

**ЯКІВЧУК СЕРГІЙ**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0157-1812>e-mail: [serhiyakivchuk@gmail.com](mailto:serhiyakivchuk@gmail.com)**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ТА МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ТВЕРДІННЯ БЕТОНІВ**

*В статті розглядається швидкість зростання міцності теплової обробки бетону, збільшення міцності бетону в логарифмічній залежності та вплив теплообміну на якість бетону. Важливою частиною є опис фізичних процесів при прогріві бетону. Виявлено, що під час теплової обробки бетону можна виокремити три основні періоди кінетики зростання його міцності. Описані моделі для термообробки бетону з використанням сонячної енергії.*

**Ключові слова:** бетон, міцність, водонепроникність, термосилова технологія, енергоефективність.

**YAKIVCHUK SERHIY**

Vinnytsia National Agrarian University

**RESEARCH OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES DURING CONCRETE CURING**

*The article examines the speed of strength growth during the heat treatment of concrete, the logarithmic increase in concrete strength, and the effect of heat exchange on the quality of concrete. An important point is the description of physical processes during the heating of concrete. Heat treatment of concrete has a positive effect on its characteristics, such as strength, frost resistance, waterproofing and durability.*

*Therefore, when developing new technologies for construction, it is important to take into account optimization of energy consumption and reduction of production time. In addition, the article focuses on how temperature regimes influence the kinetics of concrete hardening. The controlled heating of mixtures accelerates hydration processes, contributing to the rapid formation of a dense and durable structure.*

*This is especially relevant for industrial construction, where reducing the duration of technological cycles directly affects overall productivity and economic efficiency. The study emphasizes that the logarithmic pattern of strength gain allows predicting the performance of concrete at different stages of heat exposure, ensuring stable quality in mass production. In connection with the large consumption of electricity at enterprises, it is important to look for more efficient ways of its use. Currently, there is a tendency to develop new construction technologies based on alternative energy sources. The transition to such methods not only reduces energy costs but also minimizes the environmental impact of construction materials production. Improper use of electricity jeopardizes the need to implement energy-saving measures in the country.*

*The energy sector of Ukraine needs special attention from the state, including the stimulation of the use of alternative energy sources and the search for new solutions. Strengthening energy independence and improving the efficiency of industrial processes will create conditions for sustainable development of construction technologies and ensure the stability of the national economy.*

**Keywords:** concrete, strength, water resistance, thermopower technology, energy efficiency.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Яківчук Сергій

**Постановка проблеми у загальному вигляді****та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Теплова обробка бетону позитивно впливає на його характеристики, такі як міцність, морозостійкість, водонепроникність і довговічність. Тому під час розробки нових технологій для будівництва важливо враховувати оптимізацію енергоспоживання та скорочення часу виробництва. У зв'язку з великим споживанням електроенергії на підприємствах необхідно шукати ефективніші способи її використання. Наразі спостерігається тенденція до розробки нових будівельних технологій на основі альтернативних джерел енергії. Нецільове або нераціональне використання електроенергії ставить під загрозу впровадження енергозберігаючих заходів у країні. Енергетичний сектор України потребує особливої уваги з боку держави, зокрема стимулювання використання альтернативних джерел енергії та пошуку нових рішень [1–4].

**Аналіз досліджень та публікацій**

Теплові методи, які набули найбільшого поширення у виробництві збірного бетону, потребують детальнішого розгляду, оскільки для досягнення необхідних властивостей бетону під час виготовлення залізобетонних виробів часто необхідно враховувати режими прогріву та низку інших факторів [5–6].

Як відомо, підвищення температури сприяє прискоренню хімічних реакцій. Підвищення температури бетону активізує взаємодію між водою і цементом, що призводить до прискорення процесу твердіння бетону.

Попри це, фазовий склад продуктів гідратації цементу практично не змінюється за різних температур.

Зростання міцності бетону при нагріванні може бути виражене у вигляді логарифмічної залежності, але з відповідними коефіцієнтами.

$$R = A(\log t - \log t_0) \quad (1)$$

де  $A$  — параметр, що характеризує поведінку цементу під час нагрівання за прийнятих умов випробування, МПа;

$t$  — час теплової обробки, який включає період ізотермічного витримування  $t_1$  та частину часу нагріву й охолодження, протягом якого температура зразків перевищувала  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $t_0$  — індукційний період твердіння, год (тобто попередній етап перед формуванням міцної структури) [7–8].

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідити енергоєфективну технологію теплової обробки бетонних виробів із використанням альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, з метою підвищення якості готової продукції, зменшення енергоспоживання та скорочення тривалості виробничого циклу.

#### Виклад основного матеріалу

Міцність бетону, яку можна отримати в результаті теплової обробки, залежить від типу використаного цементу.

Оскільки швидкість зростання міцності в період теплової обробки досягає максимуму в перші години, а потім різко зменшується, практично недоцільно продовжувати обробку до досягнення максимально можливої міцності. Зазвичай теплову обробку завершують, коли міцність бетону становить 70–80 % від максимальної можливої. У такому разі забезпечується достатня інтенсивність зростання міцності після обробки та досягнення заданої середньої міцності бетону через 28 днів. При цьому тривалість прогріву скорочується в 2–3 рази порівняно з необхідною для досягнення максимальної міцності (табл. 1).

При цьому передбачається, що нагрівання починається приблизно через 2 години після формування виробу, а підйом температури здійснюється плавно (протягом 3 годин до  $80\text{ }^\circ\text{C}$ ) [9–12].

Застосування коротших режимів, ніж зазначено в таблиці 1, призводить до перевитрати цементу.

Якщо враховувати вплив цементу на міцність бетону під час нагрівання та тривалість теплової обробки, то найпридатнішими для цих цілей є шлакопортландцементи, особливо ті, що містять значну кількість шлаку, а також середньоалюмінатні цементи з високим вмістом  $\text{C}_3\text{S}$ . Важливо зазначити, що характер зростання міцності бетону під час теплової обробки залежить від складу бетону та інших чинників. Зокрема, зниження водоцементного відношення сприяє пришвидженню твердіння під час нагрівання та інших методів теплової обробки.

Таблиця 1

Вплив мінералогічного складу цементу на граничну міцність бетону при прогріванні

Вид цементу	Середня активність цементу, МПа	Відношення Граничної Міцності бетону R, до активності цементу	Орієнтовний час досягнення граничної міцності, год	Тривалість ізотермічної витримки для досягнення $0,8R_{пр}$ , год
Портландцемент:				
1 групи	32,5	1,45	27-33	12
2 групи	35,0	1,15	15-18	6
3 групи	27,5	1,10	10-12	4
Швидкоотвердіючий цемент	39,0	1,05	12-15	3
Шлакопортланд-цемент:				
з 30% шлака	24,0	1,55	25-30	8
з 50% шлака	17,0	1,85	27-30	14

Наведені дані та рекомендації стосуються випадків, коли тепла обробка здійснюється відповідно до рекомендованих оптимальних режимів. Відхилення від цих режимів може призвести до суттєвого погіршення властивостей бетону, включаючи появу тріщин та інших дефектів у виробі [13–14].

Нагрівання бетону призводить до його розширення. Утворені нові цементні компоненти фактично збільшують об'єм бетону. Під час охолодження бетон стискується, однак сформована структура перешкоджає цьому, унаслідок чого в бетоні залишаються деформації, тобто його об'єм після теплової обробки перевищує початковий. Збільшення об'єму призводить до підвищення пористості бетону та зниження його міцності. Крім того, під час нагрівання можуть утворюватися мікротріщини та інші дефекти, які хоч і незначно змінюють пористість бетону, але можуть суттєво знизити його міцність [15–17].

Під час довготривалого твердіння бетон набуває найбільшої міцності, а його об'єм є найменшим за певної кількості матеріалів, оскільки це забезпечує найвищу щільність новоутворених цементних структур. Цим вимогам відповідає процес укладання та початкового твердіння бетону при температурі  $0 \dots +4 \text{ }^\circ\text{C}$ , адже за  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  густина води досягає максимуму [18].

Також важливим є усадка цементного каменю під час твердіння. Додатковий поровий об'єм, який виникає внаслідок усадки, слугує резервним простором, куди може витіснитися вода під час розширення, що сприяє зменшенню дефектів у структурі бетону.

Утворення надлишкового тиску в бетоні залежить від режиму нагрівання. Зазвичай бетон нагрівають із поверхні, тому надлишковий тиск виникає переважно на поверхні. За повільного нагрівання надлишковий тиск, як правило, незначний, оскільки міграція вологи з області підвищеного тиску до холодніших частин виробу та дифузія пари сприяють його зниженню. Однак за дуже швидкого нагрівання ці чинники не встигають спрацювати, і надлишковий тиск різко зростає, що в окремих випадках може призвести до серйозних дефектів, зокрема — до здуття верхньої поверхні виробів [19].

Тепло- та масообмін під час обробки суттєво впливають на якість нагрітого бетону. За таких умов виробу відчувають значні температурні та вологісні градієнти, що спричиняє рух води та газової фази всередині бетону, що призводить до розпушення його структури. У разі неправильно відрегульованих режимів теплової обробки волога може випаровуватися з бетону, уповільнюючи гідратацію цементу та залишаючи капіляри, що різко підвищує проникність бетону і погіршує його термін служби [20].

Під час теплової обробки необхідно прагнути до того, щоб температурні та вологісні градієнти були мінімальними або не перевищували граничних значень, при яких починається руйнування бетону. Ці граничні значення залежать від міцності бетонної структури до нагрівання та інших факторів і можуть бути визначені експериментально. Використання гарячих бетонних сумішей, коли виріб формується із заздалегідь нагрітої бетонної суміші до певної температури, сприяє зменшенню руйнування через тепло- та масообмін.

Під час нагрівання бетону можуть відбуватися різні фізичні процеси, що протікають за різних умов і за певного догляду за бетоном: теплопередача, теплообмін і втрата рідини (рис. 1, 2, 3).

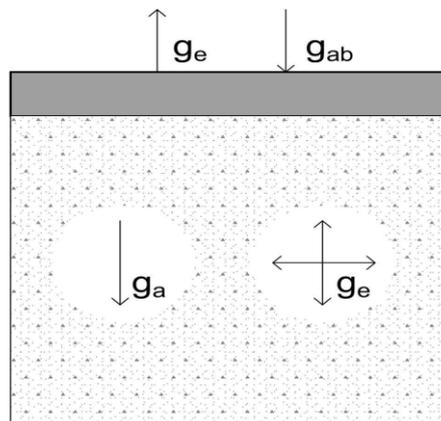


Рис. 1. Теплообмін у бетоні

( $g_e$  — тепловий потік випаровування,  $g_{ab}$  — тепловий потік поглинання,  $g_a$  — тепловий потік накопичення,  $g_{ex}$  — тепловий потік екзотермічної реакції)

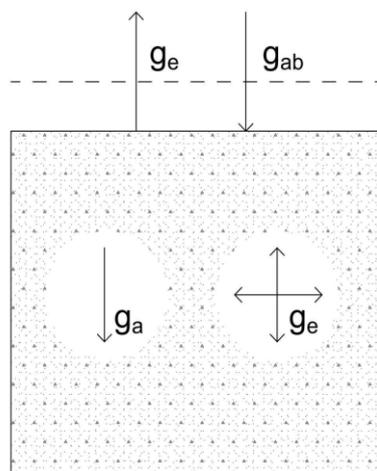
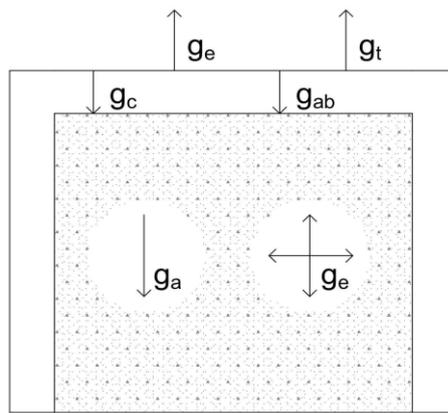


Рис. 2. Теплообмін у бетоні з періодичним змочуванням поверхні

( $g_e$  — тепловий потік випаровування,  $g_{ab}$  — тепловий потік поглинання,  $g_a$  — тепловий потік акумулювання,  $g_{ex}$  — тепловий потік екзотермічної реакції)



**Рис. 3. Теплообмін у бетоні з періодичним змочуванням поверхні**  
( $g_e$  — тепловий потік випаровування,  $g_{ab}$  — тепловий потік поглинання,  
 $g_a$  — тепловий потік акумулювання,  $g_{ex}$  — тепловий потік екзотермічної реакції)

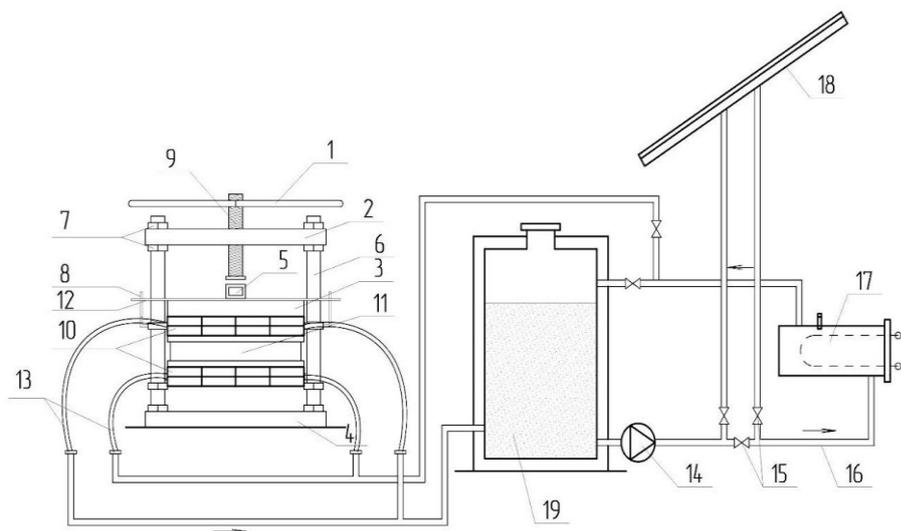
Виявлено, що під час теплової обробки бетону можна виділити три основні періоди кінетики зростання його міцності. Перший період триває 2–3 години після початку теплової обробки, у цей час при підвищенні температури міцність бетону збільшується незначно, що відповідає індукційному періоду гідратації цементу.

Другий період, який триває від 4 до 7 годин під час ізотермічного витримування, характеризується безперервним зростанням міцності бетону до 50–70 %. Зі збільшенням тривалості ізотермічного прогріву до 6–10 годин настає третій період, у якому інтенсивність наростання міцності зменшується, спостерігається стале чергування фаз зростання та спадання міцності з незначною тенденцією до підвищення.

Такий характер кінетики зростання міцності під час теплової обробки бетону є важливим для розробки комбінованих систем та установок із використанням сонячної енергії. Комбінований метод теплової обробки бетону передбачає застосування різних теплоносіїв за оптимального режиму їх використання, що впливає на енергетичний баланс системи.

Економічні переваги цього методу включають мінімальні витрати на теплоакумулювальні матеріали та їхню легку доступність. Вартість акумулювання енергії має бути конкурентною щодо економії паливно-енергетичних ресурсів, що може впливати на собівартість виготовлення продукції на підприємстві.

Для моделювання процесу нагрівання матеріалу була розроблена лабораторна модель теплової установки з комбінованою сонячною системою (рис. 4).



**Рис. 4. Теплова установка з комбінованою сонячною системою**

Установка працює наступним чином. Бетонна суміш заливається у форму (11) і розміщується між тепловими блоками (10). За допомогою важеля (1) встановлюється навантаження, а шток (9), проходячи через отвір верхньої плити (2), передає навантаження на теплові блоки (10) через рухомих плити (3), яку утримують арматурні елементи (8 і 12). Напрямні колонки служать опорами (6) і базою (4), які фіксуються гайками (7). Теплові блоки (10) вмикаються. Датчик тиску (5) показує силу навантаження. Процес нагрівання відбувається у замкненому просторі, тому теплові блоки одночасно нагрівають і пресують суміш.

Нагрів теплових блоків здійснюється так: вода, що циркулює у системі, нагрівається за допомогою сонячного колектора (18). Нагріта вода насосом (14) подається в акумулятор (19), звідки потрапляє у теплову

установку по гнучких трубках (13), в яких розміщена прес-форма з бетонною сумішшю (11), передаючи частину тепла тепловим блокам (10). Далі вода по трубопроводу (16) повертається до сонячного колектора (18). За потреби використовується додаткове джерело тепла — теплогенератор з нагрівальним елементом (17). Рух води в системі забезпечує насос (14). Для регулювання напрямку і перекриття потоку води служать крани (15).

По завершенню циклу теплової обробки установка вимикається, бетон дають плавно охолонути та вивільняють від тиску, щоб уникнути руйнування.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Під час нагрівання бетону можуть відбуватися різні фізичні процеси, які в подальшому потребують детальнішого дослідження.

Досягнення необхідних якісних показників бетону можливе лише за умови ретельного ущільнення бетонних сумішей.

Тепло прискорює хімічні реакції. Підвищення температури бетону активізує взаємодію води та цементу і пришвидшує твердіння бетону.

Запропонувати новий метод виробництва бетонних виробів, у якому нагрів бетону відбувається за рахунок сонячної енергії. Оптимально підібране обладнання зменшує річне споживання енергії для підігріву води на 50–60% і енергії з електромережі — на 50–70%. У період з квітня по вересень правильно встановлена система покриває 95% потреб у теплі та енергії.

Моделювання процесів тепло- та масообміну під час твердіння матеріалу базується на узгодженому комплексному впливі сукупності технологічних операцій стискання бетону та нагрівання, в результаті чого формується структура бетону, а отже, і його властивості — в умовах створення пластичної деформації кристалічного каркасу цементного каменю. Нагрівання є дуже витратним процесом, тому виникає потреба у пошуку альтернативних методів нагріву бетону. Одним із таких методів є використання сонячної енергії.

Встановлено, що в процесі теплової обробки бетону спостерігаються три основні періоди кінетики зростання його міцності.

#### Література

1. Дудар, І. Н., Гарнага, В. Л., Яківчук, С. В., & Друкований, М. Ф. (2022). Використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*, 27–30.
2. Collepari, M. (2006). *The new concrete*. Grafiche Tintoretto.
3. Schmidt, M. (2006). Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton. In *16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL* (Tagungsband 2, pp. 1405–1416).
4. Long, G., He, Z., & Omran, A. (2012). Heat damage of steam curing on the surface layer of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 64(11), 995–1004. doi:10.1680/mac.11.00164
5. Phan, L. T., & Carino, N. (2002). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*, 99(1), 54–66.
6. Phan, L. T. (2008). Pore pressure and explosive spalling in concrete. *Materials and Structures*, 41(10), 1623–1632. doi:10.1617/s11527-008-9353-2
7. Lee, J. W., Son, H. W., & Hyun, S. K. (2019). Hot deformation behavior of AA6005 modified with CaO-added Mg at high strains. *Journal of Alloys and Compounds*, 774, 1081–1091.
8. Посвятенко, С., Посвятенко, Н., Будяк, Р., Швець, Л., Паладійчук, Ю., Аксом, П., Рибак, І., Сабадаш, Б., & Григоришен, В. (2018). Вплив матеріалу та технологічних факторів на покращення експлуатаційних властивостей деталей машин за допомогою рельєфів і плівкових покриттів. *Східноєвропейський журнал передових технологій*, 5(12(95)), 48–56.
9. Пулупец, М., & Швець, Л. (2019). Характеристики та термомеханічні режими гарячої деформації алюмінієвих сплавів. *Актуальні проблеми транспорту*, 195–203.
10. Матвійчук, В., Штуць, А., Колісник, М., Купчук, І., & Деревенко, І. (2022). Дослідження штампування трубчастих, циліндричних заготовок прокаткою із застосуванням комп'ютерного моделювання. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 66(1), 51–58.
11. Штуць, А., Колісник, М., Видмиш, А., Возняк, О., Барабан, С., & Кулаков, П. (2020). Покращення процесів штампування прокаткою труб та циліндричних лопаток на основі експериментальних досліджень. *Key Engineering Materials*, 844, 168–181.
12. Солоня, О., Деревенко, І., & Купчук, І. (2019). Визначення пластичності для попередньо деформованої заготовки. *Solid State Phenomena*, 291, 110–120.
13. Гайдамак, О. Л. (2023). Закономірності відновлення резерву пластичності та метод його розрахунку при деформації з проміжною термообробкою. *Металлофізика і нові технології*, 45(10), 1189–1204.
14. Гайдамак, О. Л., & Гранік, В. Ф. (2023). Дослідження процесів формування металевих покриттів методом холодного газодинамічного розпилення та розробка методики розрахунку режимів розпилення. *Металлофізика і нові технології*, 45(12), 1485–1498.
15. Возняк, О., Полієвода, Ю., Купчук, І., Труханська, О., Швець, Л., & Замрій, М. (2023). Розробка алгоритму виявлення об'єктів у півтонових зображеннях. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99(11), 192–195.

16. Ren, J., Wang, R. C., Feng, Y., Peng, C. Q., & Cai, Z. Y. (2019). Microstructure evolution and mechanical properties of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc (7055) alloy processed by modified powder hot extrusion with post aging. *Vacuum*, *161*, 434–442.
17. Алієв, Е. Б., Бандура, В. М., Пришляк, В. М., Яропуд, В. М., & Труханська, О. О. (2018). Моделювання механічних і технологічних процесів у сільському господарстві. *INMATEH – Agricultural Engineering*, *54*(1), 95–104.
18. Hao, P. J., He, A., & Sun, W. Q. (2018). Formation mechanism and control methods of inhomogeneous deformation during hot rough rolling of aluminum alloy plate. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *18*, 245–255.
19. Li, D. F., Zhang, D. Z., Liu, S. D., Shan, Z. J., Zhang, X. M., Wang, Q., & Han, S. Q. (2016). Dynamic recrystallization behavior of 7085 aluminum alloy during hot deformation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *26*(6), 1491–1497. doi:10.1016/S1003-6326(16)64254-1
20. Liu, S. H., Pan, Q. L., Li, H., Huang, Z. Q., Li, K., He, X., & Li, X. Y. (2019). Characterization of hot deformation behavior and constitutive modeling of Al-Mg-Si-Mn-Cr alloy. *Journal of Materials Science*, *54*(5), 4366–4383.

## References

1. Dudar, I. N., Harnaha, V. L., Yakivchuk, S. V., & Drukovanyi, M. F. (2022). Use of solar energy for thermo-force treatment of concrete. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, 27–30.
2. Collepardi, M. (2006). *The new concrete*. Grafiche Tintoretto.
3. Schmidt, M. (2006). From nanotechnology to ultra-high-strength concrete. In *16th International Conference on Building Materials (IBAUSIL)* (Vol. 2, pp. 1405–1416).
4. Long, G., He, Z., & Omran, A. (2012). Heat damage of steam curing on the surface layer of concrete. *Magazine of Concrete Research*, *64*(11), 995–1004. <https://doi.org/10.1680/mac.11.00164>
5. Phan, L. T., & Carino, N. (2002). Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*, *99*(1), 54–66.
6. Phan, L. T. (2008). Pore pressure and explosive spalling in concrete. *Materials and Structures*, *41*(10), 1623–1632. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9353-2>
7. Lee, J. W., Son, H. W., & Hyun, S. K. (2019). Hot deformation behavior of AA6005 modified with CaO-added Mg at high strains. *Journal of Alloys and Compounds*, *774*, 1081–1091.
8. Posviatenko, Ye., Posviatenko, N., Budiak, R., Shvets, L., Paladiichuk, Yu., Aksom, P., Rybak, I., Sabadash, B., & Hryhoryshen, V. (2018). Influence of material and technological factors on improving the performance properties of machine parts using reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(12(95)), 48–56.
9. Pulpets, M., & Shvets, L. (2019). Characteristics and thermomechanical modes of hot deformation of aluminum alloys. *Actual Problems of Transport*, 195–203.
10. Matviichuk, V., Shtuts, A., Kolisnyk, M., Kupchuk, I., & Derevenko, I. (2022). Study of rolling forging of tubular and cylindrical billets using computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, *66*(1), 51–58.
11. Shtuts, A., Kolisnyk, M., Vydmysh, A., Vozniak, O., Baraban, S., & Kulakov, P. (2020). Improvement of rolling forging processes of tubes and cylindrical blades based on experimental research. *Key Engineering Materials*, *844*, 168–181.
12. Solona, O., Derevenko, I., & Kupchuk, I. (2019). Determination of plasticity for a pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*, *291*, 110–120.
13. Haidamak, O. L. (2023). Regularities of restoring the plasticity reserve and a method for its calculation during deformation with intermediate heat treatment. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, *45*(10), 1189–1204.
14. Haidamak, O. L., & Hranik, V. F. (2023). Study of metal coating formation processes by cold gas-dynamic spraying and development of a method for calculating spraying regimes. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, *45*(12), 1485–1498.
15. Vozniak, O., Polievoda, Yu., Kupchuk, I., Trukhanska, O., Shvets, L., & Zamrii, M. (2023). Development of an algorithm for detecting objects in halftone images. *Przegląd Elektrotechniczny*, *99*(11), 192–195.
16. Ren, J., Wang, R. C., Feng, Y., Peng, C. Q., & Cai, Z. Y. (2019). Microstructure evolution and mechanical properties of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc (7055) alloy processed by modified powder hot extrusion with post aging. *Vacuum*, *161*, 434–442.
17. Aliiev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes in agriculture. *INMATEH – Agricultural Engineering*, *54*(1), 95–104.
18. Hao, P. J., He, A., & Sun, W. Q. (2018). Formation mechanism and control methods of inhomogeneous deformation during hot rough rolling of aluminum alloy plate. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *18*, 245–255.
19. Li, D. F., Zhang, D. Z., Liu, S. D., Shan, Z. J., Zhang, X. M., Wang, Q., & Han, S. Q. (2016). Dynamic recrystallization behavior of 7085 aluminum alloy during hot deformation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *26*(6), 1491–1497. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64254-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64254-1)
20. Liu, S. H., Pan, Q. L., Li, H., Huang, Z. Q., Li, K., He, X., & Li, X. Y. (2019). Characterization of hot deformation behavior and constitutive modeling of Al-Mg-Si-Mn-Cr alloy. *Journal of Materials Science*, *54*(5), 4366–4383.