

possibility of obtaining thermogranite with magnetic properties from dispersed iron-graphite waste metallurgy]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serija: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Science*, 2017, vol. 34, pp. 24-30. (Rus.)

Рецензент: В.Б.Семакова  
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 09.02.2018

УДК 621.785:669.15-194.2

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142515

© Ткаченко І.Ф.<sup>1</sup>, Мірошніченко В.І.<sup>2</sup>, Гаврилова В.Г.<sup>3</sup>

### КЕРУВАННЯ МОРФОЛОГІЄЮ ГРАФІТОВОЇ ФАЗИ У ПРОМИСЛОВИХ СІРИХ ЧАВУНАХ З ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

*На підставі раніше отриманих теоретичних та експериментальних даних було досліджено вплив умов ізотермічних витримок при нагріванні на морфологію графітової фази (ГФ) сірих та високоміцних перлітових промислових чавунів. Встановлено два варіанти впливу температури ізотермічної витримки на морфологію ГФ: 1) часткове або повне розчинення існуючих пластин ГФ з утворенням «розірваних»: пластин разом з укрупненими сферичними частинками ГФ, мережі тонких прошарків ГФ по межах феритових зерен; 2) нарощування розмірів існуючих виділень ГФ вздовж всіх поверхонь пластин ГФ та на окремих локальних ділянках поверхонь графітових частинок сферичної морфології. Показано суттєве підвищення спротиву ударному руйнуванню всіх досліджених чавунів. Отримані результати пояснено одночасним розвитком процесів: розпаду цементиту перлітової матриці з подальшим виділенням нових дрібних кристалів ГФ у вигляді сферичних ізольованих частинок або на поверхнях існуючих кристалів ГФ, як на субстраті; коагуляції та сфероїдизації існуючих пластин ГФ; утворення зародків феритових зерен на межах розподілу частинки ГФ/матриця.*

**Ключові слова:** сірі та високоміцні перлітові промислові чавуни, ізотермічна витримка при нагріванні, морфологія графітової фази, спротив ударному руйнуванню.

*Ткаченко И.Ф., Мирошниченко В.И., Гаврилова В.Г. Управление морфологией графитовой фазы в серых чугунах с применением термической обработки. Изучено влияние изотермических выдержек при нагреве на морфологию графитовой фазы (ГФ) в промышленных серых и высокопрочных чугунах. Выявлено два варианта такого влияния: 1) частичное растворение пластин ГФ с образованием «разорванных»: тонких пластин, содержащих отдельные крупные сферические частицы ГФ; «сетки» тонких прослоек ГФ на границах зерен феррита; 2) прирост: общей толщины существующих пластин ГФ или размеров исходных сферических частиц ГФ на отдельных локальных участках их поверхностей. Установлено значительное повышение ударной вязкости всех изученных чугунов.*

**Ключевые слова:** промышленные серые и высокопрочные перлитные чугуны, изотермическая выдержка при нагреве, морфология графитовой фазы, ударная вязкость.

**I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko, V.G. GavriloVA. Control of graphite phase morphology in gray cast irons by heat treatment. Based on the previously obtained theoretic-**

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

<sup>2</sup> ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

*cal and experimental data, the effects of isothermal holding at heating on morphology of graphite phase (GP) in industrial gray and ductile pearlite matrix cast irons were investigated. Two types of the effects were revealed: partial or full dissolution of the existing GP plates and growing up existing GP plates or spherical particles. The dissolution is emerged in forming «broken» thin plates comprising big spherical GP particles. Another dissolution variant was formation of ferrite grain boundary network of thin GP layers. The growing up process appears as increasing: whole thickness of the existing GP plates uniformly along their lengths and dimensions of the initially spherical GP particles on some local interface areas. The above GP morphology change features are attributed to different silicon contents in the cast irons: the higher silicon content stimulates the GP particles grow and vice versa. Formation of fine ferrite grains is also observed on the spherical GP particle / ferrite matrix interfaces. Considerable increase in the impact resistance was revealed after optimal isothermal holdings for all cast irons investigated. The following improvements of the impact strength were reached for gray and ductile cast irons, respectively: from KCU = 51 to 120 kJ/m<sup>2</sup>; from KCU = 89 to 440 kJ/m<sup>2</sup>. The results obtained were explained by the following processes joint development: decomposition of the pearlite matrix cementite with GP formation; coagulation and spheroidizing existing GP plates; ferrite fine grain nucleation on the GP particles-matrix interfaces. In turn, the decomposition results in ultrafine GP crystals appearance and their further accumulation: in the form of spherical isolated particles; as layers on the existing GP spheroid or plate surfaces as substrates.*

**Keywords:** industrial gray and ductile pearlite matrix cast irons, isothermal holding at heating, graphite phase morphology, impact resistance.

**Постановка проблеми.** Графітова фаза (ГФ) в промислових сплавах заліза, як відомо, утворюється за високого вмісту карбону ( $\geq 2,14\%$ ) у присутності сіліцію ( $\geq 1,2\%$ ) в процесі повільного охолодження при кристалізації з рідкого стану. Ця фаза, на відміну від цементиту, є найбільш термодинамічно стабільною в системі Fe-C, у зв'язку з чим її вважають такою, чий стан після кристалізації не змінюється під впливом будь-яких факторів. Характерною типовою особливістю ГФ є несприятлива (пластинчаста) форма її кристалів, що призводить до вкрай низьких стандартних механічних властивостей відповідних сплавів – сірих чавунів. Вказана проблема частково вирішується шляхом модифікування, додавання глобуляризаторів та графітізуючого відпалу. Проте такі проблеми структуроутворення, як: великі розміри кристалів ГФ, неоднорідний розподіл цих кристалів в мікроструктурі, завеликий розмір зерна матриці та ін., дотепер залишаються невирішеними, що обмежує застосування цього класу відносно дешевих та нескладних за технологією виробництва матеріалів, якими є сірі чавуни [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Враховуючи достатньо широке застосування сірих та високоміцних чавунів у різних галузях промисловості (гірничо-видобувна, виробництво цементу, транспорт та ін.), виконано багато досліджень [2-4], спрямованих на підвищення спротиву ударному руйнуванню високоміцних чавунів. Проте роботи виконували на чавунах у термічно необробленому стані або після традиційних режимів термічної обробки.

**Мета роботи** – базуючись на раніше теоретично обґрунтованих та експериментально підтверджених особливостях гетерогенних фазових перетворень в металевих сплавах при нагріванні та охолодженні [2, 5], показати принципову можливість суттєвих змін морфології фаз з високою термодинамічною стабільністю та роботи ударного руйнування сплавів внаслідок їх термічної обробки, на прикладі ГФ у сірих чавунах.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводили з використанням заготовок ударних зразків двох різновидів сірого чавуну СЧ-35 з концентраціями карбону на нижньому (СЧ-35н) та верхньому (СЧ-35в) припустимих рівнях, а також високоміцного чавуну ВЧ-60-2 одного хімічного складу. Термічна обробка всіх чавунів за дослідними режимами виконувалась безпосередньо після їх кристалізації згідно результатів попередніх досліджень [2, 5], і полягала в ізотермічних витримках за температур в інтервалі 700...900°C протягом 0,3...6 годин при нагріванні та охолодженні. Дослідження включали до себе металографічний аналіз та випробування на ударний вигин зразків Менаже. Металографічні дослідження виконувались з застосуванням оптичного мікроскопа «Neophot-21» без травлення та після травлення 4% спиртовим розчином HNO<sub>3</sub>.

Особливості мікроструктури, що виявляються без травлення шліфів, від досліджених різновидів чавуну СЧ-35 (СЧ-35н та СЧ-35в) у початковому, щойно після кристалізації, стані показано, відповідно, на рис. 1, а та 2, а. Можна бачити суттєву різницю у морфології ГФ в залежності від хімічного складу чавуну: менший вміст карбону та силіцію (див. рис. 1, а) призводить до загального зменшення об'ємної частки та помітного подрібнення кристалів ГФ у порівнянні з рис. 2, а. В той же час, за такого найкращого, отриманого після кристалізації варіанту мікроструктури, форма кристалів ГФ, характер їхнього взаємного розташування та розподілу у мікроструктурі залишаються доволі несприятливими: скупчення коротких, викривлених пластин графіту утворюють великі завширшки стінки чарунок розірваної мережі, що відокремлюють між собою ділянки практично без ГФ. Враховуючи середній розмір чарунок, що спостерігаються, вказані особливості можна пояснити збагаченням, в першу чергу, карбоном меж первинних аустенітових кристалів, в той час як об'єми таких кристалів, ймовірно, мають підвищений вміст силіцію.

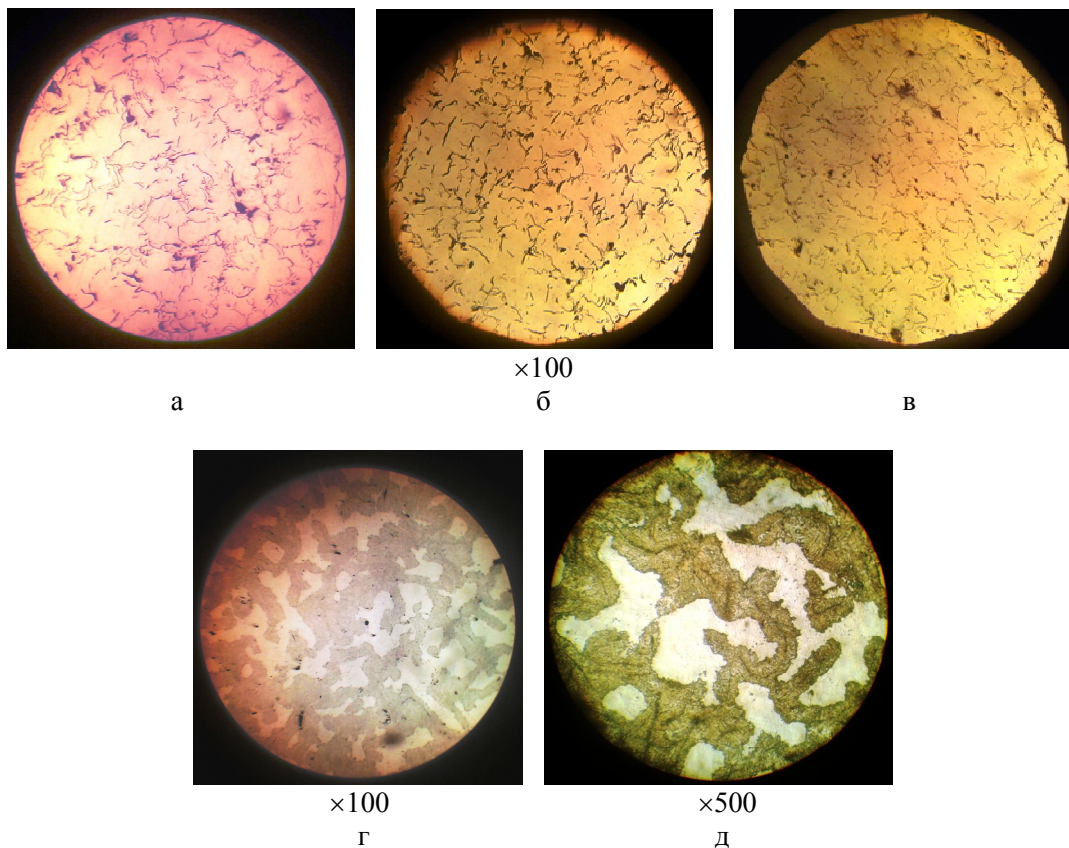


Рис. 1 – Вплив температури ізотермічної витримки при нагріванні на мікроструктуру чавунів різновиду СЧ-35н: а – початковий стан (після кристалізації); б – після низько температурної ізотермічної витримки; в, г, д – після високо температурної ізотермічної витримки; б, в – з підвищеним вмістом силіцію; а, г, д – із зменшеним вмістом силіцію

Виявлені варіанти впливу ізотермічної витримки в процесі нагрівання на морфологію ГФ у сірих чавунах показано на рис. 1 та 2. Як засвідчує рис. 1, б, у чавунах типу СЧ-35н в умовах низькотемпературної витримки можливо усунення початкових скупчень коротких графітових пластин, поблизу меж аустенітових зерен (див. рис. 1, а) з подальшим формуванням кристалів ГФ безпосередньо по межах цих зерен у вигляді розірваної мережі з достатньо товстих, коротких прошарків та поодиноких частинок сферичної форми. За умов подальшого збільшення температури та тривалості ізотермічної витримки (див. рис. 1, в, г, д), у вказаних чавунах (СЧ-35н) пластини ГФ початкової морфології (див. рис. 1, а) не спостерігаються. Натомість, в цих чавунах можна бачити (див. рис. 1, в) утворення майже безперервної мережі з тонких прошарків та

окремих частинок ГФ безпосередньо по межах аустенітових зерен. За зниженого вмісту силіцію та ідентичного режиму термічної обробки, як засвідчує рис. 1, г, у чавунах типу СЧ-35н утворюються значні завширшки витягнуті ділянки, що оточують графітові пластини, які існували у початковому структурному стані та в цілому повторюють їх контури. Показано (див. рис. 1, д), що такі ділянки складаються зі скупчень високодисперсних частинок, вочевидь ГФ, які поступово, пошарово виділяються вздовж поверхонь існуючих пластин ГФ, як на субстратах.

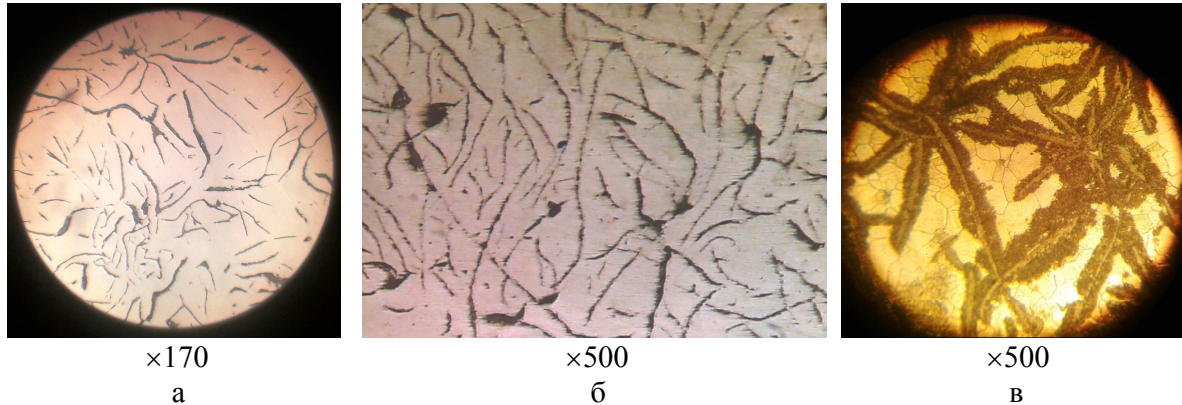


Рис. 2 – Вплив ізотермічної витримки при нагріванні на мікроструктуру чавунів різновиду СЧ-35в: а – початковий стан (після кристалізації); б, в – після низько температурної ізотермічної витримки; а, б – без травлення; в – після травлення

Зміни морфології ГФ внаслідок низькотемпературної ізотермічної витримки при нагріванні чавунів типу СЧ-35в з підвищеним та зниженим вмістом силіцію показано на рис. 2, б та рис. 2, в, відповідно. Як можна бачити з рис. 2, б, внаслідок вказаної витримки відбувається «розривання» довгих, відносно тонких пластин ГФ, які натомість перетворюються на послідовності дрібних частинок ГФ, «ланцюжки», що зберігають початкову, витягнуту форму. Звертає на себе увагу наявність у більшості таких «ланцюжків» ділянок, які взагалі не містять дрібних частинок ГФ, проте мають у своєму складі окремі великі, майже сферичні частинки графіту. Отримані результати свідчать про одночасний розвиток в процесі розглянутої ізотермічної витримки процесів розчинення, коагуляції та сфероїдації пластинчастих частинок ГФ, відповідно до загально відомих принципів теорії фазових перетворень [6].

Мікроструктуру після травлення сірого чавуну СЧ-35в із зниженою концентрацією силіцію, що пройшов термічну обробку за розглянутим вище режимом, показано на рис. 2, в. Можна бачити суттєве збільшення товщини вже існуючих графітових пластин завдяки утворенню вздовж їх поверхонь (нашарування) великої кількості достатньо дрібних частинок ГФ сферичної морфології.

Вплив ізотермічних витримок за різних температур на мікроструктуру чавунів з кулеподібним графітом типу ВЧ-60-2 показано на рис. 3. Як свідчить рис. 3, а, після низькотемпературної витримки, в структурі таких чавунів утворюється значна кількість дуже дрібних, і тому ледве помітних, частинок ГФ сферичної морфології. В той же час, зростання температури ізотермічної витримки, як впливає з рис. 3, б, призводить до суттєвого підвищення вмісту графітових частинок, переважно невеликого розміру, в структурі дослідженого чавуну. Як можна бачити з рис. 3, в, відбувається також зміна форми вже існуючих, кулеподібних у початковому стані, графітових включень внаслідок локальних обмежених викривлень («розростання») їхніх майже сферичних поверхонь. Збільшення температури ізотермічної витримки (див. рис. 3, г) призводить до майже повної втрати сферичної форми більшості вказаних включень. Наведені результати можна пояснити утворенням та подальшим зростанням нових частинок ГФ у перлітовій матриці та на локальних ділянках поверхонь кулеподібних частинок ГФ, що утворилися під час кристалізації. Окрім вказаного, за умов низькотемпературної ізотермічної витримки (див. рис. 3, в), по межах розподілу частинок ГФ та феритової матриці можна бачити достатньо дрібні зерна фериту, які збільшують свої розміри до типових значень з підвищенням температури ізотермічної витримки (див. рис. 3, г).



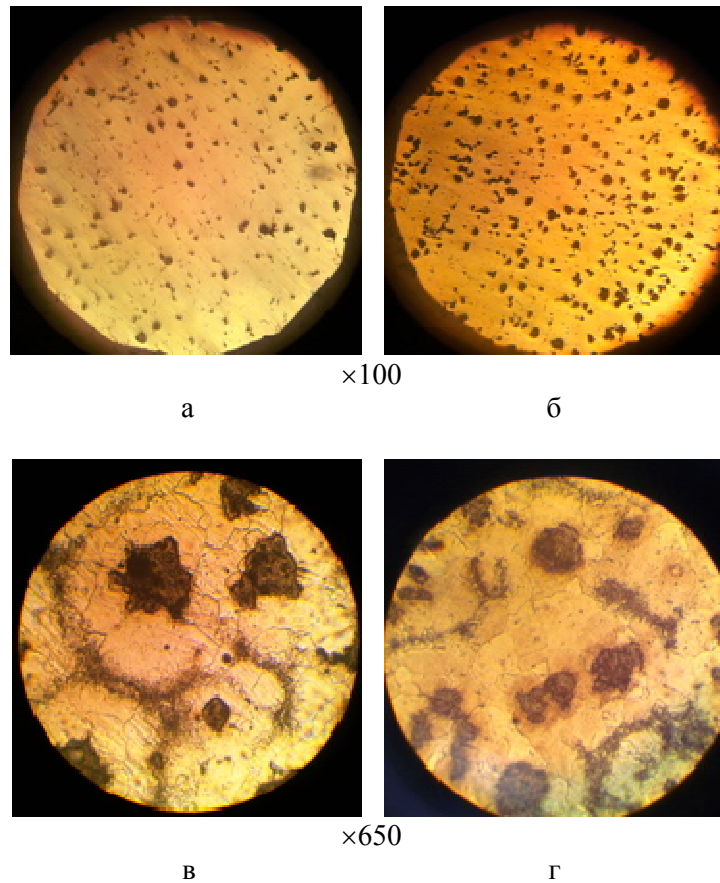


Рис. 3 – Вплив температури ізотермічної витримки при нагріванні на мікроструктуру чавунів різновиду ВЧ-60-2: а, в – після низькотемпературної витримки, б, г – після високотемпературної витримки, а, б – без травлення, в, г – після травлення

Розглянуті вище явища, що спостерігаються у всіх досліджених чавунах, можна пояснити одночасним розвитком процесів: розпаду цементиту перлітової матриці; утворення зародків і подальшого зростання нових відокремлених частинок ГФ; дифузії частини атомів карбону по межах феритових кристалів у бік вже існуючих графітових включень; послідовне, пошарове виділенням дрібних частинок графіту на поверхнях вказаних включень ГФ, як на субстратах; утворення нових, дрібних феритових зерен на поверхнях розділу частинок ГФ та феритової матриці.

Розглянуті вище зміни мікроструктури сірих та високоміцних чавунів викликають суттєві зміни їх спротиву ударному руйнуванню. Як було встановлено, ударна в'язкість досліджених сірих чавунів різновиду СЧ-35в зростає від КСУ = 84 кДж/м<sup>2</sup> у нормалізованому стані до КСУ = 120 кДж/м<sup>2</sup> після всіх досліджених варіантів ізотермічних витримок. Стосовно високоміцних чавунів визначено, що їх спротив ударному руйнуванню зростає від КСУ = 88,9 кДж/м<sup>2</sup> у термічно необробленому, щойно після кристалізації стані послідовно до КСУ = 160, 186, 247 та 444 кДж/м<sup>2</sup> із збільшенням тривалості низько температурної ізотермічної витримки до 4-х годин, але знижується до 245 кДж/м<sup>2</sup> з подальшою витримкою. Аналогічне зниження КСУ спостерігається також внаслідок дослідженого підвищення температури ізотермічної витримки.

### Висновки

1. Ізотермічні витримки сірих та високоміцних чавунів, щойно після кристалізації або повної аустенізації, за режимами, визначеними по результатах попередніх теоретичних та експериментальних досліджень, призводять до суттєвих змін морфології ГФ, розміру феритового зерна поблизу частинок ГФ та, в кінцевому підсумку, до підвищення спротиву ударному руйнуванню.
2. Встановлено два різновиди змін морфології ГФ в досліджених умовах, ймовірно, в залежності від вмісту силіцію:

- часткове розчинення початкових пластинчастих виділень ГФ з утворенням: 1) «розірваних» пластин разом з відокремленими частинками ГФ більшого розміру та сферичної морфології, 2) «розірваної» мережі тонких прошарків ГФ по межах феритових зерен за підвищеного вмісту силіцію;
  - локальне, в окремих напрямках, збільшення розмірів («розростання») кулеподібних та загальне збільшення товщини пластинчастих виділень ГФ шляхом послідовного, пошарового виділення дрібних графітових частинок на поверхнях включень ГФ, як на субстратах, за зниженого вмісту силіцію в чавуні.
3. Встановлено присутність навколо кулеподібних включень ГФ, за оптимальних умов ізотермічної витримки високоміцних чавунів, дрібних феритових зерен, розміри яких зростають до середніх значень з підвищенням температури та тривалості витримки.
  4. Показано суттєве підвищення спротиву ударному руйнуванню сірих та високоміцних чавунів порівняно зі щойно закристалізованим або нормалізованим станом, внаслідок ізотермічних витримок за оптимальних режимів: з КСУ = 84 до 120 кДж/м<sup>2</sup> та від КСУ = 88,9 до 444 кДж/м<sup>2</sup>, відповідно.

#### Перелік використаних джерел:

1. Machine design [Electronic resource] : [Web site]. – Electronic data. – Mode of access: [www.machinedesign.com/metals/cast-iron](http://www.machinedesign.com/metals/cast-iron). – Screen title.
2. Ткаченко І.Ф. Про особливості утворення аустеніту при нагріванні легованих сталей / І.Ф. Ткаченко, К.І. Ткаченко // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. Наук. Пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2002. – Вип. 12. – С. 25-27.
3. Completed Projects – Ductile Iron Society [Electronic resource] : [Web site]. – Electronic data. – Mode of access: [www.ductile.org/completed-projects](http://www.ductile.org/completed-projects). – Screen title.
4. Soiński M.S. Impact resistance of ferritic nodular cast iron / M.S. Soiński, M. Mitko, S. Tomczyński, Ł. Bronik // Archives of Foundry. – 2004. – № 11. – Pp. 190-195.
5. Scientific work. Some features of the heterogeneous diffusive nucleation and their use to form new type microstructures and eliminate chemical nonuniformities in bulk industrial product made of alloy structural steels / I.F.Tkachenko, K.I. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. – Свідоцтво № 68323 від 25.10.2016.
6. Christian J.W. The theory of transformations in metals and alloys. Part 1. / J.W. Christian. – London : Pergamon Press, 1975. – 786 p.

#### References:

1. Machine design Available at: [www.machinedesign.com/metals/cast-iron](http://www.machinedesign.com/metals/cast-iron) (accessed 30 October 2017).
2. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. Pro osoblivosti utvorennia austenitu pri nagrivanii legovanikh staley [Some features of the austenite formation at alloy steel heating]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2002, iss. 12, pp. 25-27. (Ukr.)
3. Ductile Iron Society Available at: [www.ductile.org/completed-projects](http://www.ductile.org/completed-projects) (accessed 30 October 2017).
4. Soiński M.S., Mitko M., Tomczyński S., Bronik L. Impact resistance of ferritic nodular cast iron, *Archives of Foundry*, 2004, no. 11, pp. 190-195.
5. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Scientific work «Some features of the heterogeneous diffusive nucleation and their use to form new type microstructures and eliminate chemical nonuniformities in bulk industrial product made of alloy structural steels». Certificate about registration no. 68903, 2016.
6. Christian J.W. The theory of transformations in metals and alloys, part 1. London, Pergamon Press Publ., 1975, 786 p.

Рецензент: Л.С. Малінов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 16.04.2018