



*It is shown that introduction carbon into modifier composition and increase of its dispersion degree due to spatter on high-melting particles or due to mechanical alloying increases modifier efficiency for grey cast iron.*

Г. Ф. ЛОВШЕНКО, О. С. КОМАРОВ, Н. И. УРБАНОВИЧ, В. И. ВОЛОСАТИКОВ, В. С. НИСС, БНТУ,  
А. И. ЛЕЦКО, ГНПО ПМ

УДК 621.74

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ В СОСТАВ МОДИФИКАТОРА УГЛЕРОДА

В Республике Беларусь на машиностроительных заводах ежегодно выплавляется порядка 800 тыс. т отливок из серого чугуна.

Известно, что для получения высококачественных чугунов широко применяется внепечная обработка, т. е. модифицирование. В настоящий момент в связи с дефицитом литейных чугунов в состав шихты для получения расплава вводят передельные чугуны, стальной и чугунный лом, стружку, что неизбежно приводит к нарушению воспроизводимости результатов модифицирования, снижению его эффективности и, как следствие, росту брака по отбелу, образованию мелкого междендритного графита, снижающего прочность и износостойкость литых чугунных изделий.

В связи с изложенным выше исследования, направленные на совершенствование структуры и свойств чугунных отливок, являются весьма актуальными.

Цель данной работы – повышение эффективности модифицирования как средства управления макро- и микроструктурой литых заготовок из серого чугуна за счет применения в качестве модификаторов дисперсных тугоплавких частиц, плакированных углеродом, а также за счет использования порошка и компактного материала из алюминия, механически легированных тугоплавкими ультрадисперсными частицами и углеродом.

В качестве ультрадисперсных тугоплавких частиц применяли нитрид бора (BN) и нитрид титана (TiN), размер частиц которых составил 2–20 мкм. Плакирование частиц порошка BN углеродом производили магнетронным методом в течение 4 ч

в среде азота, а частиц TiN – в среде аргона в течение 5 ч.

Механическое легирование порошка алюминия частицами BN, TiN и углеродом осуществляли в атриторе в течение 3 ч при скорости вращения мешалки  $350 \text{ мин}^{-1}$  в среде бензина. Таким способом получили механически легированный порошок алюминия трех составов (табл. 1).

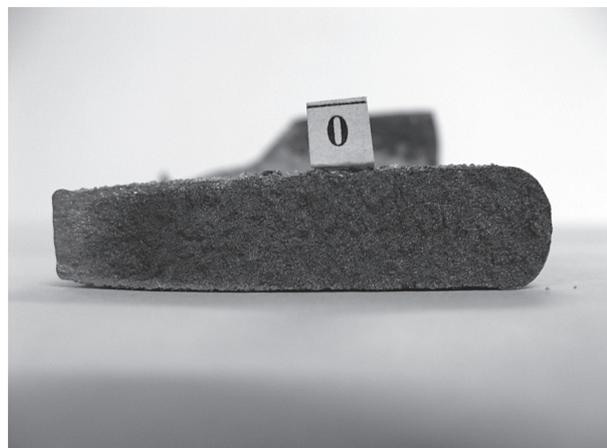
Изготовление механически легированного компактного материала состояло из двух стадий. На первой стадии порошок алюминия и углерода обрабатывали в энергонапряженной мельнице на основе механореактора гидрационного типа в течение 3 ч, в результате чего получали гранулированную композицию со средним размером гранул 200 мкм с гомогенным распределением углерода в алюминиевой матрице. На второй стадии проводили компактирование полученных гранул методом горячего прессования (экструзией), в результате чего получали прутки диаметром 8 мм.

Для изучения влияния (табл. 1) составов модификаторов на макро- и микроструктуру серого чугуна отливали исходные образцы в виде стержней диаметром 20 мм из сплава, имеющего следующий химический состав: C–3,2%; Si – 1,89; Mn – 0,30; Cr ≤ 0,18; Cu – 2,24; S – 0,09; P – 0,13%.

Навески исходного чугуна массой по 600 г переплавляли в графитно-шамотных тиглях в силитовой печи, при этом расплав модифицировали различными добавками при температуре 1450 °C в количестве 0,1% от массы расплава с помощью кварцевой трубки, на конце которой крепили конверты из железной фольги, с размещенным в нем модификатором.

Т а б л и ц а 1. Влияние состава модификатора на глубину отбела в сером чугуна

Номер образца	Состав модификатора, мас. %	Глубина отбела $h$ , мм	Вид и способ ввода модификатора
0	Без модификатора	3,5	—
2	0,1 Al	1,4	Алюминиевый порошок – таблетка
2	0,1(Al + 10%BN)	2,2	Порошок алюминия, механически легированный ультрадисперсными частицами BN-таблетка
1	2	3	4
3	0,1(Al + 10%BN + 6%C)	1,0	Порошок алюминия, механически легированный ультрадисперсными частицами BN и углеродом – таблетка
4	0,1(Al + 10%BN + 6%C + 3%Bi)	3,2	Порошок алюминия, механически легированный ультрадисперсными частицами BN и углеродом и висмутом – таблетка
5	0,1Al	Отбел по всему контуру клиновидной пробы, в торце узкой части пробы глубина отбела 4 мм	Алюминиевая проволока
6	0,1 (Al + 6%C)	0,5	Пруток из алюминия, механически легированный углеродом
7	0,1 [90% Al + 10%(BN + C)]	1,1	Таблетка, состоящая из 90% порошка алюминия и 10% ультрадисперсных частиц BN, плакированных углеродом магнетронным методом
8	0,1 [90% Al + 10% (TiN + C)]	1,2	Таблетка, состоящая из 90% порошка алюминия и 10% ультрадисперсных частиц TiN, плакированных углеродом магнетронным методом



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1. Макроструктура клиновидной пробы на отбел из серого чугуна: *a* – без добавки; *б* – 0,1% Al порошкового; *в* – 0,1% (Al + 10% NB + 6% C) механически легированного порошка; *г* – 0,1% (Al + 6% C) компактного материала в виде прутка

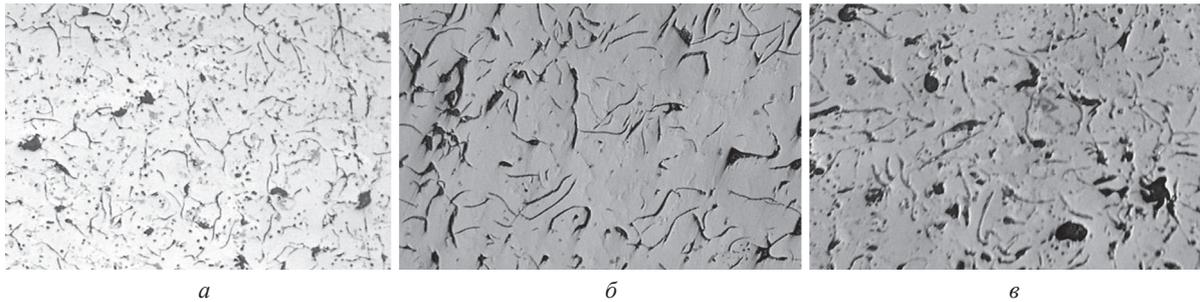


Рис. 2. Микроструктура серого чугуна: *а* – без добавки; *б* – 0,1% Al порошкового; *в* – 0,1% (Al + 6% C) компактного материала в виде прутка.  $\times 100$

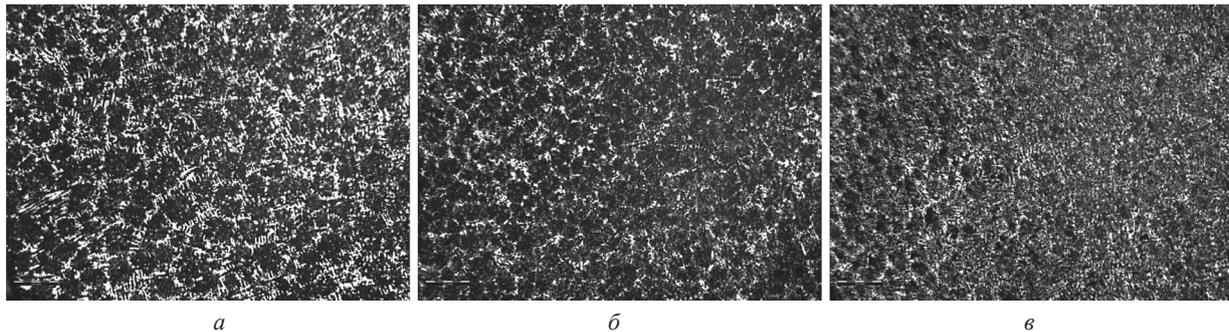


Рис. 3. Эвтектические ячейки серого чугуна: *а* – без добавки; *б* – 0,1% Al порошкового; *в* – 0,1% (Al + 6% C) компактного материала в виде прутка.  $\times 65$

Для лучшего усвоения порошкообразных добавок их брикетировали в специальной пресс-форме методом холодного прессования, получали таблетки диаметром 10 мм и толщиной 3–5 мм. После ввода модификатора в расплав и выдержки его в печи в течение 1 мин заливали стержневые формы клиновидных проб на отбел и кварцевые ампулы диаметром 18 мм.

На рис. 1 приведены примеры макроструктур клиновидных проб на отбел из серого чугуна.

Анализ макроструктуры изломов клиновидных проб, критерием которой служила глубина отбела ( $h$ , мм), показал (табл. 1), что лучшие результаты по глубине отбела имеют пробы, расплав которых обрабатывали модификаторами, содержащими тугоплавкие ультрадисперсные частицы и углерод. Из них наименьший отбел ( $h = 0,5$  мм) имеет проба из расплава, модифицированного полуфабрикатом в виде прутка из алюминия, механически легированного углеродом.

На рис. 2 показаны микроструктуры исходного чугуна и модифицированного 0,1% Al порошкового; 0,1% (Al + 6% C) компактного материала в виде прутка.

Структура исходного чугуна имеет смешанное сетчатое и междендритное точечное распределение включений графита пластинчатой завихренной формы; структура чугуна, модифицированного только порошковым алюминием, имеет неравномерное распределение пластинчатого завихренного графита. Однако структура чугуна,

модифицированного полуфабрикатом в виде прутка из алюминия, механически легированного углеродом, характеризуется равномерным распределением графитом пластинчатой завихренной формы. При этом наблюдается сокращение длины пластинок графитных включений и увеличение их толщин, что по общепринятому представлению способствует повышению прочностных характеристик серого чугуна.

Важным фактором, свидетельствующим об эффективности модификатора, является увеличение числа эвтектических ячеек в модифицированном чугуне. С целью выявления количества эвтектических ячеек на единичной поверхности образца ( $n$ ) изготавливали шлифы из литых образцов, полученных в кварцевых ампулах. Для травления использовали реактив состава: медный купорос  $\text{CuSO}_4$  – 3 г, пикриновая кислота – 5 г, концентрированная соляная кислота –  $20 \text{ см}^3$  и этиловый спирт –  $100 \text{ см}^3$ .

На рис. 3 показаны структуры эвтектических ячеек исходного чугуна, модифицированного

Т а б л и ц а 2. Влияние состава модификатора на количество эвтектических зерен

Номер образца	Состав модификатора, мас.%	$n$ , $\text{мм}^{-2}$
0	Без модификатора	12,8
1	0,1% Al порошкового таблетированного	16,64
6	0,1% (Al + 6% C) компактного материала в виде прутка	27,52

0,1%Al порошкового и 0,1%(Al + 6%C) компактного материала в виде прутка. Как показал анализ структур, наибольшее количество эвтектических ячеек ( $n = 27,52$ ) имеет чугун, модифицированный полуфабрикатом в виде прутка из алюминия, механически легированного углеродом (табл. 2).

#### **Вывод**

Таким образом, введение в состав модификатора углерода и увеличение степени его дисперсности за счет напыления на тугоплавкие частицы или механического легирования повышает эффективность модификатора для серого чугуна.