

А.Г. СЛУЦКИЙ, канд. техн. наук,
А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук,
В.А. ШЕЙНЕРТ,
Н.В. ЗЫК, канд. хим. наук,
Г.А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,
АМЕР МОХАМЕД МЕФТАХ,
И.Л. КУЛИНИЧ (БНТУ)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ СОЕДИНЕНИЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ*

В настоящее время большое внимание уделяется применению ультрадисперсных и наноразмерных порошков элементов и химических соединений (нитриды, карбиды, оксиды, карбонитриды и др.) при получении новых материалов и сплавов. Размер частиц таких нанопорошков не превышает 100 нм. Обладая уникальными физико-химическими и механическими свойствами, они могут влиять на качество получаемых сплавов за счет изменения морфологии процесса кристаллизации и затвердевания [1].

Интерес к применению таких порошков подтолкнул прогресс в технологии микролегирования, когда было установлено, что применение легирующих элементов в незначительных количествах позволило получить значительный эффект, сравнимый с легированием, традиционно применяемым в металлургии и литейном производстве.

По мнению ряда авторов [2–6] расширение представлений о наноструктурном состоянии сплавов в расплавленном виде ставит ряд новых вопросов в области модифицирования и, в первую очередь, оценку влияния компонентов существующих модификаторов на гомогенное зародышеобразование собственно железа, как основы чугунов и сталей. Возник вопрос и об изучении влияния наноразмерных частиц на процесс модифицирования – «наномодифицирование».

Основной особенностью процесса наномодифицирования является высокая длительность модифицирующего эффекта – до 30 мин, в то время как для традиционно применяемого процесса модифици-

рования (макромодифицирования) характерна низкая длительность модифицирующего эффекта (до 7 мин), что и предопределило развитие внутриформенных методов модифицирования.

Технология наномодифицирования – это ковшевая технология ввода модификатора, которая практически не изменяет существующую технологию и не требует серьезных капитальных затрат на ее внедрение.

Если подходить к описанию технологии наномодифицирования с общих классических позиций, то по своему механизму наномодифицирование совмещает как модифицирование I рода, так и модифицирование II рода. Модифицирование I рода на наномасштабе проявляется в том, что образование полимерных структур блокирует растворение углеродных наночастиц, а модифицирование II рода проявляется в том, что полимеризационные процессы [2] способствуют агрегатированию углеродных частиц в полноценные гомогенные центры кристаллизации графита.

В работах [3, 4] установлено, что модификатор, содержащий наноразмерные модифицирующие соединения (наномодификатор), эффективно влияет на процесс кристаллизации не только графитной фазы, но и на формирование фосфидной эвтектики, а также первичного зерна чугуна и неметаллических включений, активизируя последние в качестве дополнительных гетерогенных центров графитизации. Наномодифицирование оказывает воздействие, как на жидкий, так и на кристаллизующийся чугун, независимо от его предыстории. Другой важнейшей особенностью наномодифицирования является его низкая чувствительность к значительным колебаниям химического состава расплава чугуна и к способам плавки, а также подавление проявления «наследственности» шихтовых материалов в структуре чугуновой отливки, поскольку ПАЭ, входящие в состав модификатора, воздействуют избирательно на формирование структуры чугуна и структурообразование при его кристаллизации. Также наномодифицирование противодействует явлению увядания инокулирующего эффекта в процессе выдержки расплава в ковше перед заливкой формы, что увеличивает технологический цикл живучести расплава чугуна.

В настоящее время сфера применения наномодификатора значительно расширилась. Модифицирование ковких чугунов позволило сократить длительность графитизирующего отжига до 1–5 ч при

снижении температуры отжига до 850–950 °С. Модифицирование алюминиевых литейных сплавов, бронз и латуней ликвидировало полностью усадочные явления в отливках и повысило качество механообработки за счет повышения и стабилизации твердости при существенном измельчении структуры сплавов.

Анализируя литературные источники по данному вопросу, необходимо отметить уже достигнутые успехи в практике наномодифицирования сплавов. Ранее проведенные исследования [7–9] показали перспективность применения ультрадисперсных частиц соединений активных элементов в составе модификатора-раскислителя, используемого при внепечной обработке чугуна и стали. Однако актуальным является вопрос разработки способов ввода нанопорошков в литейный сплав.

Целью работы является изучение возможности получения лигатур, содержащих дисперсные (наноразмерные) соединения активных элементов, для модифицирования литейных сплавов.

Микролигатуры получали следующим образом: ультрадисперсный порошок оксида иттрия подвергали совместному помолу в планетарной мельнице с металлом-протектором (медь, олово). Известно, что металл-протектор плакирует тугоплавкие наночастицы, препятствует их коагуляции, обеспечивает их хорошую смачиваемость расплавом.

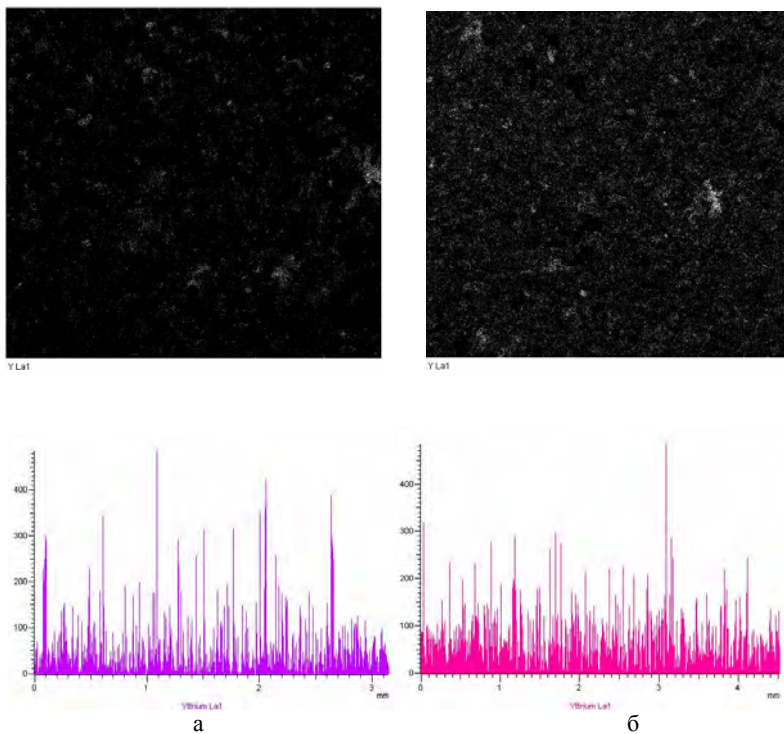
На рисунке 1 представлена фотография брикетов лигатуры на основе меди, содержащих дисперсные частицы оксида иттрия.



Рисунок 1 – Общий вид лигатуры для наномодифицирования на основе меди, содержащей оксид иттрия

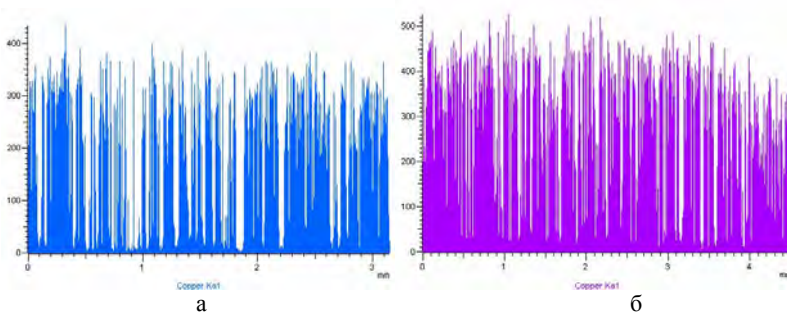
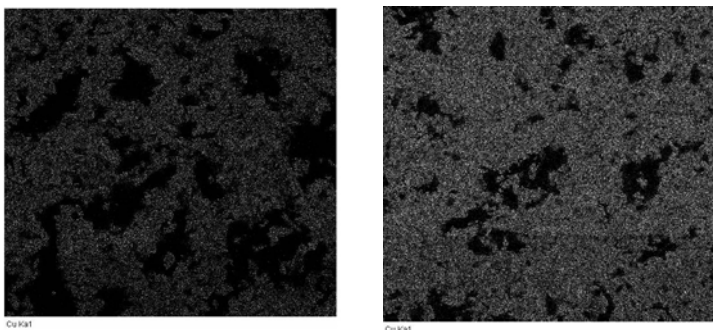
Компоненты смешивали в течение 2 и 6 ч с использованием шаров различного диаметра, а затем брикетировали на лабораторном прессе с усилием 25 т. Полученные брикеты исследовали с применением оптической и электронной микроскопии. Полученные результаты представлены на рисунках 2 и 3.

Из представленных сравнительных результатов видно, что при увеличении продолжительности перемешивания исходных компонентов обеспечивается более равномерное распределение компонентов в лигатуре по объему.



а – 2 ч перемешивания; б – 6 ч перемешивания

Рисунок 2 – Влияние продолжительности перемешивания порошков на распределение оксида иттрия



а – 2 ч перемешивания; б – 6 ч перемешивания

Рисунок 3 – Влияние продолжительности перемешивания порошков на распределение меди

По разработанной методике были изготовлены образцы микролигатуры на основе порошка олова с добавками ультрадисперсного порошка оксида иттрия, общий вид которых представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид микролигатур на основе олова с добавками ультрадисперсного порошка оксида иттрия

Вначале при ковшевом микролегировании в расплав вводили небольшие добавки чистого олова и анализировали свойства полученного чугуна. Химический состав чугуна по основным компонентам не изменился, а концентрация олова составила 0,04 %, что свидетельствует о его хорошем усвоении. При этом склонность чугуна к отбелу несколько снизилась и составила 16 мм. Металлографический анализ показал, что микролегирование чугуна оловом перлитизирует металлическую основу сплава, при этом повысилась его дисперсность (ПД 0,5) и микротвердость (330HV.002). Что касается графита, то под воздействием данной добавки он измельчился до значений (ПГд 25), а в структуре чугуна появились колонии междендритного графита. Твердость чугуна при этом увеличилась и составила 217 НВ.

Дальнейшие исследования были направлены на проведение лабораторных испытаний технологии микролегирования чугуна. Лигатура на основе олова с добавками ультрадисперсного порошка оксида иттрия в количестве 0,03 мас.% в виде прутка диаметром 3 мм вводилась в разливочный ковш под струю жидкого металла, температура которого составляла $1390\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Благодаря использованию в качестве материала-протектора олова, обладающего хорошей смачиваемостью, ультрадисперсные частицы под действием конвективных потоков равномерно распределялись по объему расплава и легко усваивались, являясь зародышами кристаллов. Поскольку вводимые частицы еще и активны за счет дефектов структуры, возникающих при обработке их в центробежной планетарной мельнице, они эффективно воздействуют не только на зарождение и рост кристаллов, но также изменяют морфологию зерен и включений графита. Добавки микролигатуры на основе олова и содержащей наночастицы оксида иттрия оказали более заметное влияние на структуру и свойства чугуна. За счет эффективного графитизирующего воздействия оксида иттрия снизилась склонность чугуна к отбелу. При этом в структуре появился феррит, что привело к снижению твердости материала.

В таблице 1 представлены сравнительные результаты испытаний процесса микролегирования чугуна.

Таблица 1 – Сравнительные результаты исследования химического состава, структуры и свойств чугуна

№ опыта	Величина добавки, %	Химический состав, %				Микроструктура		Механические и технологические свойства		
		C	Si	Mn	Sn	Графит	Металлич. основа	Твердость	Микротвердость	Отбел, мм
1	Исходный чугун	3,49	1,46	0,083	0,012	ПГф2, ПГд45 ПГр1,3. ПГ4,6	П98(Ф2) Пд1,0	207	310	17,0
2	0,03 Sn	3,48	1,75	0,089	0,041	ПГф2, ПГу25 ПГр4 ПГ4	П(ФО) Пд0,5	217	330	16,0
3	0,03 Sn +Y ₂ O ₃	3,50	1,44	0,087	0,028	ПГф2, ПГд45 ПГр1 ПГ6	П96(Ф4) Пд1,0	198	270	12,0

Исходный сплав содержал 3,49 % углерода, 1,46 % кремния, незначительное количество марганца. Глубина отбела по клиновой пробе составила 17,0 мм. Металлическая основа сплава состояла в основном из перлита с дисперсностью (Пд1,0) и незначительного количества феррита (2–3 %). Структура графита пластинчатая завихренная (ПГф2), длина включений составляла не более 45 мкм. Распределение включений равномерное (ПГр1) с колониями пластинчатого графита (ПГр3), а площадь, занимаемая графитом, составляла от 4 до 6 %. Твердость чугуна в образцах с толщиной стенки 15 мм составила 207 НВ. Микротвердость перлита находилась в пределах 310HV.002.

Таким образом, проведенные исследования показали положительное воздействие дисперсных соединений активных металлов в составе лигатуры на структуру и свойства высокоуглеродистых сплавов железа.

Литература

- 1. Наноматериалы и нанотехнологии** / В.М. Анищик [и др.] ; под ред. В.Е. Борисенко, Н.К. Толоско. – Минск : Центр БГУ, 2008. – 375 с.
- 2. Коротаяева, З.А.** Получение ультрадисперсных порошков механическим способом и их применение для модифицирования материалов: автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 / З.А. Коротаяева ; Кемеровский гос. ун-т. – Кемерово, 2008. – 22 с.
- 3. Применение** ультрадисперсных порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / А.Н. Черепанов [и др.] // *Материаловедение*. – 2000. – № 10. – С. 45–53.
- 4. Применение** механически активированных ультрадисперсных керамических порошков для улучшения свойств металлов и сплавов / В.А. Полуобояров [и др.] // *Наука производству*. – 2002. – № 2. – С. 2–8.
- 5. Теоретические основы** литейного производства [Электронный ресурс] : конспект лекций / Л.И. Мамина, Е.М. Лесив, Т.Р. Гильмашина. – Электрон. дан. (9 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – С. 221–232.
- 6. Стеценко, В.Ю.** Металлические расплавы – наноструктурные системы // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 1. – С. 48–49.

7. **Быстроохлажденный** комплексный модификатор-раскислитель для выпечной обработки литейной стали / А.Г. Слуцкий [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 2. – С. 115–118.

8. **Пути** повышения эффективности модификаторов-раскислителей / А.Г. Слуцкий [и др.] // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр. : в 2 ч.* – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 34, ч. 1. – С. 62–71.

9. **Брикет** модификатор-раскислитель для выпечной обработки чугуна и стали : пат. 9521 Респ. Беларусь, / А.Г. Слуцкий, А.С. Калининченко, В.А. Шейнерт, В.А. Сметкин, В.А. Хлебцевич, А.А. Кривоуст ; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № u 20121180 ; заявл. 28.12.12 ; опубл. 03.06.13 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.* – 2013.

УДК 669, 621.74.08

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
Д.С. МОРОЗОВ,
А.В. АРАБЕЙ,
И.Г. ШАХЛОВИЧ (БНТУ)

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ОТ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА

Эффективность литейного производства определяется себестоимостью и качеством выпускаемой продукции, обусловленных стоимостными показателями и применяемыми технологиями, с должным обеспечением оперативного контроля на всех этапах производства литых изделий.

Благодаря успехам, достигнутым в последние годы в области разработки аппаратных, в том числе микропроцессорных, средств измерений и методов обработки данных, точность и возможности систем контроля качества литейной продукции в режиме реального времени значительно возросли. Тем не менее, практическая реали-