

УДК 669.14:621.785.33.001.2

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.64.1112

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

ГУЛЬ Ю. П.^{1]}, *канд. тех. наук, проф.*,
СОБОЛЕНКО М. О.^{2*}, *ст. викл.*

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, Дніпровський металургійний інститут, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

^{2*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, Дніпровський металургійний інститут, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 561-15-31, e-mail: tom.sobolenko.mariia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

Анотація. Актуальність роботи. Використання економно легованих боровмісних сталей, істотно розширює обсяги виробництва високомісних виробів, одержуваних методами холодного об'ємного штампування. Існуючі способи підготовки металу до холодної пластичної деформації включають операцію сфероїдизуючого відпалу, що характеризується високими енергетичними та тимчасовими витратами. Крім цього традиційні способи підготовки низьковуглецевих сталей до холодної деформації мають такі недоліки: великі витрати електроенергії та газу при відпалі в печах, невисока продуктивність, складність забезпечення рівномірного нагріву та охолодження металевих заготовок, а також забруднення навколишнього середовища. Перспективний напрямок – електротермічна обробка сталевих заготовок, відмінною особливістю якої є високі швидкості нагріву металу. Для розробки швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей потрібне знання закономірностей формування структури та властивостей при нагріві та охолодженні. **Мета дослідження.** Дослідження критичних точок та виявлення особливостей впливу швидкостей охолодження недеформованого аустеніту на об'ємну частку структурних складових сталі 20Г2Р. **Методика.** При вивченні закономірностей структуроутворення використовували диференційно-термічний метод з подальшим дослідженням мікроструктури та твердості зразків сталі. **Результати.** Одержано кількісну та якісну картину структуроутворення при нагріві та охолодженні боровмісних сталей. Експериментально підтверджено можливість розробки швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей з отриманням рівномірного розподілу глобулей цементиту у феритній матриці. Проведені дослідження і аналіз отриманих даних дозволив виконати графічний аналіз структуроутворення досліджуваних сталей вказаного хімічного складу та отримати кількісний вміст структурних складових при охолодженні з різними швидкостями недеформованого аустеніту сталі. Отримані результати експериментальних досліджень структуроутворення можуть бути використані для розроблення різних режимів термічної обробки з окремого нагріву боровмісних сталей.

Ключові слова: відпал сталевих заготовок; механічні властивості; температурний режим; швидкість охолодження; структуроутворення; термомікнетична діаграма; кінетика перетворень недеформованого аустеніту

INVESTIGATION OF THE PATTERNS OF STRUCTURE FORMATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS DURING HEAT TREATMENT

GUL Yu.P.^{1]}, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,
SOBOLENKO M.A.^{2*}, *Sen. Lect.*

¹ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro Metallurgical Institute, 4, Gagarina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

^{2*} Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro Metallurgical Institute, 4, Gagarina Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 561-15-31, e-mail: tom.sobolenko.mariia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

Abstract. The relevance of the work. The use of economically alloyed boron-containing steels significantly expands the production volumes of high-strength products obtained by cold bulk stamping methods. Existing methods for preparing metal for cold plastic deformation include the operation of spheroidizing annealing, which is characterized by high energy and time expenditures. Additionally, traditional methods of preparing low-carbon steels for cold deformation have several drawbacks: high consumption of electricity and gas during annealing in furnaces, low productivity, difficulty in ensuring uniform heating and cooling of metal blanks, and environmental pollution. A promising direction is the electrothermal treatment of steel blanks, distinguished by high metal heating rates. To develop high-speed spheroidizing annealing regimes for low-carbon steels, it is necessary to understand the laws governing the formation of structure and properties during heating and cooling. **Purpose.** To investigate critical points and identify the peculiarities of the influence of cooling rates of undeformed austenite on the volumetric fraction of structural components of 20Mn2B steel. **Methodology.** In studying the regularities of structure formation, the differential thermal method was used, followed by the investigation of the microstructure and hardness of steel samples. **The results.** A quantitative and qualitative picture of structure formation during heating and cooling of boron-containing steels was obtained. The possibility of developing high-speed spheroidizing annealing regimes for low-carbon steels with the achievement of a uniform distribution of cementite globules in the ferritic matrix was experimentally confirmed. Conducted research and analysis of the obtained data allowed for graphical analysis of the structure formation of the studied steels of the specified chemical composition and to obtain the quantitative content of structural components during cooling at different speeds of undeformed austenite of the steel. The results of experimental studies of structure formation can be used to develop various regimes of thermal treatment with separate heating of boron-containing steels.

Keywords: *annealing of steel billet; mechanical properties; temperature regime; cooling rate; structure formation; thermokinetic diagram; kinetics of transformations of underformed austenite*

Вступ. Економнолеговані боровмісні сталі, наприклад сталь марки 20Г2Р, наразі служать перспективним матеріалом для виробництва високоміцних кріпильних виробів. Експлуатаційні характеристики боровмісних сталей у багатьох випадках не поступаються, а в низці випадків перевершують рівень властивостей сталей, які леговані дорого вартісними елементами [1]. Використання боровмісних сталей дозволяє збільшити обсяги виробництва високоміцних виробів, що виготовляються методами холодного об'ємного штампування (ХОШ). Підвищення надійності металевих виробів і конструкцій з них у поєднанні зі зниженням металоємності шляхом надання сталю заготовкам відповідної структури і необхідних властивостей під час термічного оброблення, належать до найважливіших завдань, які наразі стоять перед металознавцями та фахівцями з термічної обробки металу.

Технологія виготовлення високоміцних кріпильних виробів розвивається у напрямку збільшення граничного ступеня деформації заготовок (сортового металопрокату) для ХОШ за істотними ускладненнями форми кріпильних виробів. Тому до структури і властивостей сталей,

що використовуються для виробів цього класу, висувуються додаткові вимоги, а саме однорідність механічних властивостей, підвищений ресурс пластичності та однорідність структури.

Мета дослідження. Конструкційні сталі для холодної висадки повинні мати у початковому стані структуру зернистого перліту певного балу, рівномірно розподіленого в матриці. Така структура, стосовно зазначених сталей, порівняно зі структурою пластинчатого перліту, володіє кращою технологічністю і економічністю під час подальших необхідних обробок металу [2]. Для отримання структури зернистого перліту сортовий металопрокат (катанку) призначений для ХОШ піддають сфероїдизуючому відпалу. Традиційні способи сфероїдизації карбідної фази потребують тривалого часу для реалізації процесу термічної обробки (ТО), характеризуються високими енергетичними витратами та мають ряд інших недоліків [3].

Для скорочення тривалості процесу сфероїдизації застосовуються різноманітні схеми передобробок металопрокату, різні способи та технології комбінаційних обробок гарячекатаного прокату для ХОШ [4]. Вказані передобробки зазвичай ґрунтуються на збільшенні дисперсності

частинок карбідів і дефектності кристалічної решітки матриці шляхом зниження температури розпаду аустеніту в області евтектоїдного (перлітного) перетворення. Схема режиму сфероїдируючого відпалу при цьому принципово не змінюється: відбувається нагрівання з частковою фазовою перекристалізацією і здійснюється сфероїдизація карбідів нижче температури A_{c1} . Тобто сфероїдизація безпосередньо здійснюється у процесі ізотермічної витримки, або у процесі безперервного повільного охолодження, або у процесі охолодження, переривчастого декількома ізотермічними витримками.

Значне скорочення тривалості сфероїдируючого відпалування досягається завдяки застосуванню електротермічної обробки заготовки [5]. Відмінною особливістю вказаної обробки є високі швидкості нагрівання металу, що забезпечуються завдяки використанню висококонцентрованих джерел (електроконтактне або індукційне нагрівання). Однак, треба розуміти, що електротермічна обробка заготовки прискорює процес нагрівання металу до певних необхідних температур (за рахунок чого зменшується загальна тривалість сфероїдируючого відпалування), але при цьому може використовуватися і для створення таких температурних режимів, за допомогою яких забезпечуються умови проведення безпосередньо сфероїдизації цементиту сталевих заготовок. І це, на наш погляд, є новим напрямом розвитку, зокрема, інтенсифікації процесу сфероїдизації цементиту низьковуглецевих сталей, а загалом, в питаннях удосконалення наявних й створення нових технологічних процесів ТО металу.

Знання закономірностей формування структури та необхідного рівня механічних властивостей при швидкісних нагріванні та охолодженні боровмісних сталей дають змогу виконати підготовку структурного стану сталевих заготовок перед відпалуванням, який буде враховувати особливості сфероїдизації цементиту у низьковуглецевих сталях, а також вимоги до структури цих

сталей після відпалу за розподілом глобул цементиту у феритній матриці. Таким чином проведення досліджень закономірностей впливу швидкісних режимів температуро – деформаційної обробки і подальшого регламентованого охолодження сортового прокату з боровмісних сталей для ХОШ на структурні та фазові перетворення в сталях наразі є актуальною проблемою.

Методика. При вивченні закономірностей структуроутворення використовували диференційно-термічний метод з подальшим дослідженням мікроструктури та твердості зразків сталі.

Основні результати досліджень

Для обґрунтованого підходу до розроблення режимів і технології ТО каліброваної сталі для холодного висаджування досліджували критичні точки та кінетику перетворень переохолодженого аустеніту сталі 20Г2Р, наступного хімічного складу: С – 0,2 %; Si – 0,26 %; Mn – 1,2 %; S – 0,011 %; P – 0,026 %; Cr – 0,20 %; Ti – 0,04 %; В – 0,003 %.

При проведенні досліджень використовували високошвидкісне електротермічне нагрівання зразків на лабораторній установці, яка обладнана пристроями водоповітряного охолодження та системою контролю, реєстрації і регулювання процесу нагрівання та охолодження.

Дослідження особливостей структуроутворення виконані із застосуванням диференційально-термічного методу аналізу [6], який дозволяє провести реєстрацію перетворень у металі й встановлення відповідних до них температур (або інтервалів температур) перебудови кристалічної решітки.

Дослідження мікроструктури металу проводили за допомогою мікроскопа «Neophot-21». Шліфи виготовляли за стандартною методикою, застосування збільшення при світловій мікроскопії $\times 50$, $\times 500$ крат. Вимірювання твердості у лабораторних умовах проводили по шкалі Віккерса пристроєм ТП-7Р1, а механічні властивості визначали при одновісному

розтягуванні за стандартною методикою на машині FU-10000 ez.

Проведеними дослідженнями встановлено, що положення критичних точок сталі 20Г2Р вказаного хімічного складу відповідає температурам: $A_{c1} = 720 \text{ } ^\circ\text{C}$; $A_{c3} = 855 \text{ } ^\circ\text{C}$; $M_n = 385 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для визначення режимів ТО та отримання різних структурних станів сталі перед сфероїдизуючим відпалом були побудовані термокінетичні діаграми розпаду переохолодженого аустеніту сталі 20Г2Р (рис. 1).

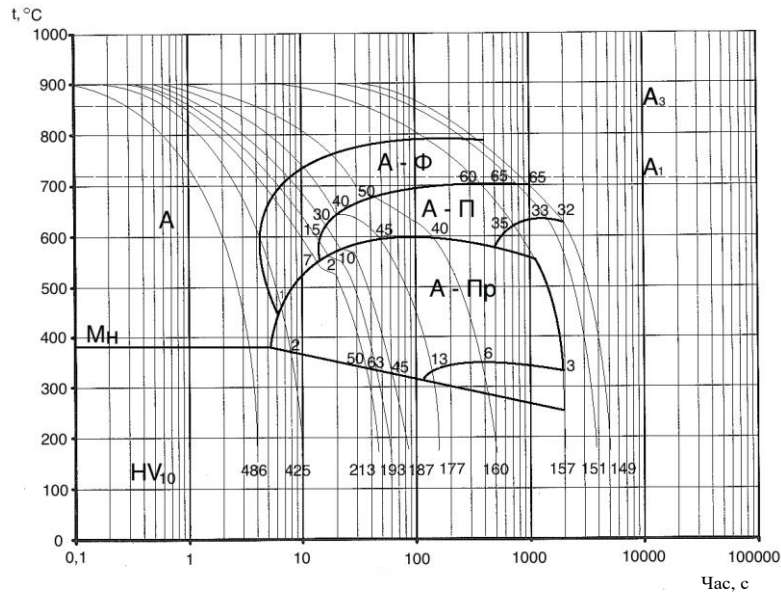


Рис. 1. Термокінетична діаграма перетворення аустеніту боровмісної сталі 20Г2Р

Проведені дослідження і аналіз отриманих даних дозволив побудувати графіки структуроутворення для досліджуваних сталей вказаного хімічного

складу. Кількісний вміст структурних складових, що виникають при охолодженні з різними швидкостями недеформованого аустеніту сталі представлено на рисунку 2.

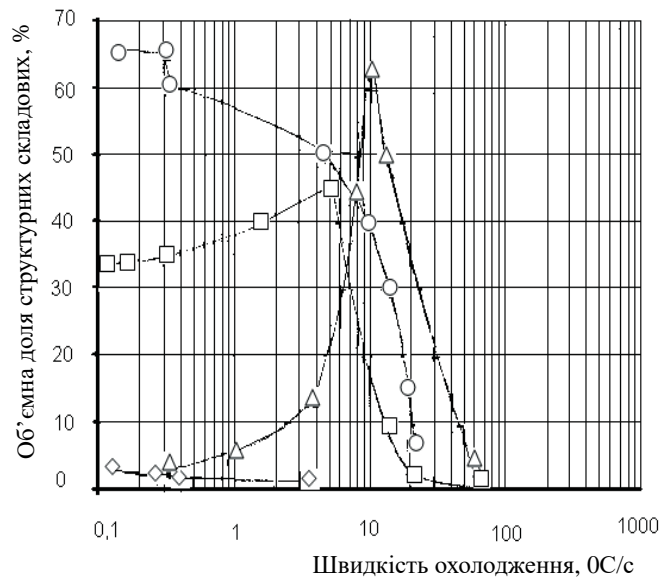


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження на характер перетворення аустеніту сталі 20Г2Р:

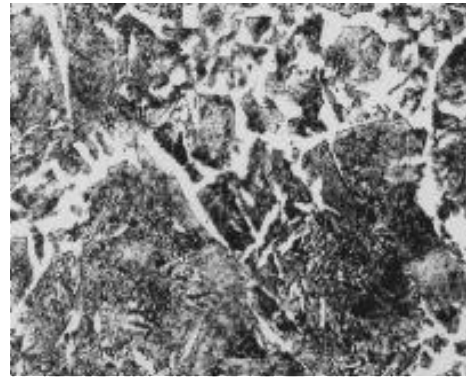
Δ – бейніт; \circ – ферит; \square – перліт

Аналіз диференційних кривих, мікроструктури та властивостей зразків показав (рис. 3, а), що перетворення переохолодженого аустеніту за

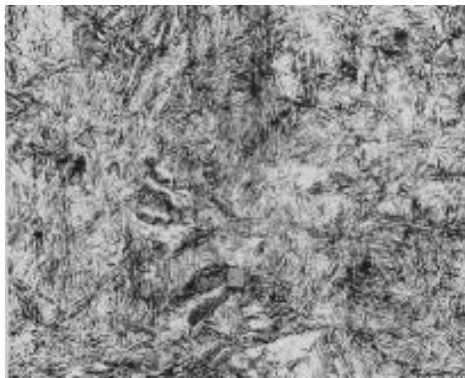
бездифузійним механізмом з утворенням мартенситу відбувається при швидкості охолодження не менш $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Твердість мартенситу при цьому складає HV 486.



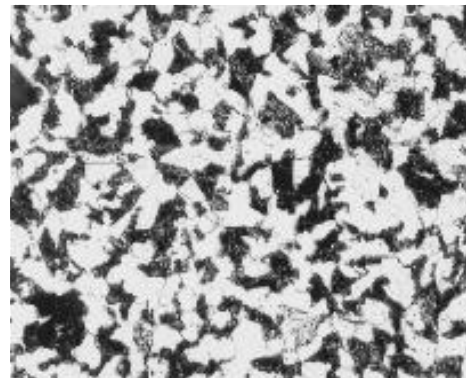
а



б



в



г

Рис. 3. Мікроструктура зразків диференціально-термічного аналізу сталі 20Г2Р:
 а – швидкість охолодження $V_{ox} = 120\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; б – швидкість охолодження $V_{ox} = 110\text{--}115\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$;
 в – швидкість охолодження $V_{ox} = 10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; г – швидкість охолодження $V_{ox} = 0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; $\times 500$

При зниженні швидкості охолодження нижче критичної у температурному інтервалі $600\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ починаються дифузійні процеси з утворенням структурно-вільного фериту. У температурному інтервалі $550\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ дифузійні процеси відбуваються з утворенням структур проміжного типу – бейніту (рис. 3, б). Твердість при цьому зменшується до HV 425.

Зниження швидкості охолодження до $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ викликає переважне виділення структур проміжного типу: кількість бейніту досягає 50 %. В той же час кількість феритної складової не перевищує 7 %.

Твердість при цьому знижується до HV 213. Максимальна кількість бейніту складає 63...65 % відповідно до середньої швидкості охолодження $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Подальше зниження швидкості охолодження викликає різке зростання кількості феритної складової у структурі зразків.

При охолодженні в інтервалі температур $660\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$ (відповідно $V_{ox} = 7\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) відбувається утворення на межах феритних зерен структурно-вільного цементиту (рис. 3, в).

Твердість сталі знижується до HV 187. Охолодження з меншими швидкостями призводить до поступового збільшення

об'ємної частки структурно-вільного фериту (приблизно до 65 %), збільшенню на початку процесу структуроутворення до 45 % частки перліту. Далі частка перліту поступово зменшується до 30 %, а на межах зерен відбувається виділення до 3 % структурно-вільного цементиту з поступовим зменшенням у структурі продуктів проміжного перетворення. Їх виділення при охолодженні зі швидкістю менш $0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ не спостерігається (рис. 3, з). Мінімальна твердість сталі з ферито-перлітною структурою складає HV 149.

Висновки

Отримано якісну і кількісну картину структуроутворення сталі 20Г2Р. Проведені дослідження критичних точок і кінетики розпаду аустеніту за безперервного охолодження можуть бути використані для розроблення різних режимів ТО з окремого нагріву сталі. У результаті проведених досліджень експериментально підтверджена можливість розробки швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей з отриманням рівномірного розподілу глобул цементиту у феритній матриці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Парусов В. В., Парусов О. В., Сичков А. Б. Прокат з боровмісних сталей для високоміцних кріпильних виробів : монографія. Дніпро : Арт-прес, 2010. 160 с.
2. Долженков І. Е. Вплив пластичної деформації та інших предобробок на сфероїдизацію карбидів в сталях. *Теорія і практика металургії*. 2007. № 1 (56). С. 66–68.
3. Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М. О. Новітні металургійні технології на основі використання продуктивних багатопроцесорних обчислювальних комплексів. *Теорія і практика металургії*. 2013. № 3–4 (92–93). С. 78–87.
4. Долженков І. Е. Стан та перспективи термічної та деформаційно-термічної обробки металопрокату. *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії*. 1999. Вип. 1. С. 247–256.
5. Колпак В. П., Лещенко А. Н., Полторацький Л. М. Комплексні лінії електротермічної обробки сталюго прокату та дроту. *Обладнання і технології термічної обробки металів і сплавів : зб. доп. 4-го міжнар. конгр.* Харків, 2003. Т. 1. С. 42–44.
6. Клименко О. П., Карнаух А. І., Буря А.І., Ситар В. І. Диференційно-термічний аналіз і технології термічної обробки : монографія. Дніпро : Пороги, 2008. 323 с.

REFERENCES

1. Parusov V.V., Parusov O.V. and Sichkov A.B. *Prokat z borovmisnykh staley dlya vysokomitsnykh kripyl'nykh vyrobiv : monografiya* [Rolling of boron-containing steels for high-strength fasteners : monograph]. Dnipro : Artpress Publ., 2010, 160 p. (in Ukrainian).
2. Dolzhenkov I.E. *Vplyv plastychnoyi deformatsiyi ta inshykh predobrobok na sferoyidyzatsiyu karbydiv v stalyakh* [The impact of plastic deformation and other pre-treatments on the spheroidization of carbides in steels]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2007, no. 1 (56), pp. 66–68. (in Ukrainian).
3. Ivashchenko V.P., Shvachych G.G. and Sobolenko M.A. *Novitni metalurhiyni tekhnolohiyi na osnovi vykorystannya produktyvnykh bahatoprotsesornykh obchyslyval'nykh kompleksiv* [Advanced metallurgical technologies based on the use of productive multiprocessor computing complexes]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2013, no. 3–4 (92–93), pp. 78–87. (in Ukrainian).
4. Dolzhenkov I.E. *Stan ta perspektyvy termichnokh ta deformatsiyno-termichnoyi obrobky metaloprokatu* [The state and prospects of thermal and thermos-mechanical treatment of metal rolling]. *Naukovi visti. Suchasni problemi metalurhiyi* [Scientific News Modern Problems of Metallurgy]. 1999, iss. 1, pp. 247–256. (in Ukrainian).
5. Kolpak V.P., Leshchenko A.N. and Poltoratsky L.M. *Kompleksni liniyi elektrotermichnoyi obrobky stal'noho prokatu ta drotu* [Integrated lines for electrothermal treatment of steel rolling and wire]. *Obladnannya i tekhnolohiyi termichnoyi obrobky metaliv i splaviv : zb. dop. 4-ho mizhnar. konhr.* [Equipment and technologies for thermal treatment of metals and alloys : proceedings of the 4th International Congress]. Kharkiv, 2003, vol. 1, pp. 42–44. (in Ukrainian).
6. Klymenko O.P., Karnaukh A.I., Burya A.I. and Sytar V.I. *Dyferentsiyno-termichnyy analiz i tekhnolohiyi termichnoyi obrobky : monografiya* [Differential thermal analysis and technologies of thermal treatment : monograph]. Dnipro : Porohy Publ., 2008, 323 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 09.10.2024.