**Стаднік М.І.**

д.т.н., доцент

Труханська О.О.

к.т.н., доцент

Бубновська І.А.

к.т.н., ст. викладач

Купчук І.М.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Stadnik M.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Trukhanska O.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Bubnovska I.**Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer**Kupchuk I.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.77****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-6****ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ГАРЯЧОГО
ПРОКАТУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ТА
МІКРО- І МАКРОСТРУКТУРУ
ЗАГОТОВОК КОМПРЕСОРНИХ
ЛОПАТОК**

У роботі досліджено вплив основних параметрів гарячого прокатування — температури початку деформації, швидкості обертання валків, ступеня деформації та параметрів калібру — на формування якості, точності профілю, мікро- та макроструктури заготовок для компресорних лопаток газотурбінних двигунів. Встановлено, що для жароміцних сталей і титанових сплавів визначальним є раціональне поєднання температури деформації та швидкості прокатування, які регулюють інтенсивність рекристалізації, подрібнення зерна, накопичення пластичної деформації та теплові градієнти в зоні контакту «метал–валки».

Проведено математичне моделювання напружено-деформованого стану методом скінченних елементів із використанням калібру типу «круг–овал», що дало змогу простежити зміну інтенсивності деформацій, енергетичної щільності та температурних полів на різних етапах проходження заготовки через калібр. Аналітичні й експериментальні дослідження показали, що оптимальний діапазон температури та ступеня деформації забезпечує зменшення структурної неоднорідності на 20–35%, зниження ймовірності утворення центральних дефектів і покращення макроструктури внаслідок активізації динамічної рекристалізації.

Порівняльний аналіз гарячого та холодного прокатування підтвердив, що гаряча деформація знижує силові навантаження, забезпечує обробку жароміцних і складнолегованих матеріалів та формує рівнозернисту структуру, тоді як холодне прокатування підвищує точність профілю, але супроводжується зростанням твердості та залишкових напружень. На основі результатів сформульовано рекомендації щодо вибору режимів гарячого прокатування для підвищення довговічності та експлуатаційної надійності компресорних лопаток.

Ключові слова: Заготовки, технологічний процес, деформація, вальцювання, пластична деформація, напружено-деформований стан, пластичність, деформаційне протягування, макро- і мікроструктура, гаряче прокатування, дослідження.

Вступ. Надійність, термін служби, конструкційна міцність та вартість газотурбінних двигунів значною мірою залежать від досконалості технології виготовлення їх найскладніших і найвідповідальніших компонентів, серед яких особливе місце займають лопатки компресорів і турбін. Під час

експлуатації ці лопатки піддаються значним циклічним, статичним і динамічним навантаженням. У разі несприятливого поєднання відхилень від розрахункових режимів роботи та погіршення якості матеріалу під час виготовлення, напружений стан лопатки може досягти критичних значень. Забезпечити



високу якість матеріалу та надійність лопаток можливо шляхом застосування ефективних технологічних процесів, одним із яких є вальцювання. При цьому важливим є правильний вибір і обґрунтування раціональних параметрів цього процесу.

Вальцювання заготовок є різновидом прокатки і поділяється на такі види:

- формувальне, призначене для отримання фасонних заготовок для подальшого штампування на пресі або молоті;
- штампувальне, що дозволяє виготовляти штамповки, зокрема заготовки лопаток гарячим вальцюванням;
- калібрувальне, що застосовується для точного холодного вальцювання деталей замість механічної обробки різанням, зокрема для тонкопрофільних компресорних лопаток.

Найбільшого поширення нині отримало формувальне вальцювання у ковальських цехах, де його використовують для профілювання заготовок на валках. Використання цього методу дозволяє економити метал на 15–20%, підвищувати продуктивність на 50–150% та зменшувати собівартість поковок на 10–25% [1].

Під час вальцювання заготовка деформується в процесі обертання валків, на яких закріплені штампи — або на частині кола валків, або на всій їх довжині. Рівчаки штампів відповідають формі та розмірам необхідної заготовки. У разі багаторівчкової обробки кожний рівчак виготовляють на окремому секторі або кільці, що дозволяє при необхідності його замінювати. Мінімальна ширина секторів-штампів повинна перевищувати ширину рівчака на 4–5 мм.

Компресорні лопатки газотурбінних двигунів працюють в умовах складних термомеханічних навантажень, що висуває жорсткі вимоги до якості матеріалу та однорідності структури заготовок. Практика виробництва свідчить, що традиційні методи виготовлення (лиття, штампування, обробка різанням) не завжди забезпечують стабільність механічних властивостей та геометричної точності. Одним із найбільш перспективних шляхів удосконалення технології є застосування гарячого прокатування фасонних заготовок, яке забезпечує ефективне формування профілю, зниження припусків та покращення структури матеріалу. [2, 7].

Однак кінцевий результат процесу визначається сукупністю режимних параметрів — температурою, швидкістю деформації, обтисненням, геометрією калібру та умовами тепловідведення. Тому дослідження впливу цих параметрів на якість формування заготовок є актуальним завданням сучасного

матеріалознавства та технології виробництва ГТД.

Мета роботи. Встановлення закономірностей впливу основних параметрів гарячого прокатування на мікро- та макроструктуру заготовок компресорних лопаток, а також визначення оптимальних режимів, що забезпечують мінімізацію структурної неоднорідності та зниження дефектності матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Теоретичні основи формування деформаційного стану

У процесі гарячого прокатування напружено-деформований стан заготовки характеризується інтенсивністю деформації [3–5].

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (1)$$

та інтенсивністю напружень

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}. \quad (2)$$

Генерація тепла в зоні деформації описується рівнянням:

$$Q = \eta \sigma_i \varepsilon_i \quad (3)$$

де η — коефіцієнт тепловиділення (0.85–0.95).

Підвищення Q веде до локального росту температури та прискорення рекристалізації.

Моделювання процесу “круг–овал”

Розрахункове моделювання виконано для заготовки зі сталей класу 12CrNi та титанових сплавів типу Ti-6Al-4V.

Основні етапи моделювання:

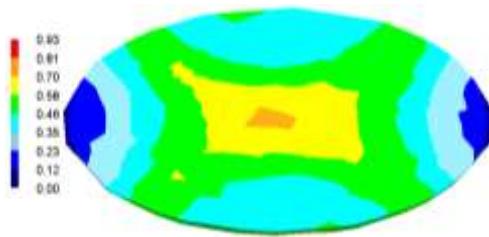
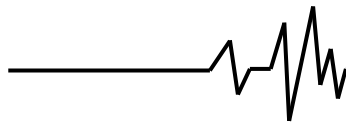
1. Побудова 3D-моделі осередку деформації.

2. Застосування методу скінченних елементів.

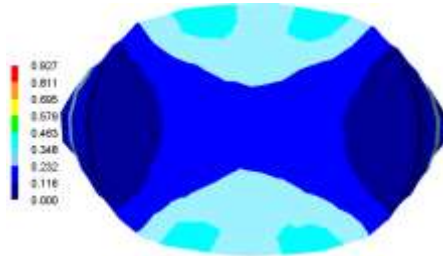
3. Введення контактної взаємодії “валки–заготовка”.

4. Розв’язання тепломеханічної задачі з урахуванням тертя та тепловіддачі.

Визначено особливості розподілу інтенсивності деформацій та напружень на різних етапах процесу — від початку навантаження до проміжної та завершальної стадій рис. 1. Проведено аналіз просторової нерівномірності температурного поля в зоні деформування: встановлено зниження температури в областях контакту інструмента із заготовкою та на її вільній поверхні (діаметр 25 мм), а також локальне підвищення температури в осередку інтенсивної деформації рис. 2.

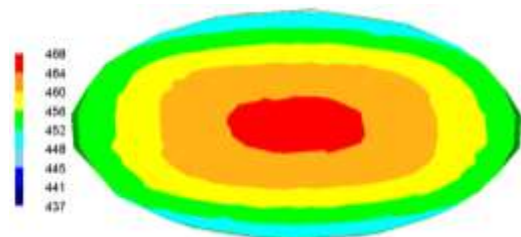


а) в розрізі 1-го перерізу

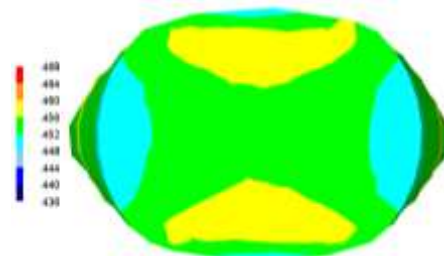


б) в розрізі 3-го перерізу

Рис. 1. Розподіл інтенсивності деформацій



а) в розрізі 1-го перерізу



б) в розрізі 3-го перерізу

Рис. 2. Розподіл нерівномірності температури

Вплив параметрів прокатування на структуру матеріалу.

Температура початку деформації.

Підвищення температури понад 1050–1100 °C (сталі) або 940–960 °C (титанові сплави) приводить до укрупнення зерна:

$$d = d_0 + k(T - T_{кр}) \quad (4)$$

де $T_{кр}$ – температура початку рекристалізації.

Швидкість обертання валків [6-7].

Надто висока швидкість викликає недостатній час для рекристалізації → різке зростання градієнтів твердості.

Ступінь деформації.

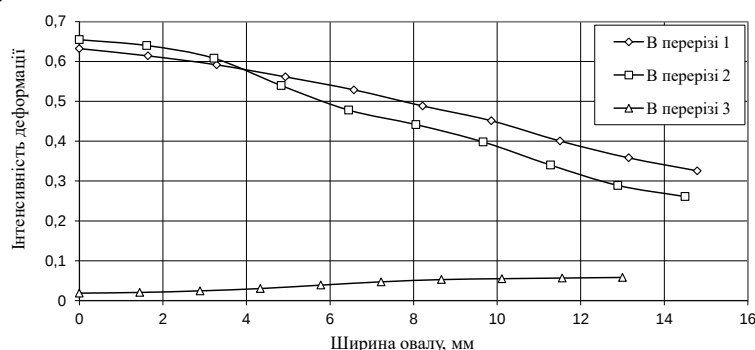
Для оптимального формування структури обтиснення має бути у межах 8–18 % за прохід. [8-9]

Таблиця 1 – Вплив параметрів гарячого прокатування на характеристики структури заготовки

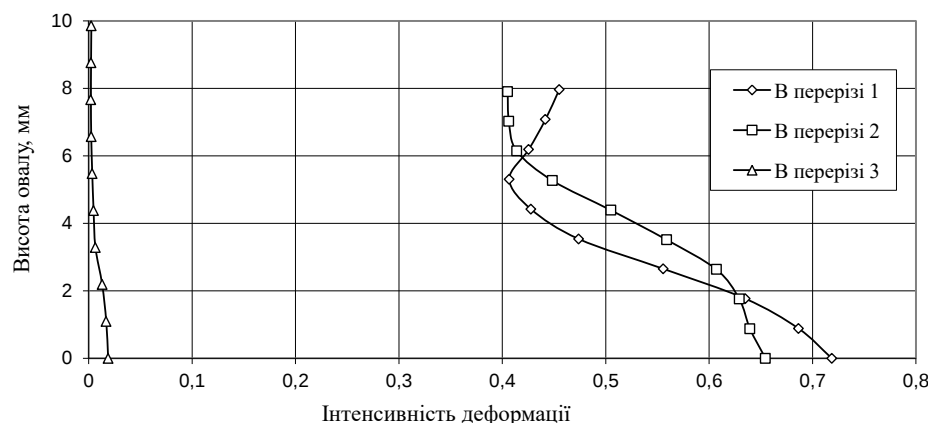
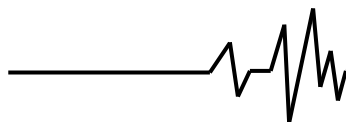
Параметр	Низьке значення	Оптимальне	Високе значення
Температура, °C	Тверда деформована структура	Дрібнозерниста структура	Укрупнення зерна
Швидкість, м/с	Нерівномірність деформації	Стабільність ϵ_i	Перегрів зони деформації
Деформація, %	Низький рівень рекристалізації	Оптимальна рекристалізація	Тріщини на краях
Розмір зерна, мкм	18–25	8–12	30–40

Для побудови залежності інтенсивності деформації від лінійних розмірів овалу брали по 10 точок по висоті та ширині овалу. Таким чином, було побудовано для заготовки Ø25мм

розподіл нерівномірності деформації ϵ_i по перерізах у напрямі осі X (рис. 3, а) і осі Y (рис. 3, б).



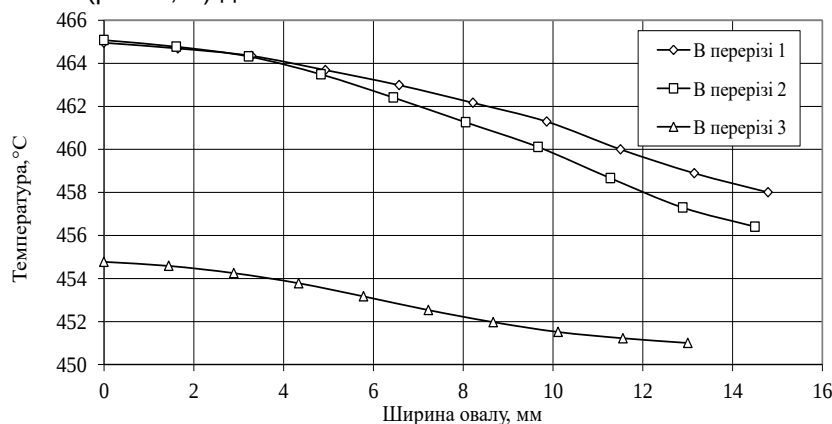
а)



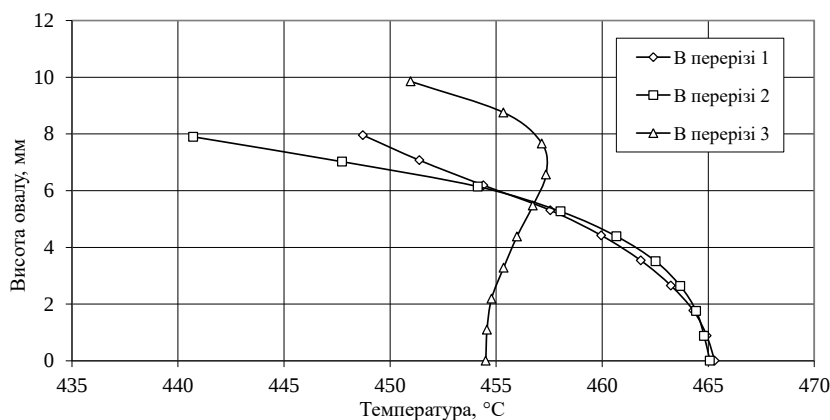
б)

Рис. 3. Розподіл нерівномірності інтенсивності деформації ϵ_i для заготовки $\varnothing 25$ мм по перерізах: а) у напрямі осі X; б) у напрямі осі Y.

Аналогічно визначена нерівномірність $\varnothing 25$. За такою ж схемою визначені відповідні розподілу температури по перерізах у напрямі нерівномірності для заготовок $\varnothing 35$ мм. осі X (рис. 4, а) і осі Y (рис. 4, б) для заготовки



а)

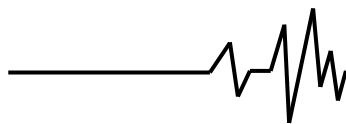


б)

Рис. 4. Розподіл нерівномірності температури для заготовки $\varnothing 25$ мм: а) у напрямі осі X; б) у напрямі осі Y

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що параметри гарячого прокатування мають суттєвий вплив на характер формування мікро- та макроструктури заготовок компресорних

лопаток. Визначено, що оптимальний температурний діапазон деформації забезпечує інтенсивну рекристалізацію та сприяє формуванню дрібнозернистої рівномірної структури, тоді як відхилення в бік



підвищених температур веде до укрупнення зерна та зниження міцності. Аналіз впливу швидкості деформації показав, що надмірне зростання швидкості викликає локальний перегрів і формування температурних градієнтів, які погіршують якість поверхні та спричиняють неоднорідність структури. Доведено, що саме поєднання температури, швидкості й ступеня обтиснення визначає характер розподілу інтенсивності деформації та величину накопиченої енергії, що впливає на розвиток рекристалізації. Оптимальні режими гарячого прокатування дозволяють зменшити структурну неоднорідність на 20–35 % та покращити макроструктуру заготовок, що є важливим для підвищення довговічності компресорних лопаток газотурбінних двигунів. Отримані результати можуть бути використані для розроблення нових технологічних схем з мінімальними припусками та підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Список використаних джерел

1. Ghosh, S., & Chatterjee, A. *Hot Working Behavior of Titanium Alloys*. Springer, 2018.
2. Hosford, W. F., & Caddell, R. M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 2014.
3. Zhou, J., & Lin, J. FE Modelling of Thermomechanical Rolling Processes for Aerospace Alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019.
4. Semiatin, S. L. *Metallic Materials: Thermomechanical Processing*. ASM International, 2015.
5. Reed, R. C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2008.
6. Utsunomiya, H., & Yoshida, M. "Microstructural Evolution in Hot Rolling of Ti-6Al-4V Alloy." *Journal of Materials Processing Technology*, 2017.
7. Матвійчук В.А., Бубновська І.А. Моделювання температурних і деформаційних полів у процесах гарячого деформування. ДДМА, 2015.
8. Кришук Н.Г., Гунько І.В. Деформаційні процеси у фасонних калібрах при гарячому прокатуванні. *Обробка матеріалів тиском*, 2019.
9. Скрябін С.А., Кришук Н.Г., Гунько І.В. Теплові процеси та термічні деформації при вальцюванні заготовок. *Обробка матеріалів тиском*, 2011.

References

1. Ghosh, S., & Chatterjee, A. (2018). *Hot Working Behavior of Titanium Alloys*. Springer, [in

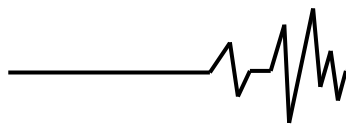
English].

2. Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2014). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press. [in English].
3. Zhou, J., & Lin, J. (2019). FE Modelling of Thermomechanical Rolling Processes for Aerospace Alloys. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019. [in English].
4. Semiatin, S. L. (2015). *Metallic Materials: Thermomechanical Processing*. ASM International. [in English].
5. Reed, R. C. (2008). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press. [in English].
6. Utsunomiya, H., & Yoshida, M. (2017). "Microstructural Evolution in Hot Rolling of Ti-6Al-4V Alloy." *Journal of Materials Processing Technology*. [in English].
7. Matviychuk V.A., Bubnovska I.A. (2015). Modeling of temperature and deformation fields in hot deformation processes. *DSMA*. [in Ukrainian].
8. Kryshchuk N.G., Gunko I.V. (2019). Deformation processes in shaped gauges during hot rolling. *Pressure processing of materials*. [in Ukrainian].
9. Skryabin S.A., Kryshchuk N.G., Gunko I.V. (2011). Thermal processes and thermal deformations during rolling of blanks. *Processing of materials by pressure*. [in Ukrainian].

INFLUENCE OF HOT ROLLING PARAMETERS ON THE QUALITY AND MICRO- AND MACROSTRUCTURE OF COMPRESSOR BLADES BLANKS

The paper investigates the influence of the main parameters of hot rolling—namely the initial deformation temperature, roll rotational speed, degree of deformation, and groove geometry—on the formation of quality, profile accuracy, and the micro- and macrostructure of billets intended for compressor blades of gas turbine engines. It is established that for heat-resistant steels and titanium alloys, the decisive factor is the rational combination of deformation temperature and rolling speed, as these parameters govern the intensity of recrystallization, grain refinement, accumulation of plastic deformation, and thermal gradients in the metal-roll contact zone.

Mathematical modeling of the stress-strain state was performed using the finite element method with a "round-oval" groove scheme, which made it possible to trace the evolution of strain intensity, energy density, and temperature fields at different stages of billet passage through the groove. Analytical and experimental studies demonstrated that an optimal range of temperature and deformation degree ensures a reduction in structural inhomogeneity by 20–35%, lowers the risk of central



defect formation, and improves the macrostructure due to the intensification of dynamic recrystallization.

A comparative analysis of hot and cold rolling showed that hot deformation significantly reduces force loads, enables processing of heat-resistant and complex-alloyed materials, and promotes the formation of a uniform equiaxed grain structure. In contrast, cold rolling provides high profile accuracy but is accompanied by increased hardness

and residual stresses, which may limit further plastic deformation. Based on the obtained results, recommendations are formulated for selecting hot rolling regimes aimed at increasing the service life and operational reliability of compressor blades. **Keywords:** Billet, deformation, drawing, plastic deformation, stress-strain state, plasticity, technological process, deformation drawing, macro- and microstructure, hot rolling.

Відомості про авторів

Стаднік Микола Іванович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. e-mail: stadnik_mykola@vsau.vin.ua).

Труханська Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: seaswallow@ukr.net).

Бубновська Ірина Анатоліївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: biana25100@gmail.com).

Купчук Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: kupchuk.igor@i.ua; <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Stadnik Mykola – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine. e-mail: stadnik_mykola@vsau.vin.ua).

Trukhanska Olena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).

Bubnovska Iryna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: biana25100@gmail.com).

Kupchuk Ihor – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: kupchuk.igor@i.ua; <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

Стаття надійшла 08.12.2025

Стаття прийнята 15.12.2025

Опубліковано 25.12.2025