

7. Хрычиков В. Е. Термокинетические условия образования усадочных дефектов в чугунах прокатных валках / В. Е. Хрычиков // Процессы литья. – 1996. – № 1. – С. 24–31.

8. Хрычиков В. Е. Влияние комбинированной кокильно-песчаной литейной формы на затвердевание и формирование макроструктуры в крупных отливках из высокопрочного чугуна / В. Е. Хрычиков, Н. П. Котешов // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 12.

9. Хрычиков В. Е. Комбинированный электродуговой-электрошлаковый обогрев прибылей чугунных прокатных валков / В. Е. Хрычиков, Н. А. Будагьянц, В. П. Камкин [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 2. – С. 38–43.

Поступила 03.11.2015



УДК 621.771.07

Наука

В. Е. Хрычиков /д. т. н./, В. Т. Калинин /д. т. н./,
Н. В. Сусло /к. т. н./, В. А. Кривошеев /к. т. н./,
Е. В. Меняйло /к. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины

Повышение эксплуатационной стойкости мелющих шаров при модифицировании исходного расплава чугуна брикетированными наномодификаторами

Проведено исследование влияния обработки чугуна нанодисперсными тугоплавкими соединениями на качество литых шаров и обоснован их выбор для обработки чугунных расплавов. Оптимальным количеством модифицирующей присадки является 0,030...0,035 % TiCN. Разработана и прошла опытно-промышленную проверку технология ввода наноматериалов в чугун в виде брикетов. Испытания промышленной партии шаров показали повышение их эксплуатационной стойкости с 22 до 27 % и уменьшение их расхода с 0,5...0,8 % до 0,13...0,3 % от массы перерабатываемой руды. (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.).

Ключевые слова: чугун, мелющие шары, кокиль, нанодисперсный модификатор, брикеты, твердость, ударная стойкость, эксплуатационная стойкость.

Research of cast iron processing influence by nanodisperse high-melting compounds on quality of cast spheres is conducted and their choice for processing of cast iron smelts is proved. Optimum quantity of modifying additive compound is 0,030...0,035 % of TiCN. The technology of introduction of nanomaterials in cast iron in the form of briquettes is developed and underwent trial testing. Tests of industrial batch of spheres showed increase of their operational firmness from 22 up to 27 % and reduction of their expense from 0,5...0,8 % to 0,13...0,3 % of mass of the recycled ore.

Key words: cast iron, grinding spheres, chill mold, a nanodisperse modifier, briquettes, hardness, shock firmness, operational firmness

Состояние вопроса и постановка проблемы

Чугунные мелющие шары используют в барабанных мельницах для измельчения руды, клинкера, угля и других материалов. Качество шаров определяет эффективность помола материала [1–3].

В Украине основным способом производства шаров является литье в кокиль на шаролитей-

ных машинах [4–6]; на ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» шары Ø 60 мм – на конвейерно-кокильной установке типа ККУ-1 [7].

Чугунные мелющие шары, обладая достаточной твердостью, имеют пониженную ударную прочность по сравнению со стальными шарами. Однако стальные шары относительно дорогие и обладают неравномерной по объему твердостью

(от 45...50 HRC на поверхности до 15...20 HRC в центре), что обуславливает их низкую эксплуатационную стойкость. Поэтому настоящее исследование, направленное на повышение стойкости мелющих шаров из чугуна, полученного путем модифицирования дисперсными и нанодисперсными (менее 0,1 мкм или 100 нм) материалами, является актуальным.

Цель исследования

Целью исследования является повышение качества и эксплуатационных свойств чугунных мелющих шаров за счет модифицирования расплава нанодисперсными материалами, а также разработка рекомендаций по реализации технологического процесса литья шаров высокого качества.

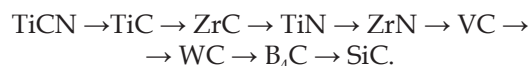
Основные результаты. Наиболее перспективным направлением в области модифицирования чугунов является применение нанодисперсных модификаторов, которые эффективно влияют на кристаллизацию графитной фазы, первичное зерно и неметаллические включения, активизируя последние как дополнительные гетерогенные центры графитизации [8].

Проведено исследование влияния обработки чугуна нанодисперсными тугоплавкими соединениями на качество литых шаров и обоснован их выбор для обработки чугунных расплавов. Дана теоретическая оценка влияния химического состава материала модификатора на механизм модифицирования и кристаллизационные процессы в чугунах.

Рассматривая процесс модифицирования с позиции взаимодействия модифицирующих добавок с чугунным расплавом, все применяющиеся материалы можно разделить на три группы: растворимые, тугоплавкие и разлагаемые. К растворимым добавкам относятся известные модификаторы графитизирующего и сфероидизирующего действия (Si, Al, C, Ti, Sr, Mg, PЗМ, Y и др.), а также порошки и гранулы металлов, оказывающие инокулирующее действие на расплав. К тугоплавким малорастворимым модификаторам относятся порошки соединений с высокой температурой плавления (TiC, TiN, TiCN, VC, ZrC, WC и др.), оказывающие инокулирующее действие. К модификаторам, разлагаемым в расплаве, относятся: SiC, Ca₂C, Si₃N₄, AlN графитизирующего действия и Mg₂Si, Mg₃N₂, MgC₂ сфероидизирующего действия.

Для повышения ударо- и износостойкости чугунных мелющих шаров наиболее целесообразно применять инокулирующее модифицирование. Основными критериями оценки модифицирующей эффективности тугоплавких соединений являются: температура плавления, изменение энтальпии образования, тип проводи-

мости и растворимость в расплаве. Чем выше термодинамическая устойчивость соединения, больше разница температур плавления соединения и расплава, меньше растворимость и наличие электронного сродства модификатора и расплава, тем выше его эффективность. Сравнительный анализ термодинамических показателей тугоплавких малорастворимых соединений позволил расположить их в убывающий по модифицирующей эффективности ряд:



На основании проведенного анализа для исследований выбраны 4 наномодификатора – TiCN, TiC, B₄C и SiC и проведены экспериментальные плавки по модифицированию чугуна для литья мелющих шаров.

Расчетные и экспериментальные данные показали, что наноматериалы имеют в расплаве достаточно высокую кинетическую стойкость, практически равномерно распределяясь по высоте расплава в ковше. Установлено, что соединения титана с углеродом и азотом – карбонитрид титана (TiCN) – полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к тугоплавким инокулирующим модификаторам.

Макроструктура отлитых шаров (рис. 1), подтверждает правильность выбора в качестве эффективного нанодисперсного модификатора – карбонитрида титана (рис. 1г). Шары, отлитые из модифицированного TiCN чугуна, имеют незначительные усадочные дефекты, которые расположены в середине отливки, что практически исключает их раскол в процессе эксплуатации. Макроструктура шаров из немодифицированного (рис. 1а) и модифицированного SiC (рис. 1б), TiC (рис. 1в) и B₄C (рис. 1д) чугунов имеет грубую столбчатую структуру с большим количеством усадочных дефектов, которые обуславливают их низкую эксплуатационную стойкость.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что оптимальным количеством модифицирующей присадки является 0,030...0,035 % TiCN. При этом наиболее эффективной структурой шаров является наличие отбела глубиной до 10,0 мм в поверхностном слое, переходной зоны и перлитно-ферритной матрицы с мелкодисперсным графитом в сердцевине. Установлено, что твердость шаров после модифицирования повышается в среднем от 45 до 50 HRC в поверхностном слое, а ударная стойкость, определенная на копре типа K01, возрастает от 25 до 28 ударов.

При использовании нанодисперсных материалов наиболее эффективным является введение их в ковш в виде брикетов. Сформулиро-

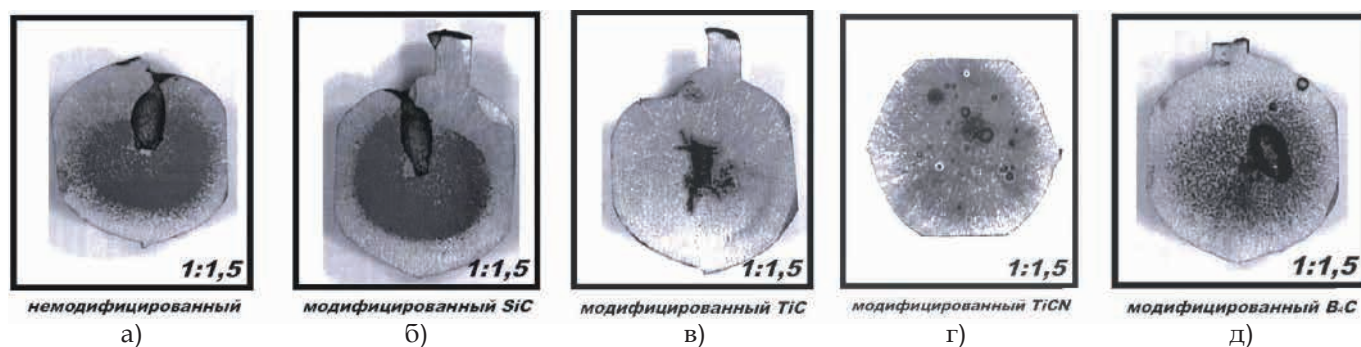


Рис. 1. Макроструктура шаров, отлитых из немодифицированного (а) и модифицированного SiC (б), TiC (в), TiCN (г), В₄С (д) чугунов

ваны требования к модифицирующим брикетам и разработана технология их производства с габаритными размерами Ø 30...50 и высотой 15...20 мм методом их прессования [9–10].

Проведены опытно-промышленные исследования по определению рационального состава брикетов. Обработку расплава проводили в 1-тонном ковше с перегородкой по технологии «сэндвич-процесс» и дальнейшей разливкой на конвейерно-кокильной установке при расходе нанодисперсного карбонитрида титана (TiCN) в количестве 0,030...0,035 % от массы металла.

Установлено, что оптимальным является следующий состав брикета: 65...70 % нанодисперсного порошка TiCN, частицы которого служат дополнительными центрами кристаллизации, измельчая дендритную структуру аустенита, и 30...35 % органического связующего в виде отходов мукомольного производства.

Дополнительно исследовали влияние органической связки на деструкцию брикета и связанное с этим время его растворения в расплаве. Органическое связующее является естественным полимером, в состав которого входят азотнокислые и уксуснокислые эфиры с чрезвычайно высокой реакционной способностью. Интенсивная газификация таких брикетов позволила совместить процесс растворения модификатора в расплаве с процессами повышения температуры на контакте поверхности брикета с расплавом и за счет этого значительно уменьшить время его растворения.

Анализ результатов проведенных исследований по газификации брикетов показал, что процесс их деструкции связан с разрывом тела бри-

кета под действием внутреннего давления, обусловленного выделением газов при разложении связующего, что приводит к постепенному уменьшению размеров брикета, образованию пор и трещин. В связи с этим за счет проникновения в эти поры металла время растворения брикета уменьшается с 8...10 до 4...5 мин при увеличении усвоения модификатора до 95...97 %.

Для определения влияния температуры заливки на величину усадочных дефектов проведено компьютерное моделирование процессов заливки и кристаллизации чугуна в кокиле конвейерно-кокильной установки. Химический состав мелющих шаров для моделирования приведен в табл. 1. Состав № 3 выбран в результате анализа технической литературы для сравнительной характеристики, так как является наиболее износостойким.

С учетом статистического анализа температур заливки шаров на конвейерно-кокильной установке для моделирования были выбраны следующие температуры: 1280 °С, 1320 °С, 1350 °С и 1380 °С. Результаты прогнозирования формирования усадочных раковин приведены на рис. 2.

Анализ результатов моделирования показал, что повышение температуры заливки до 1380 °С увеличивает объем усадочных раковин. Исходя из полученных результатов, рекомендуется температура заливки в пределах 1280–1320 °С.

Результаты испытаний механических свойств отлитых шаров опытно-промышленной партии показали, что твердость шаров из модифицированного чугуна по сравнению с шарами серий-

Таблица 1

Химический состав мелющих шаров

Чугун	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti
№ 1, соответствующий ГТ090-008:2008	3,2–3,6	0,3–0,5	0,8–1,5	До 0,1	До 0,12	0,3–0,6	0,4–1,2	-
№ 2, модифицированный TiCN	3,86	0,33	1,05	0,017	0,074	0,105	0,01	0,015
№ 3 ИЧХ28Н2	2,9	0,6	1	0,1	0,1	29	2,5	-

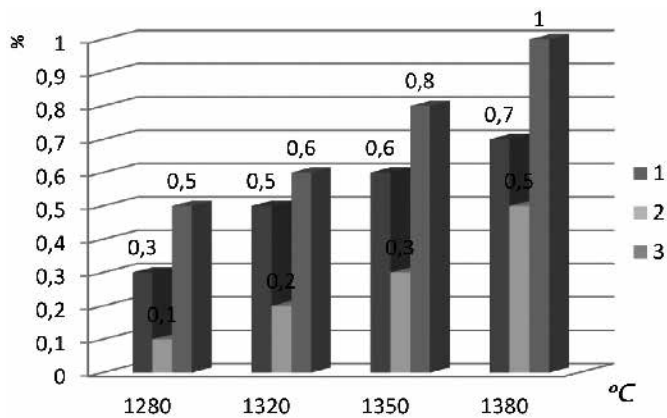


Рис. 2. Прогнозирование объема усадочных раковин при различных температурах заливки:
1, 2, 3 – для химического состава шаров
№ 1, № 2 и № 3 соответственно

ной технологии повысилась в среднем с 45 до 60 HRC, ударная стойкость – с 25 до 32 ударов.

Эксплуатационные испытания шаров, модифицированных брикетированными нанодисперсными материалами, показали, что их эксплуатационная стойкость на 22–27 % выше по сравнению с шарами серийного производства, а расход шаров уменьшился с 0,5...0,8 % до 0,13...0,3 % от массы перерабатываемой руды.

Выводы

1. Анализ результатов экспериментов позволил установить, что наиболее эффективным модификатором является карбонитрид титана (TiCN), при вводе которого в расплав твердость экспериментальных шаров увеличилась в среднем с 45 до 50 HRC, а ударная стойкость – с 25 до 28 ударов.

2. Разработана и прошла опытно-промышленную проверку технология ввода наноматериалов в виде брикетов, при которой уменьшается время растворения брикета с 8...10 до 4...5 мин и увеличивается усвоение модификатора до 95... 97 %.

3. Отлита опытно-промышленная партия шаров из чугуна, модифицированного брикетами на основе нанодисперсного TiCN, и проведено сравнительное испытание их с шарами, отлитыми по действующей технологии ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Анализ результатов исследований показал, что твердость шаров увеличилась в среднем с 45 до 60 HRC, эксплуатационная стойкость повысилась с 22 до 27 %, а расход шаров уменьшился с 0,5...0,8 % до 0,13...0,3 % от массы перерабатываемой руды.

Библиографический список

1. Ефременко В. Г. Экономические предпосылки использования мелющих тел повышенного качества и технологические аспекты их производства / В. Г. Ефременко, Ф. К. Ткаченко, А. В. Вознюк, Е. С. Танчак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 1/1 (25). – С. 22–26.
2. Игнатов В. А. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / В. А. Игнатов, В. К. Соленьий, В. Л. Жук [и др.] // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 31–34.
3. Клейс И. Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия: учебное пособие / И. Р. Клейс, Х. Х. Ууэмейс. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
4. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цыпин. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
5. Солнцев Л. А. Получение чугунов повышенной прочности / Л. А. Солнцев, А. М. Зайденберг, А. Ф. Малый. – Харьков: Вища школа, 1986. – 152 с.
6. Рябов О. Ф. Мелющие шары из легированного чугуна / О. Ф. Рябов // Горн. Журнал. – 1987. – С. 17–18.
7. Сусло Н. В. Исследования по использованию наномодификаторов при производстве чугунных мелющих шаров / Н. В. Сусло, В. Т. Калинин // Наукові вісті: зб. Сучасні проблеми металургії. – 2009. – Т. 12. – С. 59–65.
8. Калинин В. Т. Технологические особенности производства литых шаров повышенного качества / В. Т. Калинин, Н. В. Сусло // Вісник КТУ. – 2009. – Вип. 23. – С. 87–91.
9. Патент на корисну модель № 60677 Україна, МПК С22С 35/00. Комплексний брикетований модифікатор / В. Т. Калінін, Н. В. Сусло. – № 201014512; заявл. 06.12.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
10. Патент на корисну модель № 61091 Україна, МПК С22С 35/00. Брикет-модифікатор для обробки чавуну / В. Т. Калінін, Н. В. Сусло, О. О. Кондрат. – № 201014555; заявл. 06.12.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

Поступила 23.11.2015