

К ВОПРОСУ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭШП

Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов

ON RECEIPT OF LARGE FORGING INGOTS OF HIGH-ALLOY STEELS AND ALLOYS BY THE ESR

D.A. Pyatygin, I.V. Chumanov

Рассмотрены различные технологии получения крупных кузнечных слитков и полой заготовки из высоколегированных сталей и сплавов методом ЭШП. Показана перспективность применения технологии электрошлакового переплава с вращением расходимого электрода вокруг своей оси для производства крупных слитков из суперсплавов, чувствительных к сегрегации.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, кузнечный слиток, суперсплавы, сегрегация, вращение электрода.

In this paper we examine various technologies for large forging ingots and a hollow billet of high-alloy steels and alloys by ESR. The prospects are shown of application of electroslag remelting technology with a consumable electrode rotating around its axis to produce large ingots of superalloys sensitive to segregation.

Keywords: electroslag remelting, forging ingot, superalloys, segregation, rotation of the electrode.

Известно, что металл, полученный методом электрошлаковой плавки (ЭШП), обладает повышенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с металлом обычной выплавки и разливки. Это обусловлено, прежде всего, двумя факторами – рафинированием в специально подобранном шлаке и условиями кристаллизации металла. Следует заметить, что из-за необходимости двукратного металлургического передела стоимость металла ЭШП почти в два раза выше стоимости металла электродуговой плавки, который благодаря современным технологиям внепечного рафинирования, может быть очень чистым по всем вредным примесям и не уступать по этим показателям металлу ЭШП.

Электрошлаковая технология обладает достаточной гибкостью, что позволяет использовать её для получения отливок, близких по своей форме и размерам к готовым деталям, осуществлять восстановление изношенных поверхностей. Не случайно более 50% электрошлаковых установок сосредоточено на машиностроительных предприятиях.

За более чем 50 лет существования ЭШП проведено большое количество исследований по совершенствованию технологии процесса и создано оборудование, позволяющее улучшить технико-экономические параметры переплава. Однако экономический кризис, поразивший Россию, облегчил ситуацию на рынке для наших зарубежных конкурентов, где в области ЭШП сегодня убастривающийся прогресс [1].

Процесс ЭШП становится конкурентоспособным по сравнению с электродуговой плавкой и находит применение в случаях, когда необходимо получение слитков в условиях специфической кристаллизации, имеющей место при затвердевании металла под жидким шлаком в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Такие условия приводят практически к полной ликвидации макроликвационных явлений, неизбежно сопутствующих затвердеванию металла в изложнице. Поэтому для производства ответственных крупногабаритных изделий из высококачественных сталей, суперсплавов и титановых сплавов, например стального листа для судостроения, энергетики и энергетического машиностроения, процесс ЭШП необходим.

В суперсплавах на никелевой основе как типичные могут быть охарактеризованы дефекты, связанные с сегрегацией. Примерами таких дефектов служат «фреклс» (веснушки) и «белые пятна». Причем с увеличением диаметра и массы слитка ситуация с данными дефектами усугубляется. Для предотвращения появления этих дефектов сформулированы следующие условия: обеспечение минимальной глубины металлической ванны, минимального значения локального времени кристаллизации двухфазной зоны, формы фронта кристаллизации максимально плоской, независимо от профиля и диаметра кристаллизатора; недопущение нестабильности в тепловом состоянии шлаковой и металлических ванн (например, путем кратковременных отключений мощности, периодиче-

ского изменения заглибления электрода в шлаковую ванну и др.); обеспечение формирования тонкого гарнисажа для улучшения теплоотвода от слитка и формирования качественной поверхности слитка [2–5].

Соблюдение данных условий применительно к классической схеме ЭШП весьма затруднительно, так как снижение выделяемой мощности на шлаковой ванне, с одной стороны, приводит к уменьшению объема жидкой металлической ванны, с другой – уменьшению температуры шлаковой и металлических ванн, вследствие чего увеличивается толщина гарнисажа, нарушается формирование поверхности слитка, а при уменьшении скорости переплава ниже номинальной к появлению «белых пятен».

Также следует отметить, что при реализации моноэлектродной схемы ЭШП наибольшее количество тепла выделяется в подэлектродной зоне, препятствуя формированию плоской по формы металлической ванны. В этом случае из-за V-образной формы фронта кристаллизации увеличивается протяженность двухфазной области в осевой части слитка, что способствует облегчению образования кристаллизационных дефектов. Усугубляет ситуацию наличие шлакового гарнисажа на поверхности формируемого слитка, ухудшающего отвод тепла от слитка и уменьшающего скорость кристаллизации. Выровнять температурные поля в шлаковой и металлической ванне в процессе переплава возможно различными способами внешнего воздействия на зону плавления и кристаллизации (ультразвук, электромагнитные поля, вибрация и др.) и разработкой соответствующих устройств.

Так в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (г. Киев) разработаны способы ЭШН/ЭШП ЖМ и ЭШП ДС [1]. В случае ЭШН/ЭШП ЖМ предлагается принципиально новый способ получения крупнотоннажной продукции из высоколегированных сталей и сплавов базирующийся на трех особенностях: 1) электрошлаковая технология без расходующих электродов; 2) возможность получения полых слитков; 3) получение слитков переменного химического состава [1, 6]. Данная технология создана под руководством академика Б.И. Медовара для производства композитных прокатных валков. В общем виде процесс ЭШН/ЭШП ЖМ выглядит следующим образом. В шлакоплавильной печи расплавляют шлак и заливают в зазор между наплавляемой заготовкой и стенкой кристаллизатора. Как только жидкий шлак коснется токоведущей секции кристаллизатора, замыкается электрическая цепь источник питания – наплавляемая заготовка – жидкий шлак – токоведущий кристаллизатор – источник питания и начинается электрошлаковый процесс в шлаковой ванне. В токоподводящей секционный кристаллизатор, оборудованный устройством вращения шлака, осуществляется порционная подача металла, предварительно расплавленного в

отдельном сталеплавильном агрегате. Вращение шлаковой ванны способствует исчезновению видимых электродуг на границе шлак – кристаллизатор, выравниванию температуры по всему периметру токоподводящей секции и распределению жидкого металла каждой порции по сечению слитка. Данная технология позволяет также получать цельнолитую и полузаготовку.

Однако следует отметить, что реализация данной технологии требует дополнительного оборудования, что скажется и на себестоимости конечного продукта. Так в работе [1] авторы, описывая установку ЭШН/ЭШП ЖМ-300, работающую на ЗАО НКМЗ, указывают, что помимо оборудования, необходимого для осуществления процесса (сама установка ЭШП и печи для расплавления флюса), нужно следующее оборудование: две заливочные установки (индукционная печь или ДСП) с полезным объемом жидкого металла до 10 т; дополнительный источник питания для организационного управления вращением шлака; систему управления процессом, не только контролирующую электрические и массогеометрические параметры процесса, но и постоянно корректирующую уровень границы раздела металл–шлак, чтобы предотвратить короткое замыкание в результате касания жидкого металла токоведущей секции.

Развитие электрошлаковых технологий в токопроводящем кристаллизаторе способствовало созданию так называемой двухконтурной схемы переплава расходующего электрода ЭШП ДС, разработанной ввиду отсутствия в настоящее время возможностей выдержки и подачи жидкого металлического расплава, особенно включающего легкоокисляющиеся элементы такие, как титан и алюминий, в токоподводящий кристаллизатор [7]. Наличие двух независимых источников питания дает возможность разорвать жесткую связь между подводимой к переплавляемому электроду мощностью и производительностью переплава. Это позволяет варьировать скорость переплава в широких пределах без потери металлургического качества слитка, а именно бороться с сегрегационными явлениями путем уменьшения объема и глубины жидкой металлической ванны за счет уменьшения скорости переплава без потери качества поверхности слитка. В работе [1] показано, что применение такой схемы переплава позволяет уменьшить вдвое глубину жидкой металлической ванны по сравнению со стандартным ЭШП.

К недостаткам данного способа очевидно можно отнести то, что эффективный сам по себе способ управления подводимой мощностью накладывается на старую схему плавления электрода (преимущественно осевой тепло- и массообмен), которая в случае выплавки крупнотоннажных слитков не позволит получить плоскую форму жидкой металлической ванны и как следствие протяженность двухфазной области в осевой части слитка. Кроме того, наличие второго трансформа-

тора и снижение скорости переплава приведет к значительному удорожанию готовой продукции.

В работе [5] авторы отмечают, что применение токоподводящих кристаллизаторов имеет свои особенности, в частности, образование металлического гарнисажа с чешуйчатой поверхностью и рванин разной протяженности и формы, особенно при получении слитков из суперсплавов, содержащих титан и алюминий. Стремление избежать образования в таких слитках дефектов ликвационного характера требует необходимости их выплавки на режимах, обеспечивающих плоскую форму металлической ванны. Формирование поверхности таких слитков должно происходить при довольно высоком гидростатическом давлении цилиндрической части металлической ванны, что при периферийном теплоотводе создает условия, способствующие возникновению проливов жидкого металла в зазор между слитком и кристаллизатором в случае разрушения шлакового гарнисажа.

Таким образом, вышеописанные технологии направлены на получение сверхкрупных электрошлаковых слитков, в частности, из суперсплавов, избавленных от ликвационных дефектов типа «фреклс» и «белые пятна» за счет выравнивания температурных полей в шлаковой ванне путем периферийного обогрева шлаковой ванны в токоподводящих кристаллизаторах. Однако такое решение не является единственным. Еще в 70-х годах XX века авторы Клюев М.М., Никулин А.А., Медовар Б.И., Латаш Ю.В., Вачугов Г.А. и др. показали, что основным источником тепла в жидкой металлической ванне при ЭШП являются капли электродного металла, а в зависимости от места их доставки будет формироваться и профиль фронта кристаллизации. Поэтому наиболее эффективным является непосредственное воздействие на распределение электродного металла в процессе ЭШП с целью усреднения температурного поля.

На наш взгляд, перспективным способом получения крупных кузнечных слитков из высоколегированных сталей и сплавов является электрошлаковый переплав с вращением расходуемого электрода вокруг своей оси. Данный способ предполагает комплексное воздействие на процессы рафинирования и кристаллизации, также возможность повышения тепловой эффективности электрошлакового процесса [8–14]. Данная технология обладает целым рядом существенных преимуществ. Это, прежде всего, возможность значительно повысить производительность процесса в ряде случаев до 25 % и более, причём без увеличения подводимой мощности на шлаковую ванну и ухудшения качества электрошлакового металла. Стремясь обеспечить прогрессирующее энергосбережение, следует непрерывно оптимизировать процесс теплопередачи к нагреваемому металлу, совершенствуя тепловую работу используемого печного агрегата. В нашем случае это достигается за счёт трёх моментов: изменения гидродинамиче-

ской обстановки в шлаковой ванне, принудительного съёма жидкого электродного металла и уменьшения высоты шлаковой ванны.

Кроме того, следует отметить и то обстоятельство, что съём жидкого электродного металла в случае вращения электрода происходит преимущественно под воздействием центробежных сил, а не гравитационных, что характерно для принятой (классической) технологии переплава. Следовательно, при плавлении в поле действия центробежных сил жидкая фаза (капля) с оплаиваемой поверхности эвакуируется несколько раньше в сравнении с оплаиванием без вращения, что позволяет быстрее готовить поверхность электрода для последующего плавления.

В случае вращения расходуемого электрода, оплаиваемый торец плоский и уровень шлака в кристаллизаторе ниже, чем при применении технологии без вращения, где высота шлаковой ванны больше за счёт вытеснения шлака погружённым в него конусом оплаивания. Снижение площади контакта шлака с охлаждаемой стенкой кристаллизатора приводит к снижению тепловых потерь на 9–13 %.

При вращении электрода, под действием центробежных сил, в пленке жидкого металла на торце электрода присутствует преимущественно радиальное течение металла. Электродный металл в виде капель срывается с периферии торца электрода и попадает на поверхность ванны жидкого металла под углом, тем самым меняя место доставки тепла, распределяя его более равномерно по сечению слитка.

Полученные положительные результаты при реализации рассматриваемой технологии на одноэлектродных электрошлаковых установках дали основание для поиска вариантов технологий с вращением расходуемых электродов на многоэлектродных и бифилярных электрошлаковых печах.

Необходимость изменения скорости плавления наиболее актуальна при реализации переплава нескольких электродов в одной шлаковой ванне (трехфазная схема), чаще всего эта потребность возникает при получении слябов методом ЭШП, так как крайние электроды находятся в области интенсивного охлаждения. Данное обстоятельство приводит к тому, что крайние электроды оплаиваются с меньшей скоростью, чем центральные. Если не принимать никаких дополнительных мер, направленных на выравнивание скорости плавления электродов, то по истечении какого-то времени происходит вмораживание крайних электродов в металлическую ванну. Повысить скорость плавления крайних электродов и сделать её равной скорости плавления центральных электродов, можно обеспечив их вращение со скоростью, компенсирующей отставание в плавлении.

Стремление к постоянству скорости плавления на протяжении всей плавки обусловлено желанием иметь одинаковые свойства по всей высоте

формируемого слитка, хотя и при регулировании скорости, и обеспечении её постоянства мы можем иметь неодинаковые условия по рафинированию металла в процессе плавки, что хорошо иллюстрируется при реализации электрошлакового процесса по бифилярной схеме. Наличие теплового центра между переплавляемыми электродами приводит к более интенсивной скорости оплавления ближайших сторон электрода и в меньшей степени – удалённых. На поверхностях, подверженных интенсивному оплавлению из-за значительной толщины плёнки жидкого металла, условия рафинирования затруднены. Вращение электродов в случае реализации бифилярной схемы переплава создаёт лучшее условие рафинирования за счёт постоянного изменения поверхностей, подверженных более интенсивному оплавлению, а при наложении центробежных сил, достаточных для радиального течения электродного металла, и равные условия по всей оплавляемой поверхности.

Таким образом, приведен далеко не полный перечень направлений, по которым возможно совершенствование ЭШП с вращением расходуемого электрода, однако решение поставленных задач позволит еще больше расширить возможности электрошлаковых технологий, обеспечив высокое качество продукции, не ухудшая при этом технико-экономические показатели переплава.

НИР проведена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 гг.)» гос. контракт № ПЗ16 от 28.07.2009 и № П874 от 18.08.2009.

Литература

1. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.П. Стовиченко и др. // Современная электрометаллургия. – 2010. – № 3(100). – С. 5–11.

2. Цыкуленко, А.К. Кристаллизационные дефекты в суперсплавах / А.К. Цыкуленко // Проблемы СЭМ. – 2000. – № 3. – С. 21–26.

3. Митчелл, А. Кристаллизация металла в процессах переплава / А. Митчелл // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 2. – С. 4–13.

4. Митчелл, А. Электрошлаковая технология для производства аэрокосмических сплавов / А. Митчелл // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 37–43.

5. О формировании поверхности слитков из никелевых суперсплавов при ЭШП в токопроводящем кристаллизаторе / Л.Б. Медовар, А.К. Цыкуленко, Б.Б. Федоровский и др. // Проблемы СЭМ. – 2000. – № 4. – С. 7–14.

6. Математическое моделирование процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токопроводящем кристаллизаторе / В.И. Махненко, Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко и др. // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 30–36.

7. Цыкуленко, К.А. Развитие электрошлаковых технологий и совершенствование конструкций кристаллизаторов ЭШП (обзор) / К.А. Цыкуленко // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 4. – С. 8–18.

8. Чуманов, И.В. Повышение эффективности электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, В.Е. Роцин, Д.А. Пятыгин // Электрометаллургия. – 2001. – № 12. – С. 30–33.

9. Чуманов, И.В. Особенности электрошлакового процесса на постоянном токе с вращением электрода / И.В. Чуманов, В.Е. Роцин, Д.А. Пятыгин // Электрометаллургия. – 2002. – № 1. – С. 45–46.

10. Пятыгин, Д.А. Особенности ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // Известия вузов. ЧМ. – 2006. – № 3. – С. 22–25.

11. Пятыгин, Д.А. Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // Известия вузов. ЧМ. – 2006. – № 7. – С. 25–26.

12. Чуманов, В.И. Управление карбидной структурой при электрошлаковом переплаве инструментальной стали. Часть II / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов // Электрометаллургия. – 2010. – № 8. – С. 15–18.

13. Чуманов, В.И. Управление карбидной структурой при электрошлаковом переплаве инструментальной стали. Часть I / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов // Электрометаллургия. – 2010. – № 7. – С. 22–28.

14. Чуманов, И.В. О возможности получения многослойных слитков электрошлаковым переплавом / И.В. Чуманов, М.А. Порсев // Электрометаллургия. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

Поступила в редакцию 9 марта 2011 г.