

7 Effects of varying twist and twist rate sensitivities on the interpretation of torsion testing data / John J.Jonas, FrankMontheillet, LaszloS.Toth et al. // Materials Science&EngineeringA, Vol. 591, pp. 9–17, 2014.

8 Evolution of texture and microstructure during hot torsionof a magnesium alloy / Somjeet Biswas, Benoit Beausir, Laszlo S. Toth et al. // ActaMaterialia, Vol. 61,pp. 5263–5277, 2013.

9 Новое научное оборудование на кафедре ОМД УрФУ / Богатов А.А., Князев С.В., Толкушкин А.О.// Материалы III молодежной научно-практической конференции MagnitogorskRollingPractice 2018. - С. 44-46.

10 Теория обработки металлов давлением / Тарновский И.Я., Поздеев И.Я., Ганаго О.А. и др. – Москва, Metallurgizdat, 1963. – 674 с.

11 Erpalov M.V., Pavlov D.A., Torsion testing method for cylindrical samples of continuous section, ChernyeMetally, Iss. 12, pp. 72-76, 2018.

12 Erpalov M.V., Pavlov D.A., Control and experimental data processingin torsion testing with variable acceleration, CIS Iron and Steel Review, Vol. 16, pp. 71–75, 2018.

13 Erpalov M.V., Kungurov E.A., Examination of hardening curves definition methods in torsion test, Materials Physics and Mechanics, Vol. 38, Iss. 1, pp. 82-89, 2018.

УДК 621.74:669.13

ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ДОБАВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

EFFECTS OF COMPLEX MODIFIERS CONTAINING NANOCARBON ADDITIVES ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CAST IRON

Раковец А. С.¹, Куис Д. В.¹, Свидуневич Н. А.¹, Лежнев С. Н.²

*¹Белорусский государственный технологический университет, Минск,
Республика Беларусь; ²Рудненский индустриальный институт, Рудный,
Казахстан*

KuisDV@belstu.by

Rakovets A. S.¹, Kuis D. V.¹, Svidunovich N.A.¹, Lezhnev S. N.²

*¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus;
²Rudny Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan*

KuisDV@belstu.by

Аннотация: Решение вопросов повышения прочностных и эксплуатационных свойств отливок, снижения их металлоемкости на современном этапе возможно при оптимизации существующих технологий и составов материалов, а также применение новейших технологий и материалов,

в частности нанотехнологий и наноматериалов, с учетом новых достижений в области исследований по строению многокомпонентных расплавов чугуна, использования явлений наследственности и внедрения различных методов воздействия на расплавы.

В статье исследовано влияния комплексного модификатора, содержащего нанокремниевые компоненты, на структурообразование высокопрочного чугуна. Проведена оценка микроструктуры и показателей механических свойств.

Установлено, что разрабатываемые модификаторы за счет непосредственного ввода в расплав центров кристаллизации в виде дисперсных кремниевых частиц позволяют значительно повысить эффект модифицирования и снизить затраты на модификаторы благодаря их меньшему расходу.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, комплексные модификаторы, лигатура, нанокремниевые компоненты, фуллереновая сажа, структурообразование, прочность, твердость, эффективность модифицирования.

Abstract: The solution to the issues of increasing the strength and working properties of castings, the reduction in their metal consumption at the current stage is possible by optimization of the existing technologies and the compositions of materials, as well as the application of the latest technologies and materials, in particular nanotechnologies and nanomaterials, taking into account new achievements in the field of research on the structure of multicomponent melts of cast iron, the use of heredity phenomena and the introduction of various methods of influence on melts. The paper examined the effects of a complex modifier containing nanocarbon components on the structure formation of high-strength cast iron. The microstructure and mechanical properties were evaluated.

It has been found that the modifiers under development, by directly introducing the crystallization centres into the melt in the form of dispersed carbon particles, can significantly increase the effect of modification and reduce the costs of modifiers due to their lower consumption.

Key words: high-strength cast iron, complex modifiers, ligature, nanocarbon components, fullerene soot, structure formation, strength, hardness, efficiency of modification

Введение. Стабильность структуры и высокий уровень технологических, механических и служебных свойств отливок из высокопрочного чугуна достигается применением высококачественных шихтовых материалов, прогрессивных процессов плавки, модификаторов с гарантированным узкоинтервальным содержанием магния и других модифицирующих элементов, высокоэффективных методов модифицирования, легирования и термической обработки [1].

Анализ современного состояния производства отливок из различных сплавов показывает, что на сегодняшний день и ближайшую перспективу

одним из наиболее широко распространенных литейных конструкционных материалов, как в Республике Беларусь, так и за рубежом, является чугун.

Решение вопросов повышения прочностных и эксплуатационных свойств отливок, снижения их металлоемкости на современном этапе возможно при оптимизации существующих технологий и составов материалов, а также применение новейших технологий и материалов, в частности нанотехнологий и наноматериалов, с учетом новых достижений в области исследований по строению многокомпонентных расплавов чугуна, использования явлений наследственности и внедрения различных методов воздействия на расплавы.

Вместе с тем ряд вопросов применительно к чугунам во многом остается еще не решенным. В частности, не достаточно изучено влияние модифицирования на управление процессами структурообразования и формирования свойств в чугунах [2-4]. Создание новых составов модификаторов, в том числе с использованием углеродных компонентов различной степени дисперсности и структурированности, и рациональных технологий их применения, обеспечивающих получение требуемых структуры и свойств, требует дальнейшего исследования влияния отдельных и комплексных добавок на структуру и свойства чугуна, изучения технологических условий модифицирования чугуна различными присадками на эффективность их действия [5]. Актуальными являются вопросы влияния перегрева жидкого чугуна, его температуры при модифицировании и продолжительности выдержки перед заливкой в формы на эффективность действия различных модификаторов, сохранения эффекта модифицирования (наследственности) после переплава.

Целью данной работы является исследование структурного состояния и показателей механических свойств высокопрочных чугунов полученных с использованием комплексных модификаторов, содержащих наноуглеродные компоненты.

Методика исследований. При разработке комплексных модификаторов высокопрочного чугуна в рамках данной работы в качестве базового был выбран сфероидизирующий модификатор для чугуна с магнием ЭМ(пс) и графитизирующий бариевый модификатор «Графитплюс» для инокулирующего модифицирования высокопрочного чугуна. Рекомендуемый расход сфероидизирующего модификатора составляет 0,8...1,8% в зависимости от степени очистки расплава и метода ввода в расплав, графитизирующего – 0,05-0,3%.

В качестве наноуглеродных компонентов использовали фуллереносодержащую сажу. С целью обеспечения усвоения высокодисперсных углеродных частиц расплавом в качестве добавок в составе комплексного модификатора применяли прессованные алюминийкремниевые лигатуры, содержащие наноуглеродные компоненты. При этом, известна высокая эффективность алюминия в составах модификаторов длительного действия, что определяет целесообразность его использования [6].

Образцы лигатур готовили путем предварительной механоактивации в шаровых мельницах измельченной стружки силумина АЛ9 и фуллереносодержащей сажи, с последующим экструдированием лигатур Al-Si-C с расчетом содержания в них 10 масс.% углерода [7]. Используемые углеродные материалы были получены на оборудовании ООО «ФизТехПрибор» на базе Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

В составе смесового модификатора использовали лигатуру Al-Si-C в количестве 30 % по отношению к базовому графитизирующему модификатору.

Исследование влияния разрабатываемых модификаторов на структурообразование проводили с использованием чугуна индукционной плавки, выплавленного с использованием чугуна марки ВЧ40 с получением стабильного базового химического состава, %: С 2,7 – 3,8; Si 0,5 – 2,9; Mn 0,2 – 0,6; P до 0,1, S до 0,02. Модификатор вводили в струю металла при переливке в разливочный тигель, который предварительно был подогрет в муфельной печи до температуры 750 °С. Заливка расплава высокопрочного чугуна производилась при температуре 1400 – 1420 °С. Температура контролировалась многоканальным регистратором РМТ 39D, подключенным к ПК. Производили отбор проб для исследования структуры и показателей свойств.

Микроструктуру образцов исследовали на микрошлифах до и после травления с применением металлографического комплекса на базе микроскопа МИ-1. Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы «Bruker», с использованием программ «X-RAY» автоматизации рентгенофазового анализа. Спектры комбинационного рассеяния света при фиксированном значении разрешения (2 см^{-1}) регистрировали с помощью спектрально-аналитического комплекса на основе сканирующего конфокального микроскопа «Nanofinder HighEnd» (LOTIS-TII, Беларусь – Япония).

Таким образом, для дальнейших исследований были получены образцы модифицированных чугунов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Образцы модифицированных чугунов, полученных при выплавке

Обозначение образца	Характеристика
А	Чугун модифицированный 1,5% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»
Б	Чугун модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс»
В	Чугун модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% графитизатора «Графитплюс» и 0,3% лигатуры (Al-Si+фуллереновая сажа)

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты исследований фазового (рисунок 1) и элементного составов показывают, что исследованная фуллереновая сажа в основе своей состоит из аморфного углерода о чем свидетельствует ярко выраженное «галло» в интервале углов $2\theta=13-25^\circ$ характерное для неупорядоченного аморфного состояния, содержит $\approx 8\%$ фуллеренов и не содержит, кроме небольшого количества кислорода, никаких посторонних примесей.

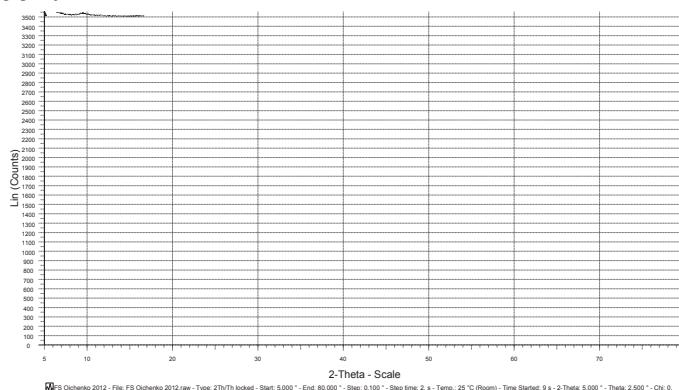


Рисунок 1 – Дифрактограмма фуллереновой сажи

Результаты исследований экструдированных лигатур Al-Si-C показали необычные структурное состояние алюминиевых сплавов [7]. Рентгеноструктурным анализом определено структурное превращение углерода с образованием в лигатурах аморфной углеродной фазы наряду с карбидообразованием.

Спектроскопией комбинационного рассеяния света в спектрах углерода установлено наличие линии различной интенсивности слева от основного пика (рисунок 2), свидетельствующее об аморфизации и образовании стеклоуглерода, что подтверждает результаты рентгеноструктурного анализа.

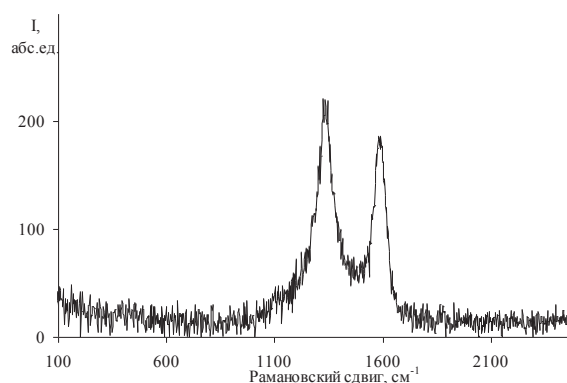


Рисунок 2 – Спектр комбинационного рассеяния света образца лигатуры Al-Si-C

Такое структурное состояние полученных лигатур определяет возможность их использования в качестве высокоактивных добавок в составах модификаторов литейных железоуглеродистых сплавов.

Одним из общепринятых критериев оценки эффективности графитизирующего модифицирования высокопрочного чугуна является

плотность распределения включений шаровидного графита в структуре. Немаловажным считается уменьшение степени переохлаждения в процессе кристаллизации эвтектики.

Микроструктура образцов высокопрочного чугуна с использованием наноуглеродных компонентов и без них приведена на рисунке 3.



а

б

в

а) образец А модифицированный 1,5% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% «Графитплюс»; *б*) образец Б модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% «Графитплюс»; *в*) образец В модифицированный 0,8% сфероидизирующего модификатора, 0,2% «Графитплюс» и 0,3% лигатуры (Al-Si+фуллереновая сажа) (в)(х100).

Рисунок 3 – Микроструктура модифицированного чугуна:

Анализ структурного состояния образцов показывает, что в образце В, в который были введены наноуглеродные компоненты, согласно ГОСТ-3443-87 графитные включения правильной формы и равномерно распределены по всей плоскости шлифа, диаметр включений 15 мкм, количество включений графита – ШГ10, металлическая основа: 10 % перлита и 90 % феррита. В образце А, содержащем 1,5% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% «Графитплюс» наблюдается равномерное распределение графитных включений, количество включений графита – ШГ6, размер включений 25 мкм, металлическая основа: 20% перлита и 80% феррита. Образец Б с 0,8% сфероидизирующего модификатора ЭМ(пс) и 0,2% «Графитплюс» имеет неравное распределение графитных включений, количество включений графита ШГ12, размер включений от 15 до 45 мкм, металлическая основа: 6 % перлита и 94 % феррита.

При измерении твердости образцов по методу Бринелля получены следующие результаты. Образец В, выплавленный с добавкой разработанной лигатуры в составе комплексного модификатора имеет твердость 200 НВ, образец А – 220НВ, образец Б – 190НВ.

Предел прочности при растяжении образца, содержащего наноуглеродные компоненты (образец В), составил – 620 МПа, образца чугуна, модифицированный стандартным комплексным модификатором (образец Б) –

420 МПа, образца чугуна с увеличенным вдвое количеством комплексного модификатора (образец А) – 600 МПа.

Выводы. Модифицирование чугуна комплексным модификатором, содержащим нанокремниевые компоненты в виде фуллереновой сажи, повышает механические свойства отливок из высокопрочного чугуна, за счет измельчения структуры чугуна, а также позволяет снизить затраты на модификаторы, вследствие их меньшего расхода.

Список литературы

1 В.Б. Бубликов Влияние модификаторов при внутриформенном графитизирующем модифицировании на структуру высокопрочного чугуна/ В. Б. Бубликов Д. Н. Берчук, Ю. Д. Бачинский, Е. Н. Берчук, В. А. Овсянников // *Металл и литье Украины* – 2014 – № 8 (255) – С. 6-10

2 Афонаскин А.В. Технология производства сложных тонкостенных чугунных отливок в металлических формах: Монография / Афонаскин А.В., Чуркин Б.С., Быстров М.В. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2009. – 66

3 J. Piaskowski Ductile iron – the greatest achievement in foundry materials of the latest fifty years / , J. Piaskowski , J. Tybulczyk, A. Kowalski // *Proceedings of the 8th Scientific International Conference „Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME’99, Gliwice-Rydzyna-Pawowice-Rokosowo, 1999 – P.473-476.*

4 A. Pytel. K. Sekowski, Microstructure and mechanical properties of vermicular low-alloy cast iron / A. Pytel. K. Sekowski// *Proceedings of the 7th Scientific International Conference „Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME’98, GliwiceZakopane, 1998 – P.435-438, (in Polish).*

5 Мищенко С.В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

6 Писаренко, Л.З. Модификатор длительного действия/ Л.З.Писаренко, Н.А. Свидуневич, Д.В. Куис// *Литье и металлургия*. – 2006. – №2. – С.84-90.

7 Волочко, А.Т. Формирование структуры и свойств композитов, полученных при обработке алюминиевого расплава лигатурами, содержащими стеклоподобные углеродные частицы / А. Т. Волочко, А.А.Шегидевич, Д.В. Куис // *Композиты и наноструктуры*. – 2014. – Т. 6, № 2. – С. 2–13.

UDC 621.771

К ВОПРОСУ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОМД ПРИ АНАЛИЗЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

TO THE QUESTION OF CLASSIFICATION OF WORKING METALS PROCESSES DURING ANALYSIS OF POWER-FORCE PARAMETERS OF THE DEFORMATION ZONE