

УДК 669.111.4

М. В. Губинський¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-3770-4397**А. В. Сибір**¹, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-9974-0636**С. С. Федоров**¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5409-882X**О. Є. Меркулов**¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659**С. М. Губинський**², н. с., ORCID 0000-0002-4598-5136**В. Ф. Мазорчук**², к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8512-0727**О. М. Форись**², аспірант, ORCID 0000-0002-9524-2381¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Неєрасова НАН України*² *Український державний університет науки і технологій*

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ НАВУГЛЕЦЮВАННЯ Fe-C РОЗПЛАВУ ТА ВПЛИВ НА НЬОГО ВИДУ КАРБЮРИЗАТОРІВ

Анотація. Одним з напрямків підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції металургійної й машинобудівної галузей та переходу до безвуглецевої економіки є розвиток технології отримання синтетичного чавуну. Виробництво синтетичний чавуну забезпечує ефективність та якість ливарного виробництва. Заміна дорогих ливарних і передільних чавунів сталевим брукхом дозволяє знизити собівартість виробництва лиття та використовувати більш якісні матеріали, вільні від шкідливих домішок і включень. Однак їх застосування у складі шихти призводить до необхідності проведення вуглецювання розплаву. Процес навуглицювання розплаву при цьому набуває важливої ролі в багатоланковому ланцюжку отримання виливків. У цій ситуації особливого значення має вибір карбюризатора, який забезпечить якість кінцевого продукту та зниження витрат при виробництві. Саме це завдання вирішувалося у роботі на основі дослідження процесів навуглицювання Fe-C розплаву та визначення вимог до якості карбюризаторів та визначення технологічних параметрів їх отримання у агрегатах з електротермічним киплячим шаром. Аналіз досліджень навуглицювання Fe-C розплаву різними видами карбюризаторів визначив основні фактори які впливають на процес навуглицювання та якість виливок з синтетичного чавуну: технологічні параметри (температура розплаву, ступінь перемішування, вихідний склад розплаву), характеристики карбюризаторів (вміст золи та її склад, вміст сірки, вміст азоту, кристалічна структура). На основі результатів експериментальних досліджень сформульовані вимоги до оптимальних параметрів карбюризаторів синтетичного чавуну: вміст золи та газів повинен бути як можливо меншим, кристалічна структура повинна включати 80-90% графітованих матеріалів з кристалічністю більш 100 Å при отриманні чавунів з пластинчастим графітом. Це дозволило визначити основні технологічні параметри отримання карбюризаторів на основі вітчизняної сировини (антрацит донецького родовища): температура термічної обробки 2400-2700°C, тривалість обробки 10 хв.

Ключові слова: синтетичний чавун, науглецювання, дифузійний процес, карбюризатор, електротермічний киплячий шар.

Посилання для цитування: Особливості процесу науглецювання Fe-C розплаву та вплив на нього виду карбюризаторів / М. В. Губинський, А. В. Сибір, С. С. Федоров, О. Є. Меркулов, С. М. Губинський, В.Ф. Мазорчук, О.М. Форись // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 62-75. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-62-75>

Стан проблеми. Процес науглецювання є багато параметричним та залежить від багатьох технологічних параметрів: температури розплаву, його вихідного хімічного складу, швидкості його перемішування і т. ін., а також від показників якості карбюризаторів: вмісту вуглецю, зольності, вмісту летких та газів, гранулометричного стану та густини. Всі ці параметри впливають на процес розчину вуглецю у розплаві і саме цей процес визначає кінцевий результат виробництва синтетичного чавуну [1-3].

Метою дослідження є визначення оптимальних показників якості карбюризаторів для вироблення синтетичних чавунів та визначення технологічних параметрів для їх отримання при термічній обробці у електротермічному киплячому шарі.

Основний матеріал дослідження. Процес розчину вуглецю досліджено багатьма дослідниками, які моделюють механізм розчину та визначають основні фактори, що впливають на нього [4-22].

Механізм розчину карбюризаторів у розплаві Fe-C це гетерогенний процес за участю трьох фаз: тверда – науглерожувач, рідка - розплав заліза, газоподібна - продукти реакції взаємодії карбюризатора з розплавом або гази, що виділилися з карбюризатора. На зовнішній поверхні карбюризатора відбуваються фізико-хімічні процеси розчину вуглецю та взаємодії вуглецю, заліза та інших елементів, що входять до складу розчину та золи карбюризатора [10, 23].

Сам процес розчину вуглецю в рідкому розплаві заліза має два етапи: відрив плоских пакетів графіту з поверхні карбюризатора за рахунок впровадження заліза в міжбазисні площини графіту чи внаслідок адсорбційного зниження міцності графіту; розчин пакетів [4, 10, 15]. Цей процес залежить від концентрації вуглецю в розплаві та процесу масопереносу від частинки карбюризатора до маси розплаву. Тобто носить дифузійний характер, що підтверджено багатьма дослідниками [4, 10, 15, 19, 23]. Таким чином процес розчину залежить від масопереносу, який як відомо залежить від наступних факторів:

- величини коефіцієнту дифузії;
- різниці у концентрації вуглецю на поверхні карбюризатора (концентрація насичення) та у масі розплаву;

- площі контакту розплаву з частинками карбюризатору.

Основні параметри які впливають на інтенсивність науглецювання (температура розплаву, інтенсивність перемішування, характеристики карбюризаторів), як правило комплексно впливають на фактори що визначають масоперенос. Крім того необхідно враховувати, що процес розчину є ендотермічним [10, 23]. Основний внесок у зміну ентальпії розплаву під час науглецювання вносять витрати тепла на нагрівання науглерожувача та тепловий ефект розчинення вуглецю. Він складає 21350 Дж/моль – 31400 Дж/моль і підвищується з ростом концентрації вуглецю.

Вплив температури на процес науглецювання розплаву заліза.

Майже всі експериментальні дослідження вказують, що підвищення температури розплаву приводить до інтенсифікації науглецювання [4, 5, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 19]. Однак вплив температури є багатофакторним. Так при підвищенні температури зменшується в'язкість розплаву і відповідно підвищується коефіцієнт конвективної дифузії. В той же час за рахунок ендотермічного процесу розчину зменшується його температура. У роботі [24] було зроблено експериментальну оцінку температурного ефекту науглецювання – зниження температури металу приблизно на 80K на 1% розчиненого вуглецю. Таким чином відбуваються протилежні ефекти, що впливають на процес розчину вуглецю.

Крім того вплив температури також пов'язаний зі зміною в'язкості компонентів золи, які присутні у карбюризаторах. В процесі розчину часток карбюризатора на його поверхні накопичується золотий розчин якій зменшує площу контакту між розплавом та вуглецем, що приводе до зменшення інтенсивності науглецювання. При підвищенні температури та зменшенні в'язкості розплаву золи, вона транспортується у розплав та відкриває вуглець для розчину. Додатково температура впливає і на величину концентрація насичення вуглецю в розплаві.

Однак всі експериментальні дані свідчать про підвищення швидкості розчину карбюризаторів при підвищенні температури.

Вплив інтенсивність перемішування на процес науглецювання розплаву заліза.

Перемішування розплаву в період науглецювання може бути пов'язано з електромагнітним перемішуванням у індукційних печах промислової частоти чи близької до неї та при барботажу розплаву. Так як процес науглецювання обмежується конвективною дифузією, то підвищення швидкості розплаву підвищує коефіцієнт дифузії та забезпечує постійну різницю у концентраціях вуглецю на поверхні карбюризатора та у розплаві. Однак такий ефект характерний тільки до межі, коли частки карбюризатора рівномірно

розташовані у розплаві. Подальше інтенсифікування перемішування не є ефективним.

При використанні перемішування розплав це є домінуючим фактором у порівнянні з температурою та характеристикою карбюризаторів [4, 12].

Вплив характеристик карбюризатора на процес науглецювання розплаву заліза. Основними характеристиками карбюризаторів, що впливають на процес науглецювання є: вміст золи та її склад, гранулометричний склад, кристалічна структура, поруватість, густина. Відомі ряд публікацій, що досліджують ефективність різних видів карбюризаторів на основі співставлення їх використання у експериментальних дослідженнях. Результати досліджень підтверджують вплив вказаних вище факторів, але як правило при зміні виду карбюризатора змінюються декілька факторів разом причому один фактор (частіше вміст золи) є домінуючим, тому аналіз отриманих результатів свідчить не про вплив фактору, а про ефективність карбюризатора відповідного типу з відповідними властивостями. Нижче наведено результати цих досліджень.

У роботі [4] наведено результати науглецювання чавуну у індукційних печах промислової частоти з інтенсивним перемішуванням. Було досліджено карбюризатори різної природи і ступеня графітації: електродний графіт, тигельний графіт, термоантрацит, кокс, деревинне вугілля, вугілля. Швидкість науглецювання коливалась від 0,063%/хв у вугілля до 0,132%/хв у електродного графіту з відповідною ступенем засвоєння вуглецю 60% і 95%. Це, як інтерпретують автори, є наслідок впливу вмісту вуглецю у карбюризаторі. Виключенням були кокс і термоантрацит, які мали нижчі показники, що може бути пов'язано з їх структурою на відміну від графітованих карбюризаторів.

Дослідження розчину карбюризаторів різного виду у розплаві заліза при постійній температурі 1350°C наведено в [5]. Процес відбувався у середі аргону протягом до 2 годин. В експериментах були використані наступні карбюризатори графіт, деревинне вугілля та кокс. Деревинне вугілля та кокс були частково демінералізовані за рахунок обробки кислотами, після чого їх зольність знизилася з 7,1% до 1,8% та 12,6% до 3,4% відповідно. Перемішування розплаву практично було відсутнє. В результаті отримано, що концентрація вуглецю в розчині Fe-C, розчиненого з графіту, була вищою, ніж коксу і деревного вугілля, але після демінералізації результати всіх видів карбюризаторів були сході. Таким чином, визначено, що основним фактором на процес розчину впливає вміст золи. Різниця у структурі карбюризаторів на процес розчину не визначена.

В роботі [8] досліджено розчинення вуглецю в Fe-Mn розплаві при 1550°C чотирьох типів металургійних коксів і графіту. Дослідження проводили за допомогою занурюваних стрижнів у печі опору. Метою дослідження було визначення впливу мікроструктури вуглецевих матеріалів, їх шорсткості та пористості. В результаті визначено що домінуючим фактором на швидкість розчину коксів мали шорсткість поверхні і пористість вуглецевих матеріалів, що впливають на швидкість розчинення. Крім того, розмір кристалітів не мав значного впливу. Запропонований механізм розчинення включає як масообмін, так і міжфазні реакції.

Схожі дослідження наведені в роботі [9], де експериментально досліджено процес розчину австралійських коксів у розплаві Fe-C. Дослідження проведено в діапазоні температур 1450-1550°C за використанням методики накриття карбюризатора і методу сидячої краплі. Швидкість розчинення значно відрізняються для різних зразків коксу. В дослідженнях не було виявлено очевидного впливу структури вуглецю на швидкість його розчинення. Розміри кристалітів дев'яти коксів були схожими.

З підвищенням температури швидкість розчинення вуглецю зростала. Цей ефект виявився сильнішим для коксу, ніж для синтетичного графіту і був пов'язаний з вмістом золи, який у коксів був вищий за графіт. Склад золи та її кількість були визначені як домінуючі фактори, що впливають на швидкість розчинення вуглецю в розплаві. Міжфазні продукти можуть діяти як фізичний бар'єр, що блокує контакт заліза і коксу, зменшуючи площу контакту з розчином.

В роботі [15] проведено експериментальне дослідження розчину вуглецю з 2 різних коксів, виготовлених з австралійського вугілля та синтетичного графіту методом накриття карбюризатора у вакуумній індукційній печі при температурі 1823°K. Основна відмінність у складі золи коксів полягає у різному вмісту заліза та алюмінію. Перший кокс розчинявся в залізі набагато швидше ніж другий, і його швидкість має той самий порядок величини що притаманні синтетичному графіту.

Дослідження [19] спрямовано на визначення параметрів науглецювання різних видів карбюризаторів при температурах 1623°K-1935°K в індукційній печі. Окислення карбюризаторів виключалося за рахунок подачі у піч аргону. В роботі досліджено синтетичний графіт, кокс, антрацит, низькобітумінозне вугілля. Процес розчинення без перемішування розплаву контролювався масопереносом, а внесок реакцій на межі фаз був відчутним. О деяких частково розчинених зразків коксу під електронним мікроскопом показало, що на поверхні зразка утворюється тонкий (в'язкий) шар золи, що перешкоджає науглецюванню. Вплив фазових реакцій на межі

карбюризатор - розплав на розчинення коксу і вугілля в сірковмісних розплавах був більшим, ніж на розчинення графіту.

В роботі [20] наведено результати експериментального дослідження розчинення кальцинованого вугілля із вмістом золи 9-12,6% за температури 1550°C в індукційній печі. Досліджено чотири види вугілля. У двох випадках отримано монотонне збільшення захоплення вуглецю рідким залізом. Для двох інших спостерігалася двоступенева поведінка. На першій стадії, що відповідає короткому часу контакту, швидкість розчинення вуглецю була значно вищою, ніж на другій стадії. Це пояснюється високим рівнем міжфазного блокування продуктами реакції, що призвело до зменшення кількості зон контакту.

Таким чином можливо констатувати, що основною характеристикою карбюризатора, що впливає на інтенсивність процесу науглецювання є вміст та склад золи, яка фізично зменшує площу контакту часток карбюризатора з розплавом. Крім того визначено вплив міжфазних реакцій які залежать як від складу карбюризатора так і розплаву.

В [4] приведені данні, що підвищення вмісту сірки та кремнію гальмують процес розчину вуглецю, а підвищення вмісту марганця сприяє йому. На основі практичних даних визначено, що кожний відсоток кремнію у розплаві зменшує засвоєння вуглецю на 4-5%. В роботі [9] показано можливість впливу сірки на процес науглецювання. Утворення міжфазних продуктів, таких як CaS і MnS, може призвести до зниження швидкості розчинення вуглецю. Ці продукти представляють собою фізичний бар'єр, що блокує контакт заліза і коксу. В роботі [10] наведено дані, що підвищення сірки та кремнію зменшують коефіцієнт дифузії при розчині вуглецю. Це також підтверджено результатами досліджень [16], які свідчать, що швидкість розчинення не змінювалася при збільшенні вмісту кремнію на 1,9% і значно зменшувалася при збільшенні вмісту сірки на 1%. Аналогічні дані приведені у [17]. Найбільший вплив на процес науглецювання чинить кремній, за ним іде марганець, а потім сірка. При збільшенні вихідного вмісту кремнію на 0,11% швидкість поглинання вуглецю знижується на 3-4%; при збільшенні вмісту сірки на 0,1% швидкість поглинання вуглецю знижується на 1-2%; при збільшенні вмісту марганцю на 0,1% швидкість поглинання вуглецю збільшується на 2-3%. Відповідно що до складу карбюризаторів повинно входити як найменш сірки та кремнію.

Велике значення для якості чавуну має вміст азоту [11, 17]. Так міцність сірого чавуну може бути збільшена на 5-7 МПа на кожні 10 ppm збільшення вмісту азоту, а твердість може бути збільшена на 3-4 HBW. Аналіз хімічного складу показав, що нафтовий кокс може

містити значну кількість азоту (кальцинований кокс до 9000 ppm, графіт 100-300 ppm). Но при збільшенні вмісту азоту 120-150 ppm спостерігається зростання пористості виливків. Щоб уникнути цих дефектів карбюризатори повинні мати низький вміст азоту.

Значний вплив на якість виливок має структура графіту та металевої основи, які передаються литому металу та визначають його властивості [4]. Коли карбюризатор містить щільних пластин, то і чавун має тенденцію до кристалізації з аналогічною формою графіту [11]. Теж саме підтверджено дослідженнями [14]. На мікроструктуру чавунів більше впливала кристалічність карбюризаторів. В експериментах отримано більш однорідний склад як графітної фази, так і металевої матриці при використанні кристалічних вуглецевих матеріалів. Цей ефект можливо пояснити наявністю мікронеоднорідностей у розплаві, які пов'язані з процесом розчину вуглецю.

У роботі [26] автори стверджують, що структура початкового вуглецю, використаного для науглецювання заліза, значно впливає на параметри структури ближнього порядку розплаву, що формується, а також на структуру твердого металу після кристалізації.

Таким чином, структура карбюризатора є важливим параметром, що впливає як на кінетику процесу, так і на мікронеоднорідність розплавів, що формуються під час науглецювання та структуру чавуну у виливках. Дослідженню саме цього процесу присвячена робота [27]. Авторами визначено здатність графітових матеріалів служити в якості інокулянтів при затвердінні чавунів і пов'язана з фізичною різницею різних типів карбюризаторів. Температура розплаву підтримувалася на рівні 1480–1490°C. Об'єм розплаву у дослідженнях складав 23 кг. Досліджувані матеріали були наступні: звичайний та очищений синтетичний графіт, природний графіт, кальцинований нафтовий кокс, металургійний кокс і вугілля. Ефективність інокуляції графіту була пояснена дисперсією в розплавленому чавуні нерозчинених частинок графіту, які виступають в якості центрів для осадження евтектичного графіту. Процес пов'язаний з розміром кристалитів та вмістом графіту у досліджених карбюризаторах. Виявилось, що розмір кристалитів графіту повинен бути більше 100 Å для того, щоб він був ефективним як інокулянт. Неграфітові матеріали не були визнані придатними в якості інокулянтів. В результаті доведено, що інокуляція графітовими матеріалами є ефективним у чавунах з пластівчастим графітом, але не ефективним у чавунах з кулястим або ущільненим вермикулярним графітом.

Таким чином, сумуючи результати попередніх досліджень можливо сформулювати основні вимоги до карбюризаторів:

- вміст золи та газів повинен бути як можливо меншим,

- кристалічна структура повинна включати 80-90% графітованих матеріалів з кристалічністю більш 100 А при отриманні чавунів з пластинчастим графітом.

Результати досліджень термічної обробки антрациту у діапазоні температур 1500-3000°C з витримкою 10-20 хв [28] показали, що для отримання відповідної кристалічності достатньо термічна обробка при температурі 2400-2600°C (рис. 1). При цьому вміст вуглецю складає не менш 99% [29] (рис. 2).

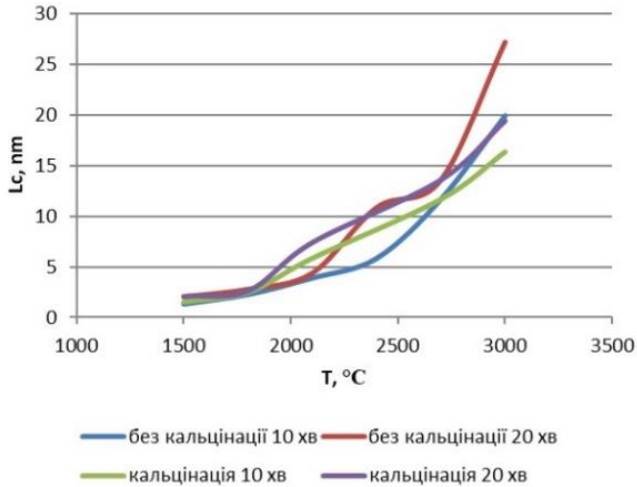


Рисунок 1 – Зміна висоти кристалітів Lc в залежності від температури обробки та часу витримки [28].

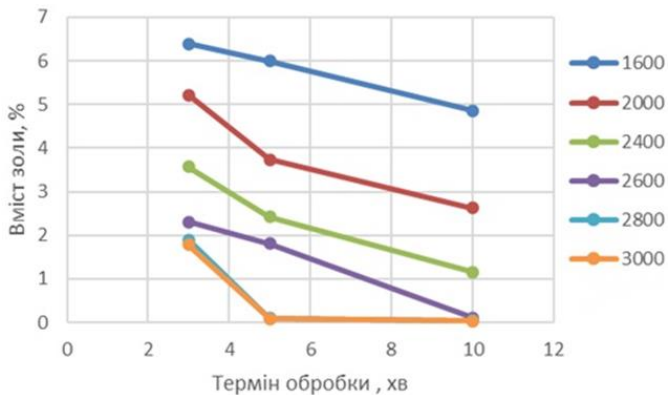


Рисунок 2 – Зміна зольності вуглецевого матеріалу при термічній обробці отримана згідно ДСТУ 17818.4-90 [29].

Висновки

Аналіз досліджень навуглецювання Fe-C розплаву різними видами карбюраторів визначив основні фактори які впливають на процес навуглецювання та якість виливок з синтетичного чавуну: технологічні параметри (температура розплаву, ступінь перемішування, вихідний склад розплаву), характеристики карбюраторів (вміст золи та її склад, вміст сірки, вміст азоту, кристалічна структура).

На основі результатів експериментальних досліджень сформульовані вимоги до оптимальних параметрів карбюраторів синтетичного чавуну:

- вміст золи та газів повинен бути як можливо меншим,
- кристалічна структура повинна включати 80-90% графітованих матеріалів з кристалічністю більш 100А при отриманні чавунів з пластинчастим графітом.

Дослідження графітації та рафінування антрациту Донецького родовища при шоківому нагріванні, характерному для печей з електротермічним киплячим шаром дозволили отримати основні технологічні параметри процесу що забезпечують вимогам до карбюраторів :

- температура обробки 2400-2700°C,
- термін витримки не більше 10 хв,
- можливість обробки антрациту без попередньої кальцинації.

Перелік посилань

1. Сіренко К. А. Розвиток виробництва лиття з синтетичного чавуну. *Метал та лиття України*. 2021. Т 29, № 3. С. 79-86.
2. Сіренко К. А., Мазур В. Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 3, С. 49-60. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049>
3. Сіренко К. А., Мазур В. Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4. С. 66-75.
4. Шумихин В. С., Лузан П. П., Жельнис М. В. Синтетический чугуn. Киев : Нукава думка, 1971. 157 с.
5. Dissolution of carbon from coke and char in liquid Fe-C alloys / Xing X. et al. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2018. V. 92. Issue 1. P. 22-27
6. Janerka K. Therate and effectiveness of carburization to the sort of carburizer. *Archives of foundry engineering*. 2007. Vol. 7, Issue 4. P. 95-100
7. Dissolution Behaviors of Various Carbonaceous Materials in Liquid Iron. Min-Min Sun et al. *Interaction Between Graphite and Iron JOM*. 2019. Vol. 71. No. 12. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03664-9>
8. Hamideh Kaffash, Merete Tangstad. Factors influencing dissolution of carbonaceous materials in liquid Fe–Mn. *J. Iron Steel Res. Int*. 2020. Vol. 27. P. 1153–1162. <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00487-w>
9. Cham S. Tsuey. Investigating factors that influence carbon dissolution from Coke into Molten iron. Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy. 2007. <https://doi.org/10.26190/unsworks/17751>

10. Мурзин А. В. Разработка технологии науглероживания металла при выплавке трубных сталей с использованием полупродукта ДСП. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Уральский федеральный университет. Екатеринбург. 2016, 186 с.

11. Janerka K., Jezierski J., Szajnar J. Quality and properties of the cast iron produced on the steel scrap. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. 53. Issue 2. P. 92-101

12. Elliott, R. Ph. D. Cast iron technology: Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. 1988. 243 p.

13. Janerka K. et al. Carburizer Effect on Cast Iron Solidification. *JMEPEG*. 2014. Vol. 23. P. 2174–2181. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1016-6>

14. Carbon Recovery and Inoculation Effect Of Carbonic Materials in Cast Iron Processing. Chisamera M. et al. *Institute of Cast Metals Engineers - 67th World Foundry Congress*. wfc06: 2006. Casting the Future (129).

15. Cham S. Tsuey et al. Factors Influencing Carbon Dissolution from Cokes into Liquid Iron. *ISIJ International*, 2004. Vol. 44 , No. 11, P. 1835–1841

16. Sun H., Mori K., Sahajwalla V., Pehlke R. D. Carbon Solution in Liquid Iron and Iron Alloys High Temperature. *Materials and Processes*. 1998. Vol. 17. No. 4. P.257-270

17. Recarburizer for synthetic cast iron application case URL: <https://www.baiyuncarbon.com/NEWS/117>. (Дата звернення: 16.11.2023)

18. Shahmarova R. S. Obtaining of high quality synthetic cast iron. *GBSSJAR*. 2021. 58(2), P.1-6. <https://doi.org/10.36962/gbssjar/58.2.007>

19. Mourao M. B., Murthy G. G. K., Elliott, J. F. Experimental investigation of dissolution rates of carbonaceous materials in liquid iron-carbon melts. *Metall Trans*. 1993. B 24. P. 629–637. <https://doi.org/10.1007/BF02673178>

20. Rita Khanna et al. Dissolution of Carbon from Coal-Chars into Liquid Iron at 1550 °C. *Metallurgical and materials transactions*. 2005. Vol. 36B. P. 719

21. Bandyopadhyay, D. et al. A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath. *Chemical Engineering Journal*. 2003. 94. P. 79–92

22. Influence of Ash on Interfacial Reactions between Coke and Liquid Iron Fiona McCarthy et al. *Metallurgical and materials transactions*. 2003. Vol. 34B, P.573

23. Macha Jaroslav et al. Termodynamika a kinetika nauhličování slitin železa pevným nauhličovadlem. *Hutn. listy*. 1988. 43. No. 1. P. 10-14

24. Leszek Krol et al. Model kinetyczny nawęglania ciekłego zelasa w procesie wytwarzania surowki syntetycznej. *Arch. hutn*. 1983. 28, No 1.

25. Романова А. В. Структура металлических расплавов. *Структура реальных металлов*. Сб. науч. тр. Киев : Наук. Думка, 1988. С. 204-235.

26. Loper C. R., Shirvani S., Witter, T. H. Graphite Inoculants for Gray Cast Iron. *MRS Online Proceedings Library*. 1984. No 4. P. 89–98. <https://doi.org/10.1557/PROC-34-89>

27. Фиалков А. Углеродистые материалы. Москва : Энергия, 1979. 320 с.

28. Sybir A. V. et al. Effect of anthracite heat treatment parameters during shock heating on the properties of carbon materials. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2022. No. 5. P. 94-101

29. Sybir A. V. et al. Peculiarities of high-temperature refining of carbon materials.

References

1. Sirenko, K. A. (2021). Rozvytok vyrobnytstva lyttia z syntetychnoho chavunu. [Development of synthetic iron casting production]. *Metal ta lyttia Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine.], 29(3), 79-86. [In Ukrainian]
2. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2023). Perevaha ta nedoliky metodiv rozrakhunku shykhty dlia vyplavky syntetychnoho chavunu v lyvarnomu vyrobnytstvi. [Advantages and disadvantages of methods for calculating the charge for synthetic iron smelting in foundry]. *Protsesy lyttia*. [Casting processes], (3), 49-60. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049>
3. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2021). Otsinka stabilnosti khimichnoho skladu i mekhanichnykh vlastyvoستي promyslovykh partii syntetychnoho chavunu [Evaluation of the stability of chemical composition and mechanical properties of industrial batches of synthetic cast iron]. *Protsesy lyttia*. [Casting processes], (4), 66–75 [In Ukrainian]
4. Shumykhyn, V. S., Luzan, P. P., & Zhelnys, M. V. (1971). Syntetycheskyi chuhun [Synthetic iron]. Nukava dumka, [In Russian]
5. Xing, X., Jahanshahi, S., Yang, J., & Ostrovski, O. (2018). Dissolution of carbon from coke and char in liquid Fe-C alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 92(1), 22-27
6. Janerka, K. (2007). Therate and effectiveness of carburization to the sort of carburizer. *Archives of foundry engineering*, 7(4), 95-100
7. Min-Min Sun, Jian-Liang Zhang, Ke-Jiang Li ,Shan Ren, Zi-Ming Wang, Chun-He Jiang, Hong-Ta (2019). Dissolution Behaviors of Various Carbonaceous Materials in Liquid Iron. *Interaction Between Graphite and Iron JOM*, 71(12), <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03664-9>
8. Hamideh Kaffash, & Merete Tangstad. (2020). Factors influencing dissolution of carbonaceous materials in liquid Fe–Mn. *J. Iron Steel Res. Int.*, 27. 1153–1162. <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00487-w>
9. Cham, S. (2007). Tsuey Investigating factors that influence carbon dissolution from Coke into Molten iron. Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. <https://doi.org/10.26190/unsworks/17751>
10. Murzin, A. V. (2016). Razrabotka tekhnologii nauglerazhivaniya metalla pri vyplavke trubnyh stalej s ispol'zovaniem poluprodukta DSP. [Development of the technology of metal carburizing during the smelting of pipe steels using semi-products of arc steelmaking furnace]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, Ural'skij federal'nyj universitet. Ekaterinburg [In Russian]
11. Janerka, K., Jezierski, J., & Szajnar, J. (2012). Quality and properties of the cast iron produced on the steel scrap. *Archives of Materials Science and Engineering*, 53(2), 92-101
12. Elliott, R. (1988). Ph. D. Cast iron technology. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd.
13. Janerka, K., Kondracki, M., Jezierski, J., Szajnar, J., & Stawarz, M. (2014). Carburizer Effect on Cast Iron Solidification. *JMEPEG*, 23, 2174–2181. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1016-6>

14. Chisamera, M., Riposan, I., Stan, S., Constantin, V., & Diaconu C. Carbon (2006). Recovery and Inoculation Effect Of Carbonic Materials in Cast Iron Processing. *Institute of Cast Metals Engineers - 67th World Foundry Congress. wfc06: Casting the Future* (129)
15. Cham, S. Tsuey, Sahajwalla, Veena, Sakurovs, Richard, Sun, Haiping, Dubikova, Maria (2004). Factors Influencing Carbon Dissolution from Cokes into Liquid Iron. *ISIJ International*, 44(11), 1835–1841
16. Sun, H., Mori, K., Sahajwalla, V., & Pehlke, R. D. (1998). Carbon Solution in Liquid Iron and Iron Alloys High Temperature. *Materials and Processes*, 17(4), 257-270
17. *Recarburizer for synthetic cast iron application case.* (2021). <https://www.baiyuncarbon.com/NEWS/117>
18. Shahmarova R. S. (2021). Obtaining of high quality syntenic cast iron. *GBSSJAR*, 58(2), 1-6. <https://doi.org/10.36962/gbssjar/58.2.007>
19. Mourao, M. B., Murthy, G. G. K., & Elliott, J. F. (1993). Experimental investigation of dissolution rates of carbonaceous materials in liquid iron-carbon melts. *Metall Trans.*, B 24, 629–637. <https://doi.org/10.1007/BF02673178>
20. Rita Khanna, Fiona McCarthy, Haiping Sun, Noel L Simento, & Veena Sahajwalla (2005). Dissolution of Carbon from Coal-Chars into Liquid Iron at 1550°C. *Metallurgical and materials transactions*, 36B, 719
21. Bandyopadhyay, D., Singh, S. D., Sanyal, D., Singh, K. K., Singh, K. N. (2003). A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath. *Chemical Engineering Journal*, 94, 79–92
22. Fiona McCarthy et al. (2003). Influence of Ash on Interfacial Reactions between Coke and Liquid Iron. *Metallurgical and materials transactions*, 34B, 573
23. Macha Jaroslav, Petros Jaroslav, Jenik Vladimir, & Zapalka Dusan. (1988). Termodynamika a kinetika nauhličování slitin železa pevným nauhličovadlem. *Hutn. listy*, 43(1), 10 – 14
24. Leszek Krol, & Jerzy Latusek. (1983). Model kinetyczny nawegłania ciekłego zelasa w procesie wytwarzania surowki syntetycznej. *Arch. hutn.* 28(1)
25. Romanova, A.V. (1988). Структура металлических расплавов [Structure of metallic melts]. *Структура реальных металлов [Structure of real metals]*. (p. 204–235). Nauk. Dumka. [In Russian].
26. Loper, C. R., Shirvani, S., & Witter, T. H. (1984). Graphite Inoculants for Gray Cast Iron. *MRS Online Proceedings Library*, (34), 89–98. <https://doi.org/10.1557/PROC-34-89>
27. Fialkov, A. (1979). *Углеродистые материалы [Carbon graphite materials]*. Energiya. [In Russian].
28. Sybir, A. V., Hubytskyi, M. V., Balalaiev, O. K., Burchak, O. V., Sukhoyy, K. M., Fedorov, S. S., Pinchuk, V. O., Hubytskyi, S. M., & Vvedenska, T. Y. (2022). Effect of anthracite heat treatment parameters during shock heating on the properties of carbon materials. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, (5), 94-101
29. Sybir, A. V., Hubytskyi, S. M., Fedorov, S. S., Sukhoyy, K. M., Hubytskyi, M. V., & Vvedenska, T. Y. (2023). Peculiarities of high-temperature refining of carbon materials. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, (6)

M. V. Hubynskiy¹, D. Sc. (Tech.), Professor, Leading researcher, ORCID 0000-0003-3770-4397

A. V. Sybir¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327

S. S. Fedorov¹, D. Sc. (Tech.), Professor, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9974-0636

O. Ye. Merkulov¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

S. M. Hubynskiy², Researcher, ORCID 0000-0002-4598-5136

V. F. Mazorchuk², Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-4115-9865

O. M. Foris², Postgraduate student, ORCID 0000-0002-9524-2381

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

² *Ukrainian State University of Science and Technologies*

PECULIARITIES OF THE Fe-C MELT CARBURIZATION PROCESS AND THE EFFECT PRODUCED ON IT BY THE TYPE OF CARBURIZERS

Abstract. One of the ways to improve the competitiveness of domestic steel and machine-building products and transition to a carbon-free economy is to develop synthetic pig iron production technology. Synthetic pig iron production ensures the efficiency and quality of foundry operations. The replacement of expensive casting and remolding cast irons with steel scrap reduces the cost of casting production and allows for the use of higher quality materials free of harmful impurities and inclusions. However, their use in the charge results in the need for melt carburizing. In this case, the melt carburizing process plays an important role in the multi-link chain of casting production. In this situation, it is of particular importance to choose a carburizer that will ensure the quality of the final product and reduce production costs. This task was solved in this work on the basis of studying the processes of carburization of Fe-C melt and determining the requirements for the quality of carburizers and determining the technological parameters of their production in units with an electrothermal fluidized bed. The analysis of studies of carburization of Fe-C melt by different types of carburizers has identified the main factors that affect the carburization process and the quality of synthetic cast iron castings: technological parameters (melt temperature, degree of mixing, initial melt composition), characteristics of carburizers (ash content and its composition, sulfur content, nitrogen content, crystal structure). Based on the results of experimental studies, the requirements for the optimal parameters of synthetic cast iron carburizers were formulated: the content of ash and gases should be as low as possible, the crystal structure should include 80-90% of graphitized materials with a crystallinity of more than 100 Å when producing cast irons with lamellar graphite. This made it possible to determine the main technological parameters for the production of carburetors based on domestic raw materials (anthracite of the Donetsk deposit): heat treatment temperature 2400-2700°C, treatment time 10 minutes.

Key words: synthetic cast iron, carburizing, diffusion process, carburetor, electrothermal fluidized bed.

For citation: Hubynskiy, M. V., Sybir, A. V., Fedorov, S. S., Merkulov, O. Ye., Hubynskiy, S. M., Mazorchuk, V. F., & Foris, O. M. (2023). Peculiarities of the Fe-C melt carburization process and the effect produced on it by the type of carburizers. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 62-75. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-62-75>

*Стаття надійшла до редакції збірника 30.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*