



УДК 621.74

Поступила 25.03.2014

Д. М. КУКУЙ, Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Ю. Н. ФАСЕВИЧ, БНТУ, Н. Н. СЕРГИЕНЯ,
А. С. СИНДЕЛЬ, филиал ЗАО «АТЛАНТ» – Барановичский станкостроительный завод

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДНЕЧАСТОТНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

В статье рассмотрены особенности среднечастотной индукционной печи, разработанной по рекомендациям БНТУ филиалом ЗАО «АТЛАНТ» - БСЗ совместно с компанией EGES. Проанализированы особенности технологии плавки экспериментальных сплавов в различных режимах с использованием дисперсных и кусковых шихтовых материалов. Сделаны необходимые выводы и рекомендации по ведению плавки.

The peculiarities of the mid-frequency induction furnace developed by branch of JSC "ATLANT" BSZ together with the company EGES under recommendations of BNTU are considered in the article. Features of technology of melting of experimental alloys in various modes with use disperse and lump the burden materials are analyzed. Necessary conclusions and recommendations on melting conduction are made.

Важным направлением развития машиностроительного комплекса на современном этапе является повышение эффективности, в первую очередь, за счет снижения энергопотребления высокоэнергоёмких технологических процессов, к которым относятся все процессы плавки черных и цветных металлов. Среди электротехнологических процессов плавки наиболее энергоёмкими являются электротермические. Электроплавка черных и цветных сплавов – наиболее энергоёмкая стадия производства отливок. В связи с этим особое значение приобретают совершенствование применяемого электротермического оборудования, направленное на автоматизацию, улучшение энергетических показателей, надежности работы и повышение эффективности. Техничко-экономические показатели электротермических установок во многом зависят от типа и условий эксплуатации применяемых источников питания, а также технологических схем энергопитания, водоподготовки, охлаждения электрических контуров и др. В последние годы в качестве источников питания индукционных печей распространение получили тиристорные преобразователи. Обладая многими преимуществами перед другими типами преобразователей, как показывает опыт их эксплуатации, они зачастую используются недостаточно эффективно. Серьезные затруднения возникают в решении вопросов согласования с нагрузкой и поиска оптимальных технологических режимов. Значи-

тельное изменение электрических параметров печей в ходе процесса нагрева при неправильном согласовании ведет к неэффективному использованию мощности индукционных печей, увеличению времени проведения, ухудшению энергетических показателей и удорожанию технологического процесса плавки.

Среди различных способов сокращения удельных энергозатрат особый интерес для действующего производства представляет разработка эффективных методов расплавления металла, под которыми понимают предшествующий этап – режим нагрева, а также некоторый промежуточный до плавления этап, когда режим нагрева придется изменять, корректировать с целью передачи от индуктора необходимой мощности при номинальном напряжении и проведения процесса в заданное время. Только оптимальное согласование этих этапов может обеспечить эффективность процесса расплавления шихты для получения как черных, так и цветных сплавов. Одним из путей решения данной задачи является внедрение в производство высокоэффективных технологических процессов плавки черных и цветных сплавов с использованием среднечастотных индукционных плавильных печей.

Современный подход к рассмотрению индукционной плавки предполагает многофункциональность этого плавильного агрегата и использование его для различных технологических задач – рас-

плавления шихты и перемешивания расплава перед разливкой. Известен ряд схемных решений для улучшения циркуляции металла в индукционной тигельной печи.

Радикальным решением проблемы улучшения электродинамического перемешивания металла применительно к разработкам НИЛ «Материаловедение и технология литейного производства» БНТУ совместно с филиалом ЗАО «АТЛАНТ»-Барановичский станкостроительный завод и компанией EGES (Турция-Великобритания) явилась специальная конструкция индуктора среднечастотной индукционной установки для обеспечения максимальной мощности во время плавки. Проект планировки осуществлен таким образом, чтобы длина токопроводов была наименьшей, а их сечение было достаточно широким для обеспечения минимального потребления энергии.

Все это позволяет предотвратить механическую деформацию краев индуктора. Особенно это актуально для сталеплавильных печей, в которых из-за термического расширения шаблона во время спекания может произойти деформация нижней части индуктора, что не допустимо. Например, в некоторых печах донное соединение индуктора после нескольких месяцев работы начинает соприкасаться с близлежащим магнитопроводом. Смещение магнитопровода для предотвращения соприкосновения витка с магнитопроводом может увеличить срок эксплуатации индуктора, но не намного. Кроме того, индуктор необходимо ремонтировать, извлекая его из печи для решения этой проблемы. У некоторых других производителей печей применяются деревянные поддержки, которые ломаются из-за деформации индуктора. Конструкторы фирмы EGES приняли во внимание возможную проблему деформации и прибавили дополнительные охлаждающие витки в донной части, жестко соединив их с соседними витками.

Для верхней части печей применена бетонная жаропрочная часть со стальной рамой, особенно на печах большого объема, где футеровочный материал печи не охлаждается в области верхней бетонной части, несмотря на охлаждение в области индуктора. Этот феномен порождает трещины в месте соединения индуктора и верхней бетонной части. Поэтому оператор должен следить за состоянием футеровочного материала в этой зоне и производить ремонт для предотвращения проникновения металла. Разработчики решили эту проблему, добавив дополнительное охлаждение в верхней бетонной части и присоединив верхнюю бетонную часть к печи таким образом, чтобы она прижималась к индуктору, а не к стальной раме, а также

термическую закалку ко всем видам верхней бетонной части, чтобы удалить влажность и улучшить механические свойства.

На среднечастотной плавильной установке кабели имеют собственную систему охлаждения, работающую автономно и никак не связанную с общей системой охлаждения печей. После длительной работы печи, если появляется какое-либо повреждение на водном кабеле, его можно заменить быстрее, чем за 10 мин без проблем с охлаждением индуктора печи.

В печах средней частоты дозагрузка печи шихтой ведется по мере расплавления шихты и ее оседания, но всегда на еще не расплавленную шихту, и она успевает высохнуть до попадания в жидкий металл. Это предупреждает опасность контакта жидкого металла с влажными кусками шихты. Такой процесс плавки обеспечивается автоматически плавильным процессором и оборудованием для загрузки шихты, которое входит в комплект поставки.

Характерной особенностью печи средней частоты вследствие плавки шихты без «болота» является непрерывная циркуляция металла в тигле печи (рис. 1), а благодаря щадящему температурному режиму выдержки чугуна в период разливки, обеспечиваемому специальным источником питания «TWIN-POWER», возможно:

- ✓ одновременное питание двух печей как с произвольным, так и бесступенчатым распределением мощности между ними;
- ✓ не требуется применения миксеров для поддержания температуры металла в период его разливки;
- ✓ нет потерь во времени во время переключения мощности;

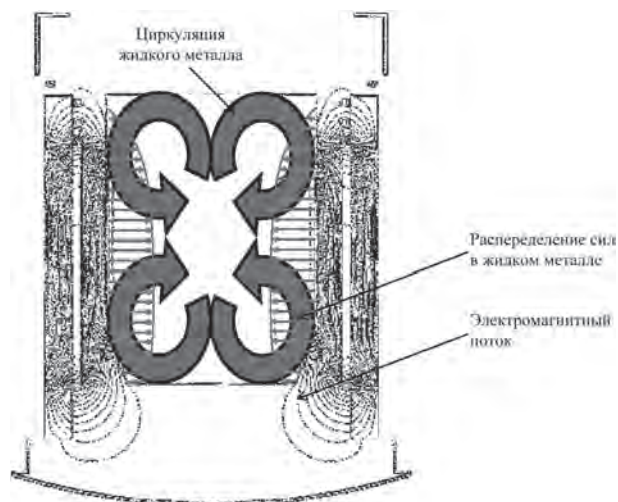


Рис. 1. Характерная циркуляция металла в индукционной печи средней частоты

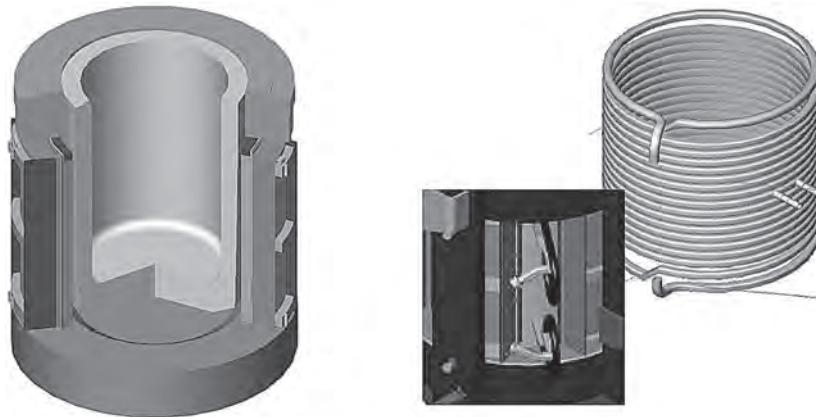


Рис. 2. Конструкция и способ крепления индуктора

✓ плавка и выдержка в одной печи и спекание футеровки во второй печи, которые в свою очередь объединены единым контуром охлаждения.

Эффективность плавильного процесса определяется в значительной степени удельной мощностью агрегата. Чем выше удельная мощность печи, тем меньше капитальные и эксплуатационные затраты, расходы на оборудование, строительство, загрузочные системы.

Созданный индукционный комплекс средней частоты имеет удельный расход электроэнергии при плавке чугуна 530–550 кВт·ч/т. С увеличением частоты интенсивность движения расплава снижается и удельная мощность может быть увеличена до 800 кВт·ч/т. Однако при этом уровне мощности возникают новые проблемы, также обусловленные наличием электромагнитных сил, но теперь уже не их воздействием на расплав, а воздействием на катушку индуктора. Эти силы, пульсирующие с двойной частотой по сравнению с частотой тока, вызывают колебания индуктора, которые передаются конструкции печи, в результате чего создаются вибрационный и шумовой эффекты (рис. 2).

С точки зрения разработки технологии выплавки черных и цветных сплавов с использованием кусковой шихты в индукционных среднечастотных печах наибольший практический и исследовательский интерес представляет способ, при котором осуществляется период окислительного рафинирования за счет ввода на поверхность шлака твердого окислителя. Важным моментом организации технологии плавки с использованием разработанной среднечастотной опытно-экспериментальной установки является определение оптимального состава шлака, основная роль которого в том, чтобы как можно скорее создать буферную «подушку» между окислителем и «зеркалом» расплава.

Возможности нового оборудования для выплавки качественных стальных заготовок провере-

ны в процессе разработки технологии получения режущих вставок резцов роторов горнодобывающих машин из наномодифицированной быстрорежущей стали Р6М5Л (рис. 3).

Основываясь на результатах исследований, целью работы была попытка улучшения структуры и повышения эксплуатационных свойств быстрорежущих сталей путем введения в расплав наноструктурированного диборида титана. Титан выбран, как один из элементов, наиболее эффективно повышающих ударную вязкость литой стали, бор использован для повышения твердости, теплоустойчивости и устойчивости против истирания, т. е. задачей исследования является повышение как ударной вязкости, так и износостойкости инструментальной стали.

Диборид титана в наноструктурированном виде вводили в жидкий металл методом продувки его через футерованную фурму инертным газом (аргоном) после полного раскисления стали. Твердость образцов определяли непосредственно в литом состоянии, после отжига, закалки и отпуска. Ударную вязкость и износостойкость изучали после полной термической обработки. Химический состав и свойства экспериментальной наномодифицированной стали приведены в таблице.



Рис. 3. Резец ротора, оснащенный режущей вставкой из наномодифицированной стали Р6М5Л (ОАО «Беларуськалий»)

Химический состав и свойства экспериментальной литой быстрорежущей стали, модифицированной наноструктурированными добавками на основе диборида титана

Измеряемый параметр	Показатель	Значение
Содержание основных компонентов, %	Углерод С	0,89
	Хром Cr	4,2
	Вольфрам W	6,3
	Молибден Mo	5,4
	Ванадий V	1,91
	Марганец Mn	0,35
	Кремний Si	0,52
	Титан Ti	0,06
	Бор B	0,0012
	Железо Fe	Остальное
Содержание примесей, %	Сера S	0,025
	Фосфор P	0,035
Механические свойства	Твердость после т. о. HRC	65
	Ударная вязкость после т. о., кДж/м ²	180
	Теплостойкость HRC (620 ⁰ С, 4 ч)	63
	Износ, мг/ч	50
	Твердость после отжига HB	265

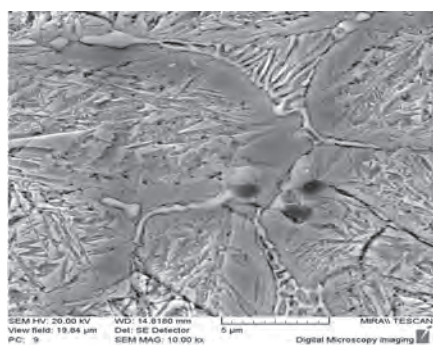
Микроструктуры исследуемых образцов (рис. 4) свидетельствуют о том, что в результате наномодифицирования измельчается первичное зерно, сетка ледебуритной эвтектики разрывается, эвтектика приобретает тонкое строение и располагается в виде изолированных колоний. Эвтектическая составляющая по морфологическому типу скелетообразная, что характерно для борсодержащей быстрорежущей стали. Однако механизм разрушения экспериментальной стали близок к механизму разрушения стали, модифицированной титаном – внутризеренный. На поверхностях разрушения экспериментальной стали, модифицированной наноструктурированным диборидом титана (рис. 4), отсутствуют фасетки скола, присутствующие обычно на фрактограммах стали, модифицированной бором в виде ферробора. Напротив, на поверхностях разрушения наномодифицированной стали преобладает ямочный микрорельеф, что свидетельствует о высокой энергоёмкости такого механизма и повышенной ударной вязкости образцов.

В результате проведенных исследований установлено:

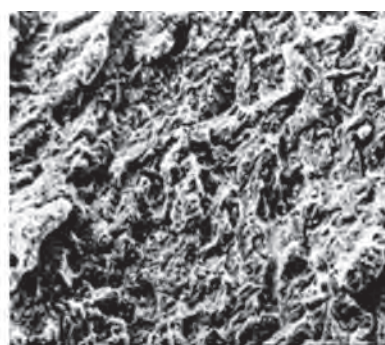
- выбранная методика ввода наномодификаторов с учетом особенностей плавильного оборудования способствует их хорошему усвоению, о чем свидетельствует химический состав образцов стали, приведенный в таблице;
- использование новой среднечастотной плавильной установки позволяет минимизировать угар основных легирующих элементов, сохранив их содержание в пределах стандарта на быстрорежущую сталь (ГОСТ 19265-73).

В экспериментальных исследованиях использовали отработанный на выплавке чугунов метод с поправками по температуре и времени исходя из следующих соображений и собственных практических наблюдений исследовательского коллектива:

1. Минимально возможная температура сталеплавильных процессов составляет 1550 °С. При этой температуре создаются наиболее благоприятные условия для окисления железа и части марган-



а



б

Рис. 4. Микроструктура (а) и поверхность разрушения (б) литой быстрорежущей стали Р6М5Л, модифицированной наноструктурированными добавками диборида титана

ца с целью образования Fe_xO_y и MnO для офлюсования основных компонентов смеси SiO_2 и Al_2O_3 с образованием легкоплавких соединений типа $2Fe_xO_y \cdot SiO_2$ и $2Fe_xO_y \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$. Длительность периода выдержки должна обеспечить флюсование всей массы шлака до появления жидкой фазы, выполняющей роль «защитной пленки» на «зеркале» металла. Минимальная продолжительность периода с учетом необходимого времени гомогенизации на данных установках составляет не более 10 мин. Максимальная продолжительность ограничивается эффектом «образования мостов» и «зарастания» тигля из-за переизбытка содержания Fe_xO_y в шлаке, который должен расходоваться на окисление C , Mn и Si . Это может усугубляться интенсивным образованием SiO_2 и увеличением массы объема шлака с одновременным повышением его вязкости.

2. Максимально возможная температура второго периода плавления, который необходим для проведения периода «закипания» расплава с помощью интенсификации процесса обезуглероживания с выделением пузырей CO , ввода ферросплавов для раскисления шлака и корректировки состава», составляет 1600 °C. При более высокой температуре, как известно, усиливается разрушение футеровки, а также возрастает угар полезных элементов ферросплавов, что нивелирует преимущество отсутствия третьего периода нагрева под выпуск плавки.

После ввода корректирующих добавок необходимое время для усвоения элементов составляло также не более 10 мин. По этим причинам стремились ограничить общий длительный период до 25 мин.

В период с момента ввода окислителя на шлак и до раскисления шлака постоянно следили за состоянием ванны и при необходимости систематически «просаживали» шлак. Окислитель в течение всего периода старались равномерно распределять и «замешивать» в шлак по всей поверхности ванны. Для этих целей использовали совковую лопату с дополнительной изоляцией ручки, так как операцию осуществляли без отключения установки.

3. Температура третьего периода составляла 1650 °C и была обусловлена требованием технологии разлива стали по отрытым изложницам емкостью 0,1 т. В этот период осуществляли окончательное раскисление (навесками технического алюминия при среднем расходе 1,4 кг/т в виде цилиндрических брусков, которые вводили вглубь ванны), отбор последней пробы на химический состав и выпуск плавки. Остаточная концентрация алюминия составляла от 0,002 до 0,0028%, что со-

ответствовало плотной структуре проб и слитков без газовых полостей и микрораковин.

Технологические и конструктивные особенности экспериментальной среднечастотной индукционной печи, а также описанные ниже испытания позволяют утверждать о возможности осуществления технологического процесса плавки стружки, а также дисперсных материалов при плавке с «болотом» и без него в индукционных среднечастотных печах.

Дисперсные низкосортные железосодержащие отходы – окалина, продукты переработки и сепарации шлака, стружка, металлургическая пыль представляют собой весьма разнородное по химическому составу и гранулометрии сырье (от нескольких микрон до десятка сантиметров). Содержание основного элемента – железа в этих отходах может колебаться от 35–40 % в аспирационной пыли до 95–98 % в стальной и чугуновой стружке. В то же время, учитывая большое количество подобного рода отходов, образующихся на современных машиностроительных предприятиях, актуальность ведения плавки с использованием индукционных печей с каждым годом не снижается. В Беларуси количество вновь образующихся низкосортных железосодержащих металлоотходов оценивается примерно в 250–300 тыс. т в год.

Для того чтобы использовать стружку в качестве шихтового материала, требуется проведение специальных подготовительных операций, направленных на увеличение удельного веса стружки: сепарирование, дробление и брикетирование. Это связано с тем, что использование насыпной стружки при плавке различными способами приводит к высокому ее угару от 15–30 % (при индукционной плавке).

В случае навалного материала процесс теплообмена становится более сложным. Несмотря на большой размер удельной поверхности материала, облучаемая поверхность практически не изменя-



Рис. 5. Схема заправки печи стружкой



Рис. 6. Схемы загрузки печи в момент проведения испытаний

ется. Однако для того чтобы достичь необходимого уровня теплообмена, в тигле печи должна быть достаточная теплопередача, которая обеспечивается индукцией (рис. 5).

При разработке технологического процесса получения металла осуществляли обычное расплавление шихты и сухой стружки ($\leq 30\%$), используя следующую процедуру загрузки печи:

- в начале процесса расплавления в тигле печи нет стружки;
- загрузка стружки осуществлялась в центр тигля печи;
- на начальном этапе расплавления в качестве шихты использовали добавки как шихты, так и стружки, далее добавление шихты производили со слабым перемешиванием для замешивания стружки в жидкий металл.

Упрощенные схемы проведения испытаний (рис. 6) наглядно иллюстрируют процедуру загрузки индукционной печи.

Собственный опыт при проведении процесса расплавления стружки и анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации индукционных плавильных печей средней частоты, моделирование процессов тепломассопереноса в печах, исследование процессов как нагрева материала, так и плавки в этих печах, апробация опытно-экспериментальной установки позволяют выделить основные принципы и рекомендации, которые необходимо соблюдать при осуществлении технологического процесса плавки стружки:

✓ Процесс переплавки стружки в плавильных печах включает в себя высокотемпературный безокислительный нагрев, расплавление, выдержку, скачивание шлака и выдачу расплава в разливочный ковш или изложницы.

✓ В процессе плавки скорость подачи стружки в жидкий металл (плавка «с болотом») должна быть не менее 5 кг/мин, в противном случае идет слишком сильный дым и повышенный износ футеровки.

✓ После проведения этапа загрузки необходимо поддерживать температуру в пределах 1300–1380 °С. Рекомендуемый объем наведения «болота» в тигле индукционной среднечастотной печи – не менее 30 % от массы загрузки стружки.

✓ В качестве ограничения можно считать как нежелательность применения слишком мелкодисперсного сырья и восстановителя – с размером частиц менее 10 мкм, так как это может привести к большим потерям на пылеунос.

✓ Благодаря конструкционным изменениям в конструкции катушки индукционной среднечастотной печи возможен процесс плавки стружки при 100 %-ной ее загрузке, без особых проблем с футеровкой (см. рис. 2).

Разработанные технологические решения обеспечивают возможность гибкой организации плавки, непрерывной заливки жидким металлом готовых форм, быстрого перехода на выплавку различных сплавов, легкую приспособляемость к изменению в шихтовке плавки при перебоях в снабжении шихтовыми материалами и возможность применения низкосортной шихты.

Уникальный среднечастотный плавильный комплекс позволяет в максимальном приближении к производственным условиям промоделировать всю технологическую цепочку процесса плавки, включая как электрические параметры, так и разновидности шихтовых материалов и последовательность их введения в шахту печи. Все это дает возможности разрабатывать оптимальные условия плавки для каждого конкретного литейного цеха и обеспечить, в конечном итоге, на 10–15 % сокращение длительности процесса расплавления шихты и эквивалентно уменьшить удельный расход электроэнергии на выплавку 1 т расплава; сокращение угара компонентов шихты и повышение качества выплавленного сплава; увеличение срока службы футеровки печи; улучшение экологических показателей за счет правильно отработанной технологии плавки и снижения количества вредных пылегазовых выбросов.