

- tehnologija – Chemical Technology*, 1985, no. 2, pp. 3-6. (Rus.)
5. Mahorin K.E., Kozhan A.P., Veselov V.V., Aleksandrov V.N. Vspuchivanie grafita v plotnom i vzveshennom slojah [Graphite swelling in dense and suspended layers]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1987, no. 2, pp. 43-49. (Rus.)
6. Maslov V.A., V.I. Pauk, Pustovalov Yu.P. *Sposob polucheniya rasshirennogo grafita* [The method of obtaining thermally expanded graphite]. Patent USSR, no. 1579008, 1988. (Rus.)

Рецензент: В.Б.Семакова  
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.04.2020

УДК 621.785:669.15-194.2

doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216034

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

### РЕГЕНЕРАЦІЯ ЛИТОЇ СТРУКТУРИ БІЛИХ ЧАВУНІВ ШЛЯХОМ ЇХ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

*На підставі результатів раніше виконаних теоретичних та експериментальних досліджень визначено умови змін мікроструктури білих квазіевтектичних легованих чавунів шляхом їх термічної обробки, яка базується на принципах «регенерації» мікроструктури гетерофазних матеріалів із поліморфними матричними фазами. Показано формування, в процесі оптимальної термічної обробки дослідженого білого чавуну, дисперсних, однорідних за розмірами та характером свого розподілення в структурі кристалів легованого структурно вільного цементиту, замість пластинчастого, що входив до складу ледебуриту, а також наддисперсних ділянок матричної фази, що містять нанорозмірні частинки цементиту. Наголошено на спільних рисах процесів «регенерації» мікроструктури у гетерофазних матеріалах різного хімічного складу, що забезпечує надійне отримання високих показників механічних властивостей.*

**Ключові слова:** білий легований чавун, пластинчастий структурно вільний легований цементит, «регенеруюча» термічна обробка, однорідні за розмірами та просторовим розподілом кристали структурно вільного цементиту, нанорозмірні частинки легованого цементиту.

*Ткаченко И.Ф., Мирошниченко В.И., Гаврилова В.Г. Регенерация литой структуры белых чугунов путем их термической обработки. На базе результатов ранее выполненных исследований определены условия изменений микроструктуры белых легированных чугунов путем их термической обработки, которая основана на принципах «регенерации» микроструктуры гетерофазных материалов с полиморфными матричными фазами. Указано общие особенности процессов «регенерации» микроструктуры гетерофазных материалов разного химического состава, что обеспечивает надежное получение высоких механических свойств.*

**Ключевые слова:** белый легированный чугун, пластинчатая «регенерирующая» термообработка, однородные по размерам и характеру распределения кристаллы структурно-свободного легированного цементита, наноразмерные частицы цементита.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, м. Маріуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0002-5956-7867, [miroviktoria@gmail.com](mailto:miroviktoria@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [gavrilova\\_v\\_g@mail.ua](mailto:gavrilova_v_g@mail.ua)

*I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko, V.G. Gavrilova. Regeneration of the initial structure in white alloy pig irons by their heat treatment. The regime parameters providing the improvements of initial cast structure in a white alloy quasi-eutectic pig iron are specified for the applied heat treatment which is based on the early defined principles of microstructure «regeneration» in hetero-phase materials with polymorphic matrixes. Extremely undesirable, typical original microstructure of the iron comprising big, plate-like, «ledeburite» cementite crystals along with coarse-grained colonies of pearlite-like structures was observed. Formation of dispersed, homogeneous in size and spacial distribution sole alloy cementite crystals instead of the «ledeburite» one, within fine grained matrix containing nano-sized cementite particles is shown as a result of the optimal «regenerative» heat treatment employment. Conserving the original iron hardness on the level 60-63 HRC was observed that confirms stability of its phase composition despite the obtained structure's morphology changes. Unified features of the structure «regeneration» processes in hetero-phase metallic materials of various chemical composition are outlined that provides reliable obtaining high mechanical performance of the materials.*

**Keywords:** white alloy iron, plate-like alloy cementite crystals, «regenerative» heat treatment, homogeneous in size and spacial distribution sole alloy cementite crystals, nano-sized cementite particles.

**Постановка проблеми.** Як відомо [1], переважаючою складовою у структурі білих чавунів (БЧ) є цементитові кристали, які мають пластинчасту форму та відносно великі розміри, що визначає характерні механічні властивості БЧ: підвищену твердість, знижені механічні характеристики при розтягненні, вкрай низький спротив ударному руйнуванню. Вказані структури утворюються під час кристалізації відповідних розплавів, а їхня морфологія в подальшому не змінюється під час будь-якого відомого режиму термічної обробки. Єдиним режимом термічної обробки БЧ, що застосовують на практиці [1], є «графітизуючий» відпал, який проте перетворює БЧ на сірий чавун з характерною морфологією графітових частинок. Таким чином, сучасні БЧ мають дуже обмежене коло застосування на практиці завдяки своїм особливим властивостям та неможливості, на відміну від інших сплавів на базі феруму, зміни їх шляхом термічної обробки. Згадане коло практичного застосування БЧ включає до себе литі деталі, що працюють виключно під впливом статичних стискаючих навантажень в умовах тертя та абразивного зношування, можливо також у агресивних середовищах.

У той же час, було показано [2-6] можливість значного подрібнення структур, повного усунення хімічних і структурних неоднорідностей та багаторазового підвищення роботи ударного руйнування конструкційних легованих сталей, а також сірих та високоміцних чавунів, шляхом «регенеруючої» термічної обробки. Враховуючи фундаментальний характер процесів, що відбуваються під час згаданої обробки, слід очікувати на їхній розвиток у будь-яких моно- та гетерофазних поліморфних металевих матеріалах із поліморфними матричними фазами.

**Метою роботи** є експериментальне підтвердження можливості змін мікроструктури білих чавунів шляхом їх термічної обробки, що базується на визначених раніше [2, 4-6] принципах «регенерації» мікроструктури гетерофазних матеріалів із поліморфними матричними фазами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню явищ та процесів, що відбуваються в умовах «регенеруючої» термічної обробки вказаних матеріалів, присвячено декілька робіт [2-6]. Сутність процесів, що отримують розвиток під час згаданої «регенеруючої» обробки та забезпечують зазначені вище зміни структури та властивостей широкого кола промислових чавунів та легованих конструкційних сталей, полягає в утворенні наддрібних кристалів нової фази під час ізотермічної витримки за оптимальних для кожного сплаву температур. Як впливає з термодинамічних умов розвитку поліморфних гетерогенних фазових перетворень [2, 5, 6], щойно утворенні зародки нової фази в умовах ізотермічної витримки можуть зростати до досягнення певних рівноважних розмірів, після чого їхнє зростання припиняється. Під час ізотермічної витримки відбувається також збагачення чи збіднення вказаних кристалів нової фази певними легуючими елементами в залежності від характеру їхнього впливу на термодинамічну стабільність такої фази. За невеликих розмірів частинок других фаз чи зерен матричної фази, зародки нової фази можуть утворювати щільний, нерозривний оточуючий прошарок, що надійно забезпечуватиме високу швидкість дифузійного перерозподілу хімічних елементів під

час ізотермічної витримки, а також гальмування зростання тріщин в об'ємі матричної фази.

У випадку великих за розмірами частинок других фаз (пластинчастих кристалів графіту, цементиту, спеціальних карбідів, інтерметалідів та ін.) або зерен матричної фази, щільність утворення зародків нової фази зменшується внаслідок зниження поверхневої енергії у розрахунку на одиницю об'єму. Таким чином, зародки нової фази не будуть утворювати щільні оточуючі прошарки у випадку великих за розмірами зерен матричної фази та частинок других фаз, а отримують локалізацію у певних центрах зародження. У зв'язку з відомою стимулюючою дією існуючих кристалів нової фази на подальше її зародження, було показано [5] переважне розростання раніше утворених локальних осередків нової фази, шляхом формування її нових зародків на базі раніше утворених наддрібних кристалів такої фази. Кінцевим результатом послідовного розвитку розглянутих процесів буде «перерізання» пластинчастих частинок других фаз окремими локалізованими скупченням наддрібних зерен нової фази з утворенням декількох дрібних, однорідних за розмірами кристалів других фаз, які мали початкову пластинчасту форму [4, 5].

Таким чином, початкові структури металевих гетерофазних матеріалів, що мають у своєму складі, зокрема, великі за розмірами частинки других фаз пластинчастої форми, повинні перетворюватись на сукупність наддрібних зерен матричної фази, що оточують суттєво подрібнені та однорідні за розмірами кристали характерних для кожного матеріалу других фаз [4, 5]. Згадані початкові структури пластинчастої морфології є типовими для промислових білих зносостійких чавунів, у зв'язку з чим їх було обрано в якості матеріалу для досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проводили з використанням білого легованого чавуну промислової виплавки, хімічний склад якого наведено в таблиці. Термічна обробка щойно відлитих заготовок розмірами 30×30×300 мм здійснювалась згідно з [2, 4, 5] за режимами, які включали до себе ізотермічну витримку за різних температур в інтервалі 650...1000°C протягом 0,5...6,0 годин з подальшим охолодженням на повітрі. Металографічні зразки було відрізано від заготовок до та після термічної обробки. Травлення здійснювали 4% розчином HNO<sub>3</sub> у спирті.

Таблиця

Хімічний склад досліджуваного чавуну

Вміст хімічних елементів, ваг. %						
C	Mn	Si	Cr	Ti	S	P
3,6-4,5	2,70-3,20	1,35-1,47	10,9-11,6	0,031-0,036	0,12-0,14	0,10-0,12

Світлини початкової структури дослідженого чавуну надано на рис. 1.

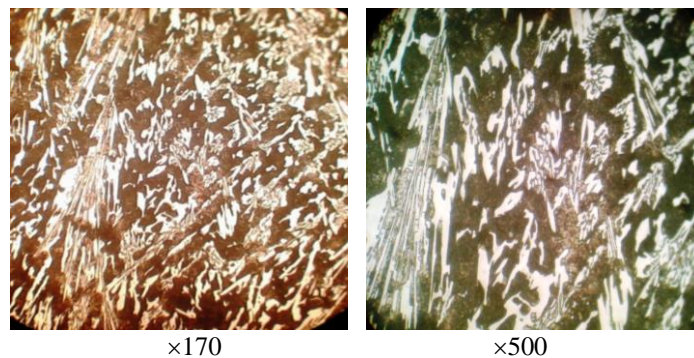


Рис. 1 – Початкова структура дослідженого чавуну

Як можна бачити, головними структурними складовими є великі за розмірами та пластинчасті за формою кристали цементиту, що входить до складу ледебуриту (ледебуритового цементиту), найімовірніше легованого хромом та манганом, а також матриця, що має перлітоподібну будову. Наведена структура, вочевидь, відповідає до-евтектичному чавуну, незважаючи на вміст карбону, що відповідає евтектичному складу. Таку невідповідність можна пояснити наявністю у складі дослідженого чавуну значної концентрації силіцію, а також хімічних елеме-

нтів, здатних утворювати спеціальні карбіди з високою температурною стабільністю, що призводить до зменшення фактичного вмісту карбону у складі високотемпературної модифікації матричної фази з подальшим утворенням значної об'ємної частки перлітоподібних структур. Розглянута структура забезпечує чавунам дослідженого квазіевтектичного різновиду високу абразивну зносостійкість, але вкрай низький спротив ударному руйнуванню. Твердість чавуну у розглянутому початковому стані складала 63...65 HRC.

Структуру дослідженого чавуну після термічної обробки за оптимальним режимом характеризують світлини, наведені на рис. 2.

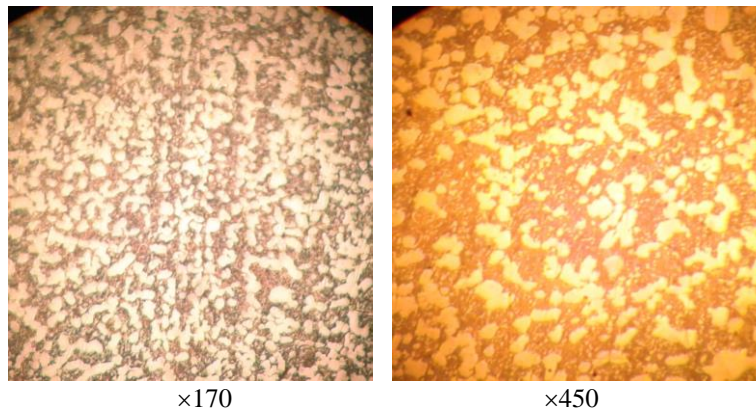


Рис. 2 – Структура дослідженого чавуну після оптимального режиму «регенеруючої» термічної обробки

Як впливає зі світлин, однією з характерних складових отриманої структури є достатньо дрібні та однорідні за розмірами ділянки світлого кольору, які, вочевидь, являють собою кристали легованого хромом та манганом структурно вільного цементиту, який безпосередньо після кристалізації, у своєму початковому стані, входив до складу ледебуриту та мав вкрай несприятливу пластинчасту морфологію (див. рис. 1).

Формування у структурі білих чавунів частинок крихких других фаз вказаної сприятливої морфології може бути пояснено дією під час виконаної термічної обробки розглянутих вище механізмів, запропонованих у [2, 4-6]. Цей висновок підтверджують результати аналізу морфології матричної фази, що була сформована в процесі вказаної термічної обробки. Можна бачити, що в межах ділянок, які у початковому стані мали перлітоподібні структури, утворюються у великій кількості наддрібні кристали, найімовірніше легованого цементиту, який у початковому структурному стані входив до складу перлітоподібних структур, а після термічної обробки отримав вигляд частинок, які створюють загальний, добре помітний точковий поверхневий рельєф. Важливо підкреслити, що окремі вказані кристали доволі складно розрізнити із застосуванням оптичного мікроскопу, що свідчить про їхні вкрай малі, наномасштабні розміри (<1 мкм). Твердість дослідженого чавуну після проведеної термічної обробки не змінюється у порівнянні з початковим термічно необробленим станом та становить 63...65 HR, що свідчить про збереження якісного та кількісного фазового складу чавуну в умовах суттєвих змін морфології його структури.

Спираючись на теоретично розглянуті механізми процесів, що відбуваються під час «регенеруючої» термічної обробки, було зроблено висновок про формування численних зародків аустеніту, як нової матричної фази, у межах колоній перлітоподібних структур, з подальшим утворенням в їхніх межах нанорозмірних частинок легованого цементиту в процесі наступного завершального охолодження.

Таким чином, проведення термічної обробки дослідженого білого квазіевтектичного легованого чавуну за оптимальним режимом забезпечило формування мікроструктури, що відповідає теоретично прогнозованому «регенерованому» структурному стану в гетерофазних полікристалічних металевих матеріалах з поліморфними матричними фазами. Як було зазначено вище по результатах теоретичного аналізу [2, 4-6], вказані «регенеровані» структури включають до себе рівномірно розподілені, дисперсні, практично одно за розмірами частинки других

фаз з початковою несприятливою, зазвичай пластинчастою морфологією, а також матричну фазу, що складається з наддрібних кристалів високотемпературної модифікації цієї фази, яка перетворюється на відповідні нанорозмірні продукти під час її фазових перетворень в процесі завершального охолодження. Враховуючи незмінний у результаті «регенеруючої» термообробки вміст карбідної фази у чавуні дослідженого різновиду разом із сприятливою морфологією всіх структурних складових, слід очікувати одночасного підвищення показників міцності при розтягненні та спротиву ударному руйнуванню розглянутих відомих металевих матеріалів.

#### Висновки

1. Експериментально досліджено особливості структури білого квазіевтектичного легованого чавуну після термічної обробки, що забезпечує умови задля формування «регенерованих» структурних станів у гетерофазних полікристалічних металевих матеріалах з поліморфними матричними фазами.

2. Показано, що за оптимального режиму «регенеруючої» термічної обробки структура дослідженого чавуну включає до себе дисперсні, однорідні за розмірами та просторовим розподілом кристали легованого структурно вільного цементиту, а також матричну фазу, що складається з наддрібних зерен фериту, у складі яких присутні нанорозмірні частинки цементиту.

3. Отримані результати металографічних досліджень пояснено розвитком раніше теоретично визначених процесів формування наддрібних кристалів однієї з поліморфних модифікацій матричної фази за умов ізотермічної витримки за оптимальних температур під час нагрівання чи охолодження гетерофазних поліморфних металевих матеріалів з поліморфними матричними фазами.

4. Детальне визначення всіх особливостей структури та механічних властивостей білих чавунів після «регенеруючої» термічної обробки, потребує подальших досліджень з застосуванням ТЕМ та стандартних випробувань на розтягнення та ударний вигин.

#### Перелік використаних джерел:

1. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю.М. Лахтин. – М. : *Металлургия*, 1976. – 406 с.
2. 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.
3. Ткаченко И.Ф. Об особенностях образования аустенита при нагреве легированных сталей / И.Ф. Ткаченко, К.И. Ткаченко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2002. – Вип. 12. – С. 25-27.
4. Пат. 142597 Україна, МПК С 21 D 1/00. Спосіб термічної обробки для формування стабільних за параметрами нанорозмірних структур у металевих матеріалах з поліморфними матричними фазами / І.Ф. Ткаченко, К.І. Ткаченко, В.І. Мірошніченко, Ф.К. Ткаченко. – № 201904237; заявл. 19.04.2019; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
5. Вплив рівноважної дислокаційної субструктури на морфологію структурних складових при гетерогенних фазових перетвореннях у полікристалічних металевих сплавах / І.Ф. Ткаченко, Ф.К. Ткаченко, К.І. Ткаченко, В.І. Мірошніченко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2016. – Вип. 33. – С. 50-57. – (Серія : Технічні науки).
6. Вплив особливостей фазових перетворень при нагріванні та охолодженні на структури і спротив ударному руйнуванню легованих конструкційних сталей / І.Ф. Ткаченко, Ф.К. Ткаченко, К.І. Ткаченко, В.І. Мірошніченко // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2017. – Вип. 34. – С. 18-23. – (Серія : Технічні науки).

#### References:

1. Lahtin U.M. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment]. Moscow, Metallurgii Publ. 406 p. (Rus.)
2. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Scientific work «Some features of the het-

- erogeneous 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.
3. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. Ob osobennostyax obrazovany'ya austeny'ta pry' nagreve legy'rovannykh stalej [Some features of the austenite formation at alloy steel heating]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2002, no. 12, pp. 25-27. (Rus.)
  4. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I., Tkachenko F.K. *Sposib termichnoї obrobki dlia formuvannia stabil'nikh za parametrami nanorozmirnikh struktur u metalevikh materialakh z polimorfnimi matrichnimi fazami* [Method of heat treatment for obtaining nano-sized structures with stable parameters in metallic materials with polymorphic matrixes]. Patent UA, no. 142597, 2020. (Ukr.)
  5. Tkachenko I.F., Tkachenko F.K., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Vpliv rivnovazhnoї dislokatsiinoї substrukturi na morfologiiu strukturnikh skladovikh pri geterogennikh fazovikh peretvorennyakh u polikristalichnikh metalevikh splavakh [Influence of equilibrium dislocation substructure on structure morphology in polycrystalline metallic materials]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Serija : Tehnični nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, no. 33, pp. 50-57. (Ukr.)
  6. Tkachenko I.F., Tkachenko F.K., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Vpliv osoblivostei fazovikh peretvoren' pri nagrivanni ta okholodzhenni na strukturi i sprotiv udarnomu ruinuvanniu legovanikh konstruktsiynikh stalei [Effects of the phase transition features at heating and cooling of alloy structural steels on theirs microstructures and impact resistance]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Serija : Tehnični nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2017, no. 34, pp. 18-23.

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

Стаття надійшла 17.03.2020

УДК621.791.927.55

doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216035

© Самотугін С.С.<sup>1</sup>, Пірч І.І.<sup>2</sup>, Самотугіна Ю.С.<sup>3</sup>,  
Безумова (Христенко) О.А.<sup>4</sup>

## КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМОТРОНІВ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЇ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

*Встановлені закономірності впливу конструктивних параметрів плазмотронів з секціонованою міжелектродною вставкою на ефективність процесів плазмового модифікування. Показана перспективність використання плазмотронів цього типу з дуговим каналом, що звужується, для реалізації плазмової наноструктуризації металообробного інструменту.*

**Ключові слова:** плазмотрон, наноструктуризація, плазмове модифікування, металорізальний інструмент, секціонована міжелектродна вставка.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [samotugin\\_s\\_s@pstu.edu](mailto:samotugin_s_s@pstu.edu)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [pirch\\_i\\_i@pstu.edu](mailto:pirch_i_i@pstu.edu)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [samotugina\\_u\\_s@pstu.edu](mailto:samotugina_u_s@pstu.edu)

<sup>4</sup> аспірант, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [khrystenko.olga@gmail.com](mailto:khrystenko.olga@gmail.com)