

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНОЇ ВИТРИМКИ У ПРОЦЕСІ СФЕРОЇДИЗУЮЧОГО ВІДПАЛУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

**Анотація.** Для гетерогенних сплавів істотну роль в забезпеченні необхідного комплексу технологічних властивостей грає структурний стан, в даному випадку – морфологія мікроструктури, що отримується після термічної обробки. В разі використання холодної висадки необхідна технологічна пластичність забезпечується сферичною (глобулярною) морфологією часток надлишкових фаз. У зв'язку з цим, сталеві заготовки, призначені для здобуття виробів холодною висадкою, піддають сфероїдизуючому відпалу, який, в основному, здійснюється в печах з тривалістю режиму до десяти і більше годин. У зв'язку з цим операція сфероїдизуючого відпалу характеризується значними енергетичними витратами. Для інтенсифікації процесу сфероїдизації запропоновано різні схеми попередніх обробок, які ґрунтуються на збільшенні дисперсності часток карбідів і дефектності кристалічної решітки матриці шляхом зниження температури розпаду аустеніту в області евтектоїдного перетворення. При цьому тривалість процесу скорочувалася до декількох годин при практично незмінному типі режиму відпалу. Вивчення особливостей інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу та факторів, які впливають на швидкість процесу сфероїдизації цементиту низьковуглецевих сталей має велике практичне значення. В даній роботі досліджено використання нагріву оброблювального металу внутрішнім теплоносієм із застосуванням неізотермічної витримки з підвищенням температури та глибоким переохолодженням у процесі сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевої сталі, вплив перелічених факторів на тривалість процесу сфероїдизації. Встановлено, що максимальне скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалу з попередньо підготовленою вихідною структурою досягається за рахунок реалізації режиму з глибоким переохолодженням та неізотермічною витримкою (з підвищенням температури). При цьому нагрівання металу здійснюється внутрішнім теплоносієм, що забезпечує отримання ефекту прискорення формування нового зерна. Скорочення тривалості процесу за глибокого переохолодження та неізотермічною витримкою досягається оптимізацією значень термодинамічного та кінетичного факторів, що визначають швидкість процесу структурних перетворень.

© М. О. Соболенко, 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

**Ключові слова:** сфероїдизуючий відпал, нагрів внутрішнім теплоносієм, неізотермічна витримка, тривалість процесу сфероїдизації.

**Посилання для цитування:** Соболенко М. О. Особливості застосування неізотермічної витримки у процесі сфероїдизуючого відпалювання низьковуглецевої сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 156-165. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-009>

## **Вступ**

Термічна обробка, як спосіб підготовки металу до подальшої холодної пластичної деформації, реалізується за допомогою різних технологічних процесів. Відомо, що сталі для холодної висадки повинні мати в вихідному стані структуру зернистого перліту певного балу. Для отримання карбідної фази з глобулярною морфологією використовують сфероїдизуючий відпал [1, 2, 3]. Існують два класичних режими сфероїдизуючого відпалу: відпал за субкритичних температур і відпал з неповною фазовою перекристалізацією. Недоліком вказаних режимів сфероїдизуючого відпалу є велика їх тривалість (кілька десятків годин). Велика тривалість такого режиму термічної обробки призводить до значних витрат енергоресурсів.

Зазначену термічну обробку здійснюють у садових печах (шахтного або ковпакового типу в захисному середовищі) або в печах безперервної дії. Проте обом схемам термічної обробки, що здійснюються в печах, притаманні традиційні недоліки нагрівання металу зовнішнім теплоносієм [5]. Тому питання пов'язані з розробкою режимів і способів інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу є актуальними.

**Мета дослідження** – вивчення особливостей застосування неізотермічної витримки з підвищенням температури та глибоким переохолодженням у процесі сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевої та низьколегованої сталі.

## **Матеріал і методика дослідження**

Для проведення досліджень використано зразки катанки діаметром 6,5 – 9,0 мм зі сталі 20Г2Р, яку в даний час широко використовують для отримання високоміцних кріпильних виробів. Термічна обробка зразків сталі проводилась на лабораторній установці з використанням високошвидкісного електроконтактного нагрівання та водоповітряного охолодження металу.

Дослідження особливостей структуроутворення виконані із застосуванням диференціально – термічного методу аналізу [6]. Дослідження мікроструктури зразків проводили з використанням оптичного мікроскопу «Neophot-21». Вимірювання твердості зразків

проводили за шкалою Віккерса пристроєм ТП – 7P1, механічні властивості визначали за одновісного розтягування на машині FU – 10000ez.

### **Виклад основного матеріалу досліджень**

З відомих способів, які забезпечують скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалу, можна відокремити ті, що пов'язані з електротермічною обробкою сталевих заготовок. Таким чином, перспективним щодо інтенсифікації процесу відпалу є застосування електроконтактного або індукційного нагріву, тобто нагріву внутрішнім теплоносієм. Такі способи термічної обробки мають ряд технологічних переваг у порівнянні з класичними режимами сфероїдизуючого відпалу сталі [4, 5].

У роботі [2] показана можливість здобуття значної інтенсифікації процесу сфероїдизуючого відпалу за використанням електротермічної обробки із попередньою підготовкою заготовки на бейнітні структури. У зазначеній роботі наведено термодинамічне обґрунтування ефекту прискорення процесу сфероїдизації, що пов'язане з отриманням відповідного вихідного стану, а також показано «технологічний внесок» електротермічної обробки до інтенсифікації процесу на основі застосування ефекту інтенсивного зростаючого процесу зародження нових зерен [7]. Вказаний ефект реалізується завдяки локальному підвищенню температури в мікрообластях біля міжфазної межі ферит/цементит, тобто саме там, де швидкість дифузії компонентів є вирішальною для розглянутого структурного перетворення.

На рис. 1 наведено схему еволюції скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалу сталі, що досягається різними способами.

З наведених на рис. 1 даних виокремлюються три основні фактори, що найпомітніше впливають на тривалість процесу сфероїдизації. Останнє підтверджується даними, отриманими за режимами № 4, № 5 і № 6 на розглянутій схемі. Перший фактор (режим за № 4) є суто технологічним і полягає у переході від нагрівання металу зовнішнім теплоносієм до нагрівання внутрішнім теплоносієм. Другим фактором є попередня підготовка структури перед здійсненням сфероїдизуючого відпалу, яка регламентується у різний спосіб. Третій фактор передбачає проведення відпалу з глибоким переохолодженням і неізотермічною витримкою з підвищенням температури.

Розглядаючи рис. 1 можна зробити висновок про те, що максимальний ефект інтенсифікації процесу сфероїдизації карбідної фази досягається саме за електротермічної обробки з відповідною підготовкою відповідного структурного стану, що передедує відпалу.

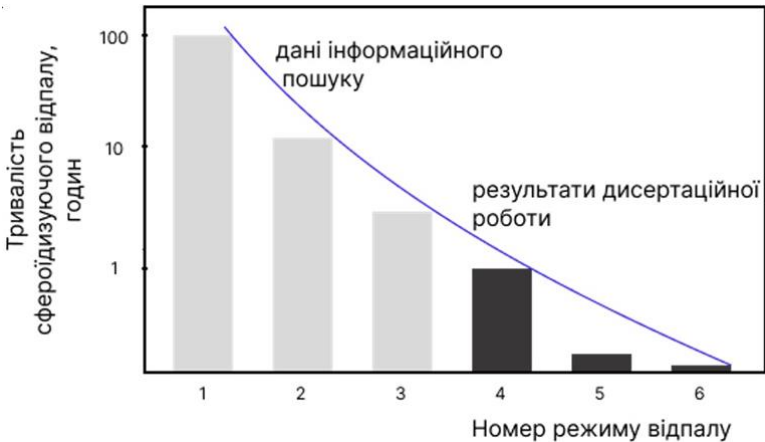


Рисунок 1 – Діаграма еволюції скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалювання сталі. Умовні позначення: 1 – відпалювання за субкритичних температур; 2 – відпалювання з частковою фазовою перекристалізацією; 3 – відпалювання з частковою фазовою перекристалізацією та підготовкою структури шляхом попереднього прискореного охолодження з аустенітної області; 4 – відпалювання з використанням електроконтактного або індукційного нагріву; 5 – теж саме + регламентована підготовка структури (обробка на феритно-бейнітну структуру); 6 – теж саме + відпалювання з глибоким переохолодженням і неізотермічною витримкою з підвищенням температури у процесі сфероїдизації

Подальший аналіз показав, що за раніше використовуваних режимах сфероїдизуючого відпалу процес сфероїдизації здійснюється або при ізотермічних витримках, або при охолодженні з невеликою швидкістю нижче точки  $A_{C1}$ . В той же час детальний розгляд термодинаміки процесу сфероїдизації дозволяє зробити висновок про те, що застосування режимів, у яких процес сфероїдизації здійснюється при неізотермічній витримці з підвищенням температури після попереднього глибокого переохолодження, повинно привести до додаткової та істотної інтенсифікації розглянутого процесу. Такий висновок було експериментально підтверджено (рис. 2) після порівняльної оцінки параметрів відповідних режимів з ізотермічною (рис 2, а) та неізотермічною витримкою (рис. 2,б) з підвищенням температури [8].

Варто зазначити, що, як можна бачити з рис. 2, режим б призводить не тільки до відміченого скорочення тривалості сфероїдизації, але й набагато більш рівномірному розподілу глобул цементиту у феритній матриці. Останній результат слід виділити як дуже істотний, оскільки

для низьковуглецевих сталей отримання рівномірного розподілу глобул у матриці завжди було проблемою, яка раніше не мала задовільного вирішення.

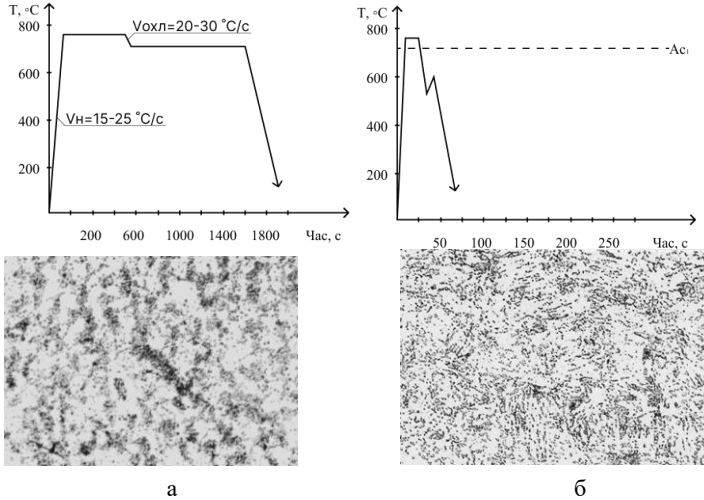


Рисунок 2 – Режими сфероїдируючого відпалу та мікроструктура зразків сталі 20Г2Р; а – перліт зернистий, бал 5; б – перліт зернистий, бал 1; х500

Окрім того, важливо відзначити, що збільшення ступеня рівномірності розподілу глобул карбідів у феритній матриці призводить до підвищення технологічних властивостей сталеві заготовки під час холодної висадки, що реалізується у можливості отримання виробів складної геометричної форми з високим показником виходу придатної продукції.

Інтенсифікація процесу сфероїдируючого відпалу з використанням неізотермічної витримки з підвищенням температури може бути розтлумачена наступним чином. Як зазначено в роботі [2], швидкість структурного перетворення, в тому числі й швидкість сфероїдизації можна описати наступним виразом:

$$V_{сф} = A \cdot \nu \cdot \frac{\Delta G_{TRC}}{\Delta X} \cdot T\Phi \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_{ак}^D}{RT}\right), \quad (1)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що призводить до використовуваної розмірності швидкості стосовно даного СП, (моль · м)/Дж;  $\nu$  – частотний фактор,  $с^{-1}$ ;  $\frac{\Delta G_{TRC}}{\Delta X}$  – градієнт вільної енергії поміж відповідними структурними складовими, Дж/моль · м;  $\Delta G_{ак}^D$  – енергія активації дифузії компоненту, що визначає швидкість процесу, Дж/моль;  $R$  – універсальна газова

постійна, Дж/моль;  $T$  – абсолютна температура процесу, К;  $T\Phi$  – термодинамічний фактор.

Аналіз виразу 1 показує, що у випадку ізотермічної витримки значення термодинамічного фактору знижується як із збільшенням часу ізотермічної витримки, так й з підвищенням температури (рис.3).

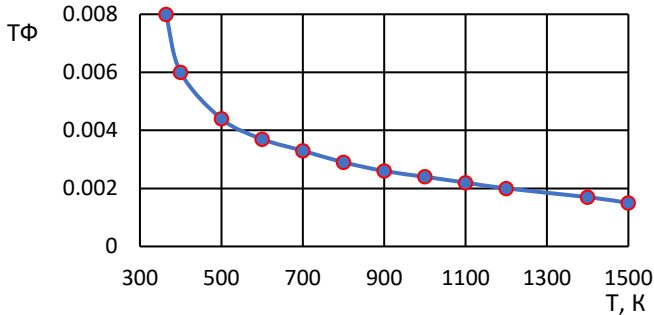
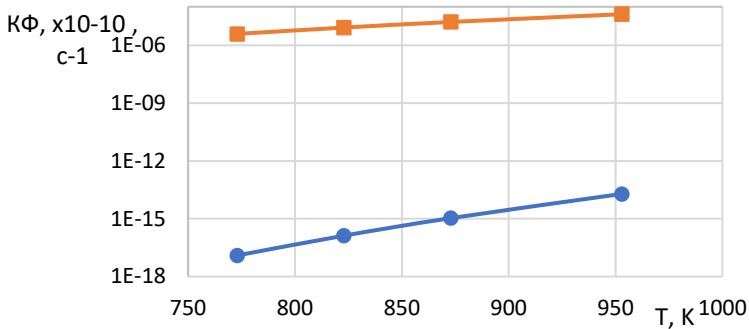


Рисунок 3 – Залежність термодинамічного фактору від температури процесу сфероїдизації [9]

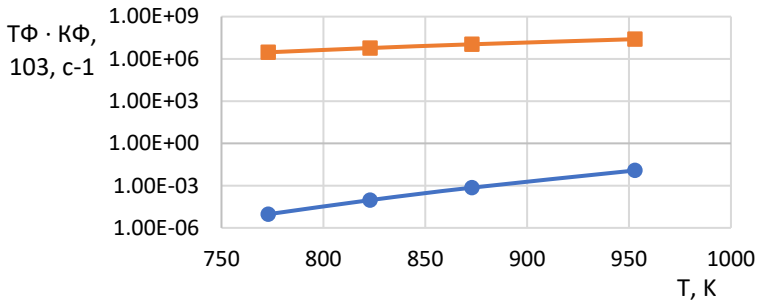
Тому, згідно з виразом (1), відбувається зменшення термодинамічного фактору та відповідно з цим зменшення швидкості сфероїдизації, оскільки кінетичний фактор за ізотермічної витримки залишається постійним.

У разі використання неізотермічної витримки (з підвищенням температури), термодинамічний фактор з підвищення температури також зменшується (рис. 3), але це зниження термодинамічного фактору може бути компенсовано збільшенням кінетичного фактору з підвищенням температури. Відповідні розрахунки за формулою (1) та отримані результати аналітичних досліджень, які наведено на рис. 4 у вигляді графічних залежностей зміни кінетичного та термодинамічного факторів у дослідному інтервалі температур, підтверджують це ствердження.

Оскільки в застосовуваному інтервалі температур за неізотермічної витримки з підвищенням температури зростання кінетичного фактору із надлишком компенсує зниження термодинамічного фактору, тому швидкість процесу сфероїдизації цементиту збільшується, що відображається у фіксованому істотному зменшенні тривалості термічної обробки. Слід вважати, що оптимізуючи співвідношення між зміною значень термодинамічного та кінетичного факторів для структурних перетворень взагалі, буде забезпечуватися додаткова інтенсифікація зміни морфології структури за структурних перетворень.



а



б

Рисунок 4 – Графіки зміни кінетичного фактору (а) та спільного впливу термодинамічного та кінетичного факторів (б) від температури у процесі сфероїдизації цементиту

## Висновки

В роботі розглянуто низька факторів, спрямованих на скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей. Визначено основні з них, які включають:

- підготовку структури та використання нагріву внутрішнім теплоносієм під час здійснення режиму сфероїдизуючого відпалу сталі;
- забезпечення максимального скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалу за рахунок реалізації режиму з глибоким переохолодженням та неізотермічною витримкою з підвищенням температури;
- скорочення тривалості процесу сфероїдизації цементиту досягається оптимізацією значень термодинамічного та кінетичного факторів, що визначають швидкість процесів структурних перетворень.

## Перелік посилань

1. Долженков І. Є. Шляхи суттєвого скорочення часу (тривалості) та покращення якості сфероїдизації карбідів сталевій металопродукції. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудівництво*. Вип. 58. 2011. С. 262-267.
2. Гуль Ю. П., Колпак В. П., Соболенко М. О. Роль термодинамічного чинника у інтенсифікації процесу сфероїдизації цементиту. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудівництво*. 2009. Вип. 48. Ч. 2. С. 30-35.
3. Колпак В. П., Гуль Ю. П., Соболенко М. О. Інтенсифікація процесу сфероїдируючого відпалу сталі. *Енергозберігаюче обладнання для термічної обробки*. 2009. С. 10-13.
4. Колпак В. П., Лещенко А. М., Полторацький Л. М., Бояринцева А. В. Комплексні лінії електротермічної обробки сталю прокату та дроту. *ОТТОМ-4*. 2003. Ч. 1. С. 42-44.
5. Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М. О. Новітні металургійні технології на основі використання високопродуктивних багатопроектних обчислювальних комплексів. *Теорія та практика металургії*. 2013. № 3 – 4(92 – 93). С. 78-87.
6. *Диференційно-термічний аналіз та технології термічної обробки*. Монографія./ О. П. Клименко, А. І. Карнаух, О. І. Буря, В. І. Сітар. Дніпропетровськ: Пороги, 2008. 322 с.
7. Kaputkin A. P. Correlation between the thermokinetic parameters of diffusional decomposition and the activation energy of diffusion in steel and nonferrous alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2005. V.99. №4. pp.343 – 347.
8. Спосіб термічної обробки прокату з низько- і середньовуглецевих сталей для холодного висадження: патент на корисну модель 36892 Україна: МПК(2006) C21D 1/26, C21D 1/78. № u200807153. заяв. 23.05.2008. опубл. 10.11.2008. Бюл. № 21. 6 с.
9. Гуль Ю. П., Цуран В. М. Вплив коефіцієнта форми часток надлишкової фази у гетерофазних сплавах на термодинамічний стимул процесу сфероїдизації часток. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудівництво*. 2006. Вип. 35 Ч. 3. С.78-83.

### References

1. Dolzhenkov, I. Ye. (2011). Ways to significantly reduce the time (duration) and improve the quality of spheroidization of carbides of steel metal products. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 58, 262-267
2. Gul, Yu. P., Kolpak, V. P., & Sobolenko, M. A. (2009). The role of Thermodynamic factors in the intensification of the process of cementite spheroidization. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 48, 30-35
3. Kolpak, V. P., Gul, Yu. P., & Sobolenko, M. A. (2009). Intensification of the process of spheroidizing annealing of steel. *Enerhozberihayuche obladnannya dlya termichnoyi obrobky*, Sloviansk, 10-13
4. Kolpak, V. P., Lashchenko, A. M., Poltoratsky, L. M., & Boyaryntseva, A. V. (2003). Complex lines for electrothermal treatment of rolled steel and wire. *ОТТОМ – 4*, 1, 42-44
5. Ivashchenko, V. P., Shvachych, G., & Sobolenko, M. O. (2013). New metallurgical technologies based on the use of high-performance multiprocessor

computing complexes. *Theory and practice of metallurgy*, 3-4 (92-93), 78-87

6. Klimenko, A. P., Karnaukh, A. I., Burya, A. I., & Sitar, V. I. (2008). Differential thermal analysis and heat treatment technologies. Porogi

7. Kaputkin, D. E. (2005). Correlation between the thermokinetic parameters of diffusional decomposition and the activation energy of diffusion in steel and nonferrous alloys. *Physics of Metals and Metallography*, 99, 4, 343-347.

8. Kolpak, V., Leschenko, A., Ivchenko, O., Sobolenko, M., & Kokashynska, H. Patent of Ukraine No. 36892. *Method of heat treatment of rolled products from low and medium carbon steels for cold heading*. State Patent Office of Ukraine, Bulletin No. 21. 6 p.

9. Gul, Yu. P., & Tsuran, V. M. (2006). Influence of the shape coefficient of particles of the excess phase in heterophase alloys on the thermodynamic stimulus of the particle spheroidization process. *Construction, Materials Science, Mechanical Engineering*, 36, 3, 78 – 83

**M. O. Sobolenko**<sup>1,\*</sup> Senior Lecturer, ORCID 0000-0002-8653-5262

<sup>1</sup> *Ukrainian State University of Science and Technologies*

\* *Corresponding author: m.o.sobolenko@ust.edu.ua*

### **PECULIARITIES OF THE APPLICATION OF NON-ISOTHERMAL HOLDING IN THE PROCESS OF SPHEROIDIZING ANNEALING OF LOW-CARBON STEEL**

**Abstract.** For heterogeneous alloys, a significant role in ensuring the required set of technological properties is played by the structural state, in this case the morphology of the microstructure obtained after heat treatment. In the case of cold heading, the necessary technological plasticity is provided by the spherical (globular) morphology of the excess phase particles. In this regard, steel billets intended for cold heading are subjected to spheroidizing annealing, which is mainly carried out in furnaces with a duration of up to ten hours or more. In this regard, the spheroidizing annealing operation is characterized by significant energy consumption. To intensify the spheroidization process, various schemes of pretreatments have been proposed, which are based on increasing the dispersion of carbide particles and the defectivity of the matrix crystal lattice by reducing the austenite decomposition temperature in the eutectoid transformation region. In this case, the duration of the process was reduced to several hours with a practically unchanged type of annealing mode. The study of the features of intensification of spheroidizing annealing and factors that affect the speed of the spheroidization process of cementite of low-carbon steels is of great practical importance. This work investigates the use of heating the workpiece metal with an internal coolant using non-isothermal holding with increasing temperature and deep supercooling in the process of spheroidizing annealing of low-carbon steel, the influence of the listed factors on the duration of the spheroidization process. It has been established that the maximum reduction in the duration of spheroidizing annealing with a pre-prepared initial structure is achieved by implementing a regime with deep supercooling and non-isothermal holding (with an increase in temperature). In this

case, the metal is heated by an internal coolant, which ensures the effect of accelerating the formation of new grains. Reducing the duration of the process during deep supercooling and non-isothermal holding is achieved by optimizing the values of thermodynamic and kinetic factors that determine the speed of the process of structural transformations.

**Key words:** spheroidizing annealing, heating with an internal coolant, non-isothermal holding, duration of the spheroidization process.

**For citation:** Sobolenko, M. O. (2026). Peculiarities of the application of non-isothermal holding in the process of spheroidizing annealing of low-carbon steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 156-165. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-009>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 04.03.2026*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*