

УДК 672.1; 669.13

**Г. А. Баглюк, В. Я. Куровский, Э. В. Захарченко\*,  
С. И. Клименко\*, Г. А. Данильчук\*\*, Л. П. Зинзура\*\*,  
Е. А. Сиренко\***

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

\* Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*\* Частное акционерное общество «Металит», Кропивницкий

## **МОДИФИЦИРОВАНИЕ И МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ КАРБАМИДСОДЕРЖАЩИМИ БРИКЕТАМИ ДЛЯ ОТЛИВОК ИЗ АЗОТИСТОГО ЧУГУНА ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ С ПЛАСТИНЧАТЫМ И ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ**

*Исследовано влияние компонентного состава и расхода карбамидсодержащих брикетированных модификаторов при ковшовом модифицировании расплава на основные механические свойства и структуру получаемых чугунов. Показана эффективность обработки расплава чугуна порошковыми брикетированными модификаторами, содержащими карбамид. Увеличение расхода брикетов, содержащих 8 % карбамида, с 0,25 до 5-6 % от массы расплава приводит к существенному увеличению прочности серого чугуна до уровня прочности высокопрочных чугунов (около 490 МПа). С увеличением расхода брикетов от 1 до 6 % степень усвоения азота уменьшается с 29 до 14 % и растет склонность к отбелу. Морфология графитной фазы с ростом содержания азота в сплаве изменяется от смеси включений пластинчатой и вермикулярной формы до вермикулярной формы частиц, количество и размер которых уменьшается в чугуне с большим содержанием азота. Матричная фаза чугуна при всех содержаниях азота имеет структуру тонкопластичного перлита.*

**Ключевые слова:** чугун, модифицирование, азот, карбамид, отбел, прочность, графит.

*Досліджено вплив компонентного складу і витрати карбамідовмісних брикетованих модифікаторів при ковшовому модифікуванні розплаву на основні механічні властивості і структуру чавунів. Показано ефективність обробки розплаву чавуну порошковими брикетованими модифікаторами, що містять карбамід. Збільшення витрат брикетів, що містять 8 % карбаміду, з 0,25 до 5-6 % маси розплаву призводить до істотного збільшення міцності сірого чавуну до рівня міцності високоміцних чавунів (близько 490 МПа). Зі збільшенням витрати брикетів від 1 до 6 % ступінь засвоєння азоту зменшується з 29 до 14 % і зростає схильність до відбілу. Морфологія графітної фази із зростанням вмісту азоту в сплаві змінюється від суміші включень пластинчастої і вермикулярної форми до вермикулярної форми часток, кількість і розмір яких зменшується в чавуні з великим вмістом азоту. Матрична фаза чавуну при усіх вмістах азоту має структуру тонкопластичного перліту.*

**Ключові слова:** чавун, модифікування, азот, карбамід, вибіл, міцність, графіт.

*The results of investigations of the effect of carbamide containing briquetted modifying agent composition and modifiers consumption at ladle inoculation of the melt on the basic mechanical properties and structure of cast iron are presented. The efficiency of melt cast iron processing with powder briquetted modifiers containing carbamide was shown. Increase of briquettes consumption, containing 8 % carbamide, from 0,25 to 5 6 % of the melt weight results in a substantial increase of the cast iron strength, that is achieved of strength of ductile iron (about 490 MPa) at 5-6 % of modifying agent. With increasing briquettes consumption from 1 to 6 % the degree of nitrogen assimilation decreases from 29 to 14 % and the chilling effect increases. Morphology of graphitic phase with increasing nitrogen content in the alloy varies from mixture of lamellar and vermicular inclusions up to vermicular form of particles, the amount and size of which is reduced for the cast iron with a higher content of nitrogen. The matrix phase of the cast iron for all the nitrogen content has a structure of thin-laminar pearlite.*

**Keywords:** cast iron, modification, nitrogen, carbamide, chilling, strength, graphite.

### Введение

Карбамид (амид угольной кислоты)  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  давно привлекает внимание исследователей и практиков как перспективный модификатор и микролегирующий реагент для обработки жидких чугунов для отливок. Это недефицитное и недорогое легкоплавкое гранулированное соединение (плавится при 133 °С [1-2]) на 46 % сухой массы состоит из азота. Растворенный азот замедляет распад карбидов и модифицирует форму графитных включений, в результате чего временное сопротивление разрыву и твердость серого чугуна значительно возрастают [3-9]. Активный азот – эффективный аустенитостабилизирующий элемент, что позволяет использовать его как заменитель таких дорогостоящих легирующих элементов, как никель и медь [5, 10, 11]. Влияние растворенного азота на затвердевание серого чугуна сильно зависит от содержания азота: на этапе эвтектического затвердевания переохлаждение снижается вдвое (с 8 до 4 °С), если содержание азота не превышает 0,015 %, а затем наоборот – увеличивается более, чем в вдвое (с 4 до 9 °С) при дальнейшем росте концентрации азота от 0,015 до 0,035 % [12]. Стабилизация перлитной основы азотистого чугуна обусловлена тем, что азот увеличивает интервал эвтектоидного превращения, значительно снижая температуру конца превращения и несколько повышая температуру его начала [12]. Азот образует в структуре сплава нитриды в виде мелких включений, способных служить зародышами кристаллизации. Нитриды и/или карбонитриды способствуют измельчению структурных составляющих чугунов [3].

В работе [8] обоснована перспективность производства азотистого чугуна с вермикулярным графитом посредством переплава азотистой металлошихты из свежих и возвратных чугунов и лома с возможным минимальным дополнительным вводом азота в печи или вне ее (в ковше или в литейной форме). Переплав азотистой металлошихты с 0,02-0,03 % мас. азота с последующим вводом в жидкий чугун, содержащий до 0,1 % серы, карбамида марки А по ГОСТ 2081-92, обеспечивают при остаточном содержании азота около 0,03 % получение нелегированного перлитного чугуна с вермикулярным графитом марки ЧВГ45 по ГОСТ 28394-89 [8].

Существует большое количество разнообразных способов ввода азота в жидкий металл, однако наибольшее применение получили два: продувка ванны жидкого металла газообразным азотом [13-15] и использование азотированных лигатур [12, 16-18].

В качестве азотсодержащих лигатур наиболее широкое применение получили азотированные ферромарганец или феррохром, нитрид магния и лигатуры на основе марганца и его сплавов, представляющие собой двухкомпонентную систему Mn-N, в которой при температурах 900-950 °С образуются нитриды:  $\text{Mn}_4\text{N}$  (5,99 % N),  $\text{Mn}_5\text{N}_2$  (9,2–11,92 % N), из которых самым устойчивым является соединение  $\text{Mn}_4\text{N}$  [12, 17, 18].

В последнее время наметилась тенденция применения модификаторов в виде брикетов, полученных путем прессования из смесей дисперсных порошковых материалов [19-20]. Выбор оптимального состава брикетированных модификаторов позволяет улучшить свойства чугунов и сталей за счет стабильности процесса и увеличения усвояемости модифицирующих компонентов, а также облегчает их ввод в расплав. Применение брикетированных порошковых модификаторов представляет большой практический и научный интерес вследствие возможности получения в составе брикетов широкого спектра концентраций различных компонентов, различий по плотности, пористости, формам и размерам брикетов [21].

При использовании карбамида в качестве азотсодержащей составляющей модифицирующих брикетов с температурой деструкции значительно ниже температуры обрабатываемого чугуна, продуктом деструкции является атомарный азот, который обладает повышенной химической активностью, хорошо растворяется в железе, проявляя по отношению к нему легирующие свойства, перлитизирует металлическую основу, повышая механические свойства чугуна [2].

Однако, в научно-технической литературе содержится крайне ограниченный объем информации о влиянии брикетированных модификаторов и микролегирующих на эффективность обработки расплавов чугуна.

*Цель данной работы* – исследование влияния компонентного состава и расхода карбамидсодержащих брикетированных модификаторов при ковшовом модифицировании расплава на основные механические свойства и структуру получаемых чугунов.

*Материалы и методика эксперимента*

Выплавку опытных составов чугунов производили в индукционной печи из шихтового материала на основе передельного чугуна следующего состава (%мас.): 3,45 С; 2,1 Si; 0,8 Mn; 0,08 S; 0,4 Cr; 0,2 Ni; Fe – остальное.

С учетом того, что обработка железоуглеродистых расплавов карбамидом сопровождается бурной реакцией и интенсивным пироэффектом, карбамид вводили в расплав в составе модифицирующих брикетов, содержащих компоненты, которые существенно снижают указанные отрицательные эффекты: порошки железа (фракции – 200 мкм) и меди (фракции – 160 мкм). Медь имеет относительно невысокую температуру плавления, хорошую растворимость в жидком чугуне и может выполнять пассивирующую функцию, обволакивая частицы добавок, имеющих большое средство к кислороду и предохраняя их от контакта с внешней средой. В качестве дополнительных модифицирующих компонентов некоторые составы смесей содержали ферросилиций размолотый ФС75 (фракции – 200 мкм) и порошок плавикового шпата ( $\text{CaF}_2$ ). Модифицирующие брикеты изготавливали из порошковых смесей с 5-30 %мас. карбамида и различным содержанием металлической составляющей. Из порошковых смесей разных составов под давлением 350 МПа прессовали модифицирующие брикеты цилиндрической формы диаметром 50 мм и высотой 30 мм и определяли их плотность.

Обработку расплава чугуна азотсодержащими брикетами проводили в ковше путем принудительного их погружения в расплав при температурах 1420-1440 °С, после чего чугун заливали в песчаные формы.

Прочность получаемых чугунов определяли по испытаниям на растяжение, а твердость – по Бринеллю. Образцы для металлографических исследований изготавливали из темплетов, вырезанных из средней части отливок. Подготовку образцов производили по стандартной металлографической методике, при которой образцы шлифовали, полировали и подвергали травлению в 25 %-ном спиртовом растворе нитала.

Степень усвоения азота  $A$  (%) в жидком чугуне рассчитывали как соотношение содержания азота в чугуне, полученном после модифицирующей обработки, к общему исходному содержанию азота в модифицирующих брикетах, использованных для обработки расплава:

$$A = \frac{10^4 N_2}{P_{\text{Бр}} \cdot 8 \cdot 46} \cdot 100\%,$$

где  $N_2$  – содержание азота в чугуна после модифицирования (%мас.);  $P_{бр}$  – расход брикетов по отношению к массе обрабатываемого расплава (%); 8 – процентное содержание карбамида в шихте; 46 – содержание азота в карбамиде (%мас.)

Отбел оценивали по величине максимального расстояния (в мм) от поверхности отливки до границы зоны, в которой появлялись включения свободного графита (чистый отбел).

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Технология получения брикетированных модификаторов включает операцию прессования брикетов необходимой массы, формы и химического состава из соответствующих компонентов порошковой шихты. При изменении содержания отдельных компонентов шихты, а также давления прессования, плотность брикетов изменяется в широких пределах. Брикеты с одинаковым химическим составом, но с разной плотностью, имеют разные значения контактной межчастичной прочности и теплопроводности, что влияет на интенсивность их растворения в жидком металле. Плотность таких брикетов не должна быть слишком низкой во избежание их всплытия до момента полного растворения при заливке ковша расплавом.

Оценка влияния состава исходной шихты из порошковых смесей на плотность брикетов показала (рис. 1), что увеличение содержания карбамида в шихте с 5 до 30 % приводит к снижению плотности брикетов вдвое для всех составов исходных смесей. Наибольшей плотностью при низких содержаниях карбамида отличаются брикеты на основе пластичного порошка меди, однако с увеличением содержания карбамида в шихте различие в плотности между медьсодержащими и железосодержащими брикетами резко уменьшается и уже при 18-20 %мас. карбамида значения их плотности практически совпадают.

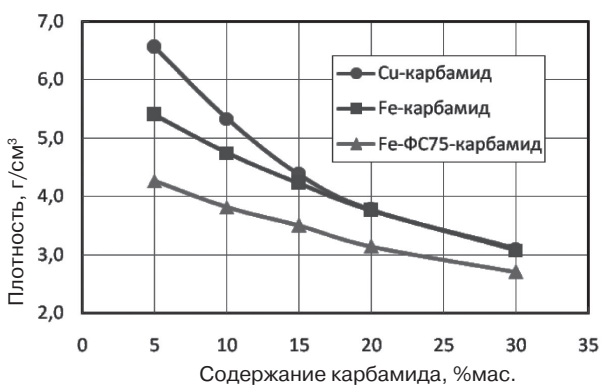


Рис. 1. Зависимость плотности брикетов, спрессованных при 350 МПа, от содержания карбамида в исходной шихте

Резкое уменьшение различия в уплотняемости шихт разного состава наблюдается, когда объемное содержание карбамида становится соизмеримым с объемным содержанием металлической фазы или даже превышает его; при этом уплотняемость шихты характеризуется в большей мере уплотняемостью карбамида, а не металлической фазы брикета.

Брикеты на основе порошка железа с 20 % ФС75 отличаются заметно меньшей плотностью при всех содержаниях карбамида, что обусловлено более высокой твердостью ферросилиция по сравнению с медью и нелегированным железом. Прессовки из шихты такого состава в связи с низкой плотностью обладают недостаточной технологической прочностью, в связи с чем они не могут быть эффективно использованы, как модифицирующие брикеты при ковшовом модифицировании.

Оценка влияния плотности брикетов на интенсивность проявления пироэффекта при их взаимодействии с расплавом показала, что пироэффект резко возрастает с повышением концентрации карбамида более 8-10 (%мас.). В дальнейших исследованиях содержание карбамида в шихте для всех составов брикетов принималось равным 8 %мас.

С увеличением расхода брикетов с 0,25 до 3 % по отношению к массе обрабатываемого чугуна, прочность (рис. 2, а) получаемых сплавов существенно увеличивается при некотором увеличении твердости (рис. 2, б). Чугун, полученный из расплава аналогичного состава без его обработки азотсодержащими модифицирующими брикетами имел среднюю прочность на разрыв около 215 МПа при твердости  $HB\ 2,07$ , тогда как после обработки расплава с расходом брикетов 3 % его прочность повышается до 310-325 МПа, а твердость – до 2,41-2,48.

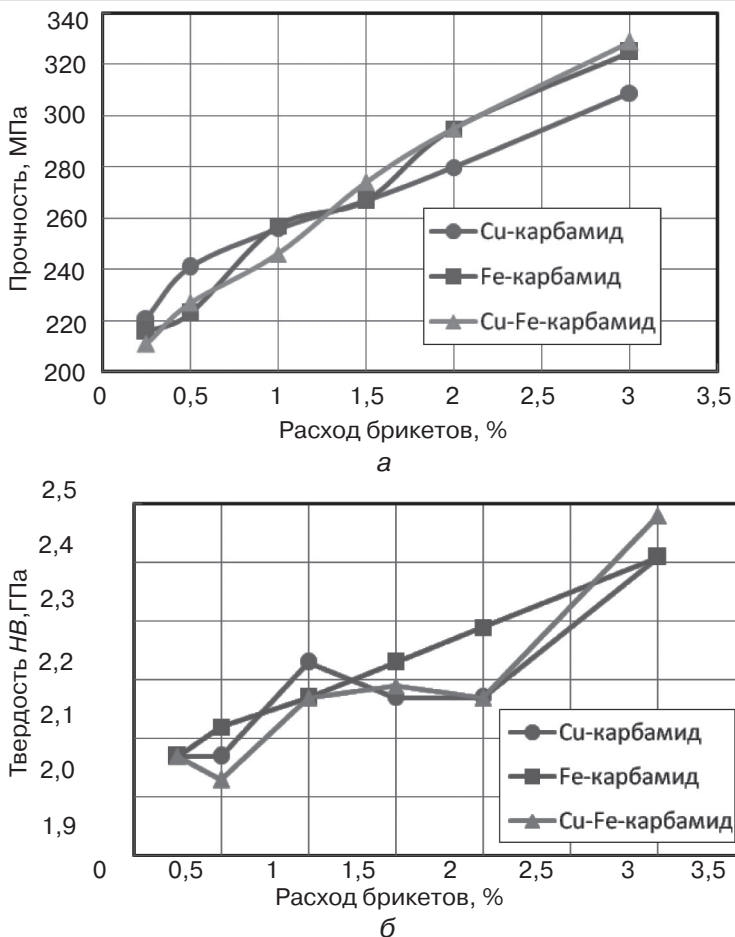


Рис. 2. Зависимость прочности (а) и твердости по Бринеллю (б) чугунов, полученных после обработки расплава модифицирующими брикетами составов (в %): 8 карбамид – 90 Cu – 2 CaF<sub>2</sub>; 8 карбамид – 90 Fe – 2 CaF<sub>2</sub> и 8 карбамид – 45 Cu – 45 Fe – 2 CaF<sub>2</sub> (обозначения см. на рис.)

Глубина отбела увеличивается с 9 мм для чугунов, не прошедших модифицирующую обработку, до 11-13 мм после обработки расплава азотсодержащими брикетами.

Обращает на себя внимание слабая зависимость рассмотренных механических свойств сплавов от компонентного состава металлической составляющей модифицирующих брикетов при их расходе для обработки расплава до 1,5 % мас. расплава. С увеличением расхода брикетов до 3 % наблюдается некоторое увеличение прочности сплавов, обработанных брикетами, в состав которых входил порошок железа по сравнению с брикетами на основе порошка меди. Такой эффект может быть обусловлен тем, что конечная структура чугуна зависит от наличия инокулирующего модифицирования, которое обусловлено влиянием эффекта суспензирования расплава и определяющее количество зародышей графитной фазы [13].

Один из наиболее эффективных методов инокулирующего воздействия – введение в металлический расплав порошкообразных микрохолодильников, представляющих собой готовые кристаллы, близкие по составу к затвердевающей фазе вследствие полного смачивания и сходства их кристаллических решеток. Эти частицы железа являются источниками высокоуглеродистых флуктуаций, которые при затвердевании становятся центрами кристаллизации графита и уменьшают отбел в отливках из серого чугуна. Расплавляясь, они поглощают тепло жидкого металла и становятся новыми центрами кристаллизации [14]. Некоторое повышение прочностных свойств чугунов, обработанных модифицирующими брикетами на основе порошка железа, обусловлено наличием в их составе более тугоплавких

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

по сравнению с медью дисперсных частиц железного порошка, обеспечивающих получение более устойчивой суспензии в расплаве для достижения требуемого инокулирующего эффекта. При использовании же брикетов на основе более легкоплавкого медного порошка инокулирующий эффект модифицирования несколько снижается.

Как показали результаты определения содержания азота в чугунах, обработанных 1-6 % брикетами состава (в %)  $90 \text{ Fe} - 8 \text{ карбамид} - 2 \text{ CaF}_2$ , если с увеличением расхода брикетов с 1 до 5 % содержание азота в чугуне заметно повышается с 0,0107 до 0,0297 %, то при 6 % расхода брикетов содержание азота увеличивается крайне незначительно (до 0,0312 %) (рис. 3, а).

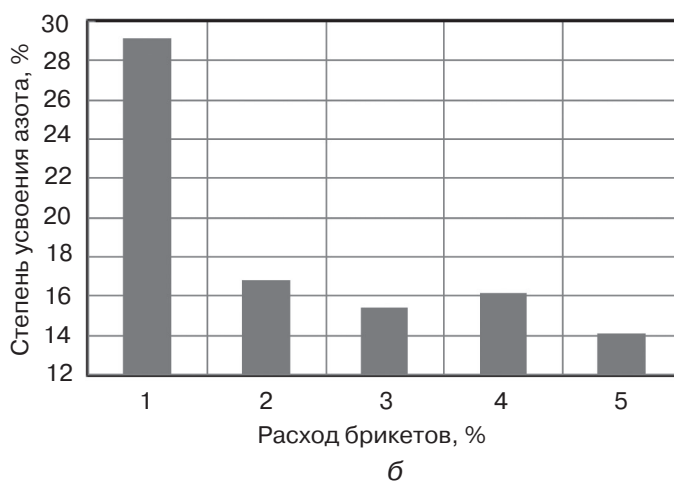
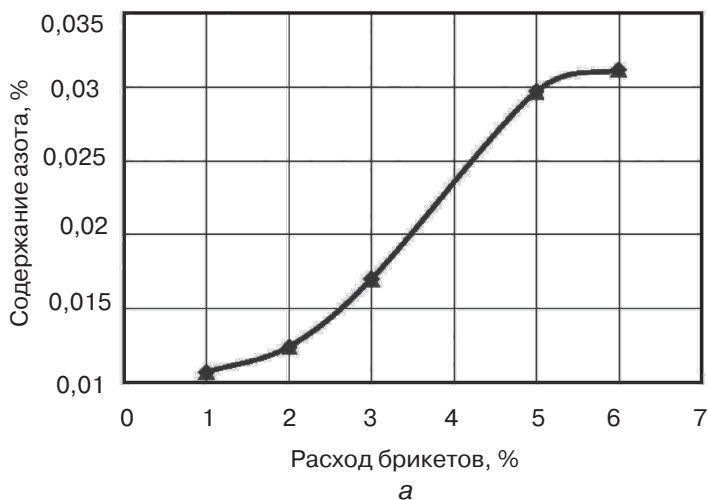
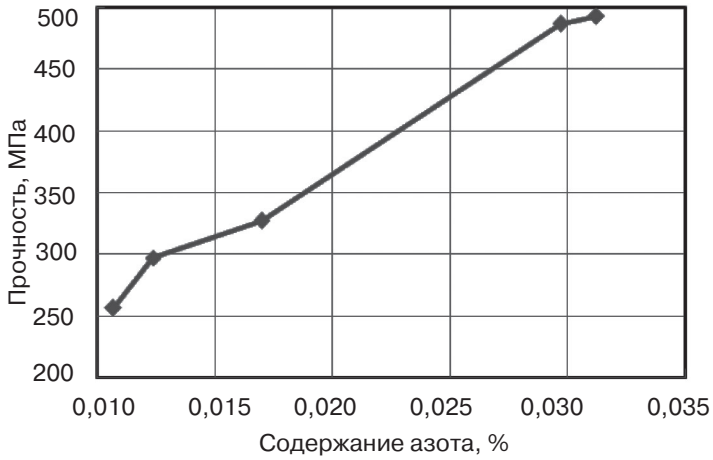


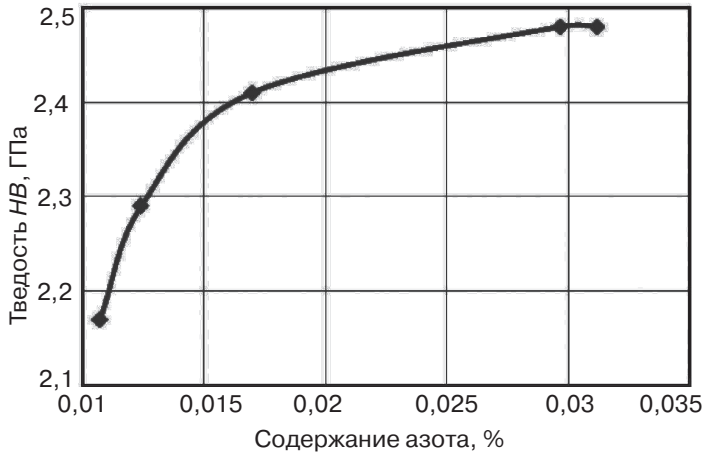
Рис. 3. Зависимость содержания азота в чугуне (а) и степень усвоения азота (б) от расхода брикетов состава (в %):  $90 \text{ Fe} - 8 \text{ карбамид} - 2 \text{ CaF}_2$

Зависимость степени усвоения азота в чугуне от расхода брикетов приведена на рис. 3, б. При минимальном расходе брикетов 1 %мас. степень усвоения азота составляет около 29 %, начиная с 2 % расхода степень усвоения резко падает и при 6 % расхода брикетов составляет лишь около 14 %. Представленные результаты свидетельствуют о технической и экономической нецелесообразности повышения расхода карбамидсодержащих брикетов для модифицирования серых чугунов свыше 5 %.

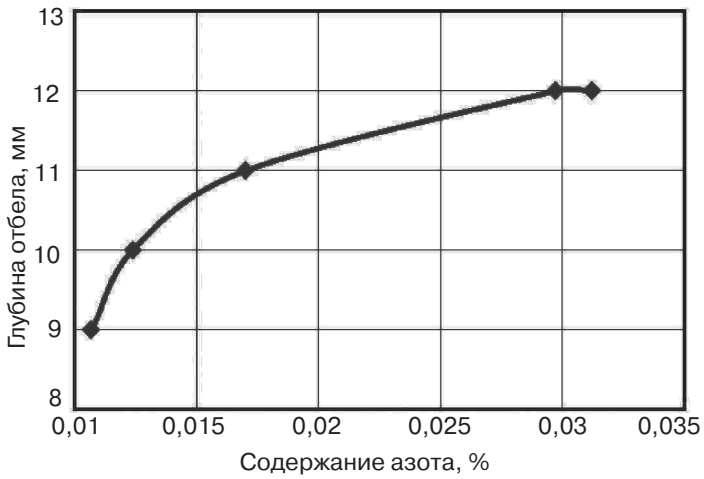
С увеличением расхода модифицирующих брикетов с 0 до 5 % происходит существенный рост механических характеристик сплава (рис. 4), тогда как при увеличении расхода брикетов с 5 до 6 % средняя прочность сплава возрастает крайне незначительно (с 487 до 493 МПа), а твердость чугуна вообще остается на том же уровне



а



б



в

Рис. 4. Зависимость прочности (а), твердости (б) чугуна и глубины отбела (в) от содержания азота

(2,48 ГПа). Обработка расплава брикетированными модификаторами в количестве 5-6 % мас., содержащими порошок железа и карбамид, приводит к получению прочности серого чугуна на уровне высокопрочных чугунов.

Как следует из рис. 4, в, глубина отбела увеличивается логарифмически с ростом содержания азота в чугуне и при максимальных содержаниях азота (~0,03 %) составляет около 12 мм.

Повышение склонности азотсодержащих чугунов к отбелу отражается и на существенном влиянии содержания азота на морфологию (размеры и форму) графитовых включений. Для чугуна с содержанием азота 0,008-0,017 % характерной является смесь равномерно распределенных включений графита пластинчатой и вермикулярной формы (рис. 5, а), и при увеличении содержания азота до 0,03 % графитная фаза состоит из включений вермикулярной формы (рис. 5, б) [8], количество и размер которых заметно уменьшается в чугуне с большим содержанием азота. Матричная фаза для чугуна при всех содержаниях азота имеет структуру тонкопластичного перлита.

### Выводы

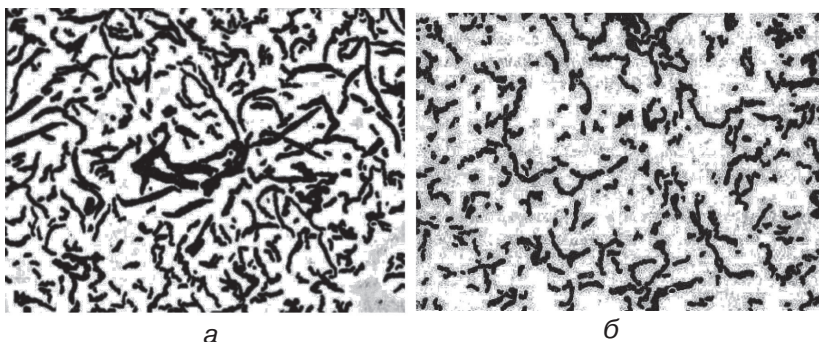


Рис. 5. Морфология графитной фазы в чугуне с 0,008-0,017 (а) и 0,03 % (б) азота

- Обработка расплава чугуна порошковыми брикетированными модификаторами, содержащими карбамид, обеспечивает существенное повышение прочностных свойств серого чугуна и его твердости.

- Увеличение расхода карбамидсодержащих брикетов с 0,25 до 5-6 % приводит к существенному повышению прочности чугуна. Обработка расплава брикетированными модификаторами в количестве 5-6 % от массы расплава, вызывает возрастание прочности серого чугуна практически до уровня высокопрочных чугунов (около 490 МПа).

- С увеличением расхода брикетов с 1 до 6 % от массы обрабатываемого расплава чугуна степень усвоения азота уменьшается вдвое (с 29 до 14 %), что свидетельствует о нецелесообразности повышения расхода карбамидсодержащих брикетов для модифицирования серых чугунов свыше 5-6 %.

- Глубина отбела увеличивается логарифмически с ростом содержания азота в чугуне и при максимальных содержаниях азота (0,03 %) составляет около 12 мм.

- С увеличением содержания азота в чугуне морфология графитной фазы изменяется от смеси включений графита пластинчатой и вермикулярной формы (при 0,008-0,017 %) до вермикулярной формы включений (при 0,03 % азота), количество и размер которых заметно уменьшается в чугуне с большим содержанием азота. Матричная фаза для чугуна при всех содержаниях азота имеет структуру тонкопластичного перлита.



### Список литературы

1. Суло Н. В., Панченко А. Н. Азотсодержащие брикет-модификаторы для чугуна и стали



- // Разработка рудных месторождений. Научно-техн. сборник. – Кривой Рог, 2011. – Вып. 94. – С. 239-241.
2. Леви Л. И. Азот в чугуна для отливок. – М.: Машиностроение, 1964. – 230с.
  3. Бигеев В. А., Щеголева Е. А., Букреев А. Е., Манашев И. Р. Перспективы производства лигатур на основе марганца и его сплавов для легирования стали азотом // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – №1 (13). – С. 34-36.
  4. Zhao L., Maurer M., Lugscheider E. Thermal spraying of a nitrogen alloyed austenitic steel // Thin Solid Films. – 2003. – vol. 424. – no. 2. – pp. 213-218.
  5. Hongsheng Ding, Shiqiu Liu, Hailong Zhang, Jingjie Guo. Improving impact toughness of a high chromium cast iron regarding joint additive of nitrogen and titanium // Materials and Design. – 2016. – vol. 90. – pp. 958-968.
  6. Edington J., Nicola W., Richards V. L. Age Strengthening of Gray Cast Iron: Nitrogen Effects and Machinability // Transactions of the American Foundry Society, vol. 110: Part 2. – 2002. – pp. 983-993.
  7. Qi-jie Z. Effect of Nitrogen in Cast Irons and Nitrogen-Containing High-Strength Gray Iron // Modern Cast Iron. – 2001. – vol. 2. – pp. 9-14.
  8. Захарченко Э. В., Захарченко А. Э. Перлитный азотистый чугун с вермикулярным графитом с повышенным содержанием серы // Кристаллизация и свойства высокопрочного чугуна в отливках. – К.: Институт проблем литья АН УССР, 1990. – С.140-146.
  9. Иванова Е. А., Наркевич Н. А., Миронов Ю. П., Белик С. И. Использование хромомарганцевого чугуна, легированного азотом, для получения износостойких покрытий методом электронно-лучевой наплавки // Физическая мезомеханика. Спец. выпуск. – 2006. – С. 161-164.
  10. Хуснутдинов Г. Д., Моисеева Н. П. Коррозионно стойкий аустенитный высокопрочный чугун ЧН9Г4ДЗШ // Процессы литья. – 2009. – № 5. – С. 42-47.
  11. Крюкова О. Г., Чухломина Л. Н. О взаимодействии титанохромового ферросплава с азотом // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 93-98.
  12. Ronode L., Jingxiang J. The effects of Nitrogen on Solidification Process of Grey Iron // AFS Transactions. – 1988. – no. 96. – pp. 423-430.
  13. Автухов А. К. Исследование влияния продувки азотом на формирование структуры металла рабочего слоя прокатных валков исполнения ЛПХНМ // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2015. – vol. 3. – no. 4. – pp. 9-12.
  14. Зборщик А. М., Кулиш Ю. Ю. Влияние нитридообразования на эффективность использования десульфуратора при инжектировании магния в чугун азотом // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – 2012. – Вип. 1(14). – no. 2(15). – С. 20-30.
  15. Sun H., Liu Y.-C., Lu M.-J. Thermodynamic and Kinetic Analysis of Nitrogenization in Desulfurization of Hot Metal by Magnesium Injection // Iron and Steel Institute Japan International. – 2009. – vol. 49. – no. 6. – pp. 771-776.
  16. Пат. 18224444 АЗ (СССР). Компактированный реагент для обработки расплава чугуна / Захарченко Э. В., Захарченко А. Э., Клименко В. Н., Куровский В. Я., Ляпунов А. П. – Опубл. 15.06.1993. Бюл. № 22.
  17. Пат. 43747 У Україна, МПК (2009) C22C 35/00. Азотомісна лігатура / Панченко Г. М., Учитель О. Д., Гасик М. І. – Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
  18. Хуснутдинов Г. Д., Зеленый Б. Г. Исследование параметров обработки чугуна нитридом магния // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 24-30.
  19. Литовка В. И., Маслюк В. А., Куровский В. Я. и др. Получение высокопрочного чугуна с применением брикетированных модификаторов // Литейное производство. – 2003. – № 8. – С.7-12.
  20. Kurovskiy V. Ya., Bagliuk G. A. The features of cast iron treatment with briqueted powder modifiers in manufacturing of forming rolls // Machines, technologies, materials, 2013. 10th International Congress. Proceedings. 10-12 September 2013. – Varna, Bulgaria, 2013. – vol. 1. – pp. 93-96.
  21. Баглюк Г. А., Куровський В. Я., Шинський О. Й. Вплив режимів пресування порошкових модифікаторів на кінетику їх розчинення в розплаві чавуну // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2010. – № 59. – С. 27-30.



## References

1. Suslo N. V., Panchenko A. N. (2011) Azotsoderzhashchie briket-modifikatory dlya chuguna i stali [Nitrogen-containing briquette-modifiers for iron and steel]. Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy. Nauchno-tekhn. sbornik. Krivoy Rog, vol. 94, pp. 239-241. [in Russian].

2. Levi L. I. (1964) Azot v chugune dlya otlivok [Nitrogen in cast iron for castings]. Moscow: Mashinostroenie, 230 p. [in Russian].
3. Bigeev V. A., Shchegoleva Ye. A., Bukreev A. Ye., Manashev I. R. (2013) Perspektivy proizvodstva ligatur na osnove margantsa i ego spлавov dlya legirovaniya stali azotom [Prospects for the production of ligatures based on manganese and its alloys for alloying steel with nitrogen]. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva, no. 1 (13), pp. 34-36. [in Russian].
4. Zhao L., Maurer M., Lugscheider E. (2003) Thermal spraying of a nitrogen alloyed austenitic steel. Thin Solid Films, vol. 424, no. 2, pp. 213-218. [in English].
5. Hongsheng Ding, Shiqiu Liu, Hailong Zhang, Jingjie Guo. (2016) Improving impact toughness of a high chromium cast iron regarding joint additive of nitrogen and titanium. Materials and Design, vol. 90, pp. 958-968. [in English].
6. Edington J., Nicola W., Richards V. L. (2002) Age Strengthening of Gray Cast Iron: Nitrogen Effects and Machinability. Transactions of the American Foundry Society, vol. 110, Part 2, pp. 983-993. [in English].
7. Qi-jie Z. (2001) Effect of Nitrogen in Cast Irons and Nitrogen-Containing High-Strength Gray Iron. Modern Cast Iron, vol. 2, pp. 9-14. [in English].
8. Zakharchenko E. V., Zakharchenko A. E. (1990) Perlitnyy azotisty chugun s vermikulyarnym grafitom s povyshennym soderzhaniem sery [Pearlitic nitrogenous iron with vermicular graphite with an increased sulfur content]. Kristallizatsiya i svoystva vysokoprochnogo chuguna a otlivkakh. K.: Institut problem litya AN USSR, pp. 140-146. [in Russian].
9. Ivanova Ye. A., Narkevich N. A., Mironov Yu. P., Belik S. I. (2006) Ispolzovanie khromomargantsevoogo chuguna, legirovannogo azotom, dlya polucheniya iznosostoykikh pokrytiy metodom elektronno-luchevoy naplavki [The use of chromium-manganese cast iron doped with nitrogen to obtain wear-resistant coatings by electron beam surfacing]. Fizicheskaya mezhmekhanika. Spets. vypusk, pp. 161-164. [in Russian].
10. Khusnutdinov G. D., Moiseeva N. P. (2009) Korroziionno stoykiy austenitnyy vysokoprochnyy chugun ChN9G4DZSh [Corrosion-resistant austenitic high-strength cast iron ChN9G4DZSh]. Protsestry litya, no. 5, pp. 42-47. [in Russian].
11. Kryukova O. G., Chukhlomina L. N. (2014) O vzaimodeystvii titanokhromovogo ferrosplava s azotom [On the interaction of titanium chromium ferroalloy with nitrogen]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, T. 324, no. 3, pp. 93-98. [in Russian].
12. Ronode L., Jingxiang J. (1988) The effects of Nitrogen on Solidification Process of Grey Iron // AFS Transactions, no. 96, pp. 423-430. [in English]
13. Avtukhov A. K. (2015) Issledovanie vliyaniya produvki azotom na formirovanie struktury metalla rabocheho sloya prokatnykh valkov ispolneniya LPKhnM [Investigation of the effect of nitrogen purge on the formation of the metal structure of the working layer of rolling rolls of execution]. Russian Internet Journal of Industrial Engineering, vol. 3, no. 4, pp. 9-12. [in Russian].
14. Зборщик А. М., Кулиш Ю. Ю. (2012) Vliyanie nitridoobrazovaniya na effektivnost ispolzovaniya desulfuratora pri inzhektirovanii magniya v chugun azotom [Effect of nitride formation on the efficiency of using a desulfurizer when magnesium is injected into cast iron with nitrogen]. Naukovi pratsi DonNTU, Metalurgiya, vol. 1(14), no. 2(15), pp. 20-30. [in Russian].
15. Sun H., Liu Y.-C., Lu M.-J. (2009) Thermodynamic and Kinetic Analysis of Nitrogenization in Desulfurization of Hot Metal by Magnesium Injection. Iron and Steel Institute Japan International, vol. 49, no. 6, pp. 771-776. [in English]
16. Pat. 18224444 A3 (SSSR). Kompaktirovanny reagent dlya obrabotki rasplava chuguna [A compacted reagent for processing molten iron]. Zakharchenko E. V., Zakharchenko A. E., Klimenko V. N., Kurovskiy V. Ya., Lyapunov A. P. Publ. 15.06.1993, Bul. 22. [in Russian].
17. Pat. 43747 of Ukraine, MPK (2009) C22C 35/00. Azotovmisna ligatura [Nitrogen-containing alloy]. Panchenko G. M., Uchitel O. D., Gasik M. I. Publ. 25.08.2009, Bul. 16. [in Ukrainian].
18. Khusnutdinov G. D., Zeleny B. G. (2009) Issledovanie parametrov obrabotki chuguna nitridom magniya [Investigation of the parameters of the treatment of cast iron with magnesium nitride]. Protsestry litya, no 4, pp. 24-30. [in Russian].
19. Litovka V. I., Maslyuk V. A., Kurovskiy V. Ya. et al. (2003) Poluchenie vysokoprochnogo chuguna s primeneniem briketirovannykh modifikatorov [Production of high-strength cast iron with the use of briquetted modifiers]. Liteynoe proizvodstvo, no. 8, pp. 7-12. [in Russian].
20. Kurovskiy V. Ya., Bagliuk G. A. (2013) The features of cast iron treatment with briquetted powder modifiers in manufacturing of forming rolls. Machines, technologies, materials, 2013. 10th International Congress. Proceedings. 10-12 September 2013. Varna, Bulgaria, vol. 1, pp. 93-96. [in English].
21. Bahliuk H. A., Kurovskiy V. Ya., Shynskiy O. Y. (2010) Vplyv rezhymiv presuvannya poroshkovykh modyfikatoriv na kinetyku yikh rozchynennia v rozplavi chavunu [The impact modifier powder compaction modes on the kinetics of dissolution in molten iron]. Visnyk natsionalnoho tekhnicheskoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Mashynobuduvannya», no. 59, pp. 27-30. [in Ukrainian].

Поступила 02.03.2017