристалізації. У моделі цей вплив насправді не компенсується ані скороченням часу міждеформаційного інтервалу, ані перепадом температури. Такий недолік в моделі може пояснити збільшену швидкість рекристалізації, спостережену в роботі [8].

Ці відмінності між модельними даними та реальним експериментом підкреслюють важливість точності визначення параметрів та

внесення реальних умов процесу в модель. Для досягнення кращої узгодженості між результатами моделювання та експерименту, подальші дослідження повинні зосередитися на уточненні впливу швидкості деформації на рекристалізацію, а також на врахуванні інших факторів, які можуть впливати на кінетику процесу. Тільки за таких умов моделі зможуть бути достовірними та застосовними для передбачення результатів інженерних процесів прокатки з високою точністю.

Висновки. Підхід із використанням рівняння Колмогорова-Аврамі при моделюванні процесів рекристалізації в алюмінієвих сплавах з високим вмістом магнію при гарячій прокатці, загалом, показав свою ефективність. Рівняння Колмогорова-Аврамі надає рамки для розуміння перебігу рекристалізаційних процесів, враховуючи взаємодію деформаційної енергії та кристалічної структури. Цей підхід є цінним інструментом для аналізу та передбачення рекристалізаційних подій в сплавах під час гарячої прокатки. Проте вплив швидкості деформації на кінетику рекристалізації в існуючій моделі є переоціненим. Отримані результати порівняння модельних даних з реальними експериментальними результатами підкреслюють неадекватність цього підходу. Виявлені розбіжності між моделлю та експериментом, зокрема в третьому та четвертому стендах, свідчать про те, що вплив швидкості деформації на кінетику



рекристалізації не може бути зведений до однієї константи чи зв'язку. Це обмеження ускладнює використання даної моделі для точних інженерних розрахунків процесів промислової прокатки.

Загалом, важливо підкреслити, що розвиток статичної рекристалізації в алюмінієвому сплаві 5182 в процесі гарячої прокатки потребує подальшої розробки і уточнення моделі, яка б урахувала складність взаємодії різних факторів, таких як швидкість деформації, температурний режим, міжкристалітні взаємодії тощо. Тільки шляхом врахування цих аспектів можна досягти точних та надійних передбачень для інженерних розрахунків процесів промислової прокатки алюмінієвих сплавів.

Список використаних джерел

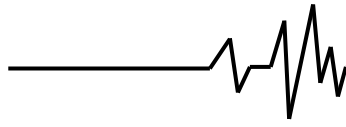
1. Shvets L. The essence and possibility of the method of isothermal deformation. *Slovak international scientific journal*. 2020. Vol. 1. № 42. P. 16-24.
2. Афтанділянц Є.Г., Зазимко О.В., Похиленко Г.М. Навч. пос. Технологія обробки металів і сплавів тиском. Видавничий центр НАУ. Київ. 2020. 86 с.
3. Будяк Р.В., Посвятенко Е.К., Швець Л.В., Жученко Г.А. Конструкційні матеріали і технології. Навч. пос. ВНАУ. 2020. 240 с.
4. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга I. Львів. 2000. 264 с.
5. Штуць А.А., Матвійчук В. А. Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням трубних заготовок. *Технічні науки: Збірник наукових праць*. ВНАУ. 2016. № 1 (95). С. 178-184.
6. Raghunathan N., Sheppard T. Microstructural development during annealing of hot rolled Al-Mg alloys. *Mater. Sci. Technol.* 1989, P. 542-547.
7. Wells M.A., Maijer D.M., Jupp S., Lockhart G., van der Winden M.R. Mathematical model of deformation and microstructural evolution during hot rolling of aluminium alloy 5083. *Mater. Sci. Technol.* 19 (4), 2003, P. 467-476.
8. Shvets L. Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. Monography. Scientific foundations of modern engineering. Boston (USA). 2020. P. 234-240.
9. YI You-ping., FU Xin., CUI Jin-dong., CHEN Hua., Prediction of grain size for large-sized aluminium alloy 7050 forging during hot forming. *Journal of Central South University of Technology*. 2008. 15(1), P. 1-5.
10. Zhang H., Peng D.S., Yang L.B., Meng L.P. Recrystallization model for hot-rolling of 5182

aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China. (English Edition)*. 11 (3). 2001. P. 382-386.

11. Shvets L. Restoration of body parts. *Colloquium-journal*. Poland. 2021 № 8 (95). P. 44-53 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-895-44-53.

References

1. Shvets, L. (2020). The essence and possibility of the method of isothermal deformation. *Slovak International Scientific Journal*, 1(42), 16-24. [USA]
2. Aftandilants, Y.G., Zazymko, O.V., & Pokhilenko, G.M. (2020). *Tekhnolohiya obrobky metaliv i splaviv tyskom: Navchalnyi posibnyk*. Vydavnychi tsestr NAU. [Ukraine]
3. Budyak, R.V., Posvyatenko, E.K., Shvets, L.V., & Zhuchenko, G.A. (2020). *Konstruktivni materialy i tekhnolohiyi: Navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia National Agrarian University. [Ukraine]
4. Popovych, V. (2000). *Tekhnolohiya konstruktivnykh materialiv i materialoznavstvo*. Knyha I. [Ukraine]
5. Shuts, A.A., & Matviichuk, V.A. (2016). *Kompiuterne modeliuвання protsesu shtampuvannya obkochuvanniam trubnykh zahotovok*. *Tekhnichni nauky: Zbirnyk naukovykh prats*, 1(95), 178-184. [Ukraine]
6. Raghunathan, N., & Sheppard, T. (1989). Microstructural development during annealing of hot rolled Al-Mg alloys. *Materials Science and Technology*, 5(6), 542-547. [USA]
7. Wells, M.A., Maijer, D.M., Jupp, S., Lockhart, G., & van der Winden, M.R. (2003). Mathematical model of deformation and microstructural evolution during hot rolling of aluminium alloy 5083. *Materials Science and Technology*, 19(4), 467-476. [USA]
8. Shvets, L. (2020). Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. In *Scientific Foundations of Modern Engineering* (pp. 234-240). Boston (USA). [USA]
9. YI You-ping, FU Xin, CUI Jin-dong, & CHEN Hua. (2008). Prediction of grain size for large-sized aluminium alloy 7050 forging during hot forming. *Journal of Central South University of Technology*, 15(1), 1-5. [USA]
10. Zhang, H., Peng, D.S., Yang, L.B., & Meng, L.P. (2001). Recrystallization model for hot-rolling of 5182 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 11(3), 382-386. [USA]
11. Shvets, L. (2021). Restoration of body parts. *Colloquium-Journal*, Poland, 8(95), 44-53. DOI: 10.24412/2520-6990-2021-895-44-53. [English]

**MODELING THE STRUCTURE EVOLUTION
DURING HOT ROLLING OF ALUMINUM
ALLOYS USING THE DEFORM SOFTWARE**

The investigation of the structural evolution of aluminum alloys during hot rolling is a pertinent challenge in modern metallurgy. This study involves the modeling of the process of aluminum alloy structure formation during hot rolling using the DEFORM-3D software suite. The software allows for the replication of real rolling conditions and the prediction of changes in alloy structures.

The article presents modeling of evolutionary structures during the hot rolling of aluminum alloy 5182 BT (Al-Mg 4.5%) in a five-stand continuous hot rolling mill. The DEFORM-3D software product was used for mathematical modeling, and the Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov equation was employed to account for recrystallization kinetics.

The results of calculations yielded the volume of recrystallized grains and their sizes throughout the entire rolling process. However, it is

crucial to note that changes in grain sizes during the rolling of aluminum alloys are a complex process and do not follow a constant pattern. This is due to the influence of numerous factors related to both the metal's internal structure and the specific technological processes. Therefore, the modeling results require further verification through industrial experiments.

In this context, data regarding the evolution of texture and structure obtained during forced hot rolling "2800" with subsequent thread cooling of the metal were used for comparison.

In conclusion, this article contributes to a deeper understanding of processes occurring during the hot rolling of aluminum alloys and provides valuable insights into the impact of recrystallization on the final structure and material properties.

Key words: *modeling, hot rolling, structure, aluminum, deformation, anisotropy, recrystallization, Zener-Hollomon parameter, Kolmogorov-Avrami equation.*

Відомості про авторів

Чмих Катерина В'ячеславівна – аспірантка першого року навчання Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: catherina099@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8873-4436>).

Волковський Ігор Володимирович – асистент кафедри агроінженерії і технічного сервісу. Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008).

Chmykh Kateryna – postgraduate of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: catherina099@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8873-4436>).

Volkovskiy Igor – assistant at the Department of Agroengineering and Technical Service, Vinnytsia National Agrarian University (VNAU), 3 Sontsivna Street, Vinnytsia, Ukraine, 21008.