

структуры жаропрочных никелевых сплавов.

Одновременно наблюдали измельчение эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы. Количество последней в результате изменения условий кристаллизации заметно не изменилось.

Установлено [2, 3], что горячие трещины в образцах с равноосной структурой зарождались по карбидному каркасу перпендикулярно поверхности образца.

В результате направленной кристаллизации опытных образцов, в сравнении с объёмной, заметно повысилась микротвёрдость всех структурных составляющих жаропрочных сплавов. Это свидетельствует о том, что химический состав осей дендритов, межосий и эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы, после направленной кристаллизации существенно отличается от состава тех же структурных составляющих в металле после объёмной кристаллизации. Анализ полученных результатов указывает на большую однородность химического состава материала образцов, полученных в результате высокоскоростной направленной кристаллизации.

Механические испытания показали [2], что образцы сплава ЖС26-ВИ с направленной макроструктурой, в сравнении с равноосной, обладали несколько меньшей прочностью ( $\sigma_B$ , соответственно, 900 и 915 МПа), большей пластичностью при комнатной температуре ( $\delta$ , соответственно, 11,7 и 6,9 %) и значительно большей длительной прочностью при высоких температурах (соответственно, 111 часов до разрушения при 975 °С и  $\sigma = 260$  МПа, и 64,5 часа при 975 °С и  $\sigma = 230$  МПа). Это можно объяснить отсутствием в сплаве после высокоскоростной направленной кристаллизации хрупкого карбидного каркаса, его гораздо более мелкой и однородной дендритной структурой и измельчением эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы.

Таким образом, высокоскоростная направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов, в сравнении с объёмной, приводит к разрушению карбидного каркаса вокруг дендритных осей и равномерному распределению карбидов по структуре сплава, к измельчению дендритной структуры и уменьшению размеров эвтектической  $\gamma+\gamma'$ -фазы, выравниванию неоднородностей химического состава структурных составляющих. В результате существенно возрастают пластичность и длительная прочность сплавов, устойчивость к образованию трещин в условиях затруднённой усадки и, следовательно, повышаются эксплуатационные свойства изготавливаемых отливок.

#### Список литературы

1. Наумик В. В. Перспективы использования возврата при получении качественных отливок с управляемой кристаллизацией / Наумик В.В., Цивирко Э.И., Лунёв В.В.

// Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 37 – 43.

2. Цивірко Е.І. Об'ємна та спрямована кристалізація нікелевих сплавів / Е.І. Цивірко, В.В. Клочихін, О.Г. Коломойцев, В.В. Наумик // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 3. – С. 5 – 11.

3. Цивирко Э.И. Процессы кристаллизации, структура и свойства отливок из никелевых жаропрочных сплавов / Э.И. Цивирко, П.Д. Жеманюк, В.В. Клочихин, В.В. Наумик, В.В. Лунёв // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 10. – С. 13 – 17.

УДК 621.74

*К. Г. Низяев, Б. М. Бойченко, А. Н. Стоянов*

*Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск*

### **НОВЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ АКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ В ОБЪЕМЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА В ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДУГИ**

Наиболее динамично развивающейся областью сталеплавильного производства в настоящее время является внепечная обработка. Применение в структуре сталеплавильного цеха установок типа «ковш-печь» в сочетании с более традиционными методами практически неограниченно расширило возможности внепечной обработки: от производства высоколегированных марок до сталей со сверхнизким содержанием примесей. Вместе с тем практика работы отечественных и зарубежных металлургических предприятий показывает, что существующие технологии обработки металла в ковше многостадийны и достаточно продолжительны во времени. Так, длительность обработки стали с целью корректировки ее температуры и химического состава составляет в зависимости от поставленной задачи от 20 до 80 минут. Это вызывает определенные затруднения организационного характера, особенно в работе конвертерного цеха.

Сократить длительность обработки возможно за счет совмещения операций нагрева стали и корректировки ее химического состава, как в «ковше-печи». Более эффективно можно решить поставленную задачу обработкой металла в ковше погружаемой электрической дугой. Применение погружаемого блока специальной конструкции, наличие в материале, изолирующем электроды от окружающего металла, газообразующих, рафинирующих и (или) легирующих реагентов позволяет совместить нагрев и обработку железоуглеродистого расплава, дозированный ввод и высокий коэффициент усвоения реагентов, наиболее полное использование их реакционной способности.

На кафедре металлургии стали НМетАУ создана принципиально новая

технология регулирования состава стали в ковше за счет обработки высокоактивными реагентами, восстановленными из соответствующих оксидов непосредственно в объеме жидкого металла в зоне электрической дуги.

Сущность процесса состоит в следующем.

Два электрода располагают параллельно друг другу и в процессе формирования помещают в материал, который обеспечивает их защиту и электроизоляцию от жидкого металла и одновременно является исходным материалом для протекания реакций восстановления элементов из их оксидов. При подведении разности электрических потенциалов к свободным концам электродов между их рабочими концами возникает электрический разряд. После этого блок погружают в жидкий чугун или сталь. За счет тепла электрической дуги протекают процессы восстановления реагентов и нагрева. Полученные таким образом парообразные реагенты вступают в реакцию с примесями железоуглеродистого расплава, обеспечивая достижение заданного результата.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлена возможность получения кальция и(или) магния под слоем жидкого металла в зоне дугового разряда и десульфурации металла этими реагентами.

Определены оптимальный химический состав смеси восстановительных блоков, необходимые геометрические размеры, гранулометрический состав, электропроводность смеси. Подобран материал электродов, обеспечивающий подвод необходимой мощности и равенство скоростей разрушения электродов и расходования смеси блоков, а также поддержание рабочей температуры восстановления магния.

Экспериментально установлено, что тепловой КПД нагрева стали в лабораторных условиях составляет 75-80%, а максимальная степень десульфурации чугуна в полупромышленных условиях – 97,2 %, степень использования магния 98,14 %.

УДК 621.74

*А. Н. Овчарук, В. К. Руденко, А. Ю. Таран, А. С. Филев*  
*Национальная металлургическая академия Украины*  
*(НМетАУ), Днепропетровск*

### **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ ЧЕРНОВОЙ МЕДИ ИЗ ОКИСНОЙ РУДЫ**

Плавку черновой меди осуществляли в крупнолабораторной электропечи, оснащенной силовым трансформатором ТЭС 3-230/0,380.

Использовали графитированные электроды диаметром 110 мм, которые жестко соединены с кареткой. Каретка имеет привод и вместе с электродами вертикально перемещается вдоль металлической стойки (направляющей). Диаметр распада электродов – 0,194 м. Внутренний диаметр ванны печи – 0,504 м. Глубина ванны печи составила 0,35 м. Рабочая площадь поверхности колошника составила 0,199 м<sup>2</sup>, а объем ванны – 0,07 м<sup>3</sup>. Отношение глубины ванны печи к диаметру электрода равнялось 3,18, а отношение этой же глубины ванны к диаметру распада электродов (h<sub>b</sub>/d<sub>p</sub>) – 0,69. Отношение диаметра распада электродов к диаметру электродов – 4,58.

Средняя плотность мощности в сечении ванны составила 0,75 кВт/м<sup>2</sup>, а плотность мощности в действующем объеме ванны, составила 2,15 кВт/м<sup>3</sup>.

Медная руда окисная, содержала CuO – 22,53%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11,29%, FeO – 0,2%, SiO<sub>2</sub> – 42,83%, TiO<sub>2</sub> – 0,13%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,78%, CaO – 1,68%, MgO – 3,32%, CoO – 2,67%, MnO – 0,17%, Na<sub>2</sub>O – 0,43%, K<sub>2</sub>O – 0,87%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,37%, S – 0,4, CO<sub>2</sub> – 5,0%, H<sub>2</sub>O – 3,33%.

В качестве восстановителя использовали отсеvy коксика, содержащие 12% золы, 3,0% летучих веществ, 0,5% серы и 85% твердого углерода. Гигроскопическая влага в используемом восстановителе составила 10,7%.

В процессе выплавки медного сплава образуется большое количество шлака, содержащего 60-65% SiO<sub>2</sub>, а для придания этому шлаку основности 0,4 в состав шихты вводится известь (флюс) в количестве 20-21%.

Шихту, состоящую из медной руды, восстановителя и флюса после тщательного смешивания небольшими порциями (по мере ее проплавления) загружали на поверхность колошника под электроды, создавая таким образом конуса. После загрузки последней порции шихты и ее прогревания производим выпуск металла и шлака, при этом фиксировали: время начала и конца плавки, съем электроэнергии за плавку, ступень напряжения, сила тока и напряжение на электроде, масса металла и шлака.

В результате проведения лабораторных плавов был получен металл с средним содержанием меди 89,0% Cu, отвальный шлак содержал 0,24 – 0,47% CuO. Кратность шлака за опытную компанию (9 плавов) составила 3,07. Всего было выплавлено 252 кг медьсодержащего металла и 775 кг