

У. Дахуорт, Д. Хойл

**ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ
ПЕРЕПЛАВ**

Electro-slag Refining

W. E. DUCKWORTH

G. HOYLE

CHAPMAN AND HALL LTD
11 NEW FETTER LANE LONDON E. C. 4

© 1969 *British Iron & Steel*

У. Дакуорт, Д. Хойл

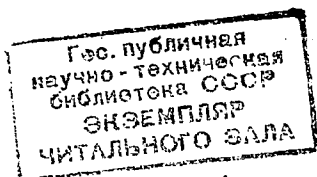
ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ

Перевод с английского
А. Б. ПАРЦЕВСКОГО



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ»
1973

14
5407



73 - 26500

669-154.9'4'187.28

Электрошлаковый переплав. Дакуорт У. Э., Хойл. Дж. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1973, 192 с.

Книга «Электрошлаковый переплав» является первой в зарубежной научно-технической литературе монографией, в которой выполнено описание современного состояния процесса электрошлакового переплава в ряде стран мира. Цель книги заключается в широком ознакомлении инженеров, в особенности специалистов предприятий, обрабатывающих стали и сплавы с высокими механическими и специальными свойствами, с процессом электрошлакового переплава и перспективами его развития.

Ил. 59. Табл. 40. Список лит.: 75 назв.

Д $\frac{3102-095}{040-(01)-73}$ 34-73

СОДЕРЖАНИЕ

От издательства	6
Основы процесса	7
Физические и химические свойства шлака и принципы выбора шлака	16
Конструкция установок электрошлакового переплава	83
Работа установок электрошлакового переплава	124
Влияние электрошлакового переплава на свойства металла	144
Экономичность процесса электрошлакового переплава	173

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Процесс электрошлакового переплава, особенно за последние годы, получил широкое распространение в СССР и ряде стран мира, успешно конкурируя с вакуумно-дуговым и вакуумно-индукционным переплавом, что объясняется возможностью экономичного получения электрошлаковым переплавом высококачественных сталей и сплавов для ответственных назначений. Следует ожидать, что мощности по производству металла этим процессом в ближайшие годы значительно возрастут.

Книга «Электрошлаковый переплав» изданная в Англии, является первой в зарубежной научно-технической литературе, в которой дано описание современного состояния процесса электрошлакового переплава в ряде стран мира. Эта книга, особенно ее разделы, касающиеся свойств шлаков и их подбора, конструкций установок, представит определенный интерес для широкого круга советских специалистов, работающих в качественной металлургии.

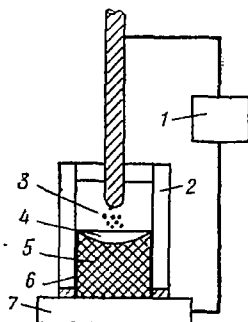
ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Электрошлаковый переплав (ЭШП) является вторичным процессом рафинирования металлов. Он применяется для дальнейшей очистки после завершения первичных операций по удалению примесей и рафинированию. В качестве исходного материала обычно применяется сплошной расходуемый электрод из первичного металла, который может быть литым, полученным обработкой

Рис. 1. Схема электрошлакового переплава:

1 — трансформатор; 2 — медный водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — жидкий металл; 5 — затвердевший металл; 6 — слой твердого шлака; 7 — водоохлаждаемый поддон



давлением или состоящим из лома. Шлаковая ванна, содержащаяся в охлаждаемом кристаллизаторе, нагревается и расплавляется электрическим током (электросопротивлением), текущим между электродом и охлаждаемым поддоном (рис. 1). Когда температура шлаковой ванны превышает температуру плавления металла, электрод начинает оплавляться; капли, стекающие с конца электрода, падают в шлаковую ванну, образуя на поддоне металлическую ванну, которая постепенно затвердевает. Электрод подают в шлаковую ванну, при этом слиток, служащий вторым электродом, постепенно растет.

Жидкий шлак таким образом непрерывно перемещается кверху. Там, где поднимающийся шлак встречается со стенками охлаждаемого кристаллизатора, он затвердевает, что обеспечивает наличие сплошной корочки твердого шлака между кристаллизатором и затвердевающим слитком. При раздевании слитка она шелушится с поверхности, характеризующейся прекрасным качеством.

Процесс во многом аналогичен вакуумно-дуговому переплаву (ВДП): сплошной слиток образуется в результате постепенного затвердевания металла в вертикальном направлении. При соответствующем снижении силы тока к концу операции обеспечивается полное отсутствие усадочной раковины и осевой пористости.

Рафинирование осуществляется вследствие реакции между металлом и шлаком, происходящей в три стадии:

- а) при образовании капли на конце электрода;
- б) при прохождении отдельной капли через шлак;
- в) после накопления жидкого металла в ванне, образующейся на верхней части слитка.

При соответствующем выборе шлаков химическая реакция может быть усилена. Возможно, например, снижение содержания серы до очень низкого уровня. Удалению неметаллических включений может способствовать их флотация и химическая реакция со шлаком. Шлаки могут быть подобраны также таким образом, чтобы воспрепятствовать удалению элементов, которые нужно сохранить.

Имеется много методов работы, которые будут описаны ниже. В основном же для осуществления процесса нужны трансформатор, охлаждаемый кристаллизатор и устройство для подачи и управления электродом.

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

В настоящее время установлены следующие преимущества электрошлакового переплава перед другими способами получения стали:

1. Хорошее качество слитка, отсутствие усадочной раковины и пористости.
2. Меньшее количество и меньший размер включений.
3. Однообразность структуры и химического состава.

4. Отсутствие слонистости и зональной ликвации.
5. Высокий выход годного из исходного жидкого металла до готовой продукции.
6. Возможность регулируемого снижения содержания таких нежелательных элементов, как сера, кислород, а в некоторых условиях и азот; возможность сохранения легирующих элементов, которые могут быть окислены, таких как кремний и титан.
7. Возможность корректирования состава металла путем применения соответствующего флюса.
8. Общее улучшение характеристик пластичности и ударной вязкости.
9. Значительное улучшение свойств в поперечном направлении.
10. Улучшение свойств при повышенных температурах.
11. Улучшение свариваемости.
12. Обеспечение такого качества поверхности, которое исключает необходимость в зачистке поверхности при горячей обработке.
13. Превосходные характеристики горячей обработки.
14. Уменьшение объема горячей обработки, требующейся для достижения заданной металлургической структуры в центральной части готового продукта.
15. Облегчение условий отливки электродов по сравнению с разливкой слитков для непосредственной прокатки.
16. Возможность управления направлением и скоростью затвердевания.
17. Возможность регулирования крупности зерен и величины карбидов, особенно в быстрорежущих инструментальных сталях.
18. Улучшение коррозионной стойкости.
19. Расплавленный металл защищен от атмосферного окисления.

Такое большое число преимуществ процесса ЭШП является следствием большого числа степеней свободы, свойственного этому процессу. Важность степеней свободы в технологии стала приобретать все большее значение по мере усложнения требований к современным продуктам.

Сравнение со степенями свободы, свойственными другому основному конкурирующему процессу вторич-

ного рафинирования — процессу ВДП, показывает, что ЭШП обладает большим числом степеней свободы, чем ВДП, и, следовательно, способен решать больше проблем и обеспечивать значительно больше преимуществ готовому продукту.

Наличие большего числа степеней свободы при ЭШП является результатом большого числа возможных комбинаций химического состава шлаков, более гибких условий питания электроэнергией и большей свободы выбора характеристик электродов. Эти параметры процесса будут кратко обсуждены ниже и более подробно — в последующих главах книги.

ХАРАКТЕРИСТИКА ШЛАКА

Основные требования к шлаку заключаются в том, что он должен плавиться при температуре, значительно ниже той, при которой рафинируется металл, и должен быть стабильным при рабочей температуре процесса. Шлак должен, конечно, обладать электропроводностью. Другими важными критериями являются теплопроводность, вязкость и поверхностное натяжение. Предпочтительно, чтобы летучесть шлака была низкой, так как в противном случае потребуются дорогостоящее экстракционное оборудование большого объема. Химическая активность шлака должна соответствовать степени очистки и требуемому химическому составу.

Обычно в качестве составляющих шлака используют фтористый кальций, известь, окись магния, глинозем и кремнезем, но возможно также добавление фтористого магния, фтористого бария, окиси титана и окиси циркония. Изменяя количество этих составляющих, можно изменить температуру плавления, стабильность, электропроводность и вязкость шлака, и это в свою очередь может изменить скорость расплавления, температуру шлака, размеры капель и другие факторы, влияющие на степень очистки.

ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЮ

Так как процесс основан на нагреве сопротивлением расплавленного шлака, число степеней свободы в отношении питания электроэнергией довольно высоко. Про-

цесс может осуществляться на переменном и постоянном токе; выбор тока зависит больше от электротехнических, чем от металлургических соображений, как это будет видно из дальнейшего изложения. При определенных обстоятельствах можно комбинировать питание переменным и постоянным током. Процесс может осуществляться на однофазном токе с одним электродом и од-

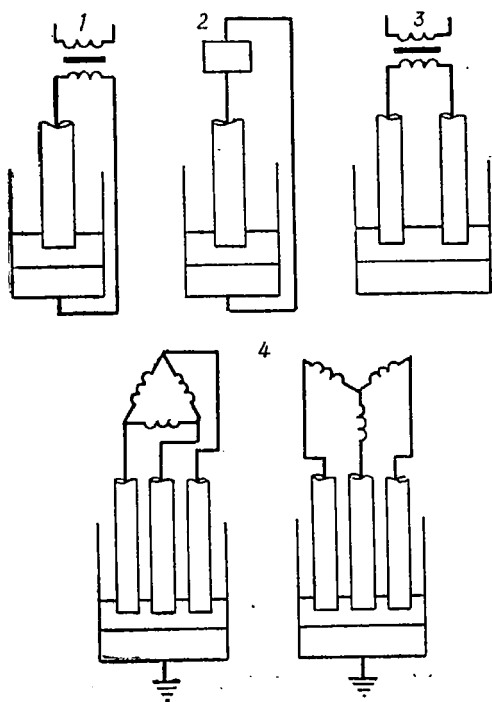


Рис. 2. Источники электропитания для ЭСП:

- 1 — однофазный переменный ток; 2 — постоянный ток;
3 — переменный ток (по Армстронгу); 4 — трехфазный переменный ток

ним кристаллизатором, на однофазном токе с двумя кристаллизаторами, на трехфазном токе с тремя электродами в одном кристаллизаторе и на трехфазном токе с тремя электродами в трех отдельных кристаллизаторах. Все эти варианты схематично показаны на рис. 2 [1].

Однофазная работа с одним электродом и одним кри-

сталлизатором является наиболее простой и рекоменду-
ется для переплава электродов диаметром до 280 мм.
Однако для повышения производительности без увели-
чения скорости наплавления желательнее применение од-
нофазного тока с двумя электродами и двумя кристал-
лизаторами или трехфазного тока с тремя электродами
и тремя кристаллизаторами. Последний способ наиболее

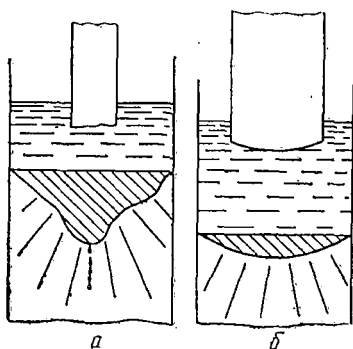


Рис. 3. Различные условия кристаллизации:

а — радиальная кристаллизация (низкое напряжение, большая сила тока); *б* — вертикальная кристаллизация (высокое напряжение, малая сила тока)

рационален, так как он обеспечивает сбалансированное получение энергии из магистральных электросетей, что заслуживает большого внимания при высоких токовых нагрузках. В свое время работа на трехфазном токе с тремя электродами в одном кристаллизаторе рассматривалась как желательная для производства крупных слитков, но затем по многим причинам, которые будут обсуждены в следующей главе, стали считать, что наиболее экономична выплавка слитка в отдельном кристаллизаторе и что потребность в электроэнергии для переплава крупных слитков такова, что следует предпочесть применение постоянного тока вместо переменного.

При рафинировании данного металла данным шлаком наиболее важными параметрами, которые определяют требования к питанию электроэнергией, являются форма и глубина ванны расплавленного металла. Как правило, предпочтительнее мелкая ванна с большим радиусом кривизны.

От электрического режима зависит также скорость переплава, и очень часто выбор параметров тока диктуется желанием найти компромисс между необходи-

мостью в высокой скорости переплава по экономическим соображениям (при этом образуется довольно глубокая металлическая ванна) и необходимостью иметь мелкую металлическую ванну с целью достижения оптимальных металлургических условий. Влияние напряжения, силы тока, глубины шлаковой ванны и диаметра электрода на глубину металлической ванны и структуру металла показано на рис. 3.

ЭЛЕКТРОДЫ

Диаметр электрода должен, как правило, быть меньше диаметра кристаллизатора, в который он переплавляется, но эта разница не должна быть слишком большой. Высокое отношение диаметра электрода к диаметру кристаллизатора помогает обеспечить желательную небольшую глубину металлической ванны. Подготовка поверхности электрода имеет значение лишь в том случае, если необходимо сохранить в электродном материале определенные элементы. Наличие на электроде окисленной корки может, например, затруднить сохранение таких легкоокисляемых элементов, как титан и алюминий. В том случае, когда эти требования не имеют значения, необходима лишь очень небольшая подготовка электрода, и во многих случаях можно использовать электроды, отлитые в графитовые или литые чугунные формы, с минимальной зачисткой перед употреблением. Идеальным электродом для электрошлакового переплава можно считать электрод, изготовленный непрерывной разливкой.

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

Качество слитка, отсутствие или наличие пористости и усадочной раковины, структура определяются скоростью затвердевания, которая в свою очередь зависит от скорости переплава, температуры шлака, скорости и направления отвода тепла из затвердевающего слитка. Затвердевание слитка обычно осуществляется таким образом, чтобы придать зернам угол приблизительно в 30° к вертикали. Медленно охлаждаемый расплав при наименьшем допустимом токе и наивысшем напряжении и глубокая шлаковая ванна способствуют образованию толстой корки и вертикальной кристаллизации. Если глубина металлической ванны небольшая, это позволяет

получать доброкачественный слиток без усадочной раковины и обеспечивать потенциально высокий выход годного.

Радиальная кристаллизация протекает, наоборот, при высокой силе тока и низком напряжении, высокой скорости переплава и мелкой шлаковой ванне (см. рис. 3).

Доброкачественный слиток получается при условиях, обеспечивающих осевую кристаллизацию и отсутствие осевой пористости. В конце переплава подпитка верхней части слитка осуществляется путем постепенного снижения мощности, предпочтительно с одновременным уменьшением силы тока и напряжения с тем, чтобы избежать быстрых изменений положения электрода, которые происходят в тех случаях, когда уменьшается только сила тока. Излишняя задержка на этой стадии может вызвать захват шлака.

Включения удаляются как растворением в шлаке, так и в результате химической реакции с ним. Неметаллическое вещество подвергается непосредственному воздействию шлака, как только тонкая пленка расплавленного металла образуется при переплаве на конце электрода, и раство-

ряется в шлаке. Остаются лишь самые мелкие включения, и чем тоньше пленка, т. е. чем холодней ванна и меньше скорость переплава, тем меньше будет содержание включений в готовом продукте (рис. 4).

Большое значение имеет, конечно, состав шлака, химически реагирующего с включениями. Очевидно, следует избегать применения глиноземистых шлаков, если в металле должно быть обеспечено отсутствие глинозема; нежелательно присутствие кремнезема в шлаке, если в металле нежелательны силикаты. В последнем случае необходимо принимать специальные меры для того, чтобы избежать излишнего окисления кремния из метал-

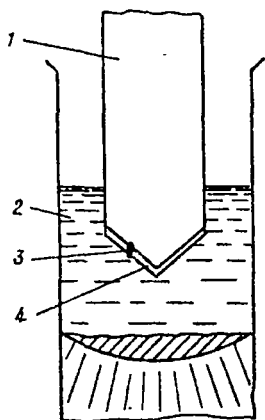


Рис. 4. Удаление включений при ЭСП:

1 — электрод; 2 — шлаковая ванна; 3 — включение; 4 — жидкий металл

ла, так как это, очевидно, вызовет накопление кремнезема в шлаке, особенно при изготовлении крупных слитков.

Гомогенность структуры и состава достигается путем соблюдения условий, обеспечивающих значительную вертикальную кристаллизацию, или перемешивания или применения поддона с возвратно-поступательным движением. Излишнее использование этих методов может быть в некоторых случаях вредным. Например, в сложных сплавах, подобных быстрорежущей стали, может создаться полосчатая структура, если слиток подвергается вибрации или охлаждается со скоростью ниже критической.

На выход годного влияют те же параметры и структура слитка; следует также тщательно следить за условиями образования донной и головной частей слитка. При хорошей подпитке верхней части слитка обрезки ее перед горячей обработкой не требуется и может быть достигнуто полное отсутствие пористости и усадочной раковины. Для получения хорошей формы донной части слитка должны быть обеспечены условия для затекания жидкого металла в углы кристаллизатора, где, очевидно, должно быть предотвращено улавливание жидкого шлака. При начале с твердым шлаком эти условия обеспечить сложнее, поэтому, очевидно, предпочтительнее вводить шлак в начале работы в жидком состоянии. Преимуществами сифонной заливки шлака являются быстрый старт и устранение возникновения дуги. Сила тока плавно увеличивается до рабочей за доли секунды и уменьшает до минимума потери тепла. Исключается разбрызгивание шлака на стенки кристаллизатора и на электрод и, следовательно, падение в ванну корочек шлака или зависание твердого шлака между электродом и кристаллизатором.

Регулирование химического состава осуществляется как подбором состава шлака и атмосферы, так и регулированием температуры. Имеется много степеней свободы в отношении состава шлака, обеспечивающих решение большинства химических проблем при электрошлаковом переплаве, например удаление серы и кислорода достигается применением шлаков, содержащих известь; снижение содержания кислорода без уменьшения содержания серы достигается при применении более инертных шлаков, содержащих окись магния.

С другой стороны, удержание серы в автоматных сортах стали требует применения безизвестковых шлаков, инертной атмосферы и добавок сульфидов к шлаку. Наиболее трудно контролировать содержание титана и алюминия; они легко переходят при окислении в большинство шлаков. Однако при ЭСП может быть обеспечено сохранение почти любого содержания титана или алюминия или, если желательно, может быть обеспечено восстановление до какой-то степени содержания любого элемента. Обычно при окислении удаляется некоторое количество кремния, но это, как правило, допустимо; при необходимости этот процесс можно отрегулировать.

Как правило, медленный переплав содействует изменению состава, а быстрый ему препятствует. Наивысшее качество поверхности слитка достигается при тонкой шлаковой корочке (менее 1,6 мм), которая обычно образуется при переплаве с высокой скоростью. Поэтому необходимо находить некоторое компромиссное решение.

Список литературы

1. Duckworth, Steel Times Annual Review, 1968, p. 183.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛАКА И ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ШЛАКА

ФУНКЦИЯ ШЛАКА

Двумя наиболее важными функциями шлакового слоя является то, что он служит главным источником тепла и основным средством регулирования химического состава.

Шлаковый слой является элементом электрической цепи между трансформатором и печью, обладающим наибольшим сопротивлением, и, следовательно, служит такой частью этой цепи, которая наиболее важна для превращения электрической энергии в тепло. Если шлак имеет недостаточное сопротивление при требуемой рабочей температуре, то очень трудно обеспечить удовлетворительные условия переплава.

Шлак служит средой, в которую содержащиеся в металле включения удаляются в результате химической реакции или растворения и в которой осуществляется необходимое регулирование содержания кислорода, серы и других элементов. Если шлак не обладает достаточной химической активностью, то требуемой чистоты достичь не удастся; если эта активность будет слишком высокой, то будут удалены те элементы, которые должны быть сохранены.

Шлак выполняет также ряд вспомогательных функций. Затвердевая на стенках кристаллизатора, он препятствует непосредственному контакту между расплавленным металлом и материалом кристаллизатора, изолируя таким образом металл электрически и термически от кристаллизатора и помогая также обеспечить гладкую поверхность слитка; шлак защищает расплавленный металл от непосредственного атмосферного окисления, создает резервуар тепла выше расплавленного металла, который предотвращает образование усадочной раковины и внутренней усадки; воздействуя на шлак, можно влиять не только на химический состав, но также и на структуру слитка.

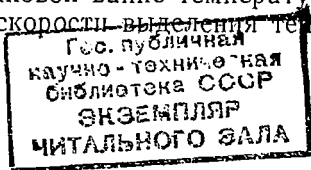
Имеется также возможность корректирования химического состава некондиционного металла путем ввода добавок в процессе переплава. Кроме того, размеры и форму зерен можно регулировать как физическими, так и химическими средствами.

ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ШЛАКА

Для расплавления при процессе ЭШП необходимо, чтобы шлак был полностью жидким и его температура превышала температуру плавления (температуру ликвидуса) переплавляемого металла.

Температура, достигнутая в шлаковой ванне, является по существу функцией сопротивления этой ванны и тока, проходящего через нее. Напряжение (20—50 в) должно быть не более чем достаточным для прохождения тока. Слишком высокое напряжение, вызывающее искрение на поверхности шлаковой ванны, может быть вредным для рафинирования в результате высоких потерь на окисление металла.

Достигнутая в шлаковой ванне температура зависит, однако, не только от скорости выделения тепла, но так-



же от скорости его отвода. Тепло отводится теплопроводностью, конвекцией, излучением и скрытой теплотой плавления металла. Наиболее важными являются тепловые потери с охлаждающей водой через стенки кристаллизатора и поддон.

Компоненты шлака должны быть стабильными при рабочей температуре процесса, и поэтому они выбираются главным образом с точки зрения низкого давления их паров. Кроме того, они должны быть пригодными для рафинирования металла при температурах процесса без загрязнения его вредными примесями.

Могут применяться шлаки, температура ликвидуса которых равна, ниже или выше температуры ликвидуса металла.

Если температура ликвидуса шлака равна или ниже температуры ликвидуса металла, то необходимо подвести энергию (электрическую или тепловую) в количестве, достаточном лишь для того, чтобы повысить температуру шлака выше температуры ликвидуса металла. Если же температура ликвидуса шлака выше температуры ликвидуса металла, количество энергии, которую необходимо подвести, должно быть достаточным, чтобы повысить температуру шлака выше температуры его ликвидуса.

Выбор шлака такого состава, температура ликвидуса которого равна или ниже температуры ликвидуса металла, обеспечивает наиболее экономичное расходование энергии.

Однако если более важными, чем экономичное расходование энергии, считаются другие факторы, например химические, то может применяться шлак, имеющий температуру ликвидуса более высокую, чем температура ликвидуса металла. Для выбора соответствующих шлаков необходимо, следовательно, знать фазовое равновесие систем, представляющих интерес для ЭСП. Кроме того, при окончательном выборе шлака учитывают давление паров, электропроводность, удельную теплоемкость, скрытую теплоту плавления и растворения, вязкость, поверхностное натяжение и плотность.

В подавляющем большинстве случаев шлаки, выбранные с учетом описанных выше факторов, будут удовлетворительными. Однако в некоторых случаях может оказаться необходимым очень тщательный контроль со-

держания отдельных элементов, и для достижения такой степени контроля необходимо понимание важнейших реакций, происходящих в шлаке, которые управляют свойствами этих элементов в шлаке и в металле.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Фазовое равновесие

Наиболее важными компонентами шлаков служат фтористый кальций, известь, окись магния и глинозем; в состав шлаков могут входить также фтористые соединения магния и бария и окислы бария, циркония и титана. При переплаве металлов и сплавов с невысокими температурами плавления применяются также хлористые соединения.

Шлаки можно классифицировать по составу на следующие:

- а) только из фтористых соединений;
- б) из фтористых соединений и окислов;
- в) только из окислов.

Наиболее важные шлаковые системы включают смеси фтористых соединений с окислами.

Применение шлаковых систем, включающих фтористые соединения и хлориды, обычно ограничивается ЭШП металлов с невысокой температурой плавления, таких, например, как медь и ее сплавы. Обычно применяются системы, содержащие фтористые соединения кальция, магния и бария.

Фтористо-окисные системы, обладающие наибольшей универсальностью применения при ЭШП, содержат фторид кальция и известь, фторид кальция и глинозем, фторид кальция, известь и глинозем, фторид кальция, окись магния и глинозем.

Системы с фтористыми соединениями

При электрошлаковом переплаве могут применяться фтористые соединения как отдельно, так и в различных комбинациях. Фтористые шлаки свободны от кислорода, имеют низкую температуру плавления или температуру ликвидуса, и вследствие их низкого электрического сопротивления процесс протекает при сравнительно низких температурах при обычно расходуемых мощностях. Эти свойства делают фтористые шлаки оптимальными для переплава металлов и сплавов с низкой температу-

рой плавления или таких металлов и сплавов, окисление которых должно быть минимальным.

Главными компонентами фтористых шлаков вследствие низкого давления их паров и, следовательно, высокотемпературной стабильности являются фтористый кальций (CaF_2), фтористый магний (MgF_2) и фтористый барий (BaF_2).

Наиболее часто применяется фтористый кальций вследствие того, что он имеется в виде материала высокой чистоты в значительном количестве, что определяет его сравнительно невысокую стоимость; фтористые соединения бария и магния получить трудней и стоят они значительно дороже.

Растворимость в воде возрастает в следующем порядке: CaF_2 , MgF_2 и BaF_2 . Поскольку токсичность фтористых соединений связана с их растворимостью, то и токсичность их возрастает также в указанном порядке. Фтористый барий является, кроме того, гигроскопичным и выделяет некоторое количество окиси бария (BaO) в результате пирогидролиза при расплавлении.

Фтористый натрий (NaF), фтористый алюминий (AlF_3) и криолит (Na_3AlF_6), как правило, мало пригодны для шлаков, так как они кипят и выделяют обильный дым при обычных для процесса температурах. Однако в СССР успешно переплавляют медь с применением шлака, состоящего из 80% фтористого кальция и 20% фтористого натрия, а также из фтористого кальция и хлористого бария [1].

*Однокомпонентные системы с фтористыми * соединениями*

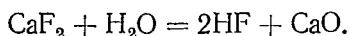
а. CaF_2 . Как указывалось выше, фтористый кальций или плавленый шпат являются наиболее важными компонентами фтористых шлаков.

Применяемый в промышленных целях фтористый кальций является обычно низкосернистым концентратом плавленого шпата кислотного сорта. Типичный химический состав материала, имеющегося в Англии*, следующий: 98% CaF_2 ; 1% SiO_2 ; 0,3% CaO ; 0,2% Al_2O_3 ; 0,1% S; 0,1% Pb.

Этот материал может быть очищен путем предвари-

* Фирма Глиб майнз, Айем, Дербишир, Англия.

тельной плавки в футерованной графитом индукционной или дуговой печи. При предварительной плавке удаляются водород, сера, свинец и частично кремний. Удаление водорода связано с увеличением содержания СаО приблизительно до 2%, которое в отдельных случаях может достигать 5%. Выделение водорода происходит по реакции



Извести, образовавшейся при пиролизе, достаточно для десульфурации в тех случаях, когда металл или сплав подвергаются электрошлаковому переплаву с применением предварительно расплавленного плавикового шпата.

Чистый фтористый кальций плавится при 1418° С, но шпат промышленной чистоты имеет температуру ликвидуса приблизительно 1380° С, менее 0,5% (по массе) СаО достаточно для снижения температуры ликвидуса до 1380° С.

Применение плавикового шпата в электрошлаковом процессе ограничивается трудностью нагрева шлаковой ванны до достаточно высокой температуры, что связано с его низким электрическим сопротивлением (около 0,23 *ом·см* при температуре электрошлакового переплава, т. е. при 1650° С). Однако если речь идет о шлаках, состоящих только из фтористых соединений, то оптимальными с этой точки зрения являются шлаки из фтористого кальция; объясняется это тем, что из всех фтористых шлаков шлаки с фтористым кальцием обладают наибольшим электрическим сопротивлением.

С применением шлаков, состоящих только из плавикового шпата, переплавляют чистое железо, мягкую сталь (Еп32В и Еп42), подшипниковую сталь (Еп31), стабилизированную титаном коррозионностойкую сталь 18/8 и титан. Переплав титана осуществляли с применением защитной газовой атмосферы [2—4] и предпочтительно при давлении 0,5 *мм рт. ст.* [3].

б. ВаF₂. Фтористый барий имеет высокое давление паров и, следовательно, меньшую температуру плавления (1290° С), чем фтористый кальций. Фтористый барий без примесей или в смеси с фтористым кальцием не проверяли. Окись бария применяют в качестве стабилизатора дуги в дуговых печах, и по аналогии следует ожи-

дать, что фтористый барий будет электрически стабилен при электрошлаковом переплаве. К недостаткам фтористого бария следует отнести его высокую стоимость, растворимость и, следовательно, токсичность, а также гигроскопичность.

в. MgF_2 . Фтористый магний обладает более высоким давлением паров и меньшей температурой плавления, чем фтористый кальций, следовательно, его термическая стабильность ниже. Фтористый магний вследствие его неподходящих электрических свойств обычно не применяют при электрошлаковом переплаве. Шлаки, содержащие 100% фтористого магния, изготовляют с большим трудом, обычно содержание фтористого магния

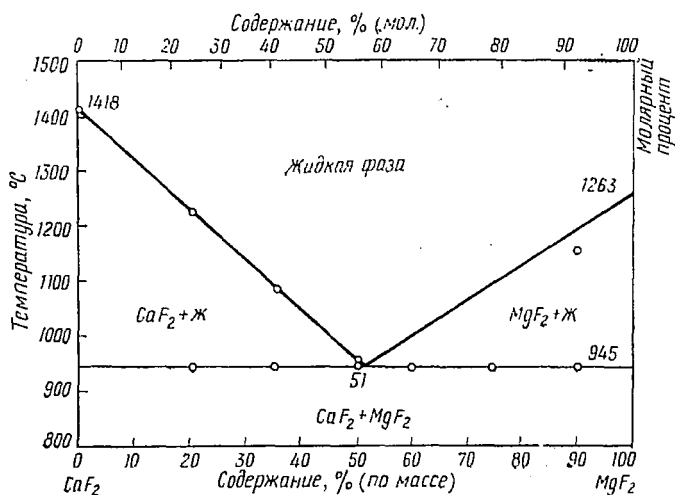


Рис. 5. Система CaF_2 - MgF_2

в фтористых шлаках не превышает 20—30%. Материал промышленной чистоты часто содержит кристаллизационную воду (до 10%), и эту воду необходимо удалить до применения шлака в ЭШП. При пиролизе фтористый магний разлагается, образуя окись магния. Окись магния значительно менее активна при десульфурации, чем известь (продукт пиролизирования плавленого шпата), поэтому в тех случаях, когда важно сохранить серу, лучше, если фтористую основу шлака состав-

ляет фтористый магний или фтористый магний и фтористый кальций, чем один фтористый кальций.

Двухкомпонентные системы с фтористыми соединениями

CaF_2 — MgF_2 (рис. 5). Эта система [5] является простой двухкомпонентной системой, в эвтектике которой содержится 51% MgF_2 , а эвтектическая температура со-

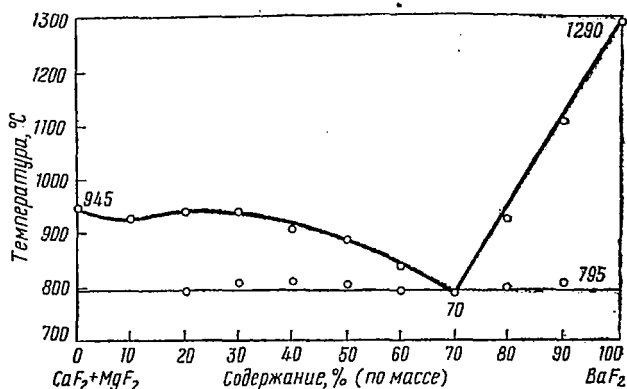


Рис. 5а. Система (50% CaF_2 +50% MgF_2)— BaF_2

ставляет 945° С. Шлаки с таким эвтектическим составом проверяли при переплаве меди и ее сплавов; результат был удовлетворительным только отчасти, что связывают с высоким содержанием фтористого магния. Исходя из этого рекомендуют, чтобы шлаки содержали не более 20—30% MgF_2 . Шлак, содержащий 80% CaF_2 и 20% MgF_2 , успешно применяли для переплава медноникелевого сплава.

Трехкомпонентные системы с фтористыми соединениями

CaF_2 — BaF_2 — MgF_2 . На рис. 5а показана система (50% CaF_2 +50% MgF_2)— BaF_2 . Шлаки, состоящие из 70% BaF_2 , 15% MgF_2 и 15% CaF_2 , с температурой ликвидуса около 800° С успешно применяли для переплава меди и ее сплавов, например марганцовистой бронзы.

Фторидно-окисные системы

Двухкомпонентные фторидно-окисные системы

а. CaF_2 — CaO (рис. 6). Шлаки, относящиеся к этой системе, являются одними из наиболее важных при ЭШП. Основными компонентами этих шлаков считают

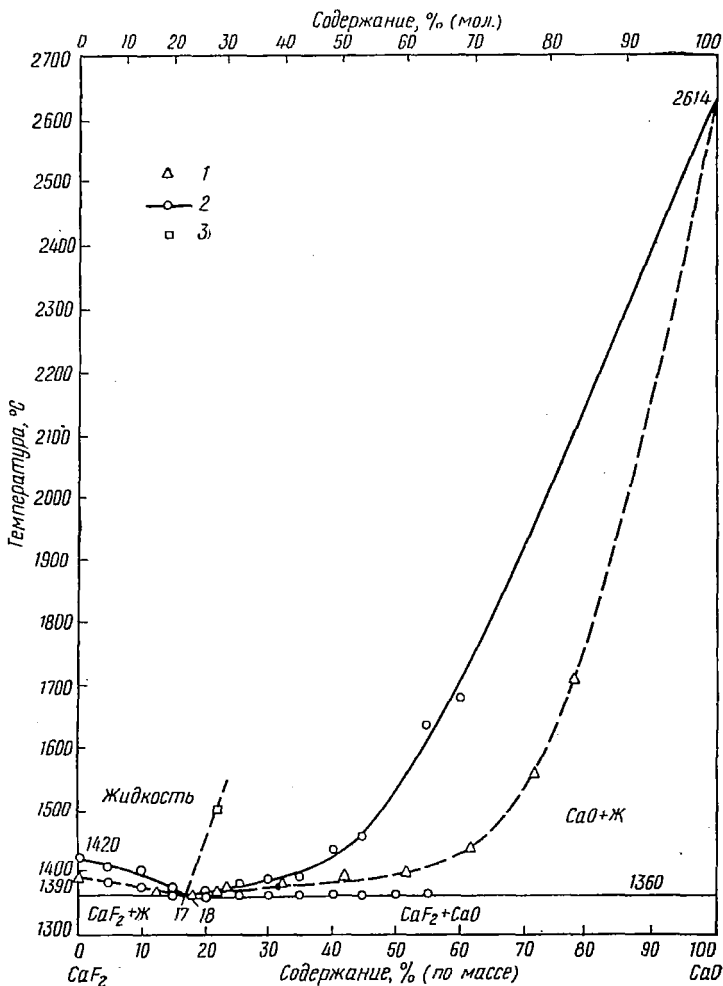


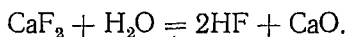
Рис. 6. Система CaF_2 — CaO :

1 — по данным Будникова и Тресвятского; 2 — Мукерджи; 3 — Ричардсона и Кора

те, содержание которых в шлаке превышает 10% (по массе). Наиболее значительным преимуществом шлаков этой системы является их невысокая цена; главным недостатком шлаков, содержащих свободную известь, является их склонность к гидратации.

Выдержка шлаков в расплавленном состоянии при 1650—1750°С в течение по меньшей мере 10 мин является поэтому абсолютно необходимым условием получения слитков без пористости и водородной хрупкости.

При предварительном расплавлении происходит пиролиз некоторой части фтористого кальция или плавикового шпата, если в шпате или чаще в извести имеется какое-то количество воды. Пиролиз происходит в соответствии с реакцией



Следовательно, если даже не добавляется дополнительно известь, то, поскольку присутствует плавиковый шпат, расплавленный шлак обычно содержит по меньшей мере 2%, а возможно и до 5% CaO.

Шлаки фтористый кальций — известь обладают почти таким же электрическим сопротивлением, как шлаки из фтористого кальция, и, таким образом, следует ожидать, что их действие при ЭШП будет очень близким. В связи с их сравнительно низким электрическим сопротивлением они жидкотекучи (т. е. их рабочая температура невысока), обеспечивают малую скорость переплава и высокое потребление энергии на единицу массы добавляемого материала. Как это наблюдалось при применении фтористого кальция, низкое электрическое сопротивление может привести к нестабильным условиям переплава.

Система $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$ является простой двухкомпонентной системой [6—9] с эвтектическим составом, содержащим приблизительно 17% (по массе) CaO, и эвтектической температурой 1360°С. Если данные Будникова и Тресвятского [7], а также Мукерджи [8] считать обоснованными, то все шлаки системы $\text{CaF}_2 - \text{CaO}$, содержащие до 40% CaO, должны иметь температуру ликвидуса менее чем 1450°С. Шлаки, содержащие более 40% CaO, редко используются при ЭШП. Положение точки ликвидуса на богатой известью стороне эвтектики обсуждалось Ричардсоном и Кором, которые в дискус-

сни с Девисом¹ утверждали, что при 22% (по массе) СаО она находится у отметки 1500° С.

Шлаки, содержащие 15—20% (по массе) СаО, обладают наименьшими температурами ликвидуса. Добавка только 0,5% (по массе) СаО снижает температуру ликвидуса СаF₂ с 1418 до 1380° С.

Известь применяют крупностью минус 12,7 — плюс 4,75 мм, обожженную во вращающейся печи². Типичный химический состав прокаленного образца этого материала следующий: 98% СаО; 1,2% SiO₂; 0,4 Al₂O₃; 0,3 Fe₂O₃; 0,2% MgO.

Шлаки, содержащие известь, являются прекрасными десульфураторами и могут применяться во всех тех случаях, когда требуется хорошая очистка от серы. К сожалению, такие легкоокисляемые элементы, как алюминий и титан, также могут уделаться в какой-то степени под воздействием этих шлаков.

Шлаки СаF₂—СаО применяют, в частности, при ЭШП шарикоподшипниковой стали, содержащей 1% С и 1,5% Сг, такого типа, как En31, AISI 52100 или ШХ15. При переплаве этих сталей с применением шлака (70F/30)³ может быть получено содержание кислорода менее 0,0012% (табл. 1) и нулевое содержание включений (при подсчете по методу Ернконтуретс). Раскисляющие свойства этого шлака могут быть дополнительно улучшены путем непрерывного раскисления шлака во время переплава (табл. 2).

После ЭШП со шлаком (70F/30) содержание кислорода в вакуумированной стали En31 снижается с 0,0040 до 0,0015% (табл. 2).

С применением шлаков СаF₂—СаО переплавляют также чистое железо, мягкие стали (En32В и En42) и коррозионностойкую сталь 18/8.

б. СаF₂—Al₂O₃ (рис. 7). Это простая двухкомпонентная система [10—14]; по разным источникам, эвтектический состав содержит от 9 до 27% (по массе) Al₂O₃,

¹ M. W. Davies. «The chemical and physical properties of fluoride based slags—progress report to March 1967». BISRA Report MG/A/35/67/, 1967.

² Известь поставляет отделение фирмы Импириэл кемкд индастриз в Бакстоне, Англия.

³ См. прил. 2 к гл. 3.

Таблица 1

Химический состав, % (по массе), шарикоподшипниковых сталей (Еп31, AISL 52100) до и после ЭШП со шлаком (70 F/30)

Элемент	Электрод	Слиток ЭШП
C	1,20	1,18
Si	0,35	0,19
Mn	0,54	0,52
S	0,012	0,007
P	0,008	0,008
Cr	1,55	1,49
Ni	0,14	0,14
Al	0,006	0,005
O ₂	0,0020	0,0006

Таблица 2

Химический состав, % (по массе), шарикоподшипниковых сталей (Еп31, AISI 52100) до и после ЭШП с непрерывным раскислением шлака во время переплава

Элемент	Электрод	Слиток ЭШП
C	0,93	1,01
Si	0,29	0,13
Mn	0,30	0,30
S	0,009	0,003
Al	0,010	0,005
O ₂	0,0040	0,0015

а эвтектическая температура составляет соответственно 1290 или 1270° С.

Считают, что диаграммы по Латашу [13] и Паскалю [10] применимы к материалам, содержащим примеси, т. е. к концентратам плавикового шпата и к обожженному глинозему промышленного сорта.

Наибольшим недостатком глинозема является его высокая стоимость. Типичный обожженный глинозем содержит 98,6% Al₂O₃; 0,7% K₂O; 0,3% Fe₂O₃; 0,2% SiO₂.

Шлаки этой системы являются, по-видимому, наиболее важными с точки зрения их общей применимости в электрошлаковом переплаве.

Замена фтористого кальция Al₂O₃ значительно повышает электрическое сопротивление шлака; замена 10% плавикового шпата глиноземом повышает электрическое сопротивление в большей степени, чем замена 40% плавикового шпата известью. Глиноземистые шлаки благодаря их высокому электрическому сопротивлению — электрическое сопротивление при 1650° С для шлака (90F/0/0/10) = 0,26 ом·см, а для шлака (65F/5/0/30) = 0,57 ом·см — хорошо сохраняют тепло, обеспечивают высокие скорости переплава и низкий удельный расход энергии на единицу массы переплавленного металла. Однако, если температура шлака, т. е. температура

процесса, слишком высока, металлическая ванна будет углубляться, что поведет к радиальной, а не к продольной кристаллизации слитка. Преимущество шлаков фтористый кальций — глинозем заключается в том, что они не чувствительны к гидратации. Степень очистки от окисных и шаровидных силикатных включений меньше,

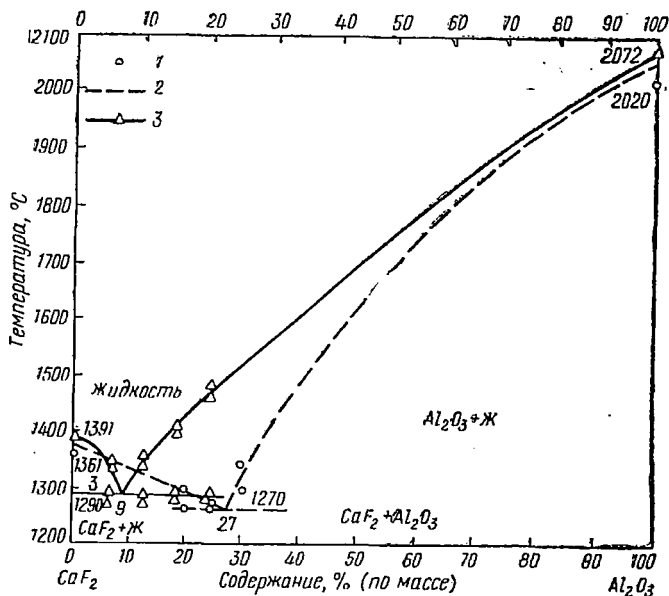


Рис. 7. Система CaF₂-Al₂O₃:

1 — по данным Паскаля; 2 — Латаша и др.; 3 — Кюо и Йен

чем при применении шлаков фтористый кальций — известь — глинозем или фтористый кальций — окись кальция. Большая степень очистки, обеспечиваемая шлаками, содержащими известь, возможно, обусловлена тем, что скорости переплава при применении этих шлаков меньше.

Наиболее часто применяемым шлаком этой системы является шлак (70F/0/0/30), имеющий наименьшую температуру ликвидуса (1250°C) в системе CaF₂-Al₂O₃. Содержание глинозема в шлаках, состоящих из плавни-

¹ Обожженный глинозем производства фирмы Бритиш алюмин.

кового шпата и глинозема, редко превышает 40% (по массе), так как при более высоком содержании температура ликвидуса шлака становится слишком высокой.

Трехкомпонентные фторидно-окисные системы

а. CaF_2 — CaO — Al_2O_3 (рис. 8 и 9). Шлаки системы фтористый кальций — известь — глинозем наиболее широко применяются при электрошлаковом переплаве.

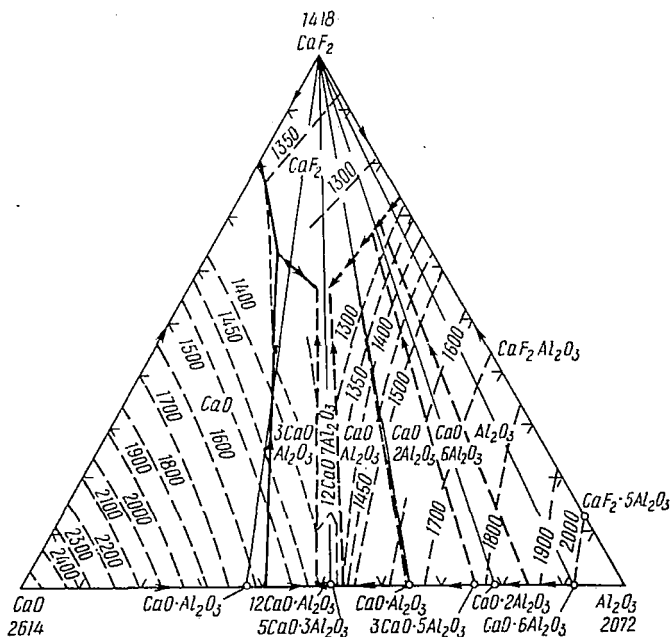


Рис. 8. Система CaF_2 — CaO — Al_2O_3 (предположительно)

На рис. 8 показана экспериментальная диаграмма фазового состояния для системы CaF_2 — CaO — Al_2O_3 [6—16]; на рис. 9 показана диаграмма шлака соответствующего состава [13, 17—29].

При сравнении рис. 8 и 9 можно видеть, что все системы (за исключением четырех), которые были зарегистрированы в качестве применяемых при ЭШП, обладают температурой ликвидуса ниже 1500°C . Эта область низких температур ликвидуса очерчена линиями, прохо-

дьящими через системы, содержащие 100% CaF_2 ; 55% $\text{CaF}_2 + 45\%$ CaO ; 50% $\text{CaO} + 50\%$ Al_2O_3 и 60% $\text{CaF}_2 + 40\%$ Al_2O_3 .

В пределах зоны низких температур ликвидуса наименьше температуры ликвидуса (приблизительно

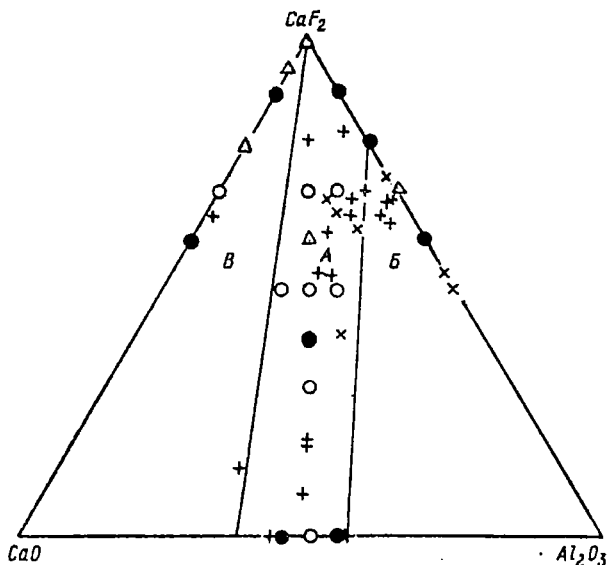


Рис. 9. Состав шлака в системе $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$

1250° С) соответствуют системам трехкомпонентных эвтектик (по всей вероятности двум), которые, как ожидается, имеют следующий приблизительный состав: 60% $\text{CaF}_2 + 20\%$ $\text{CaO} + 20\%$ Al_2O_3 (60F/20/0/20).

Шлаки могут быть распределены по трем группам (см. рис. 9):

А — кислые без свободной извести, $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$;

Б — кислые без свободной извести, $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$;

В — основные, содержащие свободную известь и мало глинозема (или без глинозема).

Шлаки группы В были рассмотрены выше (система $\text{CaF}_2\text{—CaO}$, рис. 6).

Шлаки группы А располагаются вдоль полосы низких температур, охватывающей шлаки с содержанием от

100% CaF_2 до 50% $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$. Наиболее заметным изменением в физических свойствах при перемещении вдоль этой полосы низких температур от шлака со 100% CaF_2 до 50% $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ является увеличение электрического сопротивления, которое может быть объяснено главным образом увеличением содержания Al_2O_3 . Электрическое сопротивление шлака (60F/20/0/20) при 1650°С составляет приблизительно 0,50 *ом·см* по сравнению с электрическим сопротивлением плавикового шпата промышленного сорта (98% CaF_2), равного при той же температуре приблизительно 0,21 *ом·см*.

Температура ликвидуса шлаков, находящихся в полосе низких температур, изменяется незначительно. Температура ликвидуса фтористого кальция составляет 1400°С, шлака (60F/20/0/20) приблизительно 1250°С и шлака (0F/50/0/50) 1400°С соответственно.

Наиболее часто в группе шлаков А применяются шлаки состава трехкомпонентных эвтектик или близкие к ним, например (70F/15/0/15) и (60F/20/0/20) с температурами ликвидуса приблизительно 1250°С.

Эти шлаки имеют промежуточную величину электрического сопротивления (0,50 *ом·см*) и обладают высокой степенью жидкотекучести, т. е. низкой вязкостью в процессе работы. Вязкость является функцией как химического состава, так и температуры выше температуры ликвидуса. Чем выше рабочая температура (приблизительно 1650°С) по сравнению с температурой ликвидуса (здесь приблизительно на 400°С), тем меньше вязкость. Скорости переплава ниже средних, но степень направленного затвердевания и чистота высокие, отсутствуют признаки усадочной раковины.

Если требуется увеличить скорость переплава при данной величине подводимой энергии, повысить температуру работы или экономично использовать подводимую энергию, то сопротивление шлака можно повысить путем увеличения содержания глинозема в нем. Чтобы избежать излишнего увеличения температуры ликвидуса шлака, составы шлаков следует выбирать из числа находящихся в полосе низких температур. В качестве примеров шлака с повышенным сопротивлением могут быть названы шлаки (50F/25/0/25) или (40F/30/0/30). Содержание глинозема может быть увеличено за счет извести,

при этом шлак такого состава все еще будет находиться в пределах низкотемпературной полосы, например шлак (50F/20/0/30). Однако, если сопротивление увеличится слишком сильно, например шлаки (20F/40/0/40) или (0F/50/0/50), то, хотя скорость переплава будет высокой и энергия будет расходоваться экономично (низкий показатель $квт \cdot ч \cdot кг^{-1}$), глубина металлической ванны увеличится, кристаллизация станет более радиальной, может возникнуть осевая пористость или усадочная раковина и чистота слитка ухудшится.

Шлаки группы Б не содержат свободной извести и имеют более высокое содержание глинозема и более низкое содержание извести. Эта группа представлена шлаками (70F/0/0/30) и (65F/5/0/30), причем наличие 5% CaO в последнем шлаке является прежде всего результатом пирогидролиза части плавикового шпата CaF_2 . Шлаки этой группы нашли широкое применение как в Англии, так и в СССР вследствие того, что их использование обеспечивает высокие скорости переплава и хорошее потребление энергии, хотя не всегда гарантирует оптимальный химический состав и структуру слитка.

Высокие скорости переплава и хороший расход энергии могут быть объяснены высоким электрическим сопротивлением этих шлаков, которое составляет для шлака (65F/5/0/30) при $1650^\circ C$ $0,57 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Шлаки, содержащие более 40% Al_2O_3 , обычно не применяют, так как, хотя их сопротивление велико, увеличивается также температура ликвидуса, и, как это было показано выше, рабочая температура процесса должна быть выше температур ликвидуса и шлака и металла. Как правило, никакого преимущества от повышения температуры ликвидуса шлака выше температуры ликвидуса металла не достигается.

Основным недостатком шлаков этой группы является то, что при ЭШП может возрасти содержание алюминия и (или) кислорода в металле. Однако в случае переплава подшипниковой стали En31 или AISI 52100 или ШХ15СГ увеличение их содержания, особенно кислорода, не является, как правило, недопустимым. Можно ожидать увеличения содержания алюминия и кислорода при применении шлаков, содержащих более чем 5% Al_2O_3 . Другим недостатком шлаков с богатым содержанием глинозема является высокая стоимость обожженного

глинозема, значительно превышающая стоимость плавикового шпата и известни.

б. $\text{CaF}_2\text{—MgO—Al}_2\text{O}_3$. На рис. 10 и 11 показаны соответственно экспериментальная диаграмма фазового со-

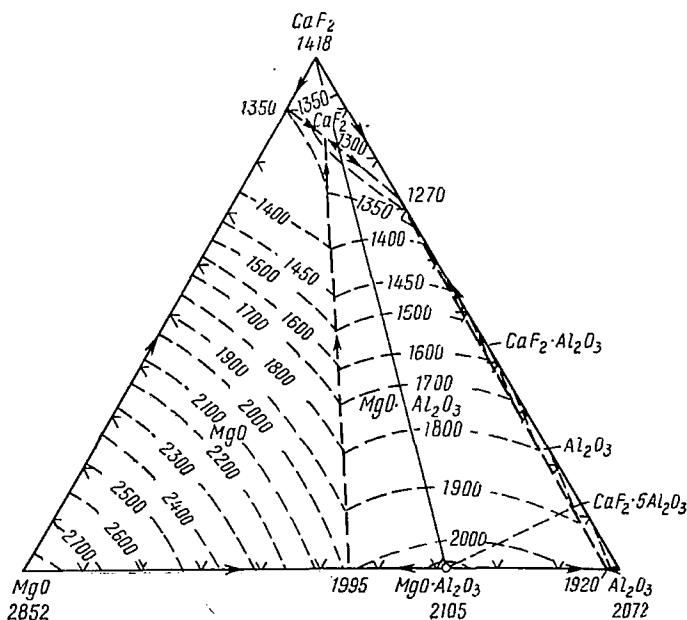


Рис. 10. Система $\text{CaF}_2\text{—MgO—Al}_2\text{O}_3$ (предположительно)

стояния [10—14, 30—32] и диаграмма состава шлаков¹ для системы $\text{CaF}_2\text{—MgO—Al}_2\text{O}_3$. Эта система состоит из двух подсистем: фтористый кальций—периклаз (окись магния) — шпинель и фтористый кальций — шпинель — корунд (глинозем). Каждая подсистема является простой трехкомпонентной с трехкомпонентной эвтектикой. Химические составы и температуры этих трехкомпонентных эвтектик следующие: 84% CaF_2 ; 7% MgO ; 9% Al_2O_3 и 1280°С и 73% CaF_2 ; 1% MgO и 26% Al_2O_3 и 1250°С соответственно.

Очерченная зона на рис. 11 включает шлаки в этой системе, предложенные Холмсом¹. Типичным для этой группы является шлак, содержащий 40% CaF_2 , 10%

¹ Патент США, № 2671040, 1954.

MgO, 50% Al₂O₃ (40/0/10/50), а интервал содержания компонентов для этих шлаков следующий: 25—55% CaF₂, 10—20% MgO, 35—65% Al₂O₃. Серьезным недо-

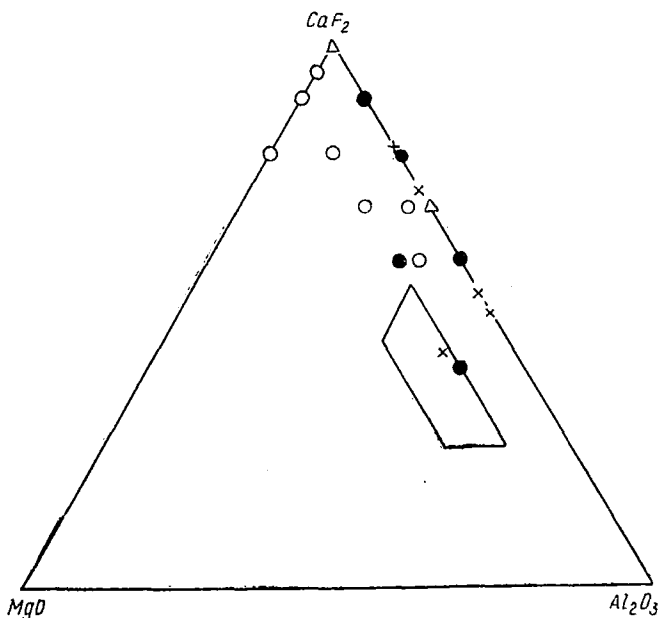


Рис. 11. Состав шлака в системе CaF₂—MgO—Al₂O₃

статком шлаков, предложенных Холмсом, является высокая температура их ликвидуса — 1450—1800° С и приблизительно 1600° С для шлака (40F/0/10/50).

Опыт фирмы ЭСРТ говорит о том, что применение шлаков этой системы, содержащих более 50% Al₂O₃ и 20% MgO, связано с большими трудностями. Предпочтительней обычно применять шлаки, содержащие 50—100% CaF₂, 0—15% MgO, 0—50% Al₂O₃. Ниже приведены типичные шлаки этой системы:

Шлаки ЭСРТ

(85F/0/5/10)

(80F/0/5/15)

(80F/0/10/10)

(70F/0/10/20)

(60F/0/10/30)

Шлак Гопкинса

(40F/0/50/)

} температура ликвидуса
} менее 1300° С

Шлаки этой системы применяют, в частности, при переплаве сплавов, содержащих алюминий и титан.

Давление паров [33—37]

Рабочие температуры процесса, измеренные в шлаковой ванне между концом электрода и ванной расплавленного металла, находятся обычно в интервале 1000—2500°С; такие температуры наблюдаются, как правило, при переплаве сплавов железа. Величина температуры зависит от потребления энергии, электрического сопротивления шлака и степени охлаждения. Компоненты шлака должны поэтому иметь низкое давление паров.

На рис. 12 показана логарифмическая зависимость давления паров фторидов алюминия, бария, магния, стронция и кальция от обратной величины абсолютной температуры [33]. Из графика можно видеть, что фторид кальция имеет наименьшее давление паров и, следова-

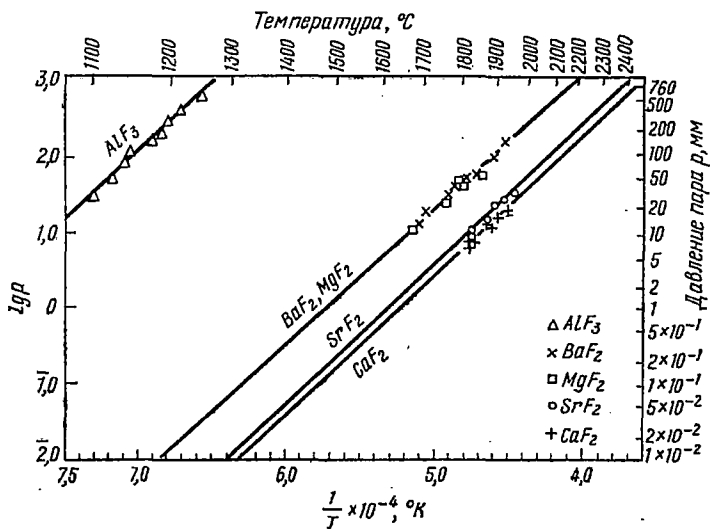


Рис. 12. Зависимость давления паров фторидов AlF₃, BaF₂, MgF₂, SrF₂, CaF₂ от температуры [38]

тельно, обладает наименьшей летучестью из всех перечисленных выше фторидов.

На рис. 13 показана логарифмическая зависимость давления паров фтористого кальция, различных окислов

и элементов от температуры [34]. Кривые показывают, что давление паров большинства окислов, за исключением окислов щелочных металлов, меньше, чем у фтористого кальция, поэтому испарение из шлака окислов менее существенно, чем испарение фторидов.

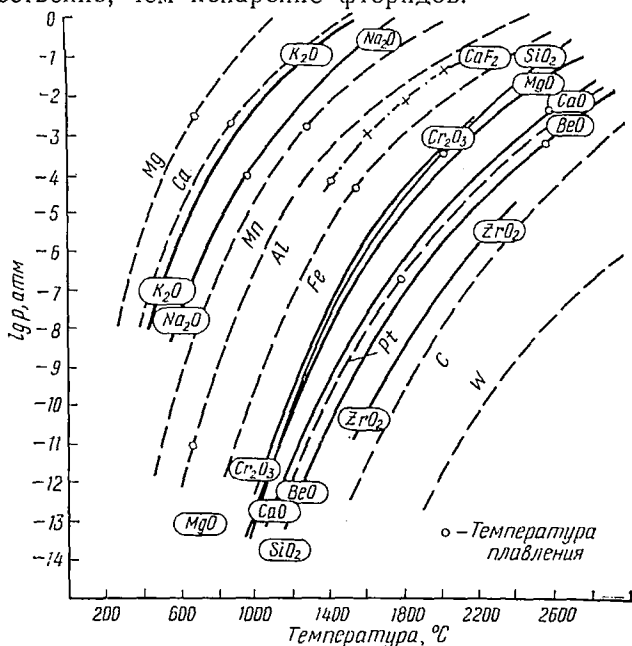


Рис. 13. Зависимость давления паров фтористого кальция, различных окислов и элементов от температуры [34]

Однако применять можно только окислы с очень низким давлением паров, например известь, глинозем, окись магния и окись циркония. Это связано с тем, что давление паров окисла пропорционально парциальному давлению кислорода в растворе и шлаке. Таким образом, чем выше парциальное давление кислорода в шлаке, тем выше содержание кислорода в металле, поэтому для снижения до минимума содержания кислорода в металле парциальное давление кислорода в шлаке должно быть также минимальным и в нем должны содержаться только окислы с низким давлением паров, перечисленные выше.

Окислы элементов, которые могут иметь различную

валентность, такие, например, как окислы титана, ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта, никеля и меди, непригодны, так как они могут служить средством передачи кислорода между атмосферой и металлом.

Кроме того, окислы щелочных металлов непригодны в связи с их летучестью.

Электропроводность [9, 26, 29]

Процесс электрошлакового переплава заключается в расплавлении металла и его очистке при прохождении через ванну с расплавленным шлаком на фторидной основе. Шлаковая ванна действует в качестве сопротивления в цепи и является источником тепла для переплава; при обычном электрошлаковом переплаве источником тепла служит исключительно нагрев сопротивлением.

К процессу может быть применен закон Ома

$$I = \frac{vA_{\text{эф}}x}{l},$$

где I — сила тока;

v — разность потенциалов в шлаке;

$A_{\text{эф}}$ — эффективная площадь поперечного сечения сопротивления (шлаковой ванны);

x — удельная электропроводность;

l — длина сопротивления (равная минимальной глубине шлаковой ванны).

Напряжение U в шлаке обычно выбирается в интервале 30—50 в.

Важную роль при определении глубины шлаковой ванны и величины тока играет электропроводность шлака.

Удельная электропроводность шлака x является функцией как его состава, так и температуры. Электрические сопротивления ($\rho = \frac{1}{x}$) некоторых шлаков при 1650° С приведены ниже, *ом·см*:

Чистый CaF_2	0,22 [9]
Концентраты плавикового шпата	0,24 [26]
98%-ный CaF_2	0,16 [29]
(80F/20)	0,22 [29]
(60F/40)	0,25 [29]
(60F/20/0/20)	0,50 [29]

На рис. 14 [9, 26, 29] логарифмические величины удельной электропроводности сопоставлены с обратной величиной абсолютной температуры для шлаков в системах фтористый кальций—известь, фтористый кальций—глинозем и фтористый кальций—известь—глинозем.

Удельная электропроводность (при постоянной температуре) жидкого шлака существенно зависит от концентрации катионов, способных переносить электрический заряд, и их подвижности (чем сильнее катионы связаны с анионами, тем меньше их подвижность).

Добавка извести к фтористому кальцию уменьшает удельную электропроводность. Кислород и фтор обладают приблизительно одинаковым ионным радиусом, но анион кислорода несет двойной заряд по сравнению с анионом фтора, поэтому ионы кальция и кислорода значительно более прочно связаны друг с другом, чем ионы кальция и фтора. Таким образом, добавка анионов кислорода в виде извести снижает подвижность катионов кальция и, следовательно, электропроводность.

Добавка глинозема к фтористому кальцию значительно снижает удельную электропроводность в результате уменьшения концентрации ионов Ca^{2+} и увеличения ионов Al^{3+} . Ионы кальция с двойным зарядом имеют большую подвижность, чем ионы алюминия с тройным зарядом. При наличии глинозема могут образоваться анионы алюминий—кислород, такие как $\text{Al}_3\text{O}_7^{5-}$ и AlO_3^{3-} , и снизится общая концентрация заряженных катионов.

Линейная зависимость $\lg x$ и $\frac{1}{T}$ для систем фтористого кальция, фтористый кальций—известь и фтористый кальций—глинозем ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 10\%$) свидетельствует о том, что такие шлаки в расплавленном состоянии обладают моноионной проводимостью.

Заметный перегиб кривой $\lg x = \left(\frac{1}{T}\right)$ происходит в точке плавления (CaF_2). Имеется еще одно изменение в характере проводимости фтористого кальция при температуре приблизительно 2000°C , на которое указывает перегиб кривой $\lg x = \left(\frac{1}{T}\right)$, объяснения которому пока не найдено. Следовало ожидать изменения в характере проводимости при температуре кипения, но оно происходит при температуре на 500°C выше.

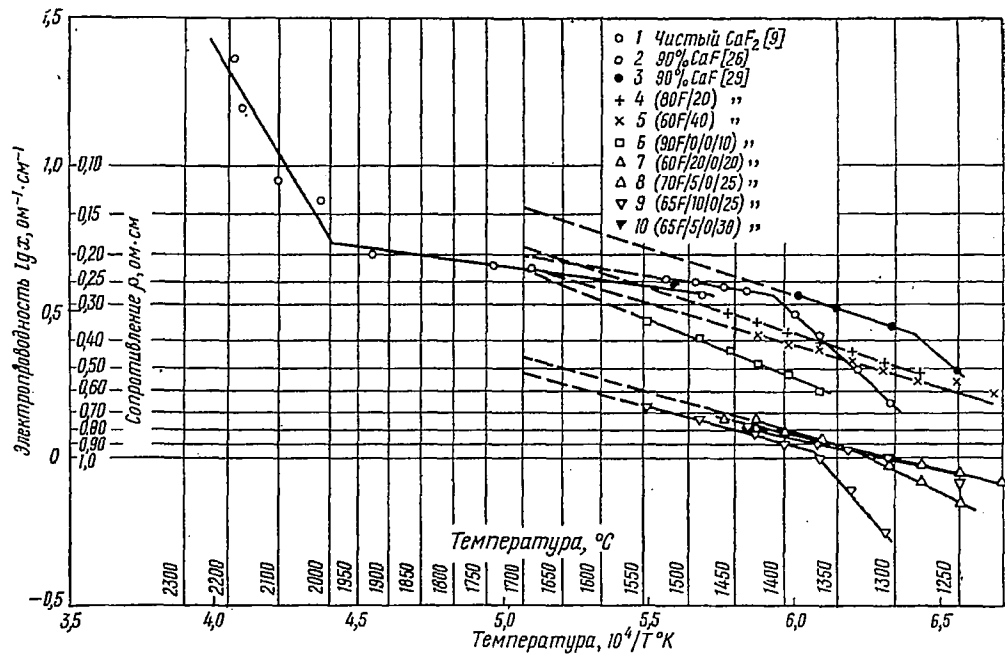
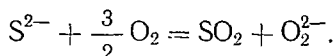


Рис. 14. Электропроводность некоторых шлаков, применяемых при процессе ЭШП, как функция температуры [9]

Коэффициент динамической вязкости равен тангенциальной составляющей силы на единицу площади любой из двух параллельных плоскостей с единицей расстояния между ними, причем пространство между ними заполнено жидкостью и одна из плоскостей движется по отношению к другой с единицей скорости, сохраняя параллельность.

Вязкость жидкого шлака в процессе ЭШП сказывается на циркуляции шлака и окончательной скорости капель жидкого металла.

Низкая вязкость шлака способствует сильному перемешиванию, создаваемому главным образом электромагнитными силами, и это ведет к удалению газов из шлака и граничной поверхности шлак—газ. Примером может служить удаление серы из шлака в соответствии с реакцией



Конечная скорость частицы расплавленного металла, опускающейся в жидком шлаке под влиянием ускорения силы тяжести g , прямо пропорциональна квадрату радиуса капли металла, разности плотностей металла и шлака и обратно пропорциональна вязкости (закон Стокса):

$$v = \frac{2gr^2(\rho_{мет} - \rho_{шл})}{9\eta},$$

где v — конечная скорость;
 g — ускорение силы тяжести;
 r — радиус капли жидкого металла;
 $\rho_{мет}$ — плотность жидкого металла;
 $\rho_{шл}$ — плотность жидкого шлака;
 η — коэффициент динамической вязкости.

По закону Стокса, направленная книзу скорость капли жидкого металла равна ее конечной скорости. К ней должна быть добавлена скорость потока шлака, опускающегося по оси кристаллизатора под воздействием электромагнитных сил и обратной конвекции, обусловленной выделением тепла с конца электрода (скрытого тепла плавления металла).

Чем выше вязкость шлака, тем меньше величина капля металла, а чем меньше разность плотностей металла и шлака, тем меньше конечная скорость капли металла и, следовательно, тем дольше время ее пребывания в шлаковой ванне. Реакции между шлаком и металлом происходят на конце электрода, при прохождении капли металла через шлак и у граничной поверхности шлаковая ванна—ванна металла. Хотя продолжительность пребывания металлических капель в шлаковой ванне невелика, реакция между шлаком и металлом развита значительно, так как велика площадь поверхности жидкого металла, подвергающегося воздействию расплавленного шлака.

Вязкость шлака является функцией температуры выше температуры ликвидуса и химического состава.

Рассматривая вязкость как функцию температуры, Френкель получил следующую зависимость:

$$\eta(T) = A_{\text{эксп}}(B/KT),$$

где η — коэффициент динамической вязкости;
 K — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;
 A и B — постоянные величины.

Девис и др. измеряли вязкость шлаков, применяемых в ЭШП при помощи вращающегося тигельного вискозиметра. Результаты этих измерений в виде зависимости логарифма вязкости от обратной величины абсолютной температуры показаны графически на рис. 15—18*.

На рис. 15 показаны соответственно кривые зависимости $\lg \eta$ от $\frac{10^4}{T^\circ K}$ для систем фтористый кальций, фтористый кальций—известь, фтористый кальций—глинозем, фтористый кальций— $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и фтористый кальций $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$.

Сотрудники БИСРА (Девис и др.) нашли, что очень небольшие количества извести во фтористом кальции значительно снижают его температуру плавления и, сле-

* M. W. Davies and F. A. Wright. «The viscosity of calcium fluoride based slag». BISRA Industry Report C/62/68, 1968.

довательно, вязкость*. Температура плавления фтористого кальция сорта «оптран» (монокристаллы) составляет 1395°С, тогда как температура плавления менее чистого сорта «экстра пюр» 1375°С. Добавка 5% извести к обоим этим сортам фтористого кальция ведет к выравниванию вязкости.

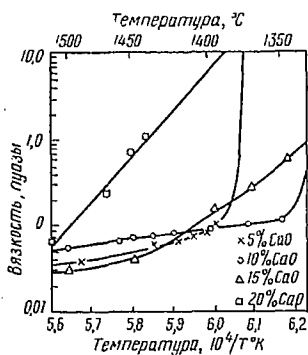


Рис. 15. Вязкость шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-CaO}$

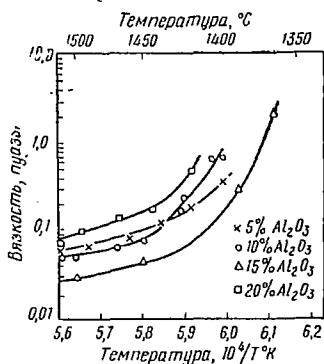


Рис. 16. Вязкость шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

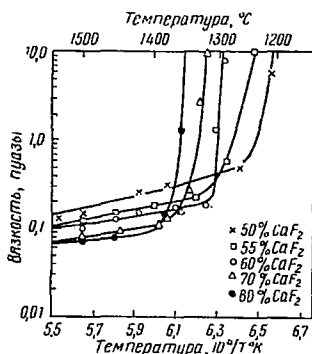


Рис. 17. Вязкость шлаков системы $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$

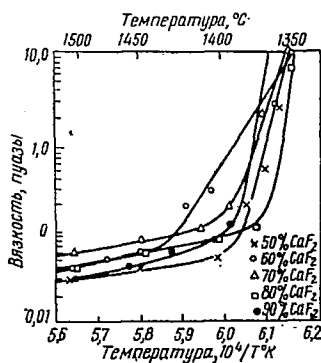


Рис. 18. Вязкость шлаков системы $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$

* M. W. Davies. «Chemical and physical properties of calcium fluoride based slags—progress report to Sept. 1967». BISRA Report MG/A/428/66 (C/41/66), 1966;

P. H. Smith et al. «The chemical and physical properties of CaF_2 based slags—progress report to August 1967». BISRA Report MG/A/96/67/(C/57/67), 1967.

Рассмотрение системы $\text{CaF}_2\text{—CaO}$ (см. рис. 15) показывает, что наименьшей должна быть вязкость шлака, состоящего из 85% CaF_2 +15% CaO . Это приблизительно соответствует его эвтектическому составу (см. рис. 6).

Влияние состава подтверждается, кроме того, тем, что, хотя температура ликвидуса шлаков, содержащих 5 и 20% CaO , аналогична, вязкость шлака с 20% CaO выше, чем шлака с 5% CaO .

Как и в системе CaF_2 , наименьшие величины вязкости в системе $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 16) соответствуют приблизительно эвтектическому составу (см. рис. 7). Эвтектический состав для этой системы характеризуется 9 или 27% (по массе) Al_2O_3 в зависимости от того, какие данные принимаются, и наименьшей вязкостью будут обладать шлаки в этом интервале, например шлак, содержащий 85% CaF_2 +15% Al_2O_3 . Следовательно, в этой системе ($\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$) перегрев должен быть, по-видимому, наиболее важным фактором, влияющим на вязкость.

На рис. 17 показана зависимость вязкости от температуры для псевдодвухкомпонентной системы $\text{CaF}_2\text{—}3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ в трехкомпонентной системе $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$. В этой системе чем выше содержание трехкальциевого алюмината $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, тем выше вязкость и ниже температура ликвидуса. По-видимому, содержание извести и глинозема оказывает больший эффект на вязкость, чем перегрев. Это может быть объяснено образованием крупных групп $\text{Al}_2\text{O}_6^{6-}$, которые должны увеличить вязкость. Для сравнения следует указать на то, что такие системы, как $\text{CaF}_2\text{—CaO}$ и $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 20\%$) имеют тенденцию образовываться только из простых ионов, таких как Ca^{2+} , Al^{3+} , F^- , O^{2-} .

Аналогично этому в псевдодвухкомпонентной системе $\text{CaF}_2\text{—}12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 18) увеличение содержания $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ с 10 до 40% увеличивает вязкость, что обусловлено, по-видимому, образованием сложных анионов $\text{Al}_2\text{O}_6^{6-}$, $\text{Al}_{14}\text{O}_{33}^{24-}$ и $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$. Однако наименьшие величины вязкости были зарегистрированы у шлаков, содержащих 50% CaF_2 +50% $\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, что близко к ожидаемому положению эвтектики в этой псевдодвухкомпонентной системе. Следовательно, хотя состав является наиболее важным фактором при определении вязкости, некоторое влияние оказывает также перегрев. Вы-

сокая температура ликвидуса в шлаке, содержащем 30% (по массе) $12 \text{ CaO} \cdot 7 \text{ Al}_2\text{O}_3$, по сравнению со шлаками, содержащими 20 или 40% (по массе), предполагает наличие трехкомпонентного соединения в системе $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$.

Плотность [39, 40]

Различие в плотности между жидким шлаком и жидким металлом, подвергающимся переплаву, имеет большое значение в процессе ЭШП.

Усилие, обусловленное силой тяжести, которое должно быть приложено для отрыва капли расплавленного металла с конца электрода, пропорционально разности плотности металл—шлак ($D_{\text{мет}} - D_{\text{шл}}$). К этому усилию должны быть добавлены электромагнитные и термические силы; эти силы действуют в направлении, противоположном действию межфазного натяжения на границе между жидким шлаком и жидким металлом, которое имеет тенденцию задерживать отрыв капли с конца электрода.

Усилие, обусловленное ускорением силы тяжести, действуя на сферическую металлическую каплю, связано с разностью плотностей уравнением:

$$F = \frac{4}{3} \pi r^3 g (D_{\text{мет}} - D_{\text{шл}}),$$

где F — усилие;
 r — радиус капли металла;
 g — ускорение силы тяжести;
 $D_{\text{мет}}$ — плотность жидкого металла;
 $D_{\text{шл}}$ — плотность жидкого шлака.

Следовательно, если для отрыва жидкой металлической частицы от электрода требуется постоянное усилие, а электромагнитные и термические силы постоянны, то чем больше разность плотностей ($D_{\text{мет}} - D_{\text{шл}}$), тем меньше объем капли металла.

Постоянная для F :

$$r \propto (D_{\text{мет}} - D_{\text{шл}})^{\frac{1}{3}}.$$

Конечная скорость капель жидкого металла пропорциональна разности плотностей, и эти параметры соотносятся в соответствии с законом Стокса.

Следовательно, чем меньше разность плотностей, тем меньше конечная скорость капли жидкого металла и, следовательно, тем больше продолжительность ее пребывания в шлаковой ванне. Реакции между шлаком и металлом происходят у конца электрода, при проходе капель металла через шлаковую ванну и на граничной поверхности металл—шлак, поэтому чем больше продолжительность пребывания капли жидкого металла в шлаковой ванне, тем эффективней реакция между шлаком и металлом.

Реакции между шлаком и металлом в шлаковой ванне являются функцией как площади поверхности металла, подвергающейся воздействию шлака, так и продолжительности пребывания в шлаковой ванне. Когда мы рассматривали усилие, необходимое для отрыва капли металла от электрода, мы видели, что чем больше разность плотностей, тем меньше величина металлической частицы и, следовательно, тем больше площадь поверхности на границе металл—шлак. Однако, рассматривая конечную скорость оторвавшейся капли металла, можно установить, что чем больше разность плотностей, тем выше конечная скорость частицы и при постоянной вязкости шлака тем меньше продолжительность пребывания капли металла в шлаковой ванне. Действие этих двух факторов противоположно. Идеальным было бы иметь небольшую величину капель металла и продолжительное время их пребывания в шлаковой ванне, чтобы способствовать реакции между шлаком и металлом. Большая разность плотностей и высокая вязкость шлака вместе способствуют как уменьшению величины капель, так и более длительному пребыванию в шлаковой ванне.

Большая разность плотностей способствует также отделению шлака от металла и, таким образом, уменьшает возможность захвата шлака кристаллизующимся металлом. Важно знать, какова плотность жидкого шлака при высокой температуре, так как это позволяет рассчитать минимальную массу требующегося шлака при условии, если известна также требующаяся минимальная глубина шлаковой ванны.

Плотность шлака зависит как от его состава, так и от температуры.

Плотность при любой температуре может быть рассчитана по формуле

$$\frac{1}{D_{(T^{\circ}\text{C})}} = V = \frac{M_1}{D_{1(T^{\circ}\text{C})}} + \frac{M_2}{D_{2(T^{\circ}\text{C})}} + \frac{M_3}{D_{3(T^{\circ}\text{C})}} + \dots,$$

где $D_{(T^{\circ}\text{C})}$ — плотность при температуре $T,^{\circ}\text{C}$;
 V — объем;
 M_1, M_2, M_3 — масса каждого компонента;
 $D_{1(T^{\circ}\text{C})}, D_{2(T^{\circ}\text{C})}, D_{3(T^{\circ}\text{C})}$ — плотность каждого компонента при температуре $T,^{\circ}\text{C}$.

$$\frac{1}{D_{25^{\circ}\text{C}}} = 0,314\text{CaF}_2 + 0,301\text{CaO} + 0,279\text{MgO} +$$

$$+ 0,252\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ [6];}$$

$$\frac{1}{D_{1400^{\circ}\text{C}}} = 0,389\text{CaF}_2 + 0,303\text{CaO} + 0,372\text{MgO} +$$

$$+ 0,328\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,416\text{SiO}_2 \text{ [39].}$$

Выше приведенные уравнения являются эмпирическими и допускают просто применение линейного закона сложения. Не вводится поправки на взаимодействие между компонентами шлака, несмотря на то, что фактически в системах $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$ наблюдаются значительные отклонения от простого линейного закона сложения.

Данные о зависимости плотности от химического состава [39] представлены в табл. 3 и на рис. 19—21. Изучение этих данных показывает, что замена фтористого кальция известью и глиноземом как раздельно, так и вместе увеличивает плотность шлака.

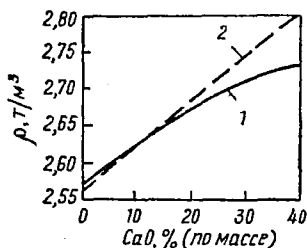


Рис. 19. Плотность жидких флюсов системы $\text{CaF}_2\text{—CaO}$ при 1673°K :

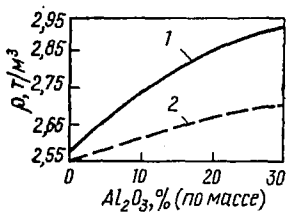
1 — экспериментальная кривая;
 2 — расчетная кривая

Сравнение рис. 19 и 20 показывает, что глинозем более эффективен, чем известь, в повышении плотности шлака. Замена 30% фтористого кальция 30% извести повышает плотность шлака до $2,72 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, тогда как 30% глинозема увеличивают плотность до $2,93 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$.

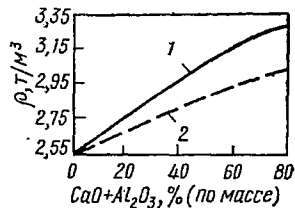
Плотность некоторых шлаков, применяемых при процессе ЭШП [39]

Химический состав, % (по массе)			Плотность, г/см ³			
CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	измеренная при 1723° К (1450° С)	пересчитан- ная на 1673° К (1400° С)	расчет- ная для 1673° К (1400° С)	оценнвае- мая для 1650° С
100	—	—	2,52(2,51)*	2,57	2,56 (2,53)*	2,43*
90	10	—	2,57	2,62	2,63	—
80	20	—	2,63	2,68	2,69	—
70	30	—	2,66	2,71	2,75	2,50
60	40	—	2,69	2,74	2,81	—
90	—	10	2,69	2,74	2,61	—
80	—	20	2,80	2,85	2,67	—
70	—	30	2,88	2,93	2,71	2,80
80	10	10	2,69	2,74	2,68	—
60	20	20	2,90	2,95	2,79	2,80
40	30	30	3,13	3,18	2,90	—
20	40	40	3,23	3,28	3,04	—

* По данным [40].

Рис. 20. Плотность жидких флюсов системы CaF₂—CaO при 1673° К:

1 — экспериментальная кривая; 2 — расчетная кривая [39]

Рис. 21. Плотность жидких флюсов системы CaF₂—CaO—Al₂O₃ при 1673° К:

1 — экспериментальная кривая, 2 — расчетная кривая [39]

Плотность фтористого кальция как функция температуры была определена Киршенбаумом и др. [40]:

$$D_{\text{CaF}_2} = 3,179 - 3,91 \times 10^{-4} T,$$

где T — температура, °К.

Теплоемкость шлака и металла является важным параметром процесса электрошлакового переплава.

Чтобы составить тепловой баланс процесса, следует определить количество тепловой и, следовательно, электрической энергии, необходимой для повышения температуры шлака и металла от температуры среды до рабочей температуры процесса.

Знание теплоемкости шлака позволяет также оценить его в качестве источника тепла (в целях подпитки верхней части слитка).

Обычная температура процесса ЭШП при переделе материалов на основе железа составляет приблизительно 2000°K ; таким образом, рассматриваемый интервал температур составляет $298\text{—}2000^{\circ}\text{K}$.

Из обычных компонентов шлака — фтористого кальция, извести, окиси магния и глинозема — только фтористый кальций плавится при 2000°K . Следовательно, величина скрытой теплоты плавления учитывается только при определении теплосодержания фтористого кальция, рассчитываемого по формуле

$$\int_{298}^{2000} C_p dT,$$

где C_p — молярная теплоемкость,
 dT — приращение температуры.

При вводе добавок извести, окиси магния или глинозема в жидкий фтористый кальций они растворяются, следовательно, в этом случае речь может идти о скрытой теплоте растворения, а не о скрытой теплоте плавления. К сожалению, пока не имеется данных о теплоте растворения этих окислов в жидком фтористом кальции. Можно было бы рассчитать скрытую теплоту растворения, применяя данные фазового равновесия. Однако точность имеющихся данных фазового равновесия не позволяет получить приемлемые оценки скрытой теплоты растворения. Парциальная теплота растворения связана с концентрацией насыщенного раствора ($C_{\text{нас}}$ и абсолютной температурой уравнением:

$$L_{\text{раст}} = \frac{RT^2 d \ln C_{\text{нас}}}{dT},$$

или в интегрированной форме

$$\Delta L_{\text{раст}} = 4,574T_1T_2 \frac{\lg C_{\text{нас}(1)} - \lg C_{\text{нас}(2)}}{T_1 - T_2},$$

где $\Delta L_{\text{раст}}$ — интегральная скрытая теплота растворения;

$C_{\text{нас}(1)}$ — концентрация насыщенного раствора при температуре T_1 ;

$C_{\text{нас}(2)}$ — концентрация насыщенного раствора при температуре T_2 ;

T_1 и T_2 — абсолютные температуры;

R — газовая постоянная.

Приведенное выше уравнение применимо только к правильным, т. е. к жидким растворам, в которых степень взаимодействия между растворенными атомами или ионами, вероятно, невелика. Найти величину $C_{\text{нас}}$ при данной температуре можно по положению ликвидуса, который образует на диаграмме фазового состояния границу жидкость/окисел + жидкость системы окисел—фтористый кальций.

Количество тепла, необходимого для повышения температуры одного моля фтористого кальция с 298 до 2000° К, определяется по уравнению

$$\int_{298}^{2000} C_p dT = \int_{298}^{1424} C_p dT + 5 + \int_{1424}^{1691} C_p dT + 29,710 + \\ + \int_{1691}^{2000} C_p dT \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

значения C_p , $\text{Дж} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$, для различных интервалов температур, °К, приведены ниже:

	Интервал температур
$59,84 + 30,47 \times 10^{-3} T + 1,97 \times 10^5 T^{-2}$	298—1424
$108,0 + 10,46 \times 10^{-3} T$	1424—1691
100,0	1691—2000

Скрытая теплота превращения
 $L_t = 77 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при 1424° К;

Скрытая теплота плавления
 $L_f = 29,710 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при 1691° К.

Следовательно:

$$\int_{298}^{2000} C_p dT = 191240 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} = 191,2 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} = \\ = 2540 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}.$$

Аналогично этому, количество тепла, необходимого для повышения температуры одного моля железа с 298 до 2000° К, определяется по уравнению

$$\int_{298}^{2000} C_p dT = \int_{298}^{1033} C_p dT + 5022 + \int_{1033}^{1181} C_p dT + 921 + \\ + \int_{1181}^{1673} C_p dT + \int_{1673}^{1809} C_p dT + 13810 + \int_{1809}^{2000} C_p dT \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

C_p , Дж·град ⁻¹ ·моль ⁻¹	Интервал температур, °К
17,5 + 24,8 × 10 ⁻³ T	273—1033
37,7	1033—1181
7,70 + 19,50 × 10 ⁻³ T	1181—1673
43,9	1673—1809
41,8	1809—2000

$L_f = 5022$; 921 и 879 Дж·моль⁻¹ при 1033; 1183 и 1673°К;

$L_f = 13810$ Дж·моль⁻¹ при 1809°К.

Следовательно:

$$\int_{298}^{2000} C_p dT = 82633 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} = 1480 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}.$$

В табл. 4 приведены некоторые тепловые характеристики для фтористого кальция, извести, глинозема, окиси магния и железа.

Рассмотрим электрошлаковый переплав чистого железа через фтористый кальций с применением «твердого старта» и отношения масс шлак: железо = 1:20.

Чтобы повысить температуру 1 т железа и 0,05 т фтористого кальция с 298 до 2000° К, требуется [(1480 × 10⁶) + (2449 × 5 × 10⁴)] = 1,602 × 10⁹ Дж (1602 МДж). Это эквивалентно 445,2 квт·ч.

Потребление электроэнергии при ЭШП (чистое железо

Некоторые тепловые параметры для CaF_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO и Fe

Вещество	Температура плавления, °К	$\int_{298}^{2000} C_p dT$		Скрытая теплота плавления	
		дж·г ⁻¹	кдж·моль ⁻¹	дж·г ⁻¹	кдж·моль ⁻¹
CaF_2	1691	2450	191,2	381	29,7
CaO	3125	2109	84,9	1419	79,5
Al_2O_3	2345	2038	208,0	1067	109
MgO	2887	1607	90,0	Не изв.	Не изв.
Fe	1809	1480	82,6	247	13,8

переплавляется с применением фтористого кальция) составит 445,2 квт·ч/т железа, или 0,4452 квт·ч/кг.

На промышленной установке ЭШП (Бэрлек) потребление электроэнергии составляет 1180 квт·ч/т, т. е. коэффициент эффективности процесса равен:

$$\frac{445,2}{1180} = 0,377 = 37,7\%.$$

ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ШЛАКА

Выбор шлака осуществляется обычно в два приема. Во-первых, необходимо выбрать основные компоненты шлака, рассмотрев как типы компонентов, так и количество каждого из них. Основными компонентами шлаков ЭШП являются обычно фтористый кальций, известь, окись магния и глинозем—эти материалы обладают стабильностью при высоких температурах, т. е. низким давлением паров, их легко получить в чистом состоянии и стоимость их невысока. Это те компоненты, которые определяют по существу физические и химические свойства шлака.

Вторая стадия выбора, которая не всегда может быть нужной, состоит в выборе второстепенных компонентов шлака. Эти компоненты (менее 10%) представляют собой:

а) фториды, например фтористый магний или барий;

б) стабильные окислы, например окись бария или циркония;

в) нестабильные окислы, например окислы титана, кремния, железа и марганца;

г) карбиды, например карбид кальция и графит;

д) нитриды, силициды и бориды;

е) металлы, например алюминий, кальций, титан, мишметалл.

Эти компоненты добавляют в основном для улучшения химических, а не физических свойств.

При выборе состава шлака в системе $\text{CaF}_2\text{—CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3$ следует рассматривать как экономические, так и технологические факторы, причем основное внимание нужно уделять экономическим факторам.

Роль фтористого кальция, окиси магния и глинозема

Роль фторида состоит в понижении температуры ликвидуса и солидуса, увеличении электропроводности и уменьшении вязкости и поверхностного натяжения шлака.

Известь добавляют в основном в качестве десульфуратора; она также незначительно понижает электропроводность.

Существенной функцией глинозема является повышение электрического сопротивления шлака, и совсем незначительные количества его обладают сильным влиянием. Например, замена 10% CaF_2 в чистом фтористом кальции глиноземом повышает электрическое сопротивление с 0,22 до 0,26 *ом·см* при 1650°С; замена 30% фтористого кальция глиноземом увеличивает электрическое сопротивление с 0,22 до 0,57 *ом·см* при 1650°С. Недостатком применения глинозема является то, что он может способствовать повышению содержания кислорода в переплавляемом металле.

Замена части глинозема известью или окисью магния уменьшает риск захвата кислорода при применении шлаков плавиковый шпат—глинозем. Количество окиси магния не должно обычно превышать 15% (по массе), так как со шлаком, в котором содержится больше окиси магния, очень трудно работать; причиной этого является, по-видимому, повышение вязкости.

Экономические факторы

Выход годных слитков

Причиной низкого выхода годного могут быть захват шлака, осевая рыхлость, усадочная раковина, пористость и водородная хрупкость. При переплаве под шлаками, содержащими мало извести, обеспечивается меньшая пористость слитков и отсутствие водородного охрупчивания. Шлаки с низким электрическим сопротивлением, т.е. содержащие мало глинозема, обеспечивают низкие скорости переплава, что уменьшает риск захвата шлака, осевую рыхлость и усадочную раковину.

Скорость переплава

Высокое содержание глинозема, т.е. высокое электрическое сопротивление, способствует высоким скоростям переплава и, следовательно, повышает производительность.

Удельный расход электроэнергии

Высокое содержание глинозема, т.е. высокое электрическое сопротивление, способствует уменьшению удельного расхода энергии.

Стоимость сырых материалов для шлака

Отношение стоимости сырых материалов CaF_2 — CaO — $\text{Al}_2\text{O}_3=2,2:1:6,5$. Следовательно, для снижения стоимости шлака до минимума следует увеличивать содержание глинозема.

Технологические факторы

Захват шлака. Низкие скорости переплава, связанные с низким или умеренным содержанием глинозема, уменьшают риск захвата шлака.

Осевая рыхлость и усадочная раковина. Низкие скорости переплава, связанные с низким или умеренным содержанием глинозема, уменьшают риск образования осевой рыхлости и усадочной раковины.

Пористость. Бедные известью шлаки менее склонны к гидратации и, следовательно, менее вероятно, что они

станут причиной пористости, чем шлаки с высоким содержанием извести.

Водородное охрупчивание. Шлаки с низким содержанием извести менее склонны вызывать водородное охрупчивание, чем шлаки, богатые известью. Водород только диффундирует из слитков небольшого поперечного сечения, например diam. 205 мм, не вызывая образования трещин.

Чистота. Высокое содержание извести благоприятно влияет на удаление серы. Высокое содержание глинозема может способствовать увеличению содержания в металле алюминия и кислорода, что обычно нежелательно.

Удалению включений благоприятствуют низкие скорости переплава вследствие увеличения времени для осуществления реакций между шлаком и металлом. Низкие скорости переплава также благоприятствуют образованию структур с вертикальной кристаллизацией, которые уменьшают риск задержки неметаллических включений (оксидов и сульфидов) в центральной части слитка, увеличивая время для перехода их в шлаковую фазу. Низкие скорости переплава связаны со шлаками, содержащими только незначительные или умеренные количества глинозема и способствующими поэтому максимальной степени очистки.

Выбор вторичных компонентов шлака

Влияние фторидов. Небольшие добавки (5—10%) фтористого бария или фтористого магния немного понижают температуру ликвидуса.

Влияние стабильных окислов. Могут быть сделаны небольшие добавки стабильных окислов (с низким давлением паров и одновалентных), таких как окислы бария, циркония, лантана и редкоземельных металлов. Эти добавки понижают температуру ликвидуса и уменьшают кислородный потенциал шлака. В настоящее время их редко применяют из-за высокой стоимости.

Влияние нестабильных окислов. К нестабильным окислам относятся окислы с относительно низкой отрицательной свободной энергией образования ($-\Delta C^\circ$), такие как кремнезем (SiO_2) и окислы переходных элементов с переменной валентностью — окислы железа, мар-

ганца, титана и др. Наличие этих окислов в каких-то, но очень малых количествах (менее 5%) способствует увеличению содержания кислорода в металле. Однако закись железа (2—4% FeO, добавленного в виде оксалата железа) или двуокись титана (25%) препятствуют удалению серы из автоматных сталей.

Влияние карбидов. Добавка небольшого количества (0,5—5%) карбида кальция к шлакам из фтористого кальция с известью способствует достижению низкого содержания кислорода (менее 0,0010%) и полному удержанию таких легкоокисляющихся элементов, как кремний и марганец, при переплаве подшипниковых сталей с 1% С и 1,5% Cr (Еп 31, AISI 52100).

Влияние сульфидов. Сульфиды железа или кальция добавляют к шлакам из фтористого кальция с глиноземом, если желательно задержать серу в автоматных сталях. Обычно предпочитают сульфид железа (FeS), так как продукт его окисления — закись железа (FeO) — препятствует десульфурации, в то время как известь, продукт окисления сульфида кальция, способствует десульфурации.

Влияние металлов. Различные методы раскисления шлака могут быть применены для задержания или удаления какого-либо элемента в металле ЭШП. Раскислители можно добавлять во время расплавления шлака или непрерывно в процессе переплава. Цель этой операции состоит в понижении кислородного потенциала шлака и, следовательно, в получении слитка с низким содержанием кислорода. Особенно подходящим раскислителем служит алюминий, так как он дешев, его можно применять в виде проволоки, что облегчает непрерывную подачу во время переплава с использованием устройства для подачи проволоки.

Используют также различные ферросплавы, но особенно хорошими раскислителями являются кальций, титан и мишметалл.

Влияние нитридов, силицидов и боридов. Пока еще мало известно о влиянии добавки нитридов, силицидов и боридов в шлаки, применяемые при ЭШП. Нитриды добавлялись для того, чтобы сохранить высокое содержание азота при переплаве. Однако в процессе ЭШП азот при тех концентрациях, в которых он обычно находится, удаляется незначительно.

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Важнейшие реакции, происходящие в шлаках

В большинстве случаев шлаки, выбранные в соответствии с принципами и методами, описанными выше, удовлетворяют предъявленным требованиям. Однако в некоторых ситуациях может потребоваться очень тщательный контроль содержания отдельных элементов; чтобы достичь такой степени контроля, необходимо знать важнейшие реакции, происходящие в шлаке, которые управляют свойствами этих элементов в шлаке и металле.

Реакции с кислородом

При электрошлаковом переплаве металлов или сплавов в результате окисления теряются некоторые количества легирующих элементов, в частности таких, как алюминий, титан и кремний, обладающих наибольшей химической активностью.

Очень важно свести эти потери до минимума, так как даже небольшие потери некоторых элементов могут вредно влиять на металлургические свойства переплавляемых материалов.

Алюминий к сплавам обычно добавляют с целью раскисления металла или регулирования размеров зерен, но иногда его вводят в больших количествах в дисперсионно-твердеющие сплавы. Титан чаще всего применяют в качестве стабилизатора карбидов, а кремний служит в основном раскислителем, но может также применяться в качестве стабилизатора нежелезных примесей.

Очень важно также свести до минимума содержание неметаллических включений (окислов и силикатов) и, следовательно, содержание кислорода. Неметаллические включения, особенно крупные и угловатые, такие как глинозем, могут служить причиной дефектов металла, которые ведут к возникновению трещин и, в конечном счете, к разрушению изделия в процессе службы.

Потери на окисление могут быть выражены двумя способами:

а) содержание элемента в электроде, % (по массе) —
содержание элемента в слитке, % (по массе);

б) содержание элемента в электроде, % (по массе) —
содержание элемента в слитке, % (по массе)

содержание элемента в электроде, % (по массе) $\times 100$.

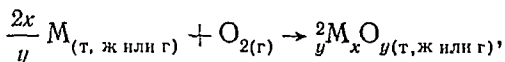
Первый способ показывает фактическое изменение состава, второй — способность данного элемента реагировать с кислородом. Чем выше процент потерь, тем выше химическая активность элемента.

Элементы по их химической активности (в порядке ее уменьшения), по данным практики ЭШП, можно расположить следующим образом: Al, Mg, Ti, Si, Mn, Cr, Fe.

Потерь на окисление таких элементов, как W, Co, Sn, Zn, Ni и Cu, обычно не бывает или они невелики. Содержание свинца обычно значительно уменьшается, что, по-видимому, обусловлено испарением его окисла по мере образования.

Относительная способность элемента к реакции с кислородом, т. е. его сродство с кислородом, может быть рассчитана теоретически на основании свободной энергии образования. В приложении 1 указаны величины свободной энергии образования окислов при 2000° К, кал/моль O₂. В этом приложении перечислены окислы тех элементов, которые обычно встречаются при ЭШП, а избранная температура (2000° К) наиболее часто наблюдается при ЭШП сплавов на железной и никелевой основе.

Рассмотрим реакцию типа



где M — металл;
O — кислород;
M_xO_y — окисел металла.

Чем более отрицательной является свободная энергия образования ΔG, тем больше сродство элемента с кислородом.

Полученный при расчетах порядок химической активности элементов (по мере ее уменьшения) при реакции с кислородом в процессе ЭШП следующий: La, Ca, Ce, U, Zr, Ba, Al, Mg, Ti, Si, B, V, Mn, Nb, Cr, Fe, W, Co, Sn, Pb, Zn, Ni, Cu.

Таким образом, данные отлично согласуются с опытными.

Типичные примеры потерь на окисление при переплаве различных сплавов приведены в табл. 5—7. Во всех приведенных примерах переплав осуществлялся на воз-

духе и раскисления шлака не производили ни при его расплавлении, ни в процессе электрошлакового переплава. Потери на окисление являются наибольшими в нижней части слитков (см. табл. 5—7). Эти потери могут быть устранены путем применения «жидкого старта», раскисления шлака при его предварительном расплавлении и в процессе переплава.

Лучшим методом уменьшения потерь легирующих элементов на окисление при условии обеспечения раскисления металла или сплава является применение шла-

Таблица 5

Потери на окисление при ЭШП
никельхромжелезомолибденового
жаропрочного сплава

Элемент	Содержание в электроде, % (по массе)	Потеря элемента в слитке, %	
		донная часть	головная часть
Zr	0,06	92	95
Si	0,68	37	27
Mn	0,58	2	Нет
Cr	22,1	2	1
Mo	9,1	2	Нет

Таблица 6

Потери на окисление при ЭШП шарикоподшипниковой стали с 1% С и 1,5% Cr

Элемент	Содержание в электроде, % (по массе)	Потеря элемента в слитке, %
Al	0,009	92
Si	0,35	23
Mn	0,54	4
Cr	1,55	2
Ni	0,14	Нет
S	0,012	42

Таблица 7

Потери на окисление при ЭШП никельхроммолибденовой конструкционной стали

Элемент	Содержание в электроде, % (по массе)	Потеря элемента в слитке, %	
		донная часть	головная часть
Al	0,029	41	45
Si	0,22	55	32
Mn	0,32	Нет	Нет
Cr	1,43	1	2
Mo	0,41	7	2
Ni	3,00	7	2
S	0,014	64	22

ка с низким кислородным потенциалом; для этого шлак не должен содержать такие окислы, которые:

а) имеют низкую отрицательную энергию образования ΔG , например окислы K, Pb, Cu, Na, Co, Ni, Sn, Mn, Fe, Cr, W, V, Nb, Si (элементы, находящиеся в начале перечня, наиболее вредны, в конце менее вредны);

б) могут иметь различную степень окисления, например окислы Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni и Cu.

Содержание нежелательных окислов в шлаке может быть снижено путем добавки восстановителя или раскислителя в печь предварительного расплавления или в печь ЭШП. Добавки к шлаку в печи ЭШП можно делать непрерывно в течение всего переплава.

Окисел может быть восстановлен металлом-восстановителем, если отрицательная величина свободной энергии образования окисла металла-восстановителя выше, чем окисла, который нужно восстановить.

Все величины свободной энергии следует рассматривать только при одинаковой температуре.

Как видно из приложения 1, углерод ($\Delta G_{2000^\circ\text{K}}$ при $2\text{C}_{(r)} + \text{O}_{2(r)} = 2\text{CO}_{(r)}$) составляет минус 573429 дж/гмоль O_2) может восстановить любой окисел, свободная энергия образования которого имеет меньшую отрицательную величину, например кремнезем (SiO_2), окись бора (B_2O_3), окислы железа и марганца.

Однако если необходимо восстановить окислы титана, то единственными пригодными для этой цели раскислителями будут кальций, церий, барий, цирконий и алюминий.

Кальций и барий при 2000°K находятся в газообразном состоянии, цирконий — в твердом, церий и алюминий — в жидкости. Наиболее эффективным раскислителем, по-видимому, следует считать алюминий, который дешев, легко доступен в пригодной для непрерывной добавки форме (провода или прутки) и является при 2000°K жидкостью. Углерод и алюминий, каждый отдельно или в сочетании, успешно применяются при ЭШП. Добавки 0,5% (по массе) графита и 0,01% (по массе) алюминия снижают содержание кислорода в шарико-подшипниковой стали (Еп31) с 0,0040 до 0,0010%.

Лантан, кальций, церий, уран и цирконий также могут применяться отдельно или в сочетаниях друг с другом и с алюминием.

При электрошлаковом переплаве обычно бывает желательным предупредить или уменьшить окисление легирующих элементов и снизить до минимума содержание окислов металлов.

Эти цели могут быть реализованы при условии, что содержание кислорода и, следовательно, парциальное давление и активность кислорода в металле будут минимальными.

Активность кислорода в металле прямо пропорциональна корню квадратному величины его активности в шлаке. Таким образом, если парциальное давление или активность кислорода в шлаке удерживаются на наименьшем возможном уровне, то и в металле парциальное давление и активность кислорода будут наименьшими.

При постоянной температуре процесса чем выше отрицательная величина свободной энергии образования ΔG , тем больше величина постоянной равновесия K_p и, следовательно, тем ниже парциальное давление кислорода в шлаке и в металле.

Поэтому, чтобы снизить до минимума окисление легирующих элементов и содержание окисных включений, кислые компоненты шлака должны иметь возможно большую отрицательную величину свободной энергии образования.

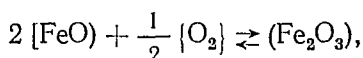
Опыт применения процесса ЭШП показал, что пригодны только те окислы, постоянная равновесия которых K_p для реакции образования превышает 10^{15} , в частности CaO , BaO , ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO , CeO_2 , TiO_2 . Окислы Si , V , Mn , Nb , Cr , Fe , W , Co , Sn , Pb , Zn , Ni (в порядке уменьшающейся пригодности) обычно не подходят для применения в процессе ЭШП. Однако при переплаве некоторых сплавов, например шарикоподшипниковой стали, содержащей 1% С и 1,5% Сг, глинозем, содержащийся в шлаке, может повысить содержание кислорода в металле (10% Al_2O_3 увеличивает содержание кислорода с 0,0020 до 0,0040%). Следовательно, в данном случае только CaO , BaO и ZrO_2 могут рассматриваться в качестве удовлетворительных компонентов шлака.

Оксид любого элемента, имеющего более одной степени окисления или более одной валентности, например оксид переходного элемента, способен действовать в

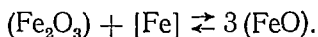
качестве средства передачи кислорода между атмосферой и металлом.

Оксиды железа являются, по-видимому, наиболее важными в связи с их способностью изменять валентность без заметного изменения структуры, а также вследствие того, что они являются важными компонентами ферросплавов. Чтобы предупредить передачу кислорода из атмосферы в металл во время ЭШП, абсолютно необходимо снизить до минимума содержание оксидов с переменной валентностью и, в частности, оксидов железа.

Если рассматривать оксиды железа в качестве средства передачи кислорода, то на граничной поверхности газ/шлак будет иметь место реакция



а на граничной поверхности шлак/металл будет происходить реакция



Возрастание активности кислорода в шлаке и, следовательно, его активности в металле при наличии в шлаке оксидов с переменной валентностью может быть предотвращено путем удаления кислорода из атмосферы над шлаком. В качестве защитной атмосферы могут быть применены аргон, гелий и азот с малым содержанием кислорода.

Реакции с серой

Обычно желательно, чтобы содержание серы в сталях и в других сплавах было низким и не превышало, как правило, 0,005—0,010% (по массе). Иногда, однако, серу добавляют преднамеренно — при переплаве автоматных сталей, доводя ее содержание до 0,15—0,20% (по массе). В этом случае серу необходимо сохранять в процессе электрошлакового переплава.

Степень удаления серы, достигаемая при ЭШП, составляет обычно от 50 до 75% и зависит в значительной мере от содержания серы в электроде. При использовании высокоосновных шлаков с большим количеством извести, содержащих карбид кальция, содержание серы может быть снижено до 0,0025% (по массе). Обычное содержание серы в материалах ЭШП составляет 0,007—

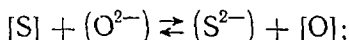
0,003% (по массе) при условии, что ее содержание в электроде равно приблизительно 0,012—0,008%.

Содержание серы регулируется как химическими, так и электролитическими реакциями.

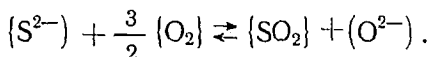
Химические реакции [41, 42]

Существуют два типа реакций, управляющих содержанием серы в процессе ЭШП — реакция между шлаком и металлом и реакция между газом и шлаком:

а) реакция между шлаком и металлом



б) реакция между газом и шлаком



Рассмотрим реакцию «а»:

$$K = \frac{a_{(S^{2-})} a_{[O]}}{a_{[S]} a_{(O^{2-})}},$$

отсюда

$$\frac{a_{(S^{2-})}}{a_{[S]}} = K \frac{a_{(O^{2-})}}{a_{[O]}}.$$

Для жидких растворов (в интервале применимости закона Генри) и при очень небольших величинах $N_{(S^{2-})}$ и $N_{[S]}$ это уравнение приобретает вид:

$$\frac{(S^{2-})}{[S]} = \text{постоянная} \times \frac{N_{(O^{2-})}}{N_{[O]}} ,$$

где $\frac{(S^{2-})}{[S]}$ — коэффициент распределения;

(S^{2-}) — содержание серы в шлаке, % (по массе);

$[S]$ — содержание серы в металле, % (по массе);

$N_{(O^{2-})}$, $N_{S^{2-}}$ — молярная доля ионов O^{2-} и S^{2-} в шлаке;

$N_{[O]}$, $N_{[S]}$ — молярная доля атомов O и S в металле.

Аналогично этому в реакции «б»

$$K = \frac{p_{\{SO_2\}} a_{(O^{2-})}}{p_{\frac{3}{2} \{O_2\}} a_{(S^{2-})}} ,$$

откуда

$$\frac{p_{\{SO_2\}}}{a_{\{S^{2-}\}}} = K \frac{p_{\frac{3}{2}\{O_2\}}}{a_{\{O^{2-}\}}}$$

Это уравнение принимает вид:

$$\frac{\{S\}}{\{S\}} = \text{постоянная} \times \frac{p_{\frac{3}{2}\{O_2\}}}{N_{\{O^{2-}\}}}$$

где $\{S\}$ — содержание серы в газе, % (по массе);
 $\{S\}$ — содержание серы в шлаке, % (по массе);
 $p_{\{O_2\}}$ — парциальное давление кислорода в газовой фазе;

$N_{\{O^{2-}\}}$ — молярная доля ионов O^{2-} в шлаке.

Из уравнения «а» можно видеть, что передача серы из металла в шлак обеспечивается высокой основностью шлака $N_{\{O^{2-}\}}$ и низким содержанием кислорода в металле $N_{\{O\}}$.

Для шлаков, содержащих минимальные количества глинозема и кремнезема, $N_{\{O^{2-}\}}$ пропорционально молярной доле извести $N_{\{CaO\}}$.

Как мы видели в предыдущем разделе, молярная доля кислорода в металле $N_{\{O\}}$ может быть доведена до минимума при применении шлака с низким кислородным потенциалом. Такой потенциал может быть достигнут путем сведения к минимуму содержания окислов, которые имеют низкую отрицательную свободную энергию образования более одной степени окисления.

Высокая величина коэффициента распределения (т. е. хорошее удаление серы из металла) достигается при высоком содержании серы и низком содержании кремнезема и окислов железа в шлаке.

Уравнение «а» показывает, что передача серы из шлака в газовую фазу обеспечивается высоким парциальным давлением кислорода $p_{\{O_2\}}$ в атмосфере и низкой основностью шлака $N_{\{O^{2-}\}}$.

То, что сера удаляется в атмосферу в виде двуокиси серы, было подтверждено Глиненным и Бужеком [43], применявшими иодометрический и масс-спектрографический методы анализа. Исследования баланса серы, вы-

полненные фирмой ЭСРТ и Глиненным и Бужеком, показывают, что большая часть серы, удаляемой из металла, преобразуется в газовую фазу при использовании воздуха в качестве атмосферы. Глиненный и Бужек установили, что при использовании в качестве атмосферы аргона удаление серы из металла было очень небольшим. Поэтому более важна реакция между газом и шлаком, чем реакция между шлаком и металлом.

Для обеспечения оптимальной десульфурации требуется соблюдение следующих условий:

реакция между шлаком и металлом — высокая основность шлака, низкий кислородный потенциал металла и, следовательно, шлака;

реакция между газом и шлаком — низкая основность шлака, высокий кислородный потенциал газовой фазы.

Таким образом, для хорошего удаления серы при переплаве на воздухе требуется умеренная или высокая основность шлака и низкий кислородный потенциал шлака.

Десульфурации способствует высокое содержание извести и окиси магния, воздушная атмосфера, низкое содержание кремнезема и окислов железа в шлаке; электрод должен быть предварительно очищен от окалины, чтобы понизить содержание окислов железа в шлаке.

Чтобы задержать серу в металле, следует вести переплав в атмосфере аргона и добавлять серу к шлаку в виде сульфидов железа или кальция в количестве, необходимом для достижения равновесия с содержанием серы в металле.

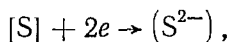
Небольшие добавки оксалата железа препятствуют удалению серы, однако при этом, по-видимому, возрастает содержание кислорода. Окись титана действует аналогичным образом — задержание серы достигается при использовании шлака, содержащего 25% TiO_2 .

Электролитические реакции

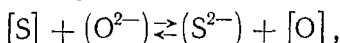
Электрошлаковый переплав может осуществляться с применением переменного тока или постоянного тока прямой (электрод отрицателен) или обратной полярности.

Рассмотрим применение постоянного тока обратной полярности. У граничной поверхности между ванной ме-

талла и шлаковой ванной в том случае, если электрод служит катодом, происходит реакция:

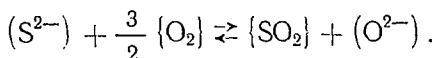


которая аналогична реакции



описанной выше.

На поверхности шлака сера, находящаяся в шлаке, реагирует с атмосферным кислородом, как это было указано выше:



Следовательно, десульфурация возможна при применении постоянного тока обратной полярности (электрод положителен), но она незначительна при применении постоянного тока прямой полярности (электрод отрицателен).

Наилучшую десульфурацию обеспечивает применение переменного тока (табл. 8).

Таблица 8

Степень десульфурации при различных методах ЭСП
и различных шлаках [24]

Род тока	Содержание серы в электроде, % (по массе)	Содержание серы в слитке, %, при использовании шлаков			
		CaF ₂ -1* (АНФ-1*)	CaF ₂ -CaO (АНФ-7*)	CaF ₂ -MgO (АНФ-9*)	CaF ₂ -Al ₂ O ₃ (АНФ-6*)
Переменный	0,032	0,017	0,006	0,009	0,013
Постоянный прямой полярности (электрод — катод)	0,032	0,032	0,034	0,039	0,036
Постоянный обратной полярности (электрод — анод)	0,032	0,018	0,015	0,011	0,015

* АНФ-1 — (100 F); АНФ-7 — (80 F/20); АНФ-9 — (80 F/0/20); АНФ-6 — (70 F/0/0/30).

По десульфурационной способности различные шлаковые системы можно расположить следующим образом (по мере уменьшения): $\text{CaF}_2\text{—CaO}$, $\text{CaF}_2\text{—MgO}$, $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$, CaF_2 .

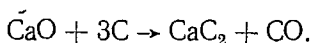
Ниже показано, как изменяется коэффициент распределения $(S)/[S]$ при различных способах ЭШП [43]; содержание серы в электроде 0,037% (по массе), шлак $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$:

Род тока	Коэффициент распределения $(S)/[S] \times 100$
Переменный	59
Постоянный с прямой полярностью (электрод—катод) . .	24
Постоянный с обратной полярностью (электрод—анод) . . .	55

Из рассмотрения электролитических реакций следует, что переменный ток способствует максимальной десульфурации, постоянный ток прямой полярности — максимальному задержанию серы.

Реакции с углеродом

Углерод не удаляется из металлов или сплавов в процессе ЭШП. В том случае, когда углерод улавливается из шлака, его содержание может увеличиться; при переплаве металл обычно поглощает углерод, содержащийся в шлаке. Углерод в шлаке, находящийся в виде карбидов, захватывается обычно при предварительном расплавлении шлака в индукционной или дуговой печи. Единственными материалами, применяемыми в настоящее время для тиглей, в которых расплавляют шлак, является графит или окись магния. Графитовые тигли применяют в индукционных печах; дуговые печи могут футероваться графитом или окисью магния, но в любом случае применяются графитовые электроды. Углерод в какой-то степени улавливается всеми шлаками, что является функцией продолжительности плавки и поверхности тигля, находящейся в контакте со шлаком при постоянной температуре; больше всего поглощают углерод шлаки, содержащие свободную известь, которая реагирует с графитом, образуя карбид:



Типичные изменения в содержании углерода в различных сплавах после ЭШП приведены в табл. 9.

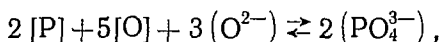
Таблица 9

Изменение содержания углерода в различных сплавах в результате ЭШП

Тип стали	Содержание углерода, % (по массе)	
	в электроде	в слитке
Никельхромжелезомолибденовый жаропрочный сплав	0,13	0,13
Никельхромжелезный коррозионноустойчивый сплав	0,080	0,093
Коррозионноустойчивая сталь 18/10, стабилизированная титаном	0,06	0,07

Реакции с фосфором

Дефосфорация при ЭШП является окислительным процессом, т. е. она протекает при ЭШП так же, как и при обычной плавке стали:



$$K = \frac{a^2(\text{PO}_4^{3-})}{a_{[\text{P}]^2} a_{[\text{O}]^5} a_{(\text{O}^{2-})^3}};$$

следовательно, $\frac{a(\text{PO}_3^{3-})}{a_{[\text{P}]}} = \text{константа} \times a_{\frac{5}{2}[\text{O}]} \cdot a_{\frac{3}{2}(\text{O}^{2-})}$,

где K — константа равновесия;
 a — активность (по Раультиану);

$\frac{a(\text{PO}_4^{3-})}{a_{[\text{P}]}}$ — коэффициент распределения фосфора между шлаком и металлом.

Следовательно, распределение фосфора между шлаком и металлом пропорционально содержанию кислорода в металле и основности шлака. Чем выше основность

шлака и содержание кислорода в металле (т.е., чем выше кислородный потенциал шлака), тем больше степень удаления фосфора. Высокий кислородный потенциал шлака достигается при высоком содержании окислов железа и кремния; следовательно, дефосфорация и удаление кислорода при ЭШП несовместимы.

Следует отметить, что не имеется такого механизма удаления фосфора из шлака в газовую фазу, какой существует для серы, поэтому шлак насыщается фосфором до такого уровня, при котором дальнейшее удаление фосфора становится невозможным.

В связи с насыщением шлака фосфором, а также не-

Таблица 10

Изменение содержания фосфора и числа включений при применении различных шлаков

Показатели	Содержание в электроде	После переплава под шлаком					
		CaF ₂	CaF ₂ -10% Al ₂ O ₃	CaF ₂ -30% CaO	CaF ₂ -10% SiO ₂	CaF ₂ -10% FeO	CaF ₂ -25% FeO
Содержание фосфора, %	0,034	0,035	0,034	0,032	0,030	0,031	0,010
Число включений*	134	69	85	69	69	109	99

* Подсчет по методу Фокс.

Таблица 11

Удаление фосфора при ЭШП с применением шлака CaF₂-BaO

Тип стали	Содержание фосфора, %			
	в электроде	в слитке		
		донная часть	середица	головная часть
Сталь 20	0,029	0,010	0,015	0,020
Ст. 3	0,054	0,012	0,017	0,026
Коррозионностойкая типа 18/8, стабилизированная титаном	0,022	0,007	0,010	0,010

обходимостью иметь шлак с высоким кислородным потенциалом дефосфорацию при ЭШП обычно не производят.

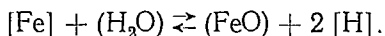
Уильямс [23] показал, что удаление фосфора может происходить, в частности, при применении добавок окислов железа; однако удаление фосфора связано с высоким содержанием включений (табл. 10).

Медовар и др. [24] сообщают об успешной дефосфорации при применении шлаков $\text{CaF}_2\text{—BaO}$ (табл. 11).

Водородные реакции

В процессе ЭШП в отличие от процесса ВДП водород не удаляется. Возможно, что применение вибрации может побудить атомарный водород к образованию пузырьков молекулярного водорода, который мог бы затем выделяться из системы.

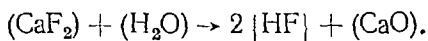
Если при ЭШП не предпринимается предупредительных мер, то содержание водорода в металле может легко возрасти. Увеличение содержания водорода проявляется в виде пористости в слитках и в их растрескивании. Водород образуется при реакции воды с горячим металлом:



Источником воды при ЭШП могут быть сырые шлаковые материалы, смесь стружки с экзотермическим материалом, раковины в литых электродах, поверхность электродов, конденсация, атмосфера и утечки в кристаллизаторе и поддоне.

Из обычных материалов для получения шлаков (фтористый кальций, известь, окись магния, глинозем) наиболее серьезным источником воды является известь. Вода реагирует с известью, легко образуя гидроокись $\text{Ca}(\text{OH})_2$; даже свежееобожженная известь будет содержать приблизительно 2% воды; обычно содержание воды составляет 2,5—3% [3]. Суммарные потери на прокаливание ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) для других материалов могут составлять менее чем 0,2% (по массе), а обычно — менее чем 0,1% (по массе) [3].

Вода может быть удалена из шлака предварительным его расплавлением. Вода при этом удаляется при реакции



Подробнее подготовка шлаков будет рассмотрена в следующем разделе.

Стружка, которая применяется в пусковой смеси, должна быть чистой и сухой. Предпочтительнее использовать стружку, полученную без применения технологической смазки при резании. Если применялась водная эмульсия растворимого масла, то стружку следует обезживать такими растворителями, как ацетон или метилированный спирт, и обезжировать четыреххлористым углеродом или трихлорэтиленом.

Экзотермическую смесь следует готовить по мере надобности из сухой стружки магнезия, алюминиевого порошка и нитрата калия; последний компонент добавляюТ только непосредственно перед применением.

Поступление воды из смеси стружки с экзотермическим материалом полностью устраняется при работе с расплавленным шлаком в начале процесса.

Электроды, разлитые вертикально в огнеупорные трубы или в разъемные стальные формы, часто имеют усачочные раковины, простирающиеся на какую-то глубину. При отрезании от конца электрода диска или при придании ему квадратной формы для подготовки к переплаву водная эмульсия растворимого масла может попасть в раковину. Если электрод устанавливается затем для переплава головным концом с раковиной книзу, эмульсия может попасть из электрода в кристаллизатор. Практическим решением этой проблемы, если применение технологической смазки необходимо, является использование безводного материала, например парафина. Альтернативным решением может быть установка электрода перед переплавом раковиной кверху, причем при приварке следующего электрода к инвентарной головке оставляется небольшое отверстие для выхода воды в виде пара при нагреве электрода.

Влага иногда имеется на электроде в виде гидратированных окислов железа (гидратированная окалина). Она может быть устранена путем удаления окалины с применением дробеструйной обработки, очистки проводочными щетками, шлифования или травления.

Если влажность воздуха высока, вода конденсируется из атмосферы на холодных поверхностях кристалли-

затора или поддона. Чтобы этого не происходило, следует поддерживать температуру охладителя кристаллизатора и поддона выше точки росы воды при данной влажности воздуха; кроме того, можно включать подачу охладителя, которым обычно служит вода, непосредственно перед перепадом — в этом случае конденсация просто не успевает начаться.

В условиях высокой влажности вода из атмосферы может диффундировать в металл через шлак. Высокая влажность часто наблюдается в колодцах установок ЭШП, когда имеется большая поверхность воды в виде пленки или струй при охлаждении кристаллизаторов или в водяном зумпфе. Влажность атмосферы может быть снижена путем уменьшения открытой поверхности воды или установки вентиляторов, которые рассеивают высоковлажную атмосферу.

Что касается утечки в кристаллизаторе, то в этой связи следует заметить, что кристаллизаторы из мягкой стали со струйным охлаждением легче ремонтировать, чем медные кристаллизаторы; для ремонта медных кристаллизаторов требуются крупные печные устройства предварительного нагрева. Утечки в поддоне обычно происходят через отверстия для болтов, крепящих верх поддона к его опоре, поэтому там, где это возможно, следует стремиться к тому, чтобы болты закреплялись вне площади опоры кристаллизатора.

Для предупреждения просачивания воды, применяемой для охлаждения кристаллизаторов поливом или разбрызгиванием, через прокладки из асбестового картона между кристаллизатором и поддоном следует применять двухслойные прокладки, состоящие обычно из внутренней асбестовой прокладки с наружной резиновой прокладкой, которая должна быть несколько толще асбестовой.

Химические аспекты подготовки шлака

Применяемый в процессе ЭШП шлак иногда предварительно расплавляют.

Основная цель предварительного расплавления заключается в рафинировании шлака — очищении его от таких компонентов, которые препятствуют производству металла высокого качества. При расплавлении значи-

тельно уменьшается содержание воды, кремнезема, окислов железа, серы и свинца.

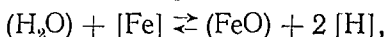
Расплавление шлака осуществляется в печах следующих типов:

а) индукционная печь с графитовым тиглем;

б) дуговые печи — однофазные с графитовым тиглем и одним графитовым электродом (тип Бэрлек) или магnezальной футеровкой и двумя графитовыми электродами (тип Уайлд Барфилд), а также трехфазные с магnezальной футеровкой и тремя графитовыми электродами (тип Шилд элой).

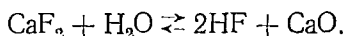
При применении индукционной печи для предотвращения воздействия воздуха на поверхность шлака используют крышки; при этом над поверхностью шлака создается восстановительная атмосфера, а при выгорании углерода из тигля образуется окись углерода.

Наиболее важным аспектом расплавления шлака является удаление воды. Вода в шлаке, присутствующая в основном в извести, может реагировать с жидким металлом с выделением водорода:



что поведет к пористости слитков и (или) к водородному охрупчиванию крупных слитков.

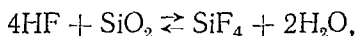
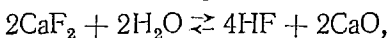
Вода удаляется в соответствии с реакцией:



При непрерывном удалении фтористого водорода реакция будет протекать вправо до завершения. Устранение воды по этой реакции сопровождается уменьшением содержания фтористого кальция и увеличением содержания извести.

Кремнезем, содержащийся в шлаке, может способствовать увеличению содержания кислорода в металле и иногда — увеличению содержания кремния в металле, а также может препятствовать удалению серы.

Кремнезем удаляется по реакциям:



вода при этом действует в качестве катализатора, или по реакции $2CaF_2 + SiO_2 \rightleftharpoons SiF_4 + 2CaO$, в которой вода не участвует.

Опытные плавки, проведенные ЭСРТ, показали, что удаление кремнезема происходит даже в том случае, если при анализе вода не обнаружена (воды не более 0,05%) (табл. 12) [3]. Удаление кремнезема сопровождается потерей фтористого кальция и возрастанием содержания извести. Фактическое удаление кремнезема при рафинировании шлака зависит от времени, в течение которого шлак находится в жидком состоянии (время выдержки), исходного содержания кремнезема и воды и объема печи (табл. 13, 14). При отсутствии воды в маленькой печи (емкость 10 кг) потеря кремнезема после 20 мин выдержки составила 0,15% при исходном содержании кремнезема приблизительно 1,0% (см. табл. 12) [3].

Таблица 12

Изменения в составе плавикового шпата, расплавленного в 10-кг индукционной печи с графитовой футеровкой в атмосфере окиси углерода (печь с крышкой) при 1620° С [3]

Компонент	Исходное содержание, % (по массе)	Конечное содержание, % (по массе), при выдержке после полного расплавления плавикового шпата, мин							
		0	5	10	20	30	40	60	120
SiO ₂	0,97	0,94	0,84	0,84	0,82	—	0,60	—	—
Al ₂ O ₃	0,31	0,15	0,18	0,20	0,32	—	0,17	—	—
FeO	0,07	0,05	0,06	0,07	0,03	—	0,06	—	—
Fe ₂ O ₃	0,07	0,03	0,03	0,02	0,01	—	0,07	—	—
S	0,01	0,01	0,01	0,015	0,012	—	0,012	—	—
C	Нет	0,06	0,06	0,05	0,07	—	0,04	—	—
H ₂ O	»	Нет	Нет	Нет	Нет	—	Нет	—	—
Pb	0,08	0,01	—	—	—	0,003	—	0,001	0,001

При выдерживании жидкого шлака в течение 45 мин в очень маленькой печи (емкость 1 л) содержание кремнезема снизилось до 0,48% (по массе) с исходных 1,28% [24]. После 2 ч расплавления в 50-кг дуговой печи содержание кремнезема составило 0,46% при исходном содержании 2,5% (по массе), а после 1 ч расплавления в 500-кг дуговой печи содержание кремнезема снизилось с 2,46 до 0,26% (см. табл. 14) [24].

Потери глинозема невелики — около 0,1% (по массе) при рафинировании плавикового шпата в 10-кг индук-

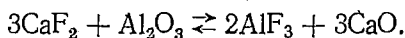
Изменения в составе плавикового шпата, выдержанного в расплавленном состоянии в течение 45 мин с доступом и без доступа воздуха [24]

Показатели	SiO ₂	CaO	S
Исходное содержание, % (по массе)	1,22	3,22	3,7
Конечное содержание, % (по массе):			
с крышкой	—	4,36	1,4
без крышки	0,04	4,09	0,2

Изменения в составе плавикового шпата, рафинированного в 0,5-т трехфазной дуговой печи [24]

Показатели	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	S
Исходное содержание, % (по массе)	2,46	0,27	2,06	0,70
Конечное содержание, % (по массе):				
после рафинирования в течение 40 мин	0,26	0,09	5,02	0,04
после рафинирования в течение 60 мин	—	0,07	4,38	0,02

ционной печи (см. табл. 12) [6]. Глинозем удаляется, по-видимому, в соответствии с реакцией



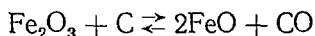
Удаление глинозема сопровождается снижением содержания фтористого кальция и увеличением содержания извести; алюминий выделяется из системы в виде летучего фторида AlF₃.

Потери всех трех компонентов — воды, кремнезема и глинозема — сопровождаются снижением содержания фтористого кальция и увеличением содержания извести;

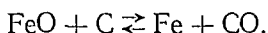
1 моль воды эквивалентен 1 моль извести, 1 моль кремнезема эквивалентен 2 моль извести и 1 моль глинозема эквивалентен 3 моль извести.

Содержание закиси железа при расплавлении шлака меняется незначительно, а содержание окиси железа значительно снижается (см. табл. 12). Присутствие окислов железа в шлаке увеличивает содержание кислорода в металле и уменьшает его способность к десульфурации металла, поэтому обычно желательнее низкое содержание окислов железа в шлаке.

Окислы железа восстанавливаются углеродом (из тигля или электрода) в соответствии с реакциями



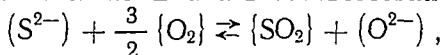
и



Вероятно, что происходят обе реакции. Окись железа (Fe_2O_3) восстанавливается при расплавлении до закиси железа (FeO) [3]. Корольки железа, находящиеся на дне плавильной печи, свидетельствуют о том, что часть закиси железа восстанавливается до металлического железа. Окись углерода, образующаяся при этом, сгорает у разливочного носка печи.

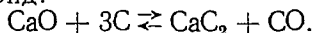
При расплавлении шлака в печи с крышкой, в которой нет доступа воздуха к жидкому шлаку, удаления серы фактически не происходит (см. табл. 12 и 13). Шлак с низким содержанием серы способствует хорошей десульфурации металла. Низкое содержание серы в шлаке достигается при расплавлении шлака с доступом окислительной атмосферы к поверхности жидкого шлака.

Сера удаляется из шлака в соответствии с реакцией



Высокое содержание углерода в шлаке может привести к увеличению содержания углерода в металле, что нежелательно для низкоуглеродистых коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов.

Шлак реагирует с графитом электрода и (или) тигля, образуя карбид:



Таким образом, шлаки, содержащие свободную известь, например шлак (70 F/30), обладают наибольшим средством к углероду.

Свинец часто связан с плавиковым шпатом в виде сульфида свинца (галена), который может быть в какой-то степени окислен и гидратирован. В некоторых сталях присутствие свинца даже в количестве 0,0005% (по массе) может быть вредным, следовательно, удаление свинца из шлака имеет важное значение. В табл. 12 показано, что рафинирование шлака в течение 1 ч в 10-кг индукционной печи снижает содержание свинца в плавиковом шпате с 0,08 до 0,001% (по массе). Свинец, выделяющийся при расплавлении, потенциально опасен для здоровья, и дым следует отводить эффективной системой удаления.

Вредность процесса ЭШП для здоровья

Применение фторидов в процессе ЭШП связано с опасностью для здоровья. Все фториды токсичны при попадании в желудок, степень токсичности зависит от их растворимости.

Фтористый кальций, который почти нерастворим (0,0016 г/100 см³ Н₂О при 18°С) [44], фактически безвреден. Однако фториды магния и бария, растворимость которых составляет соответственно 0,0076 г/100 см³ при 18°С и 0,12 г/100 см³ при 25°С, токсичны и применение их должно быть связано с мерами предосторожности [44].

Дымы, выделяющиеся из плавикового шпата (фтористого кальция) при расплавлении шлака или в процессе переплава, представляют серьезную опасность для здоровья. Вредными газообразными компонентами дымов в порядке их важности являются пары свинца, фтористый водород, пары бериллия, двуокись серы, пары мышьяка. В дымах содержится также пыль фтористого кальция, которая может вести к фторокозу животных в сельском хозяйстве, особенно рогатого скота.

В табл. 15 показаны количества токсичных веществ, которые могут выделиться из 100 кг плавикового шпата (считая, что все токсичные компоненты войдут в дымы); в таблице показаны также предельные величины [45], т.е. концентрация веществ, при которой можно безопасно работать непрерывно, а также объем воздуха, требующегося для растворения токсичных компонентов до безопасного уровня. Необходимо эффективное удаление

дымов, обеспечивающее полный отвод всех дымов из сталеплавильного цеха. Вредные составляющие дыма могут быть затем удалены в мокрых скрубберах с применением разведенного раствора гидроокиси.

Таблица 15

Токсичные вещества, выделяющиеся при плавке плавикового шпата

Газообразные вещества	Максимальное количество вещества, выделяющееся из 100 кг плавикового шпата, мг	Предельная концентрация, мг/л ³	Объем воздуха, требующегося для растворения вещества до пороговой предельной величины, л ³
Pb	1×10 ⁵	0,15	7×10 ⁵
HF	3,6×10 ⁵	2	2×10 ⁵
Be	100	0,002	5×10 ⁴
SO ₂	2,0×10 ⁵	13	2×10 ⁴
As	5×10 ³	0,5	1×10 ⁴

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Свободная энергия образования ΔG окислов при 2000°K,
кал/г·моль O₂

Реакция	ΔG , кал/г·моль O ₂	
	[46]	[37]
$\frac{4}{3} \text{La}_{(ж)*} + \text{O}_{2(г)} = \frac{2}{3} \text{La}_2\text{O}_{3(т)}$	—	—196409
$2\text{Ca}_{(г)} + \text{O}_{2(г)} = 2\text{CaO}_{(т)}$	—193000	—193720
$\frac{4}{3} \text{Ce}_{(ж)} + \text{O}_{2(г)} = \frac{2}{3} \text{Ce}_2\text{O}_3$	—183666	
$\text{U}_{(ж)} + \text{O}_{2(г)} = \text{UO}_2$		—177372
$2\text{Ba}_{(г)} + \text{O}_{2(г)} = 2\text{BaO}_{(т)}$	—172000	
$\text{Zr}_{(т)} + \text{O}_{2(г)} = \text{ZrO}_{2(т)}$	—172900	—170737
$\frac{4}{3} \text{Al}_{(ж)} + \text{O}_{2(г)} = \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_{3(т)}$	—165000	
$2\text{Ti}_{(ж)} + \text{O}_{2(г)} = 2\text{TiO}_{(т)}$	—160800	—159400
$2\text{Mg}_{(г)} + \text{O}_{2(г)} = 2\text{MgO}_{(т)}$	—152600	—157714

Реакция	ΔG , кал/г·моль O_2	
	[46]	[37]
$\frac{4}{3} Ti_{(ж)} + C_{2(г)} = \frac{2}{3} Ti_2O_{3(г)}$	-158066	-156967
$\frac{6}{5} Ti_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{2}{5} Ti_3O_5$	-152780	-151090
$Ce_{(ж)} + O_{2(г)} = CeO_{2(г)}$	-143500	
$Ti_{(ж)} + O_{2(г)} = TiO_{2(г)}$	-140400	-134908
$2C_{(г)} + O_{2(г)} = 2CO_{(г)}$	-137020	-137200
$Si_{(ж)} + O_{2(г)} = SiO_{2(ж)}$	-123100	-130300
$\frac{4}{3} B_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} B_2O_{3(ж)}$	-127934	—
$2V_{(г)} + O_{2(г)} = 2VO_{(ж)}$	-121000	—
$\frac{4}{3} V_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} V_2O_{3(г)}$	-119334	—
$2Mn_{(ж)} + O_{2(г)} = 2MnO_{(г)}$	-110400	-11200
$Nb_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{1}{2} Nb_2O_{4(г)}$	-106700	—
$\frac{4}{5} Nb_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{5} Nb_2O_{5(ж)}$	-101880	—
$\frac{4}{3} Cr_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} Cr_2O_{3(г)}$	-98600	-95700
$C_{(г)} + O_{2(г)} = CO_{2(г)}$	-94720	-94600
$\frac{12}{13} V_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{13} V_6O_{13}$	-86860	—
$2V_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{1}{2} V_2O_{4(ж)}$	-86250	—
$\frac{3}{2} Mn_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{1}{2} Mn_3O_{4(ж)}$	-80475	—
$\frac{4}{5} V_{(г)} + O_{2(г)} = \frac{2}{5} V_2O_{5(ж)}$	-77800	—
$\frac{4}{3} Mn_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} Mn_2O_3$	-68534	—

Продолжение приложения I

Реакция	ΔG , кал/г-моль O_2	
	[46]	[37]
$1,894 Fe_{(ж)} + O_{2(г)} = Fe_{0,947} O_{(ж)}$	-67200	-67920
$2H_{2(г)} + O_{2(г)} = 2H_2O_{(г)}$	-64620	-64166
	—	65400
$Mo_{(т)} + O_{2(г)} = MoO_2$	-62500	—
$\frac{3}{2} Fe_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{1}{2} Fe_3O_{4(ж)}$	-59454	—
$\frac{2}{3} Mo_{(т)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} MoO_3$	-58734	—
$\frac{8}{11} W_{(т)} + O_{2(г)} = \frac{2}{11} W_4O_{11}$	-57000	—
$\frac{2}{3} W_{(т)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} WO_3_{(ж)}$	-55666	—
$Cr_{(т)} + O_{2(г)} = CrO_{2(т)}$	-55400	—
$S_{(г)} + O_{2(г)} = SO_{2(г)}$	-51570	-52000
$\frac{4}{3} Fe_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{2}{3} Fe_2O_3$	-50200	—
$2Co_{(ж)} + O_{2(г)} = 2CoO_{(т)}$	-42800	—
$Sn_{(ж)} + O_{2(г)} = SnO_{2(ж)}$	-41950	—
$Pb_{(ж)} + O_{2(г)} = 2PbO_{(г)}$	-38200	—
$Mn_{(ж)} + O_{2(г)} = MnO_2$	-38100	—
$2Zn_{(г)} + O_{2(г)} = 2ZnO_{(т)}$	—	-37982
$2Sn_{(ж)} + O_{2(г)} = 2SnO$	-36300	—
$2Ni_{(ж)} + O_{2(г)} = 2NiO_{(т)}$	-30200	-21380
$\frac{3}{2} Co_{(ж)} + O_{2(г)} = \frac{1}{2} Co_3O_4$	-20450	—
$4CW_{(ж)} + O_{2(г)} = 2CW_2O_{(ж)}$	-12200	—
$4Na_{(г)} + O_{2(г)} = 2Na_2O_{(ж)}$	-10400	—
$2Cu_{(ж)} + O_{2(г)} = 2CuO$	+11400	—
$Pb_{(ж)} + O_{2(г)} = PbO_2$	+25000	—
$4K_{(г)} + O_{2(г)} = 2K_2O$	+44600	—

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ШЛАКОВ*

Метод обозначения шлаков пятикомпонентной системы CaF_2 — CaO — MgO — Al_2O_3 — SiO_2 разработан фирмой ЭСРТ.

Первым дается процентное содержание фтористого кальция с добавлением к нему буквы F. Затем через косые линии дается процентное содержание окислов в следующем порядке: известь, окись магния, глинозем, кремнезем; эти величины выражены в процентах по массе и округлены до 1%.

Окислы помещены в порядке снижения основности или свободной энергии образования (ΔG_{298}), т. е. в том же порядке, как это обычно принято в керамической промышленности.

Например, один из новых экспериментальных шлаков, содержащих 50% CaF_2 , 21% CaO , 5% MgO , 12% Al_2O_3 и 12% SiO_2 , имеет обозначение (50F/21/5/12/12). Шлак, содержащий 50% CaF_2 , 20% CaO , 30% Al_2O_3 , должен обозначаться (50F/20/0/30/0); в данном случае последняя цифра может быть опущена — (50F/20/0/30).

Приведенная выше схема достаточно гибка для обозначения составов шлаков, которые не полностью укладываются в пятикомпонентную систему.

В наиболее общем случае новое условное обозначение состоит из двух частей: в первой части дается содержание фтористых компонентов (отделенных буквой F), во втором — окисных компонентов.

Другими окисными фазами, которые применяются в шлаках ЭШП, являются двуокись циркония (ZrO_2) и двуокись титана (TiO_2). Если строго следовать принципу, что окислы должны быть расположены в порядке снижения их основности или свободной энергии образования, ZrO_2 и TiO_2 должны располагаться между Al_2O_3 и SiO_2 . Однако вследствие того, что эти окислы сравнительно редко применяются в процессе ЭШП, было предложено помещать их после SiO_2 , обозначая соответственно буквами Zr и Ti, следующими за их процентным содержанием.

Например, шлак ЭСРТ, содержащий 70% CaF_2 , 15% CaO и 15% ZrO , имеет обозначение (70F/15/0/0/15Zr). Аналогично этому русский пусковой шлак АН-25, который электропроводен в твердом состоянии и содержит 34% CaF_2 , 16% CaO , 8% SiO_2 и 42% TiO_2 , должен иметь обозначение (34F/16/0/0/8/42 Ti).

Кроме CaF_2 , применяются также другие фториды, например MgF_2 . Так как CaF_2 обладает большей основностью, чем MgF_2 , располагаются фториды следующим образом: CaF_2 , MgF_2 . Шлак ЭСРТ, содержащий 10% CaF_2 , 50% MgF_2 , 20% Al_2O_3 и 20% TiO_2 , должен иметь обозначение (10F/50F/0/0/20/20 Ti).

Исключением являются шлаки, в которые вообще не входят фториды. Например, шлак ЭСРТ, содержащий 5% MgO , 85% Al_2O_3 и 10% TiO_2 , обозначается (OF/0/5/85/0/10 Ti) или (0/5/85/10 Ti).

Это условное обозначение, являющееся удобным, логичным и всеохватывающим, показывает основность шлака; если наибольшие величины находятся в левой стороне, то шлак основной, если в правой — шлак кислый.

* G. Hoyle et. al. «Electro-slag refining technology». BISRA, Report MG/A/416/66.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ШЛАКОВ, ПРИНЯТЫЕ В СССР*

Обозначение	Химический состав, %
АНФ-1	$\geq 92\% \text{CaF}_2, \leq 5\% \text{SiO}_2$
АНФ-1П	95% CaF_2 , 5% CaO
АНФ-5	80% CaF_2 , 20% NaF
АНФ-6	70% CaF_2 , 30% Al_2O_3
АНФ-7	80% CaF_2 , 20% CaO
АНФ-8	60% CaF_2 , 20% CaO , 20% Al_2O_3
АНФ-9	80% CaF_2 , 20% MgO
АНФ-14	60% CaF_2 , 10% CaO , 10% MgO , 10% Al_2O_3 , 10% SiO_2
АНФ-19	80% CaF_2 , 20% ZrO_2
АНФ-20	80% CaF_2 , 20% BaO
АНФ-21	50% CaF_2 , 25% Al_2O_3 , 25% TiO_2
АН-5	5% CaF_2 , 25% CaO , 15% MgO , 55% SiO_2
АН-8	13—19% CaF_2 , 4—7% CaO , 5—7% MgO , 11—15% Al_2O_3 , 31—36% SiO_2 , 21—26% MnO
АН-10	20% CaF_2 , 10% CaO , 20% Al_2O_3 , 55% SiO_2 , 30% MnO
АН-20	20% CaF_2 , 15% CaO , 15% MgO , 30% Al_2O_3 , 20% SiO_2
АН-25	30% CaF_2 , 15% CaO , 40% TiO_2 , 10% SiO_2 , 5% Fe_2O_3
АН-29	0—20% CaF_2 , 40—45% CaO , 40—55% Al_2O_3
АН-291	20% CaF_2 , 25% CaO , 15% MgO , 40% Al_2O_3
АН-292	35% CaO , 5% MgO , 60% Al_2O_3
АН-348А	7% CaO , 45% SiO_2 , 40% MnO
АН-А1	30% NaF (или Na_3AlF_6), 10—40% NaCl
АН-М1	5% BaF_2 , 40% NaF , 55% MgF_2

* D. J. Salt. Chemical composition and melting temperature of some Russian slags used in the electro-slag refining process, ESRT, 14, 1966.

Список литературы

1. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. Цветные металлы, 1966, № 12, 74—75.
2. Морозов Е. И. и др. Титан в промышленности. Оборонгиз, 1961, с. 314.
3. Beall R. A. et al. Electroslag melting of titanium and molybdenum, 1st International Symposium on Electroslag Consumable Remelting and Casting Technology. Mellon Institute, Pittsburgh, 1967, Part I.
4. Ausmus S. L. and Beall R. A. Electroslag melting of titanium slabs», Trans. International Vacuum Metallurgy Conference. Amer. Vac. Soc., 1967, 1968, p. 675.
5. Beck E. Metallurgie, 1908, v. 5, № 17, p. 504.
6. Eitel W. Zement, 1938, № 307, S. 455 и № 310, S. 469.
7. Будников П. П., Тресвятский С. Г. ДАН СССР, 1953, т. 89, № 3, с. 479—82.
8. Mukerji J. Mem. Sci. Rev. Met., 1963, v. 60, № 11, p. 785.
9. Vaak T. Acta Chem. Scand., 1954, № 9, s. 1727.
10. Pascal P. Die Electrometallurgie des Aluminiums, Z. Electrochem., 1913, Bd. 19, № 16, S. 610.
11. Gunther G. et al. Arkiv Kemi, 1950, № 64, s. 565.
12. Gunther G. and Perlitz H. Arkiv Kemi, 1953, № 61, S. 565.
13. Латаш Ю. В. и др. Автоматическая сварка, 1960, № 9, с. 17—23.
14. Куо С. К. and Yen T. S. Huaxue Xuebao (Acta Chimica Sinica), 1964, v. 30, № 4, 381.
15. Lea F. M. and Desh C. M. Chemistry of Cement and Concrete, Arnold, 1956, 2nd ed. p. 52, Fig. 11.
16. Levin F. M. et al. Phase Diagrams for Ceramists, Amer. Ceram. Soc., 1964, Fig. 232.
17. Латаш Ю. В. и Медовар Б. И. Автоматическая сварка, 1959, № 3, с. 45—50.
18. Подгаецкий В. В., Герасименко Л. А. Автоматическая сварка, 1960, № 10, с. 93—95.
19. Трегубенко А. Ф. Сталь, 1961, № 3, с. 233—238.
20. Шульте Ю. А. и др. Сталь, 1961, № 4, с. 322—26.
21. Сперанский Б. С. и др. Автоматическая сварка, 1963, № 1, с. 9—14.
22. Williams A. C. Iron & Steel Inst. Spec. Rep. № 77, Clean Steel, 1962, p. 79.
23. Герасименко Л. А. Автоматическая сварка, 1963, № 5, с. 77.
24. Медовар Б. И. и др. Электрошлаковый переплав. Metallurgиздат, 1963.
25. Williams A. C. J. Iron & Steel Inst., 1964, v. 202, P. 7, p. 581.
26. Коллисник В. Н. Автоматическая сварка, 1964, № 4, с. 9.
27. Латаш Ю. В. Автоматическая сварка, 1965, № 9, с. 28.
28. Степанов В. В. и др. Автоматическая сварка, 1966, № 11, с. 31.
29. Лопаев Б. Е. и др. Автоматическая сварка, 1966, № 1, с. 31.
30. Будников П. П. и Тресвятский С. Г. Укр. хим. журн., 1953, № 19, с. 552.
31. Roy D. M. et al. J. Amer. Ceram. Soc., 1953, v. 36, No. 5, p. 149.
32. Alper A. M. et al. J. Amer. Ceram. Soc., 1962, v. 45, No. 6, p. 264.

33. Ruff O. and Le Boucher. Z. Anorg. Allg. Chem., 1934, № 219, S. 376.
34. Muir A. and Osborn E. F. Phase Equilibria among Oxides in Steelmaking. Addison—Wesley, 1965, p. 14.
35. Schulz D. A. and Searcy A. W. J. Phys. Chem., 1963, № 67, p. 103.
36. Blue G. D. et al. J. Phys. Chem., 1963, № 67, p. 877.
37. Kubaschewski O. et al. Metallurgical Thermochemistry, Pergamon Press, 1967, 5th ed. Table D 409.
38. Ваак Т. Acta Chem. Scand., 1955, № 9, S. 1540.
39. Степанов В. В. и Лопачев Б. Е. Автоматическая сварка, 1967, № 2, с. 39—41.
40. Kirschenbaum A. D. et al. J. Inorg. Chem., 1960, № 15, p. 297.
41. Salt D. J. Selection of fluxes for electro-slag melting, I Международный симпозиум по электрошлаковому переплаву и технологии разливки. Mellon Inst. Pittsburgh, 1967, p. I.
42. Kay D. A. там же, p. II.
43. Hlineny J. and Bužek Z. Hutnicke Listy, 1966, № 8, 1.524.
44. Weast R. C. and Selby S. M. Handbook of Chemistry and Physics. Chemical Rubber Co, 1967, 48th ed.
45. Irving Sax N. Dangerous Properties of Industrial Materials, Reinhold, 1963, 2nd ed.
46. Elliot J. F. and Gleiser M. Thermochemistry for Steelmaking. Addison-Wesley, 1960, vol. 1.
47. Kelley K. K. U. S. Bureau of Mines Bull. № 584, 1960.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

В этой главе обсуждаются общие принципы конструкции установок ЭШП, а также подробно описывается несколько промышленных установок.

ОБЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ

Первые электрошлаковые печи имели предварительно напряженную раму из конструкционной стали с электрододержателем и контактами для присоединения силовых кабелей. Электрододержатель позволял электроду перемещаться в системе направляющих только в вертикальном направлении.

Позднее промышленные печи ЭШП строили по принципу колонны с траверсой, пытаясь расширить площадь для их обслуживания и упростить конструкцию и работу печи. В печах этого типа электрододержатель можно

было поворачивать на центральной колонне, что позволяло отводить один электрод в сторону от кристаллизатора и ставить на его место другой электрод. Такое конструктивное решение было более элегантным и облегчало также замену электродов в процессе переплава. Другие альтернативные решения основывались на практике вакуумно-дугового переплава, предусматривая слегка упрощенную схему управления, но полностью используя возможности гидравлических устройств, применяемых в оборудовании ВДП, и присущих ему преимуществ зажимания, поперечного перемещения, подъема и опускания тяжелых электродов сравнительно большого поперечного сечения. Некоторые из этих печей представляли собой комбинированные печи ЭШП и ВДП, причем система вакуумных насосов отключалась, чтобы предупредить осаждение пыли из отходящих газов ЭШП. Перевод печи с работы процессом ЭШП на работу процессом ВДП и наоборот мог осуществляться обычно в течение нескольких часов.

В печах более новой конструкции для слитков весом до 40 т снова использована рамная конструкция, что позволяет переплавлять отдельные тяжелые слитки однофазным переменным током и легко извлекать из кристаллизаторов получаемые слитки.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ

Плавная подача электрода в кристаллизатор через жидкую шлаковую ванну имеет большое значение для получения успешных результатов при ЭШП. В процессе переплава положение электрода должно регулироваться с высокой степенью точности, чтобы обеспечить устойчивые величины напряжения, тока, подводимой мощности, температуры шлака. Если используется более одного электрода на печь или на кристаллизатор, то эти соображения относятся к каждому из них.

Электрод оборудуется инвентарной головкой стандартного диаметра для упрощения конструкции держателя и надежного закрепления электрода. Инвентарная головка должна сочетать электропроводность с соответствующей прочностью для поддержки электрода, а также хорошей свариваемостью, обеспечивающей легкое крепление к ней электродов.

Тележка чаще всего перемещается по системе направляющих при помощи тросовой или цепной подвески; такая конструкция обычно применяется на печах фирмы Бэрлек в сочетании с амплидиновым (электромашинный усилитель) управлением. Лебедка, на которую наматывается трос, может приводиться также и от гидравлического двигателя. Трос особенно хорошо подходит для позиционного перемещения электрода без мертвого хода, характерного для применения редукторов и универсальных муфт, и устраняет необходимость использования гидравлических труб и плунжеров. В печах фирмы Консарк применяются гидравлические системы.

На небольших экспериментальных установках обычно для управления электродом используют реверсивный двигатель постоянного тока с переменным числом оборотов, двухходовую червячную передачу и простое устройство с направляющей гайкой. На одной из крупных промышленных печей [1] на заводе Инглиш стил Корп. в Шеффилде применен такой же принцип управления. Ходовой винт вращается в направлении «вверх», а гайка с приводом от отдельного двигателя вращается в направлении «вниз», при этом достигается точное регулирование.

Если привод электрода обеспечивает лишь медленное перемещение его вверх и вниз, что необходимо для создания условий устойчивого переплава, то производительность может снижаться из-за излишнего времени пребывания электрода под нагрузкой, а замена электродов в процессе переплава сопряжена с большими потерями тепла из шлаковой ванны. Чтобы преодолеть эти недостатки, обычно предусматривается возможность быстрого перемещения электрода с управлением, независимым от системы подачи электрода при переплаве. Скорость перемещения достигает при этом 6,1—12,2 м/мин по сравнению с 0,3—0,9 м/ч при переплаве. ходовым винтом и гайкой для быстрого перемещения электродов с высокой скоростью регулирующие электрогидравлические клапаны отключаются. В системах с ходовым винтом и гайкой для быстрого перемещения применяется отдельный двигатель переменного тока или двигатель с двумя обмотками, как это сделано на установке фирмы Инглиш стил. На печах фирмы Рабе-

ри Оуэн применяется агрегат с двумя двигателями. Маленький серводвигатель мощностью 0,5 л. с. применяется для управления электродом при переплаве, а двигатель мощностью 5 л. с. с муфтой — для быстрого перемещения.

С появлением усовершенствованных полупроводниковых схем и применением их для управления двигателями переменного тока двигатель с соответствующими характеристиками крутящего момента и числа оборотов стало возможным использовать для медленного перемещения электрода, для быстрого реверсирования в процессе переплава, а также для быстрого перемещения электрода.

Чтобы обеспечить постоянство свойств продукта и облегчить труд оператора при устойчивых условиях переплава, обычно применяют автоматическое управление процессом. За исключением маленьких установок, на которых колебания тока слишком резки, чтобы их можно было использовать для управления процессом, импульсный сигнал о величине тока электрода получают обычно через трансформатор тока от шин, питающих электрод током. Величина тока электрода характеризует расстояние между концом электрода и зеркалом металлической ванны. Если этот ток уменьшается в результате увеличения пути его прохождения в шлаке, то требуется переместить электрод вниз для восстановления существовавшей ранее длины пути. При этом способе управления изменяющиеся сигналы, пропорциональные, фактическому току электрода, сравниваются с оптимальными величинами тока, рассчитанными для данных условий переплава. Любой полученный сигнал ошибки используется затем для управления работой двигателя, регулирующего положение электрода. Этот принцип применяется почти универсально; имеются некоторые варианты, в том числе с использованием наложения сигнала о величине напряжения, что позволяет управлять переплавом по величине подводимой мощности.

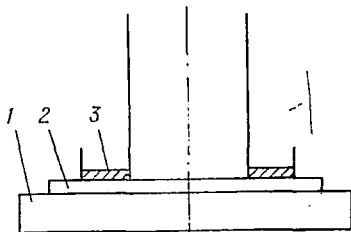
Чтобы можно было управлять процессом по температуре в зоне переплава, ЭСРТ разработала терморпару, пригодную для продолжительного погружения в шлаки, вызывающие эрозию.

КОНСТРУКЦИЯ ПОДДОНА

Площадка, или поддон, на которой помещается кристаллизатор, имеет двойное назначение — она служит опорой для слитка и кристаллизатора и обеспечивает отвод тока от донной части слитка, за исключением тех случаев, когда применяется сбалансированный трехфазный ток или способ Армстронга и бифиллярный

Рис. 22. Плита из мягкой стали в рабочем положении (фирма Белер):

1 — водоохлаждаемый мелкий поддон; 2 — плита толщиной 12,7 мм из мягкой стали; 3 — асбест



способ переплава. Поэтому поддон должен быть рассчитан на то, чтобы служить опорой для слитков любого веса, переплавляемых на данной установке, а также обладать хорошей электро- и теплопроводностью.

Чаще всего применяется составное устройство, состоящее из медной плиты, надежно закрепленной в водоохлаждаемом стальном резервуаре, обычно глубиной 25—50 мм, в зависимости от массы переплавляемых слитков и требуемой скорости отвода тепла. Для улучшения отвода тепла и обеспечения опоры для верхней медной плиты между сторонами поддерживающего стального резервуара внутри поддона встраивается спиральный трубопровод для воды. При производстве слитков большой длины способом, отличающимся от способов с откидным днищем или поднимающимся кристаллизатором, применяется контактная цапфа поддона, препятствующая потере контакта в результате охлаждения слитка и усадки. Верхняя поверхность медной плиты должна быть всегда плоской, гладкой и чистой, чтобы обеспечить электрический контакт и соответствующее уплотнение в сочетании с асбестовой прокладкой (для предотвращения протекания шлака в начальный период переплава). Толщина медной плиты поддона составляет обычно от 12,7 до 38 мм в зависимости от размеров и нагрузки. При пуске установки на сухом

шлаке и при других способах пуска, способствующих возбуждению дуги, предпочтительно иметь более толстые плиты; в этих случаях также медные плиты могут быть защищены плитой из мягкой стали дополнительно к обычно применяемым дисковым затравкам. На установке фирмы Белер плита из мягкой стали применяется также для того, чтобы улучшить контакт слитка с поддоном при подъеме кристаллизатора. На рис. 22 показано положение плиты из мягкой стали под кристаллизатором, защищающей медную плиту.

Первые экспериментальные переплавы на установках БИСРА выполнялись с применением графитового блока, служившего в качестве опоры для кристаллизатора и слитка и обеспечивающего электрический контакт. Однако восприимчивость металла, получаемого ЭШП, к углероду воспрепятствовала дальнейшему применению графитовых блоков.

КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Эксплуатационные качества кристаллизатора, связанные с его конструкцией и изготовлением, оказывают значительное влияние на качество слитков ЭШП. Некоторые из уникальных свойств слитков электрошлакового переплава — гладкая поверхность, плоская форма головной и донной части слитков, широкое разнообразие сечений, направленная вертикальная кристаллизация — находятся в зависимости от рабочих параметров кристаллизаторов и их конструкций.

При использовании кристаллизаторов из графита имело место поглощение металлом углерода и получение слитков неправильных поверхностей в результате износа кристаллизаторов, вызываемых шлаковой эрозией. Это привело к разработке водоохлаждаемых металлических кристаллизаторов.

Кристаллизаторы часто изготовляют из меди, так как она обладает высокой теплопроводностью. В одной из первых конструкций БИСРА был применен медный цилиндр внутренним диаметром 150 мм, наружным диаметром 177 мм со спиральным медным змеевиком, припаянным по его внешней стороне. Логическим развитием этой конструкции был медный кристаллизатор с водяной рубашкой. Рубашка образуется двумя коакси-

альными медными трубами, разделенными друг от друга спиральным змеевиком для воды и уплотненными сверху и снизу припаянными медными кольцами. В нижней и верхней частях кристаллизатора имеются патрубки для подвода и отвода воды.

На всех установках, описание которых приводится ниже, маленьких экспериментальных установках, печах

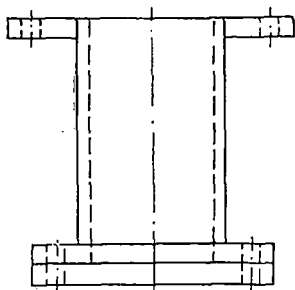


Рис. 23. Кристаллизатор обычного типа фирмы Консарк

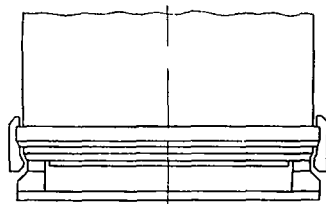


Рис. 24. Укороченный кристаллизатор фирмы Консарк

Консарк, в печах, построенных по советской лицензии, применяются медные кристаллизаторы. Кристаллизаторы Консарк — аналогичный применяемому при процессе ВДП и укороченный — показаны на рис. 23 и 24.

Капитальные вложения на медные кристаллизаторы с водяной рубашкой значительно выше, чем на кристаллизаторы из мягкой стали с орошением водой, а удельные расходы на килограмм переплавленного металла на промышленных установках выше, по-видимому, только на 10%. Однако стоимость орошаемых кристаллизаторов из мягкой стали может составлять всего 10% от стоимости медных кристаллизаторов с водяной рубашкой, что позволяет достичь экономии при выполнении исследовательских программ, при которых для сравнительно небольшого числа плавок могут потребоваться кристаллизаторы различных размеров и формы, причем подвергающиеся разным и, возможно, вредным воздействиям.

На рис. 25 показаны детали типичного орошаемого кристаллизатора из мягкой стали. Конструкция брызгал имеет решающее значение, так как для предотвра-

щения перегрева требуется, чтобы стенки кристаллизатора охлаждались равномерно и полностью.

Альтернативой для брызгал является кольцевое пространство, эквивалентное площади отверстий брызгал. Вместо расположенных по окружности отверстий

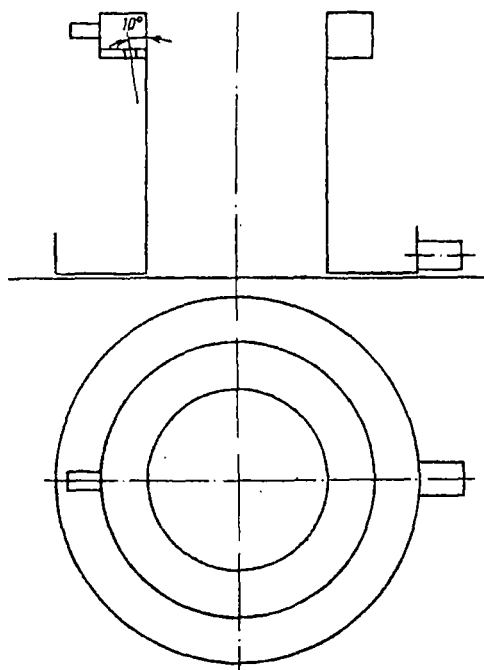


Рис. 25. Орошаемый кристаллизатор из мягкой стали

малого диаметра, наклоненных под углом 10° к стенке кристаллизатора, используется небольшое число вертикальных отверстий большего диаметра, по которым вода из коллектора поступает во вторую камеру, нижняя поверхность которой образует кольцевой зазор у вертикальной поверхности кристаллизатора, эквивалентный площади сечения отверстий, расположенных по окружности наклонных брызгал (рис. 26). Коллектор изготовляют обычно из алюминия и его можно переносить, что позволяет применять его для нескольких кристаллизаторов.

Орошаемые кристаллизаторы из мягкой стали изготовляют различных размеров, начиная от диаметра 38 мм и до поперечного сечения 1016×203 мм. Длина их, по-видимому, не ограничена, успешно работают кристаллизаторы длиной

до 2740 мм. Необходимо уделять большое внимание охлаждению углов орошаемых кристаллизаторов квадратного или прямоугольного сечения. Обычно для того, чтобы обеспечить возникновение и поддержание пленки охлаждающей воды, применяются закругленные углы, форма которых за-

висит от имеющегося оборудования для гибки листов. Большие плоские поверхности на квадратных и прямоугольных кристаллизаторах должны быть соответствующим образом укреплены, чтобы избежать корбле-

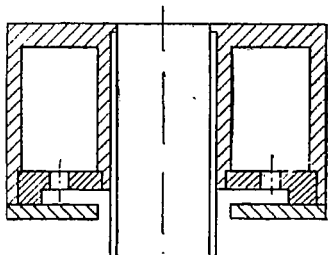
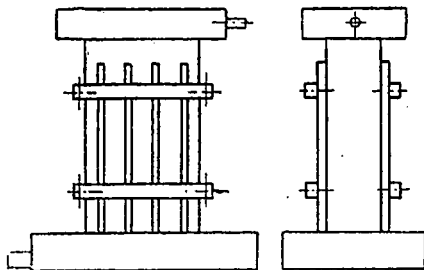


Рис. 26. Алюминиевый коллектор для воды

Рис. 27. Удлиненный кристаллизатор для слитков прямоугольного сечения



ния. Такая конструкция, рассчитанная эмпирически, показана на рис. 27.

Методы расчета кристаллизаторов и их конструкции постоянно совершенствуются. Таким усовершенствованием, целью которого является достижение экономии в результате уменьшения размеров кристаллизатора для «однократной» или кратковременной работы, служит применение водоохлаждаемых секционных кристаллизаторов, которые позволяют производить широкий сортамент профилей и слитков при небольшом числе стан-

дартизованных единиц (конструкция ЭСРТ). Типичная схема показана на рис. 28.

Чтобы предупредить ухудшение качества поверхности нижнего слитка в результате переохлаждения «застойной» водой, накапливающейся в желобе орошаемых

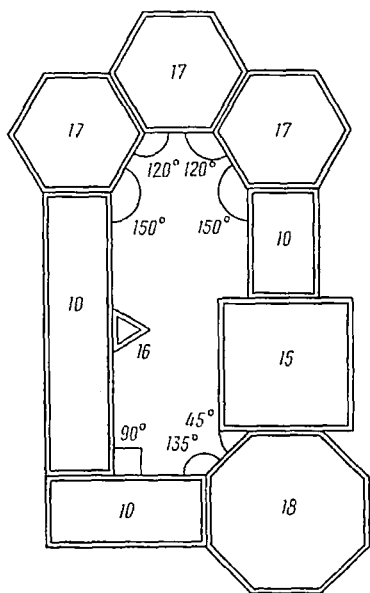


Рис. 28. Секционные водоохлаждаемые кристаллизаторы. Показана возможность использования различных секций для изготовления слитков сложных профилей (показанная схема не обязательно применяется практически)

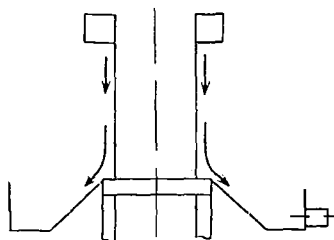


Рис. 29. Конусообразный поддон

кристаллизаторов, в конструкции фирмы Бэрлек применяется принудительное направленное перемешивание. Отдельная струя воды или воздуха высокого давления поступает к соплу, расположенному горизонтально и касательно к корпусу кристаллизатора на уровне плоскости пересечения стенки кристаллизатора с поддоном.

Двумя другими усовершенствованиями, находящимися еще в ранней стадии разработки, является применение конических поддонов к кристаллизаторам и подвижного водяного желоба, т. е. такого, который может передвигаться с такой же скоростью подъема, как граничная поверхность между жидким металлом и шлаком. Первая конструкция, показанная на рис. 29, препятствует накоплению воды на любом уровне выше уровня основания вертикального корпуса кристаллизатора.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Электрошлаковый процесс является процессом нагрева сопротивлением, и его потребности в электроэнергии не предъявляют особых требований к передаче высоких мощностей. В зависимости от поперечного сечения слитка требуется напряжение 15—17 в при силе тока 500—50000 а. Напряжение в распределительной сети обычно бывает 11 кв, что требует применения трансформаторов.

Могут применяться трансформаторы с бесступенчато регулируемой мощностью и непрерывным переключением вторичной обмотки, а также трансформатор и соответствующие регуляторы. Дроссель насыщения, регулирующий подвод тока к обычному трансформатору ЭСП, прекрасно удовлетворяет требованиям бесступенчатого регулирования, и на все большем числе новых установок применяются такие устройства. Полупроводниковые тиристорные устройства не рекомендуются для регулирования подачи тока к электрошлаковым печам вследствие их недостаточной способности противостоять кратко- или долговременным коротким замыканиям, которые могут возникать при пуске установки или в процессе ее работы.

В целях защиты от коротких замыканий обычно применяются устройства, ограничивающие ток во вторичной цепи трансформатора. Эти устройства могут представлять собой термические, звуковые или визуальные сигнальные устройства или приборы для прерывания тока во вторичной цепи. Реактанц водоохлаждаемых медных или алюминиевых шин и кабелей обычно достаточен для гашения любых колебаний, которые могут возникнуть во время обычного промышленного переплава. Однако на опытной установке ЭСРТ был подключен отдельный серийный реактор, чтобы обеспечить дополнительную защиту трансформатора во время экспериментов по установлению плавной работы.

Силовые кабели должны прокладываться по кратчайшему пути от трансформатора до электрододержателя и по нему же возвращаться от поддона к трансформатору, чтобы уменьшить индуктивную петлю и обеспечить эффективность передачи тока. Коэффициент мощности на установках, работающих на однофазном

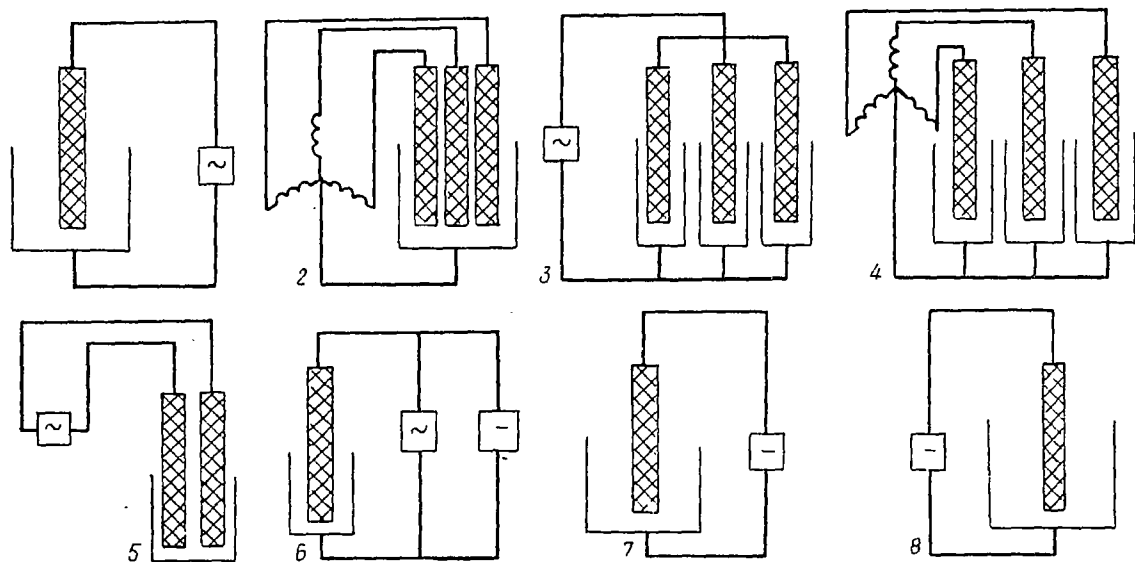


Рис. 30. Различные способы электроснабжения при электрошлаковом процессе:

1 — однофазный переменный ток; 2 — трехфазный переменный ток; 3 — однофазный переменный ток при переплаве трех слитков; 4 — трехфазный переменный ток при переплаве трех слитков; 5 — бифилярная схема; 6 — комбинированное применение переменного и постоянного тока; 7 — постоянный ток, электрод — положитель; 8 — постоянный ток, электрод — отрицателен

переменном токе, составляет обычно 0,85—0,92. Могут применяться емкостные сопротивления для уменьшения максимальной потребляемой мощности путем повышения коэффициента мощности до 0,98, но получаемые при этом экономические преимущества различны на разных печах и зависят от местных условий.

Электроэнергия к установкам может подаваться различными способами (рис. 30).

Сравнение работы установок ЭСП на переменном и постоянном токе с точки зрения электротехники

Использование переменного тока устраняет необходимость в выпрямителе, применение которого требует дополнительных капитальных и эксплуатационных расходов и места для его размещения.

При применении постоянного тока в цепи установки отсутствует реактивное сопротивление и проблемы прокладки кабелей не так остры. При постоянном токе устраняется необходимость в дополнительном управлении переплавом для компенсации реактанца по мере расплавления электрода. Уменьшение реактанца позволяет увеличить скорость переплава к концу этой операции, так как уменьшается индуктивная петля, имеющая место при питании переменным током.

Переплав при постоянном токе не связан с проблемами коэффициента мощности в цепи ЭСП и имеет, таким образом, преимущества при производстве очень крупных слитков, так как коэффициент мощности имеет тенденцию к снижению при увеличении размеров слитков.

Присоединение выпрямителей к магистральной сети при высокомошных нагрузках постоянного тока может повести к искажению формы волны в сети, превышающему допустимое органом электроснабжения. Влияние гармоник на магистральную сеть может быть уменьшено при условии наличия достаточной дополнительной рабочей нагрузки, в противном случае потребуются дорогостоящие фильтры для смягчения искажений формы волны.

Поверхностный эффект передачи переменного тока позволяет использовать полые инвентарные головки для крепления к ним электродов, т. е. при той же прочности

и меньшей массе меньше тепла отводится с охлаждающей водой. При постоянном токе поверхностный эффект отсутствует.

УСТАНОВКИ ГОПКИНСА

Первая установка Гопкинса, на которой применялась рулонная полоса и порошковый шлак, показана на рис. 31 [2]. Полоса проходит через трубоформирующую машину и превращается в цилиндрический электрод, который проходит через контактный башмак, входит в кристаллизатор и погружается в шлаковую ванну. Расстояние между концом электрода и контактным башмаком поддерживалось постоянным в течение всего процесса переплава. При израсходовании первого рулона задний конец полосы приваривали к переднему концу полосы следующего рулона без перерыва в ходе переплава. Переплав начинался методом, который теперь называют «твердым стартом» (в отличие от «жидкого старта»).

Легирующие элементы в дробленом, сыпучем состоянии хранились в бункерах. Дозаторы, приводимые от двигателя машины для формования трубы, контролировали количество легирующих элементов, подаваемых в накопительную воронку, и скорость их подачи; затем эти добавки поступали по трубке в центральную часть электрода в кристаллизатор.

Слиток при фактически 100%-ном усвоении элементов образовывался в водоохлаждаемом кристаллизаторе, установленном на водоохлаждаемом поддоне или плите. Ток от источника тока поступал к башмаку и возвращался в источник через поддон.

Этот принцип работы использовался в течение многих лет, но он имел один серьезный недостаток [3]. Потребители иногда находили включения полосчатой формы в готовых продуктах. Эти дефекты прослеживались до нерасплавленных кусочков электрода, которые падали в затвердевающую ванну жидкого металла. Хотя процесс подвергался довольно строгому контролю, включения полностью устранить никогда не удавалось. В связи с этим в начале пятидесятых годов трубчатые электроды были заменены сплошными электродами с таким же по существу химическим составом, что и получаемые из них готовые продукты. Дозаторы, однако, еще остава-

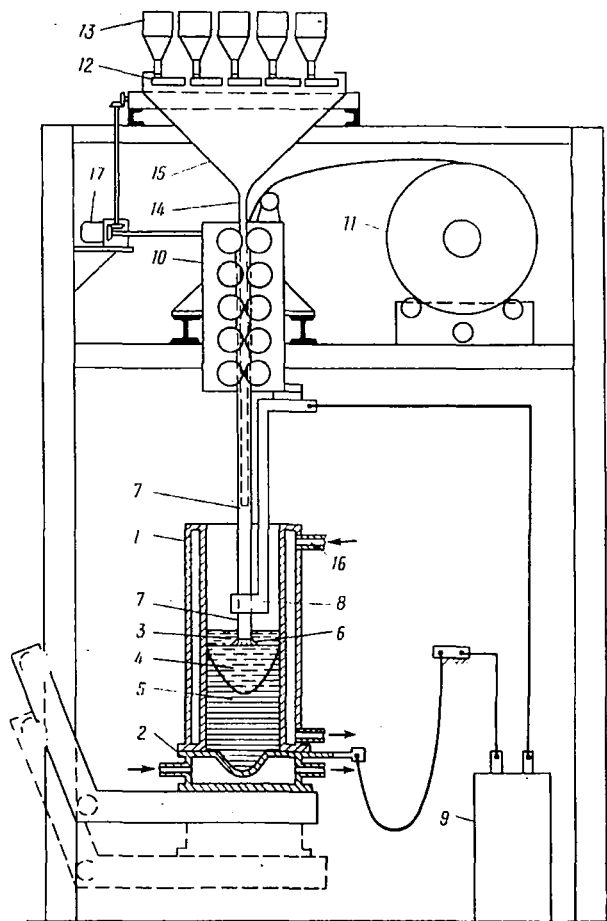


Рис. 31. Схема установки Гопкинса:

1 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 2 — водоохлаждаемый поддон; 3 — жидкий флюс; 4 — жидкий металл; 5 — затвердевший металлический слиток; 6 — разряд тока; 7 — трубчатый расходоуемый электрод; 8 — контактный башмак; 9 — источник электроэнергии; 10 — устройство для формирования трубы; 11 — рулон полосы; 12 — дозаторы для компонентов сплава; 13 — бункера для компонентов сплава; 14 — питающий патрубок; 15 — накопительная воронка; 16 — подача воды; 17 — электродвигатель

лись для подачи флюсов и легирующих элементов, для регулирования минимальных изменений химического состава в данном сорте металла.

Суммарная производственная мощность четырех установок Гопкинса на заводе в МакКиспорте составляла 5400 т/год легированных сталей.

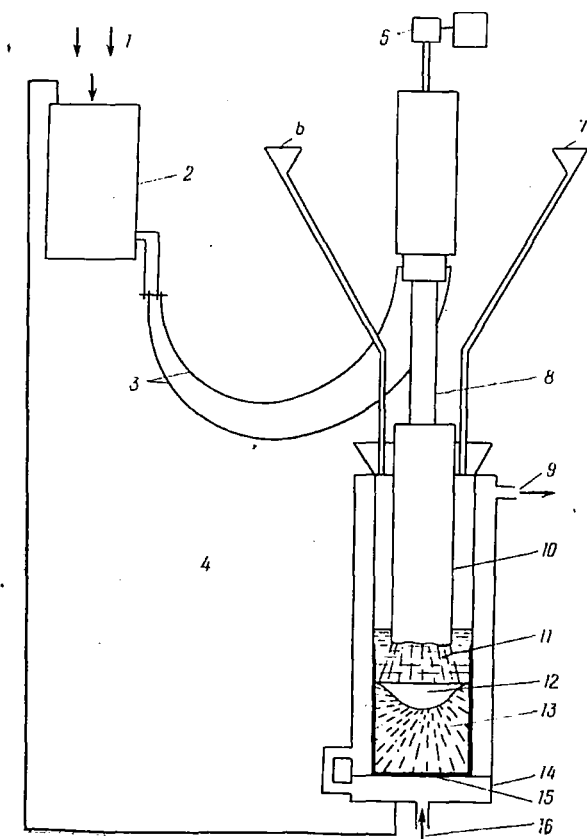


Рис. 32. Схема расположения оборудования при процессе Гопкинса [2]:

1 — источник переменного тока; 2 — выпрямитель постоянного тока; 3 — электропитание (водоохлаждаемые медные кабели и шины); 4 — пульт управления с амплитудным регулятором положения электрода (имеются вольтметр, амперметр, ваттметр и приборы для указания положения электрода); 5 — подъемник; 6 — подача легирующих; 7 — подача флюсов; 8 — держатель; 9 — патрубок отвода воды; 10 — электрод; 11 — шлак; 12 — металлическая ванна; 13 — затвердевший слиток; 14 — медный поддон; 15 — затвердевшая шлаковая корочка; 16 — патрубок для подвода воды

На рис. 32 схематически показано применявшееся оборудование. Электрод обратной полярности был присоединен к источнику постоянного тока низкого напряжения и высокой силы и подвешен на вертикальном ползуне в водоохлаждаемом двухстенном медном кристаллизаторе. Обычно применялся пуск на твердом шлаке.

Чтобы повысить равномерность затвердевания металлической ванны, использовали устройство для вращения кристаллизатора.

Каждая печь была оборудована двумя ползунами. Кристаллизатор был укреплен на сочлененном шарнире, что позволяло последовательно переплавлять электроды в один слиток. Сила тока, поступающего к металлической ванне, регулировалась почти прямо пропорционально скорости подачи электрода.

По мере увеличения скорости подачи электрода расстояние между электродом и жидкой ванной уменьшалось, что вело к увеличению силы тока.

По лицензионному соглашению с фирмой Ферт Стерлинг фирма Лектромелт исследовала конструкции печей, объединяющих в одном устройстве возможности процессов ЭШП и ВДП [4]. Такая установка, показанная на рис. 33, представляет собой по существу устройство с двумя рабочими головками и одним плавильным стендом.

Во вращающейся несущей раме,двигающейся по полукольцевой направляющей, помещены два электродных устройства, конусообразное устройство для ВДП, система смешивания и подачи флюсов и отдельные системы привода и управления для обоих электродных устройств. Рама двигается вокруг осевого стержня с вертлюгом.

При работе процессом ВДП съемную верхнюю часть средней секции необходимо было прикреплять к одному из электродных устройств и опускать затем на фланец нижней части средней секции, обеспечивая тем самым необходимое вакуумное уплотнение.

При работе процессом ЭШП съемная секция удалялась и приводилась в действие система подачи флюса. Если для получения слитка заданных размеров необходимо было переплавить более одного электрода, то во время переплава ко второму электродному устройству

прикрепляли второй электрод. После завершения переплава рама поворачивалась до установки второго электрода в рабочее положение, после чего процесс продолжался.

Альтернативная конструкция может включать один ползун (или головку) и два плавильных стенда. Такая

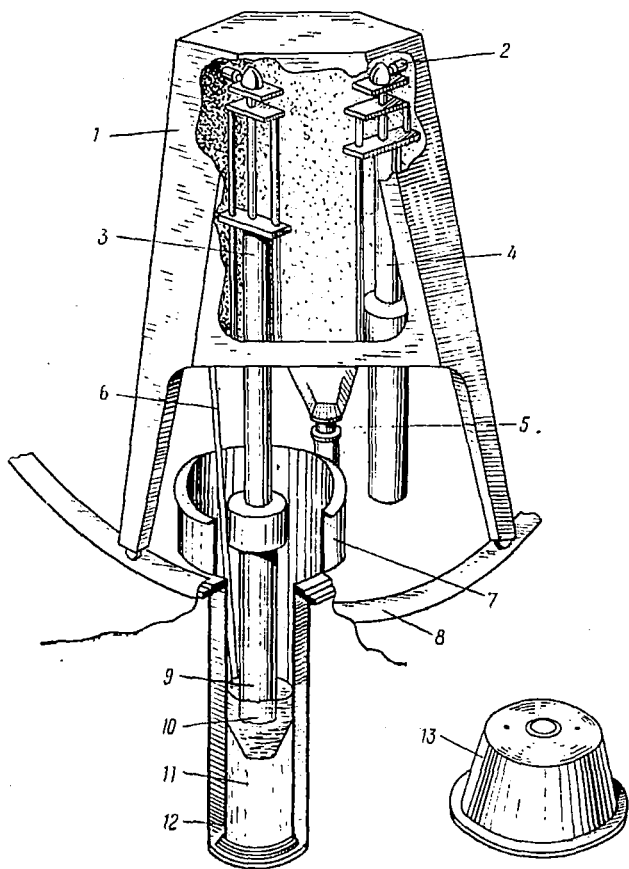


Рис. 33. Комбинированная вакуумная дуговая и электрошлаковая печь, показанная в положении для работы процессом ЭСП [4]:

1 — несущая конструкция для двух электродных устройств; 2 — отдельные системы привода плунжеров; 3 — плунжер для вакуумно-дугового или электрошлакового переплава; 4 — плунжер для электрошлакового переплава; 5 — вертикаль несущей конструкции; 6 — съемная система подачи флюса; 7 — нижняя часть средней секции; 8 — полукольцевая направляющая; 9 — электрод; 10 — шлаковая ванна; 11 — слиток; 12 — кристаллизатор; 13 — съемная верхняя часть средней секции (применяется при вакуумно-дуговом переплаве)

конструкция очень похожа на обычную печь ВДП. Этот способ заслуживает внимания в тех случаях, когда работают с наращиванием электрода.

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА МОЩНОСТЬЮ 160 *кв*а ФИРМЫ ЭСРТ

В опытной установке мощностью 160 *кв*а фирмы ЭСРТ применяется опорная рама из конструкционной стали, в которой помещены электрододержатель и контакты для силовых кабелей; электрододержатель зажат в системе направляющих таким образом, что возможно только его вертикальное перемещение.

Как видно из схематического изображения установки (рис. 34), кристаллизатор опирается на водоохлаждаемый медный поддон 1, установленный на приводной тележке 2, которая может передвигаться по рельсам в канаве. Кристаллизатор может быть прикреплен к тележке зажимом 3. Электрод 4 снабжен конусообразным штырем 5, закрепляемым в разъемном конусообразном зажиме 6, который является частью водоохлаждаемого медного электрододержателя 7. Электрододержатель закреплен в салазках 8,двигающихся по направляющим 9, изолированным от опорной рамы установки. Вертикальное перемещение электрододержателя обеспечивается двигателем 10 через цепную передачу 11. Для сбалансирования массы электрода применяется противовес 12 переменной массы.

Вода к кристаллизатору, поддону и электрододержателю поступает из системы с контролируемым расходом, оборудованной сигнальной системой на случай недостачи воды. Электрический ток от трансформатора 13 подводится по шинам и гибким кабелям. Для отвода газов из верхней части кристаллизатора применяется эксгаустер с гибким газоотводом.

Трансформатор мощностью 160 *кв*а подает ток 4000 *а* при напряжении 40 *в* или 2000 *а* при напряжении 50—80 *в* с десятью ступенями регулирования напряжения. Устройства для защиты от перегрузки рассчитаны на ток в десять раз выше тока первой ступени (364 *а*) в течение 12 *сек*. Этот интервал необходим при пуске установки, когда во вторичной обмотке трансформатора могут возникнуть большие токи в результате коротких замыканий. Серийный реактор ограничивает ток

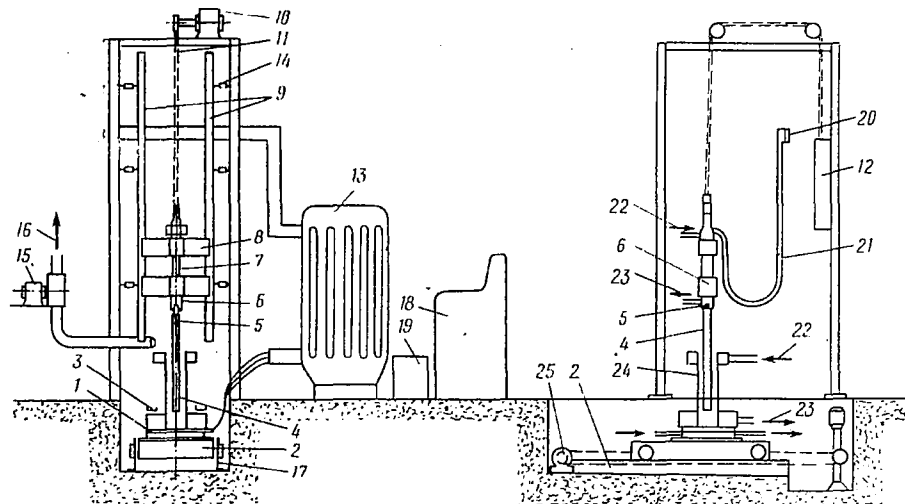


Рис. 34. Схема установки электрошлакового переплава мощностью 160 ква:

1 — водоохлаждаемый медный поддон; 2 — тележка; 3 — зажимы кристаллизатора; 4 — электрод; 5 — конусообразный штырь; 6 — разъемный конусообразный зажим; 7 — электрододержатель; 8 — салазки электрододержателя; 9 — направляющие; 10 — двигатель подъемного устройства электрода; 11 — цепная передача; 12 — противовес; 13 — трансформатор; 14 — изоляторы; 15 — эксгаузер; 16 — выпуск газов в атмосферу; 17 — рельсы для тележки; 18 — пульт управления; 19 — дроссель; 20 — шины; 21 — гибкий кабель к электрододержателю; 22 — патрубок для подачи воды; 23 — патрубок для отвода воды; 24 — орошаемый стальной кристаллизатор; 25 — двигатель привода тележки

короткого замыкания величиной, не более чем в десять раз превышающей ток полной нагрузки, защищая таким образом магистральные сети.

Система регулирования имеет своей целью поддержание постоянной величины тока (рис. 35). Импульс (от

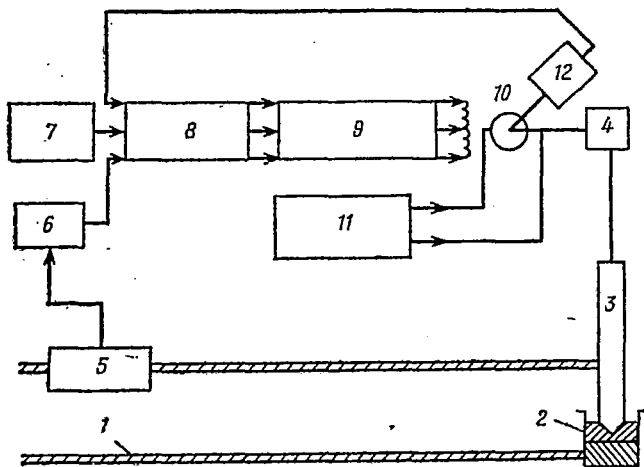


Рис. 35. Система регулирования установки ЭСП:

- 1 — источник переменного тока; 2 — кристаллизатор; 3 — электрод; 4 — редуктор; 5 — трансформатор тока; 6 — фильтр сигнала; 7 — эталонная величина напряжения; 8 — сервоусилитель; 9 — реле автоматического переключения и приборы ручного управления; 10 — серводвигатель; 11 — источник питания постоянным током обмотки якоря и балластное сопротивление; 12 — тахогенератор

трансформатора тока на главных шинах) выпрямляется и поступает в сервоусилитель при напряжении, пропорциональном току в цепи. Этот импульс сопоставляется с предварительно установленной величиной напряжения, пропорциональной желаемой величине тока. Разность двух величин вводится в сервоусилитель, выходной сигнал которого управляет серводвигателем привода электрода. Электрод перемещается в направлении, позволяющем сбалансировать оба импульса и, таким образом, восстановить требуемую исходную величину тока. Система стабилизируется отрицательной обратной связью от тахогенератора, приводимого серводвигателем.

Электрошлаковый процесс является по существу химическим процессом и для полной реализации его потенциальных возможностей существенное значение имеет знание протекающих основных реакций. Необходимые данные могли бы быть получены на промышленной установке, но эксперименты на ней дорого стоят и утомительны. Поэтому была создана установка лабораторного масштаба. Рама установки состоит из опоры с колонной для электрода. К опоре прикреплена заземляющая пластина размером $76 \times 76 \times 12,7$ мм из меди с внутренней полостью для охлаждающей воды. Водоохлаждаемый кристаллизатор изготовлен также из медной полосы толщиной 3,25 мм, высота его 76 мм, внутренний диаметр 38 мм. Эффективная циркуляция воды обеспечивается спиральной медной трубкой, помещенной в рубашку шириной 9,5 мм. Предусмотрены два зажимных болта, проходящих через верхнюю пластину кристаллизатора и крепящих его к основанию. Обычно применяется электрод диаметром 12,7—19,5 мм, помещенный в держатель из меди с толщиной стенки 6,35 мм. Этот держатель прикреплен к латунному блоку, скользящему по латунным направляющим.

Шунтовой двигатель постоянного тока приводит электрод через двухходовую червячную передачу. Максимально возможный крутящий момент достигается при всех скоростях двигателя регулированием тока якоря. Переключающее устройство позволяет включать и выключать двигатель и моментально реверсировать его при всех скоростях. Скорость подачи регулируется в пределах 0—100 мм/мин.

Для переплава применяется однофазный переменный ток от трансформатора с масляным охлаждением (250 в, 0—60 вт). Напряжение во вторичной обмотке переключается бесступенчато; возможно получение тока 1000 а по меньшей мере в течение 15 сек, необходимых для начала переплава. При установившихся условиях переплава требуется ток приблизительно 400 а. Потери энергии снижаются передачей тока большой силы при низком напряжении по медным шинам достаточного поперечного сечения и до оплеткам. Применяются плавкие предохранители на 60 а; прочие приборы представлены ампер-

метром 0—1000 а и вольтметром 0—100 в. Имеются расходомеры и устройства для регулирования подачи воды к кристаллизатору и поддону.

ОДНО- И ТРЕХФАЗНЫЕ УСТАНОВКИ ФИРМЫ БЭРЛЕК [6]

Двумя основными особенностями одно-и трехфазных печей ЭШП фирмы Бэрлек являются их многоцелевое назначение и наличие устройств для пуска на жидком шлаке.

Могут быть применены различные варианты работы для одновременного переплава одного, двух или трех слитков. Если три станда работают отдельно, то на каждом из них можно переплавлять по одному слитку диаметром до 355 мм и, поскольку при этих условиях возможна одновременная работа, последовательный пуск позволяет работать почти непрерывным процессом. При другом варианте работы, используя два станда, можно изготавливать один слиток диам. 355 мм и второй слиток диам. 610 мм. Оба слитка переплавляются на однофазном переменном токе, для слитка диам. 610 мм используются два из трех 360-кВА трансформаторов, соединенные параллельно. При работе с одним стандом можно изготовить слиток диам. 915 мм, применяя для этого трехфазный ток и три электрода.

Для расплавления шлака служит одноэлектродная дуговая печь, установленная на тележке, движущейся по рельсам. Печь может подниматься и опускаться или перемещаться в стороны для точной установки донного выпускного желоба над кристаллизатором для заливки в него шлака.

Для управления работой этой установки нужно иметь трех операторов; после пуска стандов работа происходит автоматически. После заливки жидкого шлака в нижнюю часть кристаллизатора электрод опускают при помощи ручного управления для обеспечения правильных условий работы, после чего включается автоматическое управление. Каждый электродный стенд обслуживается однофазным трансформатором мощностью 360 кВА и регулятором. Регуляторы могут быть включены параллельно, чтобы обеспечить подачу однофазного тока мощностью до 1080 кВА. Система подачи воды для охлаждения кристаллизаторов, силовых кабелей и поддонов ра-

ботаает в замкнутом цикле, включающем наружную гравитацию; расход воды составляет $0,9 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Вода поступает к кристаллизаторам по гибким шлангам, присоединенным к выходному патрубку водопровода вблизи стендов для переплава, а стекает через решетки в фундаментах. Каждый из кристаллизаторов установлен на поддоне, помещенном на тележке. После выплавки слитка водяные шланги и силовые кабели разъединяют и тележку с находящимся в кристаллизаторе слитком вручную перемещают по рельсам на запасной путь. Основной путь таким образом освобождается для подачи к стенду следующей тележки с подготовленным к работе кристаллизатором. После этого тележка с первым кристаллизатором, слиток в котором частично охладился, выталкивается на основной путь и может быть доставлена в отделение стрипперования и подготовлена для следующей операции.

Скорость переплава составляет до $10 \text{ кг}/\text{мин}$; полная производительность достигает $2000 \text{ т}/\text{год}$. В целях обеспечения экономичности литые электроды изготовляют в том же цехе, применяя для этой цели двухтонные двухкорпусные печи мощностью по 900 кВт , в которых переплавляют лом, поступающий из складских устройств, находящихся в том же здании.

ПЕЧИ ТИПА КОНСАРК [7]

Не вызывает удивления, что печи ВДП оказали значительное влияние на конструкцию печей ЭШП фирмы Консарк, так как эта фирма была пионером в применении в США в начале шестидесятых годов несложных автоматических вакуумных дуговых печей. Фирма Консарк изготовляет печи двух типов с применением одного и того же принципа размещения основного оборудования (рис. 36). Это может быть печь ЭШП или комбинированная печь ЭШП/ВДП в зависимости от требований фирмы-заказчика. Целью фирмы Консарк является создание автоматизированного агрегата, работающего непрерывно с минимальной потребностью в рабочей силе. На всех печах имеются по два стенда — когда на одном стенде идет подготовка к работе, на другом происходит переплав. Переход с одного стенда на другой в конце переплава состоит в простом переключении тока, охлаж-

дающей воды и системы сервоконтроля на стенд, подготовленный к следующей операции. На это обычно требуется 1—1,5 мин.

Система гидроуправления, используемая для перемещения электрода в двух направлениях, включает минимальное число движущихся деталей и особенно пригодна для точной установки очень тяжелых электродов. Кроме

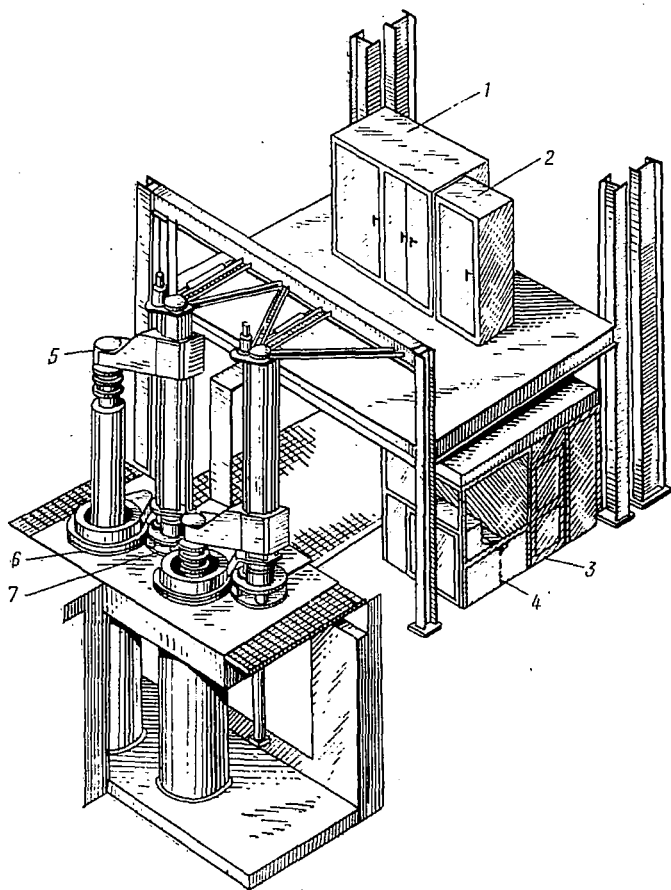


Рис. 36. Печь фирмы Консарк для непрерывного электрошлакового переплава слитков диаметром до 610 мм:

1 — однофазный трансформатор на 15 тыс. а с дросселем насыщения; 2 — контактор; 3 — помещение управления; 4 — панель управления; 5 — двухпозиционная система подвески; 6 — стеллаж для переплава; 7 — от выключателя тока на 20 тыс. а с гидроприводом

того, гидроэнергия может быть применена для привода других механизмов печи.

На печах для получения слитков диаметром 510—760 мм применяется консольная подвеска электродов с гидроприводом, но для более крупного оборудования гидравлические устройства размещаются непосредственно над электродом.

Системы питания переменным током с дросселем насыщения и постоянным током, впервые примененные фирмой Консарк, обеспечивают независимое бесступенчатое регулирование тока и напряжения в интервале обычных условий работы агрегата. Возможно поэтому точно выдерживать электрические параметры в соответствии с требованиями переплава. Кроме того, при подпитке головной части слитка в конце переплава подводимая мощность может быть автоматически и плавно снижена в соответствии с предварительно запрограммированным циклом с применением программирующего устройства со слежением по заданной кривой. Это обеспечивает устойчивую подпитку без снижения выхода годного из-за неправильной подачи тока и ошибки оператора.

Опыт фирмы Консарк в США показывает, что при работе на постоянном токе при положительном электроде будет наименьшая скорость переплава, но облегчается старт; при отрицательном электроде наивысшая скорость переплава, но затрудняется старт; при работе на переменном токе скорость переплава средняя.

На небольших печах ЭШП применение переменного тока является предпочтительным вследствие приемлемых скоростей переплава и меньших удельных капиталовложений, чем при применении постоянного тока. Однако при выплавке слитков больших размеров и применении однофазного переменного тока могут возникнуть трудности (несбалансированные нагрузки), поэтому предпочитают постоянный ток, так как его применение обеспечивает сбалансированную трехфазную нагрузку в сети и не создает трудностей с колебаниями коэффициента мощности.

Фирма Консарк предпочитает использование водоохлаждаемых деталей системы электропитания, так как они более компактны и менее дороги, чем эквивалентные воздухоохлаждаемые детали.

Если имеется дроссель насыщения, то его применяют для регулирования тока электрода. Быстрое регулирующее воздействие дросселя ограничивает колебания тока. Напряжение в шлаковой ванне регулируется чувствительной электрогидравлической сервосистемой, работающей в замкнутом цикле.

Хотя по причинам, указанным ранее, предпочитается «жидкий старт», предусматриваются устройства для добавки дополнительного или компенсирующего шлака при переплаве длинных слитков. Первоначально использовались вибропитатели, но теперь предпочитают применять автоматическую систему дозирующего взвешивания, вследствие снижения на один порядок величины ошибки в скорости подачи. Для записи добавок шлака применяется ленточный самописец.

Как показано на рис. 36, фланец верхней части кристаллизатора закреплен на уровне площадки в резервуаре с принудительно циркулирующей водой. Аналогично с практикой ВДП применяются неизолированные медные тигли, которые, как утверждают, имеют в отличие от стальных тиглей неограниченную стойкость и не нуждаются в уходе.

Простые, автоматизированные и экономически обоснованные печи вышеописанных типов обеспечивают низкую удельную стоимость электрошлакового переплава.

УСТАНОВКА МЕТАЛЕКТРИК МОЩНОСТЬЮ 375 *кВа* ФИРМЫ ЭСРТ

Столкнувшись с трудностями в отношении приемлемости масштабных сравнений слитков, полученных на опытной установке мощностью 160 *кВа*, фирма ЭСРТ искала пути к решению этой проблемы на более крупной установке. Была выбрана печь Металектрик мощностью 375 *кВа*, работающая на однофазном переменном токе с дросселем насыщения для регулирования напряжения, пригодная для выплавки слитков диаметром до 355 мм при обычных методах работы, или диаметром 510 мм, длиной до 9,05 м и массой до 5 т при применении специальных методов работы. Электрод может перемещаться на расстояние 7,3 м, что обеспечивает возможность переплава электродов длиной 4,87 м.

Два рукава электрододержателя перемещаются на двух опорных колоннах коробчатого сечения. Привод электродной тележки осуществляется от отдельной лебедки с системой тросов; лебедка приводится гидравлическим двигателем, на валу которого эксцентрично насажен диск, действующий как кулачок на сопряженный с ним вал лебедки, и насосным агрегатом, управление которым в свою очередь осуществляется регулятором тока. Каждая из электродных колонн и электрододержатель могут вращаться отдельно вокруг вертикальной оси, что позволяет заменять электроды в процессе работы.

Электроды зажимаются в водоохлаждаемых держателях, изготовленных из меди с высокой электропроводностью. Давление сжатия снимается посредством пневмоцилиндра, встроенного в рукав. Механизм разжатия электрододержателя оборудован соответствующими блокировочными устройствами, предотвращающими выпадение электродов, находящихся под током, во время переплава.

Чтобы обеспечить точное регулирование в процессе переплава, применяется высокоэффективная система подвески электродов с гидравлическим приводом. К электрогидравлическому сервоклапану, управляющему приводом электрода, поступает положительный или отрицательный сигнал от усилителя. Ток электрода воспринимается контрольной схемой и сравнивается с предварительно установленной эталонной величиной тока. Разность этих двух величин используется для выдачи сигнала соответствующей величины и полярности, который поступает в полупроводниковый усилитель. Усиленный сигнал передается к электрогидравлическому клапану, который в свою очередь регулирует расход и подачу гидравлической жидкости к приводу.

Эта система управления обеспечивает точность положения электрода в пределах $\pm 0,025$ мм, скорость перемещения электрода вниз в пределах 2,5—76 мм/мин, а также скорость перемещения электрода до 3 м/мин при ручном управлении с целью быстрой замены его новым электродом.

Выбор мощности для «работающего» электрода выполняется посредством пневматических рубильников, заблокированных для работы без нагрузки с трехпозици-

онным выключателем со съёмным ключом на панели управления.

Подача охлаждающей воды к кристаллизаторам, поддонам, кабелям и электрододержателям осуществляется от системы водоснабжения, работающей в замкнутом цикле.

Имеется отдельная печь, обеспечивающая «жидкий старт» установки. Это обычная индукционная печь с графитовым тиглем ёмкостью 68 или 36 кг шлака. Печь установлена на тележке с соответствующим силовым узлом гидравлического дистанционного управляемого устройства наклона печи, обеспечивающего перелив жидкого шлака из носка печи в промежуточный ковш, желоб и отверстие в основании кристаллизатора.

Печь ЭШП помещают в колодце глубиной 4,6 м при высоте колонн 9,15 м, что позволяет поднимать электроды длиной 4,87 м выше верха кристаллизаторов высотой 3,05 м. Это упрощает процедуру замены электродов при производстве длинных слитков из нескольких электродов более удобных размеров. Кроме того, имеется соответствующая габаритная высота для осуществления экспериментальных работ.

МИНИАТЮРНАЯ УСТАНОВКА МЕТАЛЕКТРИК

Маленькая установка Металектрик была сконструирована для проведения лабораторных исследований и оценки влияния ЭШП на химический состав различных сплавов по тому же принципу, что и миниатюрная установка БИСПА/ЭСРТ. В то время как установка ЭСРТ служила лишь прототипом, модель Металектрик производится в промышленном масштабе — много таких установок работает как на промышленных предприятиях, так и в научных институтах.

Обычно поставляется трансформатор мощностью 25 кВА с переключением напряжения без нагрузки вручную с пятью ступенями величин выходного напряжения или с бесступенчатым регулированием напряжения контроллером типа Brentford.

Электрод приводится по принципу гайки с ходовым винтом от двигателя постоянного тока с переменным числом оборотов, установленным выше двух направляющих, по которым движется электрододержатель. Име-

ется несложное управляющее устройство, в котором помещены вольтметр, амперметр и приборы управления двигателем привода электрода.

Применяется водоохлаждаемый кристаллизатор диам. 38 мм, закрепленный над обычной (для оборудования таких размеров) графитовой пусковой подушкой. Все оборудование может быть размещено на лабораторном столе.

УСТАНОВКИ ФИРМЫ РАБЕРИ ОУЭН

Фирма Раберн Оуэн энд Ко в Дарластоне, Англия, начала заниматься изготовлением печей для электрошлакового переплава в результате того, что ее интересы сосредоточены в производстве машин для электрошлаковой сварки, а также связей с фирмой Джозеф Гилло, специализировавшейся на производстве инструментальных и быстрорежущих сталей, т. е. тех сталей, на которых проводились первоначальные исследования по применению электрошлакового переплава.

Для ускорения сооружения первой установки значительные заимствования были сделаны из чертежей опытной установки БИСРА, поэтому основные детали этой установки аналогичны деталям установки БИСРА. Отличием является то, что термоионный клапанный «привод» для серводвигателя с расщепленной серийной обмоткой заменен компактным полупроводниковым электронным управляющим устройством. Кроме того, тележка для кристаллизатора с поддоном движется вдоль установки, а не перпендикулярно к ней; встроена также площадка для установки электродов, главным образом для облегчения этой операции.

Опираясь на опыт, полученный в результате работы установки на заводе Дж. Гилло, фирма Раберн Оуэн разработала конструкции новых одно- и трехфазных установок и изготовила пока по одной установке каждого типа. Основной моделью является однофазная установка переменного тока мощностью 400 ква, рассчитанная на работу с питанием от сети 11 кв, 50 гц, состоящая из одной колонны сборной конструкции, несущей механизм подъема электрода и направляющей рукав с электрододержателем. Колонна устанавливается в колодце, на дне которого имеются путь и две тележки, каждая из кото-

рых предназначается для водоохлаждаемого медного поддона.

Предусмотрена отдельно стоящая контрольная панель с самопишущим амперметром, приборами для регистрации расхода воды и температуры и устройствами для предупреждения и защиты от перегрузок. Имеются также устройства для запрограммированного по времени начала и прекращения процесса.

Точное регулирование скорости подачи электрода осуществляется при помощи сервосистемы с тахометром, которая в свою очередь управляется усиливающим устройством усовершенствованной конструкции с интегрирующей схемой, что обеспечивает точное и тщательное управление всем процессом.

Может быть установлен дроссель для ограничения величины тока во вторичной обмотке трансформатора вдвое по сравнению с обычным током полной нагрузки. В качестве стандартных применяются алюминиевые шины.

Установка мощностью 1200 *кВа* (т. е. 3×400 *кВа*) состоит из трех отдельных агрегатов, опирающихся на конструкцию типа «футбольные ворота». Поперечное перемещение тележек электрододержателей между опорными конструкциями верхней поперечной перекладины рамы установки осуществляется вручную. Устройства энергоснабжения и управления трехфазными установками аналогичны по конструкции применяемым на однофазных установках.

ПЕЧЬ ФИРМЫ УАЙЛД БАРФИЛД

Электрошлаковая печь фирмы Уайлд Барфилд рассчитана на мощность трехфазного тока 1350 *кВа* и является крупнейшей из всех печей ЭШП, установленных в Англии до 1969 г.

Опорная конструкция печи изготовлена из стальных профилей. Каждый из электродных рукавов представляет собой сборный стальной короб, в котором установлены ролики для перемещения рукава по колонне. Рукав консольной конструкции регулируется по длине гидравлическим механизмом и может быть приспособлен для любого изогнутого электрода. Вертикальное перемещение электрода осуществляется лебедкой с системой тросов. Редуктор барабана лебедки приводится нереверсивным асинхронным двигателем, работающим с постоян-

ным числом оборотов, через муфту на вихревых токах, которая обеспечивает пробуксовывание или передачу энергии для перемещения электрода в зависимости от характера и направленности сигнала, полученного от прибора для измерения мощности на шинах. В муфту

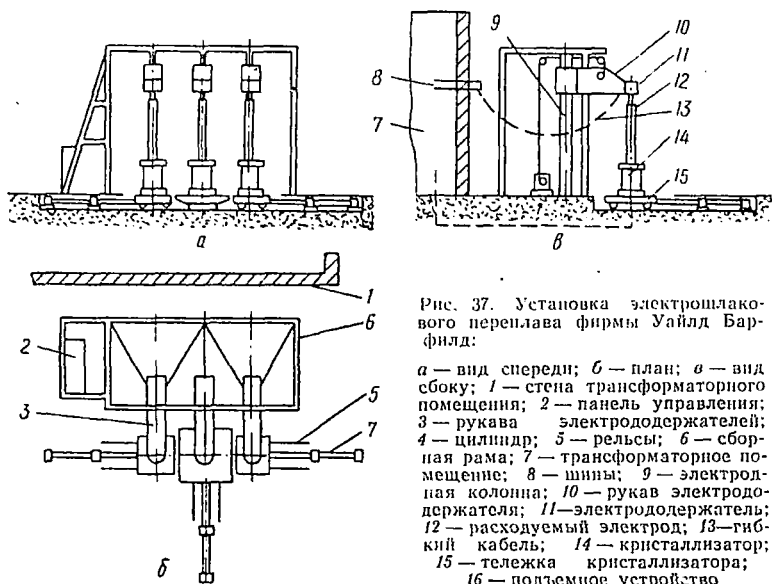


Рис. 37. Установка электрошлакового переплава фирмы Уайлд Бар-филд:

а — вид спереди; *б* — план; *в* — вид сбоку; 1 — стена трансформаторного помещения; 2 — панель управления; 3 — рукава электрододержателей; 4 — цилиндр; 5 — рельсы; 6 — сборная рама; 7 — трансформаторное помещение; 8 — шины; 9 — электродная колонна; 10 — рукав электрододержателя; 11 — электрододержатель; 12 — расходный электрод; 13 — гибкий кабель; 14 — кристаллизатор; 15 — тележка кристаллизатора; 16 — подъемное устройство

встроен тахометр, обеспечивающий защиту от превышения числа оборотов и обратную связь.

Электрододержатели охлаждаются водой и рассчитаны на введение в них электродных инвентарных головок сбоку. Зажимание инвентарной головки в электрододержателе осуществляется гидравлически, а управляют этой операцией с пола цеха, что облегчает достижение оптимальной продолжительности рабочего цикла.

Водоохлаждаемые медные поддоны, по одному для каждого из трех стендов, установлены на трех тележках, каждая тележка передвигается под воздействием гидrocилиндра в направлениях, показанных на рис. 37.

Трансформатор мощностью 1350 ква (для установки внутри помещений) с естественным охлаждением встроен в цельносварной стальной корпус. Переключение на-

пряжения во вторичной обмотке осуществляется посредством устройства для переключения под нагрузкой с приводом от электродвигателя.

Имеются устройства для пуска печи на жидком шлаке. Они состоят из двухфазной дуговой печи мощностью 125 ква с графитовыми электродами, помещенной в передвижном корпусе, который после удаления электродов с помощью лебедки может транспортироваться краном к окну для заливки жидкого шлака в кристаллизатор.

Схемы на панели управления собраны на транзисторах и полупроводниках и представляют собой вставные штепсели, которые могут быть легко заменены в случае неправильной работы.

УСТАНОВКА ФИРМЫ ИНГЛИШ СТИЛ КОРП [1]

При конструировании электрошлаковой установки фирмой Инглиш стил Корп имелось в виду решить следующие задачи:

а) печь должна была иметь наибольшую практически возможную мощность при питании однофазным током;

б) должна быть обеспечена возможность перехода на питание трехфазным током и в этом случае печь должна удовлетворять потребности отдела поковок Инглиш Стил Корп, а также изготавливать слитки для прокатки;

в) должна быть предусмотрена возможность работы с откинутым днищем, т. е. осуществление непрерывного переплава;

г) в качестве усовершенствованного агрегата печь должна обладать возможно более широкой приспособляемостью при наименьшей приемлемой капитальной стоимости.

Как можно видеть из рис. 38, агрегат рассчитан на питание однофазным переменным током.

Электрод зажимается в вилкообразном рукаве с двумя держателями, что позволяет заменять электроды в процессе переплава. Этот рукав укреплен на тележке, которая передвигается вниз и вверх по вертикальной колонне и снабжена механизмом с вращающейся гайкой и ходовым винтом. Кристаллизатор укреплен на подвижном столе, подвешенном на роликовых цепях, с приводом через редуктор от двигателей с малым и высоким числом

оборотов. Первоначально вследствие отсутствия расчетных данных относительно скорости непрерывного вытягивания слитков был применен только быстроходный

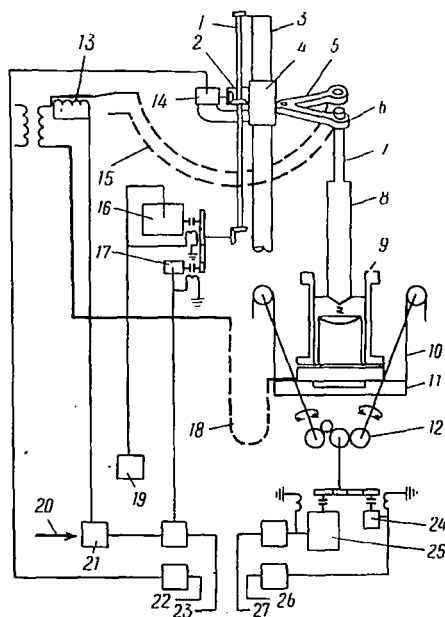


Рис. 38. Схема промышленной установки электрошлакового переплава фирмы Инглиш стил:

1 — ходовой винт; 2 — гайка; 3 — колонна; 4 — тележка; 5 — рукава электродержателей; 6 — электрододержатель; 7 — инвентарная головка; 8 — электрод; 9 — кристаллизатор; 10 — цепи; 11 — опорный стол кристаллизатора; 12 — привод стола; 13 — трансформатор тока; 14 — двигатель перемещения тележки вниз; 15 — гибкие кабели; 16 — двигатель быстрого перемещения; 17 — двигатель перемещения тележки вверх; 18 — гибкий кабель; 19 — контроллер быстрого перемещения; 20 — устройство предварительной установки величины тока переплава; 21 — устройство для сравнения фактической и предварительно заданной величины тока переплава; 22 — регулирование скорости двигателя вручную; 23 — регулирование скорости перемещения тележки; 24 — двигатель медленного перемещения стола; 25 — двигатель быстрого перемещения стола; 26 — контроллер медленного перемещения стола; 27 — контроллер быстрого перемещения стола

двигатель. Подвижной стол облегчает выполнение таких операций, как загрузка печи, а также отвод отходящих газов.

Печь оборудована трансформатором, который может подать ток до 15 тыс. а, напряжением 113 в, что обеспечивает мощность 980 ква в зоне переплава.

Чтобы обеспечить возможность работы на трехфазном токе, на фундаменте печи имеется достаточно места для размещения еще двух колонн и относящихся к ним приводных двигателей, а также достаточная площадь для помещения еще двух идентичных трансформаторов и необходимых шин.

Могут применяться электроды весом до 2 т и длиной до 6,1 м, переплавляемые на слитки длиной 3 и 4,5 м при применении устройства для откидывания днища.

Для экономии меди применяются водоохлаждаемые кабели, шины и другие детали. Это несколько увеличивает потери мощности и требует, чтобы опорная площадка кристаллизатора была снабжена электрической изоляцией для предотвращения перегрева.

Осуществляется электрическое управление по току и напряжению. Напряжение регулируется без нагрузки переключателем с электродвигателем в качестве привода, предусмотрено 11 ступеней напряжения в интервале 22—113 в. Ток регулируется изменением сопротивления в цепи, проходящей через шлак. В связи с тем, что для обеспечения высокого качества продукции нужна точная регулировка тока, были приняты меры для создания чувствительной и быстродействующей системы регулирования, которая может функционировать при малых скоростях.

В этой системе имеются два двигателя, один из них служит приводом для ходового винта при его движении «вверх», а второй — приводом для гайки при ее движении «вниз». Этот двигатель работает при, по существу, постоянной скорости в течение всей операции переплава при управлении им вручную. Число оборотов первого двигателя регулируется пропорционально величине тока при переплаве; повышение величины тока снижает скорость подачи, это удлиняет путь прохождения тока через шлак и восстанавливает исходную величину тока, и наоборот. Так как скорости при регулировании очень малы, для быстрых действий, например для замены электродов, используется третий двигатель.

Первоначально старт происходил на твердом шлаке, но позднее стал практиковаться старт на жидком шлаке. Шлак предварительно расплавляют в орошаемых водой тиглях из мягкой стали с применением нерасходуемых графитовых электродов.

Имеется возможность снабжения установки профильтрованной речной водой с приблизительно постоянной температурой в неограниченном количестве. Поэтому применяется система со сбросом всей воды, при этом отпала необходимость приобретения и эксплуатации дорогостоящей системы рециркуляции воды.

Еще одной особенностью этой печи является возможность сваривать электроды друг с другом и с инвентарными головками, что обеспечивает высокий выход годных слитков и позволяет устранить проблему выравнивания электродов, которая имеет место при сварке электродов вне печи. Этот метод особенно важен при применении навариваемых электродов, так как может быть выполнен полный стыковой шов.

УСТАНОВКА ФИРМЫ ФЕРТ БРАУН

Установка электрошлакового переплава сконструирована фирмой Ферт Браун для собственного использования и имеет уникальную конструкцию. В связи с тем, что в том же цехе работают две вакуумные дуговые печи, было решено в целях экономии сделать узел кристаллизатора таким же, как в вакуумных дуговых печах. Медные кристаллизаторы погружены в резервуар с принудительной циркуляцией воды, причем верхние фланцы кристаллизатора находятся на уровне пола. Конструкция электродных инвентарных головок и электрододержателей по логичным причинам также отражает практику работы вакуумных дуговых печей. Электрододержатель укреплен на тележке, которая движется в вертикальном направлении между стойками «ворот» с приводом от одного двигателя через два редуктора и два ввинчиваемых опорных вала. На уровне верхней части кристаллизатора предусмотрены устройства для отвода газов. Применяется однофазный трансформатор мощностью 1250 *кв*а, подающий ток до 20 тыс. *а*. Медные кристаллизаторы работают «под напряжением», кабели питания электрода током и кабели отвода тока от кристаллизатора располагаются возможно ближе друг к другу, чтобы исключить потери на индукцию. На вертикальных винтах поперечной траверсы установлены предельные выключатели, ограничивающие перемещение по ней. Трансформатор тока на главных шинах применяется для подачи

импульсов, управляющих работой привода электрода. Извлечение слитков осуществляется при удалении опорной плиты кристаллизатора. Возможно незначительное поперечное перемещение электрододержателя, позволяющее применять искривленные электроды.

УСТАНОВКА ФИРМЫ БЕЛЕР В КАПФЕНБЕРГЕ

Используя результаты успешного производства до 1966 г. более двух тысяч слитков на своей первой опытной установке мощностью 340 *кв*а, фирма Белер в Капфенберге, Австрия, сконструировала промышленную печь, рассчитанную на производство слитков диаметром от 300 до 800 *мм*, квадратных со стороной 400 *мм* и прямоугольных сечением 450×150 *мм* для последующей прокатки на тонкий лист. В этой печи применяются электроды длиной 2 *м*, но так как она оборудована устройством для замены электродов, из этих коротких, расходуемых электродов могут быть получены сравнительно длинные слитки. В течение 2—4 *мин*, требующихся для замены электродов, подвод энергии к шлаковой ванне осуществляется при помощи четырех вспомогательных нерасходуемых электродов, которые работают в шлаковой ванне в кольцевом пространстве между расходуемым электродом и медным кристаллизатором с водяной рубашкой.

Особенностью этой печи ЭШП является применение вспомогательного приспособления для постепенного подъема кристаллизатора длиной 700 *мм*, что позволяет производить длинные слитки независимо от высоты кристаллизатора. Это наряду с устройством для замены электродов позволяет производить слитки максимальной длиной 3 *м*. Кристаллизатор опирается на два рукава вилки, которая может передвигаться вверх при помощи гидропривода. По одному из этих рукавов вода поступает в водяную рубашку кристаллизатора, а по другому отводится в систему, поэтому нет необходимости в применении шлангов для подвода воды к кристаллизатору.

Нет почти никаких трудностей с точки зрения электрического контакта поддона. Операция переплава начинается на стальной плите, опирающейся на медный поддон. Перемещение кристаллизатора кверху начинает-

ся, как только длина слитка составит приблизительно 510 мм. Слиток становится затем достаточно тяжеловесным, чтобы легко скользить из кристаллизатора, опираясь на поддон. Эта система работает, однако, удовлетворительно только в том случае, если внутренние стенки кристаллизатора изготовлены из меди. Чтобы избежать возможной утраты контакта у поддона, применяется несложное зажимающее устройство для крепления стальной плиты к медному поддону.

Фирма Белер применила также новый способ старта на жидком шлаке. Шлак предварительно расплавляют в кристаллизаторе, в котором будет находиться переплавляемый слиток. Вместо расходоуемого электрода применяется графитовый электрод. При расплавлении шлака вспомогательные электроды, окружающие главный электрод, опускаются в шлаковую ванну. Затем ток включается на эту вспомогательную систему электродов, оборудованную отдельным приводом.

Затем графитовый электрод выводят из рабочего положения; замену графитового электрода расходоуемым производят вне печи. По окончании этой операции основной расходоуемый электрод вводят в положение для переплава и опускают в шлаковую ванну, которая поддерживается в расплавленном состоянии вспомогательными электродами, после чего включают ток. Вся операция замены и пуска установки, аналогично замене расходоуемых электродов, занимает 3—5 мин.

Эта печь производит пока слитки диаметром до 812 мм для собственного применения фирмой Белер.

СОВЕТСКАЯ УСТАНОВКА ЭШП

Процесс электрошлакового переплава разрабатывался в СССР в Институте им. Е. О. Патона в Киеве с 1958 г. Неудивительно поэтому, что с того времени было опубликовано много сообщений о конструкциях установок и различных усовершенствованиях. Следует отметить, что печи последних конструкций для выплавки слитков массой до 40 т похожи на варианты крупных печей ранней конструкции. Для промышленных печей 1964—1965 гг. характерна построенная по советской лицензии печь Компани дез ателье э форж де ла Луар во Франции.

Вертикальная колонна служит направляющей для

двух тележек — одной несущей расходуемый электрод и другой для медного кристаллизатора с водяной рубашкой. Обе эти тележки движутся вверх и вниз по колонне с приводом от электродвигателей через редукторы, при-

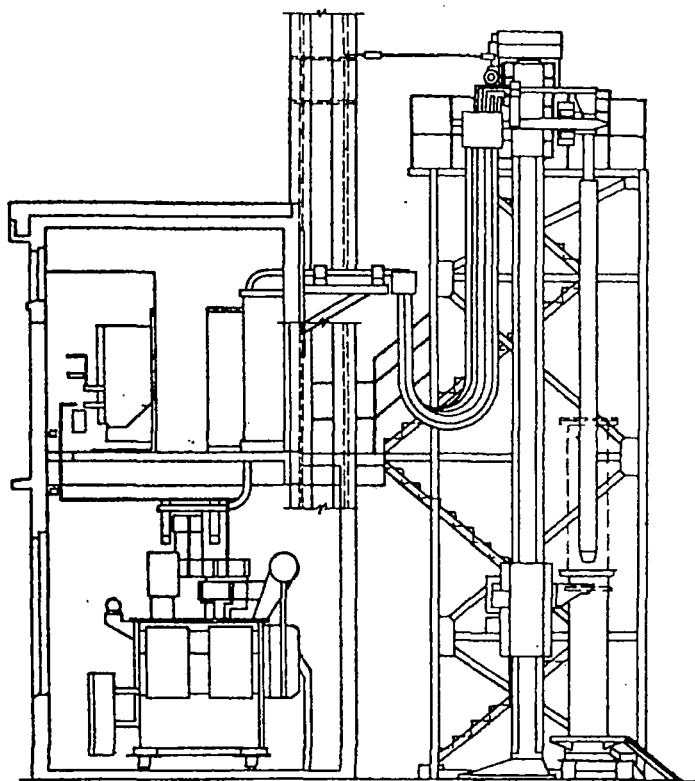


Рис. 39. Схема печи электрошлакового переплава советской конструкции (Компани дез ателье э форж де ла Луар)

водящие в свою очередь шестерню, находящуюся в зацеплении со стационарной зубчатой рейкой.

Трансформатор мощностью 1000 ква, оборудованный устройством для переключения напряжения под нагрузкой, подает ток для производства слитков массой до 2,5 т различного профиля и поперечного сечения вплоть до квадрата со стороной 480 мм.

На рис. 39 показан общий вид однофазной электрошлаковой печи советской конструкции указанной выше мощности.

Естественным развитием этой конструкции было размещение трех независимых устройств рядом друг с другом и присоединение их к одно- или трехфазному источнику тока. В следующей конструкции применялся трехфазный переменный ток для питания трех электродов в одном кристаллизаторе, т. е. трехфазный переплав. Однако некоторые недостатки трехфазного переплава — недоиспользование площади шлаковой ванны в кристаллизаторе, необходимость в производстве трех сравнительно длинных тонких прямых электродов для крупных слитков, пропорционально увеличивающаяся продолжительность настройки и нерегулируемое перемешивание шлаковой ванны — способствуют тенденции возвращения от трехфазного к однофазному оборудованию.

Последующее развитие оборудования этого типа привело к сооружению крупных специализированных цехов электрошлакового переплава, предназначенных для производства в течение года значительного количества слитков. Уникальными особенностями советских установок электрошлакового переплава являются расширяющееся применение бифиллярной системы ЭШП, сифонный метод старта на жидком шлаке и ЭШП с применением нерасходуемого электрода для образования шлаковой ванны.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭШП ФИРМОЙ АРКОС [7]

Продолжая совершенствовать свой процесс электрошлаковой сварки, внедренный ею в США в 1959 г., фирма Аркос, Филадельфия, США, разработала свой вариант электрошлакового литья для производства слитков, из которых она изготавливает сварочную проволоку. Это электрошлаковое оборудование расположено по схеме, показанной на рис. 40.

В отличие от обычного электрошлакового переплава, при котором в качестве электродов используется один или несколько предварительно отлитых слитков, в установке фирмы Аркос применяется непрерывная подача

ленты шириной 38 мм, толщиной 0,9 мм. Эта лента вместе с легирующими порошками, подаваемыми по методу Голкинса, образует электрод. Дозируемые количества железного порошка и ферросплавов непрерывно смешиваются и подаются на находящуюся под током часть

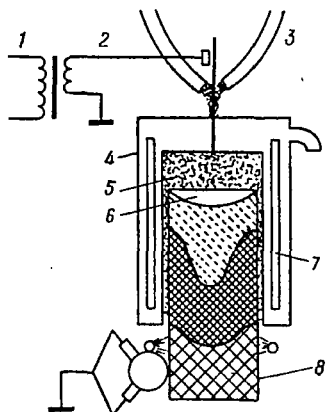


Рис. 40. Схема электрошлаковой установки непрерывной разливки фирмы Аркос, в которой в качестве электрода применяются ленты и порошки, а кристаллизатор с открывающимся днищем позволяет непрерывно вытягивать слиток [7]:

1 — напряжение в первичной обмотке 440 в; 2 — напряжение во вторичной обмотке 80 в; 3 — питатель порошка; 4 — изолированный от земли кристаллизатор; 5 — шлаковая ванна; 6 — жидкий металл; 7 — водяное охлаждение; 8 — затвердевший слиток

ленты, выше уровня жидкого шлака. Существенной деталью процесса является то, что эти порошки прилипают к ленте по мере ее входа в шлак. Это прямо противоположно способу образования трубы и подачи легирующих по способу Голкинса.

Магнитное поле, окружающее ленту, притягивает порошки к ленте и, таким образом, лента и порошок в виде целого электрода быстро расплавляются в граничной зоне между твердым металлом и жидким шлаком при температуре 1760—1980° С. Однако это не препятствует применению немагнитных легирующих порошков. При необходимости получить высокое содержание марганца соответствующие частицы смешиваются с железным порошком; частицы марганца удерживаются в железном порошке механически.

Производятся главным образом слитки из коррозионноустойчивых сталей, но получали также мартенситно стареющие стали, а также медный сплав с применением в этом случае медной ленты и никелевого и железного порошков.

Список литературы

1. Fitzjohn A. B., Aldrich G. and Woodward P. ESC Review, 1967, № 5, p. 3.
2. Hopkins R. K. AIME Electric Furnace Steel Proceedings 1948, p. 75—92.
3. The Engineer, 1966, June, p. 874—76.
4. Devries R. P. Industrial Heating, 1966, № 9, p. 1685; № 11, p. 2185.
5. Dewson P. Metallurgia, 1966, v. 73, № 440, p. 257.
6. Machinery & Production, 1967, v. 111, p. 1332—34.
7. Malim T. H. Iron Age, 1967, v. 200, № 9, p. 52.

РАБОТА УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОПЕРАЦИИ

Последовательность операций при электрошлаковом переплаве любого материала следующая:

- выбор шлака;
- определение электрических параметров работы;
- определение количества исходного шлака;
- подготовка электрода;
- подготовка установки;
- пуск установки;
- определение скорости подачи шлака при переплаве;
- определение температуры шлака;
- регулирование скорости переплава;
- регистрация параметров плавки;
- подпитка верхней части слитка;
- охлаждение и извлечение слитка.

Сначала будут изложены общие соображения по каждой из этих операций, в конце раздела будут рассмотрены специальные методы работы, которые отклоняются от обычного способа переплава одного электрода в стационарном кристаллизаторе.

Выбор шлака

Тип шлака следует выбирать с учетом температуры плавления металла и требующихся химических реакций. Подробные сведения о методе выбора шлака уже были

даны ранее и здесь, по-видимому, необходимо только повторить снова, что шлак должен иметь предпочтительно температуру плавления несколько ниже температуры плавления самого металла и обладать низкой вязкостью. Эти два условия помогают обеспечить максимальную поверхность охлаждения путем создания шлаковой корочки минимальной толщины, что способствует получению слитка с хорошей поверхностью.

Определение электрических параметров

Если мы хотим получить при электрошлаковом переплаве слиток с хорошей поверхностью и структурой, то подводимую мощность необходимо регулировать в очень точных пределах. На рис. 41 показана приблизительная зависимость между потребляемой мощностью и диаметром кристаллизатора.

Электрический к. п. д. электрошлаковых установок изменяется в зависимости от их размеров и, принимая это во внимание, переплав следует вести при подводе к шлаку правильно рассчитанной мощности. Необходимая подводимая мощность может быть обеспечена различными комбинациями напряжения и тока трансформатора. На основании прошлого опыта наиболее эффективный интервал напряжений находится между 30 и 60 в. Если напряжение выше указанных величин, то имеется тенденция к возникновению дуги между электродом и шлаком, что служит причиной некоторой электрической нестабильности. Это явление обычно рассматривается как вредное и его следует избегать.

Выбор тока в пределах требуемых ограничений мощности довольно труден, потому что при увеличении тока увеличивается скорость переплава и, следовательно, повышается производительность, но одновременно стано-

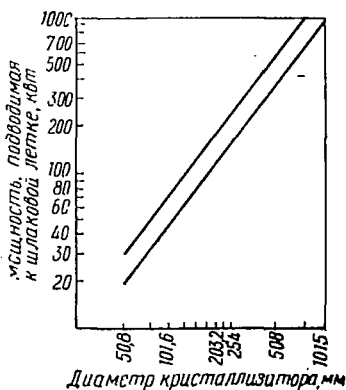


Рис. 41. Приблизительная зависимость между потребляемой мощностью и диаметром кристаллизатора

вится глубже металлическая ванна, что ведет к ухудшению структуры слитка. Он может также повлиять на химические составляющие, например повышение силы тока уменьшает потери марганца в некоторых типах стали. Высокие величины тока переплава способствуют уменьшению пористости в донной части слитка, что обусловлено, как полагают, более быстрым выделением имеющейся влаги; они также способствуют мелкозернистости структуры и при условии, что величина тока является оптимальной для получения хорошего выхода годных слитков, высокие величины тока переплава являются желательными по этой причине. Однако, за исключением мелкозернистости, свойства слитка, по-видимому, лучше при небольшой величине рабочей силы тока. Обычно при этом получается слиток лучшего качества; более мелкая металлическая ванна обеспечивает лучший характер затвердевания. Малая величина тока способствует также уменьшению числа крупных включений.

Удельный расход электроэнергии, по-видимому, не связан с величиной рабочего тока и, таким образом, с точки зрения производительности желательно работать при высокой скорости переплава. Поэтому для любого материала должен быть найден оптимальный вариант величины тока для придания слитку лучших свойств и обеспечивающий наиболее экономичный переплав.

Влияние напряжения не столь велико, как влияние тока. В некоторых случаях высокое напряжение может обеспечить лучший фронт кристаллизации и, следовательно, улучшение свойств слитка. Медовар [1] сообщает, что основной эффект напряжения состоит в повышении температуры шлаковой ванны, а также, что высокое напряжение интенсифицирует десульфурацию и обезуглероживание, но уменьшает дефосфорацию. Оно может также улучшить удаление растворенных газов и всплытие таких неметаллических включений, как окисные, что обусловлено высокой температурой. Он сообщает также, что увеличение силы тока может препятствовать удалению окисных включений. Увеличение температуры шлака при увеличении напряжения объясняется тем, что скорость расплавления электрода возрастает непропорционально напряжению в отличие от ее зависимости от возрастания тока.

Установлено также, что удельный расход электро-

энергии является наиболее важным параметром контроля процесса ЭШП, так как он определяет скорость переплава электрода и объем, глубину и форму металлической ванны [2].

Уменьшение напряжения трансформатора до заданного уровня при постоянных величинах тока увеличивает производительность и снижает удельный расход электроэнергии. Поэтому при выборе напряжения, как и при выборе тока, необходим компромисс между оптимальными условиями, зависящими от конкретных требований к конечному продукту.

Как указывалось ранее, решение о том, на каком токе работать, переменном или постоянном, зависит от электротехнических требований с учетом масштабов работы. Однако представляет интерес влияние вида применяемого тока на металлургические факторы. Известно [1, с. 29], что при работе на постоянном токе достигается более быстрое отделение более мелких капель, чем при работе на переменном токе, и, следовательно, при постоянном токе создаются более благоприятные условия для взаимодействия между металлом и шлаком. Нет достаточного подтверждения тому, что десульфурация при переменном токе протекает лучше, чем при постоянном токе, и это связано с явлением электролиза.

Продолжительность контакта между каплями и шлаком значительно меньше, чем между концом электрода и шлаком и поверхностью металлической ванны и шлаком и, таким образом, большая часть реакций при очистке металла электрошлакового переплава происходит на конце электрода и в металлической ванне и именно поэтому факторы, влияющие на форму конца электрода, являются наиболее важными. Исследование происходящих явлений электролиза показывает, что в некоторых случаях [1, с. 69] при отрицательном электроде водород может удаляться более эффективно, чем при положительном электроде, а удаление кислорода лучше осуществляется при положительном электроде. Однако известно также [1, с. 20], что наиболее интенсивное удаление газов наблюдается при ЭШП на переменном токе. Вообще можно констатировать, что независимо от рода тока могут быть выбраны соответствующие скорости переплава и химические составы шлаков, обеспечивающие требуемую степень очистки. Это иллюстрирует пре-

имущество большого числа степеней свободы, присущих электрошлаковому процессу.

Одной из причин отсутствия значительного различия между работой на переменном и постоянном токе является наличие постоянной составляющей при электрошлаковой сварке, которая может иметься также во время электрошлакового переплава. Условия, способствующие этому, обсуждаются в другом месте [3].

Определение количества исходного шлака

Глубина шлаковой ванны зависит от расстояния до электрода, т. е. от промежутка между электродом и зеркалом металлической ванны. Кончик электрода обычно принимает коническую форму, расстояние от точки до точки изменяется и, кроме того, точная форма пути тока неизвестна. Вследствие этих неопределенностей при расчете глубины шлаковой ванны применяется термин «средний путь тока».

Для расчета ранее применялась формула:

$$l = \frac{VA_{\text{эфф}}^x}{I},$$

где $A_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь поперечного сечения пути тока.

Для практических целей $A_{\text{эфф}}$ принимается равным A — площади поперечного сечения кристаллизатора, особенно при применении постоянного тока, что дает возможность вычислить приблизительную величину l . Фактическая требуемая глубина шлаковой ванны будет несколько больше этой величины, чтобы электрод был погружен в шлак по меньшей мере на 25 мм. Первоначальное определение требуемой мощности (P) может быть сделано по графику, подобному показанному на рис. 41. Затем можно выполнить расчеты для интервала величин напряжения и тока, согласующихся с характеристиками подводимой мощности, при разных величинах l . Как уже указывалось, окончательный выбор может быть сделан только на основании имеющегося опыта, но первоначальный выбор, в соответствии с указанными выше критериями, обеспечивает возможность получения слитков приемлемого качества.

Подготовка электрода

Размеры электрода следует выбирать таким образом, чтобы отношение площади поперечного сечения электрода к площади поперечного сечения слитка было возможно более высоким при условии, что между электродом и стороной слитка должен быть оставлен зазор не менее 8,5 мм/м длины кристаллизатора. Этот зазор необходим ввиду неизбежного коробления, происходящего в длинных электродах при нагреве. Некоторые специалисты обуславливают отношение диаметров электрод/кристаллизатор равным 0,6—0,8. Большой диаметр электрода уменьшает потери тепла, обеспечивает лучшие характеристики затвердевания и лучшее рафинирование, снижает потери марганца и т. д.

Подготовка поверхности во многих случаях не должна быть особенно тщательной. Обычно бывает желательным удалить масло, жир и другие загрязнения, которые могут снизить рафинирующее воздействие шлака. Вообще говоря, обезжиривание и дробеструйная обработка достаточны, но какие-либо дефекты отливки, заусенцы, заливы, должны быть удалены, чтобы исключить возможность их контакта со стенками кристаллизатора. Идеальными электродами являются непрерывнолитые заготовки.

В тех случаях, когда подлежащий переплаву металл содержит такие легкоокисляемые элементы, как титан и алюминий, необходимо удалять окисную корку с поверхности электрода, в противном случае потери этих элементов будут большими, чем это обуславливается характером применяемого шлака. В интересах экономичности процесса лучше применять литые электроды, чем электроды, полученные из литых слитков путем ковки или прокатки. Электроды можно легко отливать в огнеупорные трубы, применяя несложное оборудование.

Фирма Джон Фаулер (Дон Фаундри) в Шеффилде разработала разъемную секционную изложницу для экономичной отливки электродов из металла, выплавленного в дуговых или индукционных печах, для последующего переплава в печах ЭШП.

Рабочее положение этих изложниц горизонтальное. Диаметр их от 127 до 305 мм, секции длиной по 1370 мм, максимальная длина 6100 мм. Электроды промежуточ-

ной длины могут быть отлиты путем ввода стального стопера. Наблюдается незначительное образование усадочных раковин; обрeзь головной части, как правило, незначительна, обрeзь донной части отсутствует. Изложница может быть рассчитана, если это требуется, на продувку и заполнение защитной атмосферой.

Чтобы обеспечить возможность надежного зажима в электрододержателе электродов в широком интервале

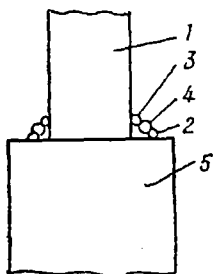


Рис. 42. Метод приварки электрода к инвентарной головке:

1 — инвентарная головка; 2 — 1-й проход; 3 — 2-й проход; 4 — 3-й проход; 5 — электрод

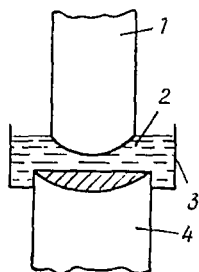


Рис. 43. Схема приварки электрода к инвентарной головке на установке ЭСП:

1 — инвентарная головка; 2 — шлак; 3 — временный резервуар для шлака; 4 — электрод

размеров, к ним обычно приваривается переходная инвентарная головка (полая в тех случаях, когда применяются большие мощности переменного тока). Обычно применяется электродуговая сварка вручную с применением электрода эвтектического типа по схеме, показанной на рис. 42; при инвентарных головках и электродах больших размеров может применяться электрошлаковая сварка на месте в цехе ЭСП или на специальном сварочном стенде с использованием мощности основной печи (рис. 43). Недостатком последнего метода является то, что он уменьшает продолжительность использования печи по ее прямому назначению. После окончания операции сварки электрод с инвентарной головкой может быть зажат в соответствующем положении в держателе. В некоторых случаях, когда это необходимо, чтобы предупредить возникновение нежелательных электромагнитных явлений, приваривают инвентарную головку из аустенитной стали.

Иногда не имеется достаточного количества материала, чтобы изготовить один электрод, и в этом случае оказывается необходимым изготавливать электроды путем сварки вместе двух или более коротких кусков. Опыт показал, что ток может проходить через сварные швы между различными кусками нерафинированного материала без серьезных потерь электрической мощности. Например, при работе на переменном токе порядка 2500 а при напряжении 40 в потеря мощности в этом случае обычно бывает меньше 4%!

Ввиду того, что при сварке расход сварочных электродов небольшой, загрязнение металла невелико при условии, что сварочные электроды изготовлены из того же материала, что и электроды для переплава. Значительное расхождение в химическом составе может повести к возникновению зон ликвации в слитке, и этого следует особенно избегать в тех случаях, когда продукт предназначается, в конечном счете, для производства тонкого листа или проволоки.

Необходимо, конечно, чтобы сварка выполнялась качественно, потому что в случае падения крупного куска электрода из зоны сварки в металлическую ванну в результате разрушения шва полного переплава не произойдет и появится местная сегрегация.

Подготовка установки

При подготовке установки должны быть выполнены следующие условия: чистый сухой поддон, асбестовая изоляция на резиновом основании, стартовые диски и стружки там, где они применяются, а также чистый сухой кристаллизатор с соответствующими соединениями для воды. Если применяется кристаллизатор с охлаждением разбрызгиваемой водой, то перед началом переплава необходимо проверить эффективность работы брызгал; если применяется кристаллизатор с водяной рубашкой или другой тип водоохлаждаемого кристаллизатора, то важно проверить перед началом переплава, нет ли внутренних подтеков, в противном случае может произойти взрыв.

Взрывы, которые могут иметь место при электрошлаковом переплаве, значительно менее опасны, чем взрывы, возможные при вакуумно-дуговом переплаве, и это также является одним из преимуществ ЭСП.

Медный поддон слегка обрабатывают песком, чтобы очистить его от следов шлака или окислов, после чего кристаллизатор закрепляют на поддоне в рабочем положении на прокладке из асбестового картона, окруженной прокладкой из резины (рис. 44).

Поддон обычно изолируют от кристаллизатора, хотя на некоторых установках этого не делают. При применении изолированных кристаллизаторов [4] при переплаве подшипниковых сталей могут возникнуть некоторые трудности, обусловленные разрывом шлаковой корочки и возникновением кратковременной дуги между кристаллизатором и слитком. Применение неизолированного кристаллизатора обеспечивает параллельный путь для тока в случае такого нарушения шлаковой корочки,

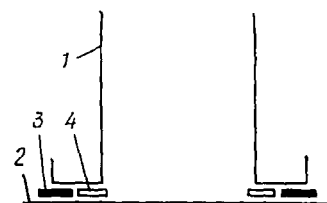


Рис. 44. Изоляция кристаллизатора от поддона и метод уплотнения:

1 — кристаллизатор; 2 — поддон;
3 — резина; 4 — асбест

в результате чего не возникает дуги и, следовательно, дефектов.

Важно, чтобы кристаллизатор был надежно закреплен в вертикальном положении, для предотвращения доступа воды и утечки жидкого шлака в начальный период переплава. Затем пускают воду для охлаждения кристаллизатора и поддона; расход воды определяется величиной кристаллизатора, типом переплавляемого металла и производительностью при избранных параметрах работы. Для установления и регулирования расхода охлаждающей воды необходимо иметь точные расходомеры с легко считываемыми показаниями. Одновременно может быть включена вода для охлаждения кабелей, шлаковых печей и др.

Пуск установки

В пусковой период необходимо обеспечить возможно более быстрое образование полной ванны жидкого шлака и установление устойчивых условий переплава. Чем скорей этого удастся добиться, тем лучше будет форма донной части слитка и, следовательно, выше выход годного.

Метод предварительного расплавления шлака и за-

ливка его в жидком состоянии в кристаллизатор являются, по всем данным, наиболее целесообразными. При работе с жидким шлаком предотвращается образование дефектов в донной части слитка, обусловленных наличием влаги, и устраняется необходимость дробления и хранения предварительно выплавленных шлаков. Производительность процесса при пуске на жидком шлаке («жидкий старт») значительно возрастает, потому что при переплаве крупных слитков в крупных кристаллизаторах для расплавления твердого шлака требуется более одного часа и это время полностью потеряно с точки зрения производительности установки. Однако в некоторых случаях имеются затруднения с технологией пуска на жидком шлаке и пуск на твердом шлаке («твердый старт») все еще довольно распространен. В этом случае между электродом и поддоном образуется дуга, которая затухает, как только появляется небольшое количество расплавленного шлака; продолжительность ее существования не превосходит нескольких секунд. Последующий нагрев идет за счет сопротивления.

Если применяется пуск на твердом шлаке («твердый старт») в противоположность жидкому («жидкий старт»), то в кристаллизатор может быть помещена затравка с насыпанной на нее экзотермической смесью и опилками из того же материала, что и электрод. Затем электрод опускают в кристаллизатор до соприкосновения его с затравкой и стружками. В кольцевое пространство между электродом и кристаллизатором добавляют предварительно выплавленный измельченный шлак (крупность частиц менее 3 мм) в количестве, приблизительно вдвое меньшем, чем это нужно для переплава в соответствии с выбранными электрическими параметрами; некоторые операторы предпочитают добавлять весь шлак с самого начала. При включении тока возникает дуга, которая быстро расплавляет шлак в количестве, достаточном для прохождения тока; дуга при этом гаснет.

Имеются также запатентованные устройства (фирмы Фосеко интернэшнл), облегчающие пуск [5]. Могут применяться токопроводящие стартовые таблетки, состоящие из плотно спрессованного флюса, химический состав которого обеспечивает высокую электропроводность в твердом состоянии. При прохождении тока таблетки расплавляются, обеспечивая нагрев сопротивлением без об-

разования дуги. Могут применяться также стартовые блоки — прессованные экзотермические флюсовые смеси, которые загораются при пропускании тока по проводам, проходящим через блоки. При этом образуется жидкий флюс и металл, аналогичный переплавляемому.

Имеется много вариантов пуска установки. Можно обходиться без заправки, в этом случае дуга воздействует непосредственно на поддон. Если он изготовлен из меди, то имеется риск загрязнения материалами, содержащими медь. В других случаях может применяться графитовая подушка (при использовании которой возможно обогащение углеродом) или при благоприятных условиях можно не применять экзотермическую смесь.

При пуске возможны некоторые реакции, которые могут вредно повлиять на рафинирование.

На реакцию между известью и железом в некоторых фторидно-известковых шлаках влияет период от возникновения дуги до полного расплавления шлака и установления стабильного процесса переплава. При этих условиях сравнительно большие объемы окислов железа переходят в шлак. Даже при наиболее тщательной сушке шлака определенное количество влаги остается в нем в виде гидроокиси кальция. При наиболее жестких методах очистки остаются также ограниченные количества кислорода, связанного со шлаком. Обычные сырые материалы для изготовления шлаков, особенно негашеная известь, быстро поглощают влагу из атмосферы. В результате любой шлак содержит в начале процесса окисляющие примеси и они реагируют с металлом, что ведет к повышению содержания железа в шлаке.

При практическом осуществлении процесса ЭШП невозможно установить, какое влияние оказала операция пуска на химический состав шлака. Это значит, что шлаковая ванна может значительно отличаться по своему химическому составу от первоначально рассчитанного и, таким образом, качество переплавленного металла не может быть предсказано с достаточной степенью надежности. Кроме того, эти реакции не являются ни устойчивыми, ни воспроизводимыми. Чтобы уменьшить вредные последствия, следует применять предварительно расплавленный шлак, что позволяет свести до минимума содержание в нем влаги.

Для достижения максимальной производительности

при «жидком старте» желательно расплавлять шлак в отдельной печи и заливать его в кристаллизатор во время пуска. Установившейся практикой на многих установках является заливка жидкого шлака в кольцевое

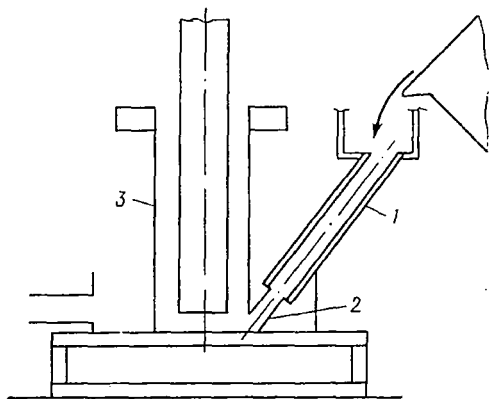


Рис. 45. Схема оборудования для «жидкого старта»

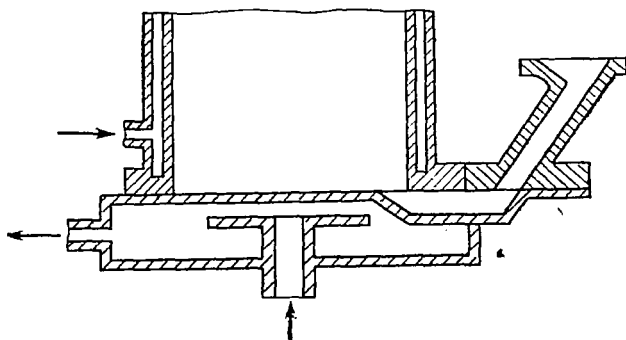


Рис. 46. Схема советского оборудования для «жидкого старта»

пространство между электродом и кристаллизатором сверху. Однако при длинных кристаллизаторах и узком кольцевом пространстве шлак может застывать при заливке, образуя твердые осадки на стенках.

Одним из способов устранения этих трудностей является заливка шлака в нижнюю часть кристаллизатора (рис. 45).

Графитовая трубка 1 соединяется с патрубком 2, ко-

торый приварен к нижнему концу обычного кристаллизатора 3, охлаждаемого разбрызгиваемой водой. Конструкция патрубка такова, что выступы, образующиеся при входе в него металла, не препятствуют извлечению слитка и, кроме того, никоим образом не мешают применению кристаллизатора при пуске на твердом шлаке.

При сифонной заливке [4] шлак поступает в кристаллизатор через канавку в поддоне (рис. 46). По еще одному методу жидкая шлаковая ванна создается с применением нерасходуемого электрода (графит), который затем заменяется расходуемым электродом.

Определение скорости подачи шлака при переплаве

При изготовлении длинных слитков обычно необходимо добавлять «компенсационный шлак», чтобы пополнить расход шлака на покрытие стенок кристаллизатора и обеспечение требуемой глубины шлаковой ванны. Скорость подачи может определяться по данным о расходе шлака при опытном переплаве или рассчитываться во время переплава по изменению величин тока и напряжения. Шлак следует добавлять медленно в виде гранул (крупностью менее 3 мм), чтобы предотвратить неожиданное охлаждение ванны и устранить потери.

Определение температуры шлака

Во время электрошлакового переплава можно следить за температурой и регистрировать ее. Как указывалось выше, температура жидкого шлака оказывает большое влияние на эффективность переплава, и, хотя она не относится к обычно контролируемым параметрам процесса, нет сомнения в том, что в будущем значение контроля температуры возрастет.

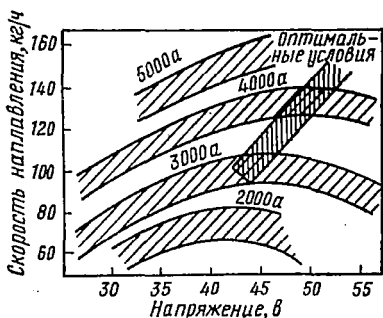
Температуру шлака можно измерять термопарой. В приборе (Плейт 37), разработанном фирмой ЭСРТ, применяется пара иридий—иридий+40% родия; прибор рассчитан на то, чтобы противостоять сильно корродирующему действию шлака и исключить ошибки, которые могут возникнуть в результате действия магнитных полей, создаваемых током переплава. Внешняя оболочка изготовлена из специального графита, а внутренняя— из рекристаллизованного глинозема. Для защиты систе-

мы от воздействия дыма применяется аргон. В том случае, если необходимо полностью исключить влияние переменного тока, применяется также фильтр-схема.

Регулирование скорости переплава

При переплаве крупных слитков (в частности, из ферромагнитных материалов с применением переменного тока) потери мощности в процессе переплава уменьшаются, и для поддержания правильной скорости пере-

Рис. 47. Зависимость между скоростью наплавления и напряжением при изготовлении слитка diam. 240 мм (электрод diam. 100 мм) [6]



плава может потребоваться снижение подводимой мощности. Как установлено Латашем [5], излишняя мощность ведет к образованию излишне глубокой металлической ванны, а чрезмерно высокая скорость переплава способствует образованию слишком плоской формы конца электрода. Зависимость между параметрами переплава показана на рис. 47, из которого видно, что незначительные изменения условий могут привести к значительному отклонению от оптимального хода процесса.

Регистрация параметров плавки

С целью контроля и использования в дальнейшем рекомендуется регистрировать следующие параметры: ток, напряжение, скорость подачи, расход электроэнергии, массу слитка (и, следовательно, удельный расход электроэнергии), размеры электродов и кристаллизаторов, тип и массу шлака, высоту шлакового покрытия, толщину шлаковой корочки, расход воды, кривую подъема температуры.

Подпитка верхней части слитка

Когда большая часть электрода переплавлена или кристаллизатор заполнен, проводят подпитку верхней части слитка путем постепенного уменьшения величины тока и напряжения для получения плоской, свободной от дефектов головной части слитка без усадочной раковины. Уменьшение подводимой мощности следует осуществлять без изменения положения электрода. По окончании операции огарок электрода вместе с инвентарной головкой извлекают из шлаковой ванны и ток выключают.

Охлаждение и извлечение слитка

До извлечения слитка шлак должен полностью охладиться. Обычно при подъеме кристаллизатора вертикально вверх слиток остается на поддоне и большая часть шлаковой корочки на этой стадии отваливается в виде чешуек. Если этого не произошло, незначительное постукивание или обрубка зубилом позволяют легко удалить остатки шлаковой корочки. Иногда слиток может привариться к донной части стального кристаллизатора. Если это происходит, то наиболее простым способом является пламенная резка и ремонт. При переплаве большинства сплавов желательно охлаждать слиток в вермикулите, чтобы исключить растрескивание.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Целью предшествующего раздела было рассмотрение процесса ЭШП в его «стандартных» формах. Имеются, кроме того, специальные методы, применяемые для достижения специальных целей. Некоторые из этих методов будут вкратце рассмотрены ниже.

Несколько электродов

В ряде случаев (например, при производстве тонких широких слябов или полых слитков) может оказаться необходимым применение более одного электрода. При условии выбора правильных электрических параметров и при наличии достаточного зазора между кристаллизатором и электродами (и, конечно, между отдельными

электродами, если они присоединены к различным фазам источника тока) никаких трудностей не возникает. Достаточно иметь одну общую систему управления и равномерно расправлять электроды для поддержания постоянного расстояния между электродами и зеркалом металлической ванны.

Несколько слитков

Несколько электродов, присоединенных к общему источнику тока и имеющих общую систему подачи, могут работать каждый в отдельном кристаллизаторе; получаются слитки приблизительно равной массы. Любое местное изменение величины тока между кристаллизаторами вызывает дополнительное изменение температуры шлака, которое в свою очередь влияет на скорость наплавления слитка в данном кристаллизаторе в сторону восстановления равновесия.

Первые несколько слитков (массой по 7,6 кг) одновременно были выплавлены фирмой ЭСРТ по контракту с ее лицензиатом, фирмой Консарк.

Позднее фирма ЭСРТ получала два неодинаковых по массе слитка при общем управлении процессом. Критерием при этом служит электрод, так как отношение площадей поперечного сечения в каждом отдельном кристаллизаторе должно быть постоянным. Фирма Консарк успешно производила по три слитка диаметром до 305 мм.

Преимущество выплавки нескольких слитков одновременно состоит в том, что обеспечивается полное использование подводимой мощности в том случае, когда нужны мелкие слитки, что важно с точки зрения экономичности процесса.

Поддон с возвратно-поступательным движением

Фирма ЭСРТ применила поддон с возвратно-поступательным движением [8], что позволило снизить на 30% величину мощности (к сожалению, не удельный расход электроэнергии), требующейся для производства слитка данного размера. Кристаллизатор с поддоном помещены на тележке, которая может передвигаться независимо в двух перпендикулярных друг другу на-

правлениях. Скорость и величина перемещения переменные, что позволяет обеспечить любое изменение положения кристаллизатора относительно неподвижного электрода. Назначение этого устройства заключается в том, чтобы все части шлаковой ванны одна за другой попали в положение непосредственно под электродом, что обеспечивает равномерное распределение металла.

Металлургический эффект этой операции заключается в том, что шлаковая ванна становится холодной, а ванна расплавленного металла приобретает более плоскую форму. Это в свою очередь обеспечивает кристаллизацию слитка не в радиальном, а главным образом в вертикальном направлении. При этом также уменьшается ликвация. Метод имеет особенно важное значение при производстве прямоугольных слитков: в случае выплавки тонких широких слябов возвратно-поступательное движение должно быть, конечно, ограничено одним направлением. Возможным недостатком является то, что необходим длинный электрод с небольшим поперечным сечением. Наименьшее расстояние сближения электрода со стенкой кристаллизатора должно быть такое же, как при неподвижных электродах.

Полунепрерывный способ производства

Необходимость в применении высоких кристаллизаторов при производстве длинных слитков может быть устранена путем использования непрерывных методов производства. Применяются два способа: а) кристаллизатор передвигается вверх со скоростью, совпадающей со скоростью образования слитка [6]; б) поддон движется вниз, что обеспечивает постоянный уровень шлаковой ванны в неподвижном кристаллизаторе [7].

Плазменный электрошлаковый переплав

При обычных методах ЭШП переплавляемый материал представляет собой расходуемый электрод, обладающий электропроводностью. Имеется, однако, много случаев, когда материал находится в другом состоянии, например лом (особенно стружка) или порошок, полученный при процессах непосредственного извлечения металлов. Поэтому весьма желательно изготавливать

слитки ЭШП из такого материала, но для этой цели требуются другие средства нагрева шлака. С известной долей успеха ранее применяли нерасходуемые электроды, но при этом всегда был риск внесения примесей при использовании электродов из графита, молибдена или вольфрама.

Разработка плазменно-дугового метода переплава является идеальным решением этой проблемы, так как

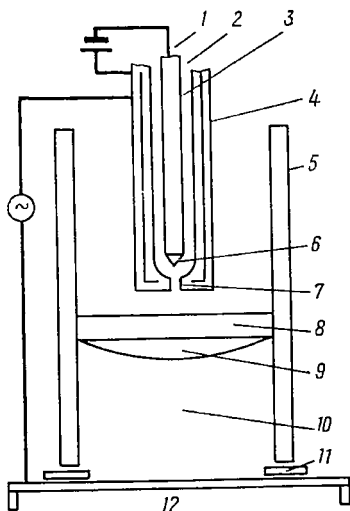


Рис. 48. Схема установки для плазменного электрошлакового переплава:

1 — плазменная горелка; 2 — подвод инертного газа; 3 — внутренний медный водоохлаждаемый электрод (минус на электроде); 4 — наружный медный водоохлаждаемый корпус (плюс на корпусе); 5 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 — вольфрамовый наконечник; 7 — сопло; 8 — шлак; 9 — металлическая ванна; 10 — слиток; 11 — изоляция; 12 — водоохлаждаемый поддон

он обеспечивает передачу тока шлаку посредством струи ионизированного инертного газа [8]. Схема процесса показана на рис. 48. Плазменная горелка состоит из водоохлаждаемого медного корпуса (который служит положительным выводом в цепи постоянного тока) с суженным отверстием. Находящийся в корпусе вольфрамовый электрод соединен с отрицательным выводом в цепи постоянного тока. В кольцевом пространстве между корпусом и электродом пропускается инертный газ (аргон), который ионизируется постоянным током и выходит через отверстие в виде интенсивной струи горячей плазмы. Потери мощности в этой цепи сравнительно небольшие и температура плазменной струи быстро падает по мере ее удаления от горелки. Если, однако, приложить напряжение переменного тока, как

показано на рис. 48, то в струе ионизированного газа может поддерживаться высокая сила тока и может быть применено для расплавления шлака обычное оборудование ЭШП.

После наведения шлаковой ванны в нее можно подавать с соответствующей скоростью порошок или лом и переплавлять их для получения слитка. Рафинирующее воздействие несколько ниже, чем обычно при ЭШП, так как не происходит обычного нарастания тонкой пленки жидкого металла, но этот метод особенно полезен для регенерации сырых металлов или передела их в слитки. По этому способу получали слитки хорошего качества из ряда металлов.

Специальные профили

В процессе ЭШП можно изготавливать слитки различного профиля и формы, возможно более близкой к форме готового продукта. Например, идеальными для производства труб являются полые слитки; исключение операции прошивки дает значительный экономический эффект. Могут изготавливаться двухслойные слитки, скажем с осевой частью из мягкой стали и оболочкой из легированной стали. Имеется, конечно, очень много других возможностей, таких, например, как производство слитков для прокатных валков и др. Оценка этих возможностей осуществляется фирмой ЭСРТ и другими исследователями.

Ориентация зерен

Во многих процессах, особенно при производстве тонкого листа для глубокой вытяжки, трансформаторного листа и т. д., большое значение имеет ориентация зерен, и для достижения требуемого эффекта применяются весьма сложные циклы обработки путем горячей прокатки. Возможно получение в слитках ЭШП некоторой ориентации, что может устранить необходимость в этих сложных процессах обработки.

Тепловой к. п. д. процесса ЭШП

Тепловой к. п. д. процесса ЭШП составляет более чем $\sim 30\%$. Изучаются специальные методы его улучшения. Например, одной из важных причин тепловых

потерь является водяное охлаждение. С целью повышения температуры кристаллизаторов (конечно, в таких пределах, чтобы температура внутренней поверхности кристаллизатора не повела к размягчению слитка или к его привариванию к стенкам кристаллизатора) применяют другие охладители, например эвтектический охладитель из щелочного металла, применяемый иногда в вакуумных дуговых печах при переплаве титана.

В некоторых случаях могут применяться толстостенные неохлаждаемые кристаллизаторы. Одним из вариантов этого метода является применение «струйного охлаждения», при котором кристаллизатор ритмично охлаждается водой, которая испаряется. Этот метод позволяет снизить общий расход воды благодаря очень высокой скрытой теплоте пара.

Заклучение

Процесс ЭШП в его современном виде является многосторонним и эффективным, но необходимо осуществить еще много интересных и потенциально важных усовершенствований. Процесс быстро прогрессирует и установки ЭШП восьмидесятых годов будут, вероятно, значительно более сложными по конструкции, приемам управления и работе.

Список литературы

1. Медовар Б. И. и др. Электрошлаковый переплав. *Металлургия*, 1963, с. 65.
2. Миронов Ю. М. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1965, № 5, с. 51—56.
3. Дудко Д. А. и Рублевский И. Н. *Автоматическая сварка*, 1962, № 3, с. 40—48.
4. Paton B. *Electro-slag Remelting in the Soviet Union. Vith International Congress on Electro-Heat*, Brighton, 1968.
5. Латаш Ю. В. *Автоматическая сварка*, 1958, № 6, с. 76—83.
6. Holzgruber W. *VI International Congress on Electro-Heat*, Brighton, 1968.
7. *Iron & Steel*, 1967, v. 40, № 9, p. 338.
8. Hoyle G. *Effect of electro-slag refining variables on composition and properties of metals. 9th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress*, 1969.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА СВОЙСТВО МЕТАЛЛА

Процесс ЭШП позволяет получать слитки с желательными характеристиками почти независимо от свойств переплавляемого металла. Такими характеристиками являются: высокое качество поверхности слитков, высокий выход годных слитков, в которых отсутствуют усадочные раковины и пористость, гомогенность состава, повышенная чистота по включениям, хорошая структура слитков, делающих их пригодными дляковки или прокатки. Достигается также общее улучшение механических свойств, но так как они в какой-то степени различаются в зависимости от типа переплавляемого металла, то этот вопрос будет рассмотрен отдельно в соответствующих разделах, посвященных отдельным сплавам и металлам.

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛИТКОВ

Поверхность слитков ЭШП обычно бывает очень высокого качества благодаря наличию гладкой затвердевшей шлаковой корочки, образующейся при соприкосновении шлака со стенками кристаллизатора. Наилучшие результаты достигаются при работе со шлаком, температура плавления которого ниже температуры плавления металла, и при высокой скорости плавления. Если подводимая мощность и, следовательно, скорость наплавления слишком низки, это ведет к образованию гофрированной поверхности из-за неравномерной толщины шлаковой корочки. Колебания подводимой мощности или неравномерная подача электрода могут быть причиной дефектов поверхности, а излишне глубокая шлаковая ванна способствует образованию бороздок на поверхности слитка вследствие охлаждения верхней части слишком глубокой шлаковой ванны между электродом и кристаллизатором. Безусловно, одним из наиболее важных требований является гладкая поверхность слитков, однако при условии получения лучшей структуры слитка приемлема некоторая ребристость поверхности.

На выход годных слитков влияет скорость наплавления и отвод тепла, так как от этого зависит форма металлической ванны. Для достижения высокого выхода годных слитков нужна мелкая ванна. При хорошем ведении процесса и тщательно выполненной операции подпитки верхней части слитка обычно не требуется обрезки головной части слитка перед дальнейшей горячей обработкой. Обрезка донной части слитка также может не потребоваться при условии хорошего доступа металла к стенкам кристаллизатора; желательно возможно скорее расплавить шлак до начала значительного расплавления электрода. Потери на окисление, которые могут повести к излишнему выгоранию некоторых элементов в первых 2—3 см по длине слитка, также нужно устранить. Эти требования лучше всего выполняются при «жидком старте», но и «твердый старт» может дать отличные результаты при условии применения хорошего метода работы. Ошибками, которые следует исключить, являются возникновение дуги и образование толстого кольца нерасплавленного шлака у донной части слитка.

Хорошее качество слитка достигается в результате направленной кристаллизации слитка от дна к головной части и, следовательно, отсутствия усадочной раковины. Подпитка головной части слитка осуществляется постепенным снижением мощности, предпочтительно одновременным уменьшением тока и напряжения таким образом, чтобы предупредить быстрое изменение положения электрода, которое может произойти при автоматическом управлении процессом в случае снижения только величины тока. Замедленное проведение операции на этой стадии процесса может повести к появлению шлаковых включений.

Вода может служить причиной рыхлости, и должны быть приняты все возможные меры, чтобы избежать ее попадания. Помимо случайного попадания воды, например из-за утечек в кристаллизаторах и поддонах, основной причиной этого типа дефектов может быть влажность шлака. Полностью устранить влажность шлака можно только его расплавлением, следовательно, предпочтительным является «жидкий старт»; в случае невозможности «жидкого старта» пред-

варительно расплавленный и дробленый шлак следует хранить в герметичных контейнерах.

Гомогенность структуры и химического состава достигается в условиях, способствующих значительной направленной кристаллизации от дна к верхней части слитка, или перемешиванием, или применением поддона с возвратно-поступательным движением; однако излишнее применение этих методов может в отдельных случаях повести к полосчатости. Например, структура слитков быстрорежущей стали может стать полосчатой вследствие переохлаждения, даже если слиток подвергается вибрации или охлаждается со скоростью ниже критической. В табл. 16 показано распределение элементов, типичное для слитка гомогенного химического состава.

Повышенная чистота данного переплавляемого металла всегда может быть достигнута путем применения соответствующих шлаков. В табл. 17 показан типичный

Таблица 16

Распределение элементов в слитке диам. 152 мм из мягкой стали*

Элемент	Содержание элементов, %				
	корковая зона	на расстоянии половины радиуса	осевая часть слитка	на расстоянии половины радиуса	корковая зона
<i>Верхняя часть слитка</i>					
C	0,18	0,18	0,175	0,18	0,19
Si	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mn	0,58	0,59	0,58	0,57	0,56
S	0,018	0,018	0,019	0,018	0,018
P	0,025	0,027	0,026	0,026	0,027
N ₂	0,008	0,007	0,006	0,0035	0,006
<i>Нижняя часть слитка</i>					
C	0,175	0,185	0,18	0,185	0,175
Si	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Mn	0,56	0,56	0,53	0,56	0,56
S	0,018	0,019	0,019	0,016	0,019
P	0,025	0,028	0,026	0,028	0,029
N ₂	0,006	0,0055	0,006	0,0065	0,005

* BISRA. Paper MG/A/416/66.

пример возможного улучшения чистоты и значительного уменьшения суммарной длины включений в результате ЭШП мягкой стали. В табл. 18 показано, как снижается содержание кремния, серы и кислорода в стали Еп42В; возможно также снизить содержание азота и водорода (табл. 19).

Таблица 17

Влияние ЭШП на чистоту мягкой стали*

Номер опыта	Суммарная длина включений, найденных в 100 полях зрения, мм	
	до переплава	после переплава
1	9,71	5,74
2	3,40	1,01
3	3,45	2,44

* BISRA. Paper MG/A/416/66.

Таблица 18

Влияние ЭШП на химический состав стали Еп42В*

Элемент	Содержание, %				
	электрод Еп42В	слиток ЭШП		изменение, %	
		верхняя часть	нижняя часть	верхняя часть	нижняя часть
С	0,64	0,65	0,66	+1	+3
Si	0,19	0,115	0,115	-42	-42
Mn	0,64	0,64	0,57	Не изм.	-11
S	0,049	0,012	0,009	-75	-81
P	0,031	0,032	0,032	+3	+3
N ₂	0,006	0,006	0,006	Не изм.	Не изм.
Al	0,010	0,014	0,030	+40	+200
O ₂	0,004	0,002	0,002	-50	-50

* BISRA. Paper MG/A/416/66.

При переплаве сталей, которые не содержат сильных нитридообразующих элементов: титана, ниобия и др., содержание азота может быть резко снижено. Так, при пе-

Изменение содержания газов в сталях ЭШП [1]

Сталь	Содержание, 10 ⁻⁴ %					
	кислород		азот		водород	
	до переплава	после переплава	до переплава	после переплава	до переплава	после переплава
18ХНВА	55	30,8	113	76,5	—	—
ОХ18Н9	34,6	12,2	757	273	11,3	8,7
ЭИ851	56,9	25,6	527	607	10,5	9,7
ЭИ847	15,7	16,7	544	574	15,3	13,6
ЭИ961	40	21	250	190	5,4	5,9
ЭИ867	13	7,5	107	51	4,7	2,4
ЭИ867	10,4	5,9	62	31	13,3	4,1
ЭИ867	17,2	4,6	27	37	9,9	2,4

реплавле стали ОХ18Н9 содержание азота снижалось почти до одной трети первоначальной величины. При переплавле аустенитных сталей, стабилизированных титаном

Таблица 20

Химический состав
коррозионностойкого
сплава Ni—Cr—Fe
до и после ЭШП

Элемент	Состав, %	
	электрод	слиток ЭШП
Mo	3,21	3,20
Nb	5,11	5,04
Ti	0,89	0,87
Al	0,55	0,50
Cu	<0,01	<0,01
C	0,080	0,093
S	0,002	0,002
O ₂	0,0041	0,0003
N ₂	0,0090	0,0070

и ниобием, содержание азота остается на прежнем уровне.

При переплавле жаропрочного сплава ЕИ867 на никелевой основе, который содержит большое количество алюминия, резкое снижение содержания кислорода и водорода сопровождалось значительным снижением содержания азота, особенно в тех случаях, когда его содержание в исходном металле было высоким (табл. 20). Приведенные данные являются подтверждением того

факта, что в отличие от титана и ниобия алюминий не препятствует удалению азота при ЭШП вследствие меньшей плотности нитрида и его сравнительно низкой температуры диссоциации.

Направленность кристаллизации, достижимая при электрошлаковом переплаве, такова, что слитки пригодны дляковки или прокатки непосредственно после переплава без предварительного обжатия или проковки.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ДОСТИГНУТЫЕ ПРИ ЭШП РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Жаропрочные сплавы

По-видимому, наиболее сенсационными преимуществами ЭШП были достигнутые при производстве жаропрочных сплавов на никелевой основе. Сообщалось о случаях, когда выход годного устойчиво увеличивался более чем на 20% по сравнению с материалом лучшего качества, полученным вакуумно-дуговым переплавом, который считался прежде наиболее хорошим способом получения этих сплавов. Не является необычным 95%-ный выход годного из жидкого металла до катаного сортового металла высокого качества, прошедшего испытания при сверхзвуковых скоростях. Нет необходимости подчеркивать экономическую сторону дела. Повышение выхода годного связано с улучшением пластичности в горячем состоянии, и это может быть подтверждено данными, полученными от Юнион карбайд Корп, США. Отличная проковываемость слитков из сплава юдимет-700*, полученных при ЭШП и ВДП, подтверждена результатами испытаний на машине Глибля (рис. 49). Машина Глибля является устройством для определения пластичности сплавов в горячем состоянии при различных температурах. Кривые на рис. 49 показывают, что почти независимо от температуры испытания пластичность сплава юдимет электрошлакового переплава была всегда хорошей с точки зрения проковываемости, тогда как пластичность слитков ВДП соответствовала требованиям хорошей проковываемости только в определенном интервале температур.

До применения ЭШП для переплава слитков из сплава этого типа температуруковки необходимо было жестко контролировать, чтобы избежать растрескивания. Кри-

* Юдимет-700 — сплав на никелевой основе, 18% Со, 15% Сг, 3% Тi, 4% Аl, 5% Мо.

тичность условийковки слитков ЭШП значительно смягчилась, что дало соответствующий экономический эффект.

В табл. 20 приведены данные об изменениях химического состава сплава на никелевой основе при ЭШП; основным является снижение содержания кислорода до

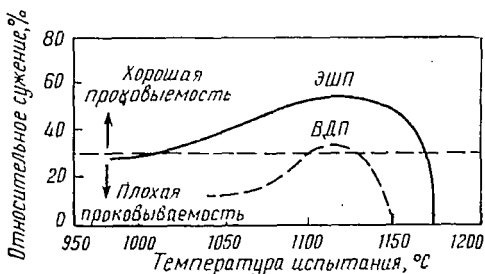


Рис. 49. Результаты испытания пластичности в горячем состоянии на машине Глибля сплава юдимет-700

величины менее 8% от исходной. Небольшое увеличение содержания углерода может быть, по-видимому, приписано некоторому излишку содержания углерода в шлаке. Этот недостаток может быть устранен, если учитывать реакции между шлаками и графитовыми тиглями, в которых эти шлаки расплавляют.

Поведение еще одного жаропрочного сплава показано в табл. 21. Существенно важным компонентом этого сплава обычно считается цирконий, но его удаление при ЭШП не оказало вредного влияния на характеристики сплава при последующей механической обработке. Предполагается, что его назначение в исходном расплаве состоит в том, чтобы служить средством для очистки от примесей, и на стадии вторичного переплава он удаляется вместе с прореагировавшими с ним примесями, что способствует повышению чистоты сплава.

О результатах переплава других сплавов сообщают Патон и др. [2]. Сообщается о значительном снижении числа включений, причем указывается на возможность устранения включений, содержащих титан (TiO_2 и TiN). Содержание газов снижалось — кислорода приблизительно на 75% и азота приблизительно на 27%. Пластичность при высокой температуре возростала максимально на 46%, а длительная прочность при испытаниях на пол-

Химический состав жаропрочного сплава Ni—Cr—Fe—Mo до и после ЭШП

Элемент	Состав, %		Элемент	Состав, %	
	электрод	слиток ЭШП		электрод	слиток ЭШП
C	0,13	0,102	Mo	9,14	9,0
Mn	0,57	0,58	W	0,50	0,50
Si	0,68	0,50	Zr	0,06	0,003

зучестойкость при высокой температуре приблизительно на 30% по сравнению с материалом обычной плавки. Улучшалась также ударная вязкость.

Исследование, проведенное Компани дез ателье э форж де ла Луар во Франции [3], подтверждает, что электрошлаковый переплав значительно улучшает чистоту сплавов на никелевой основе и позволяет изготавливать тяжелые профили из окалиностойких сплавов благодаря сплошному затвердеванию слитков электрошлакового переплава. Оказалось возможным изготавливать из квадратных слитков ЭШП со стороной 305 мм из сплава хейнс-25 (на кобальтовой основе, 10% никеля, 20% хрома, 50% вольфрама) полностью качественные штанги диам. 255 мм, в то время как при производстве из квадратных слитков со стороной 380 мм из того же сплава, но обычной плавки штанг аналогичного диаметра всегда обнаруживалась значительная осевая рыхлость, что вело к очень низкому выходу годного. Тонкие листы, полученные из переплавленных слитков, никогда не имели поверхностных дефектов и чистота их поверхности была превосходной. Исследование Компани дез ателье э форж де ла Луар подтверждает, что электрошлаковый переплав значительно увеличивает проковываемость слитков без какой-либо подготовки поверхности, что повышает выход годного и производительность.

Быстрорежущая сталь

Электрошлаковый переплав может решить многие из специальных проблем, связанных с производством быстрорежущей стали. Осевая рыхлость фактически устраняется; головная обрезь невелика или ее не требуется сов-

сем. В результате переплава может быть достигнуто значительное однообразие структуры от поверхности слитка к его оси с уменьшением крупности зерен в центральной части слитка.

Таблица 22

Влияние ЭШП на карбидную неоднородность стали P18 [1, с. 122]

Исследуемый материал	Уков	Карбидная неоднородность, баллы
Исходный	4,6	10,0
Переплавленный	2,0	7,0
Исходный	6,2	10,0
Переплавленный	2,3	6,0
Исходный	9,0	9,0
Переплавленный	4,0	5,0
Исходный	25,0	7,0
Переплавленный	11,0	3,0

Примечания: 1. Все электрошлаковые слитки были выплавлены из исходного металла одной плавки.

2. Оценка карбидной неоднородности производилась согласно ГОСТ 5952—51.

Следует подчеркнуть, что процесс ЭШП не изменяет характер кристаллизации быстрорежущей стали и что некоторые фазы в ней аналогичны фазам в материале обычной выплавки. Таким образом, необходима проработка структуры горячей деформации в обычном объеме, чтобы устранить образование карбидной сетки и крупных карбидов. Если это сделано, то отмечается значительное уменьшение полосчатости.

Исследования размеров карбидов и гомогенности быстрорежущей стали были проведены в СССР (табл. 22).

Крупность карбидов часто рассматривается в качестве важного критерия в технических условиях на быстрорежущую сталь. Регулирование их крупности возможно, но условия процесса ЭШП являются критическими в том случае, когда должен быть исключен даже незначительный рост карбидов, так как первоначальные затвердевшие слои снова нагреваются до температуры предварительной сфероидизации за счет тепла централь-

ной части слитка. Ряд исследователей сообщил о том, что температура горячей деформации быстрорежущей стали, подвергшейся ЭШП, может быть снижена на 20—30° С, и имеются предположения о том, что температура заковки также может быть снижена на какую-то величину, равную, по-видимому, 50° С. Выход годного сортового материала обычно возрастает приблизительно на 10% по сравнению с лучшим методом обычной плавки. Точную величину дать невозможно, так как стандарты значительно различаются.

Содержание серы, конечно может быть снижено, если это желательно. Другим изменением состава, заслуживающим упоминания, является потеря приблизительно 33% Si. Это обычно является недостатком и может быть исправлено, если это необходимо; лучшим методом является незначительное увеличение содержания кремния в электродном материале.

Для автоматных сталей с высоким содержанием серы, такой, например, как сталь M2S, требуются совсем другие условия переплава. Удаление серы может быть задержано кислородом, содержащимся в шлаке, что, конечно, аналогично обычному сталеплавильному процессу, но имеются также другие методы, обеспечивающие регулирование содержания серы без возрастания содержания кислорода. В табл. 23 приводятся некоторые данные, свидетельствующие о возможности изменения химическо-

Таблица 23

**Влияние ЭШП на химический состав быстрорежущей стали
(средняя величина изменений), %**

Тип стали	C	Si	Mn*	S	P	Cr	W	Mo	V	Co	O ₂	Ni
18-4-1	0	-40	-18	-46	0	0	0	0	-2	0	-25	0
6-5-2	0	-60	-4	-20	0	0	0	0				0
Сталь для горячих штампов с 8% W	0	-30	0	-50	0	-4**	0	0	Не определяли			

* В нескольких случаях установлено снижение содержания Mn в направлении от нижней к верхней части слитка.

** Изменения содержания Cr в продольном направлении.

Чистота от неметаллических включений стали, полученной различными методами

Материал	Испытания по стандарту AMS2300A					
	включения			серьезность включений		
	верх	низ	сере- дина	верх	низ	сере- дина
Сталь 18-4-1 ВДП	0,19	0	0,10	1,71	0	0,85
То же, ЭШП	0	0	0	0	0	0
То же, выплавленная в дуговой печи	0,67	0,54	0,61	96,3	49,8	73,1
То же	2,02	0,40	1,21	141,8	38,1	90,0
» »	0,23	0,13	0,18	100	33,4	66,7

Результаты магнитных испытаний на чистоту по AMS 2300A, выполненных на ступенчато обточенных прутках диам. 35 мм из быстрорежущей стали ВДП, ЭШП и обычной плавки (средние величины на плавку) [4]

Материал	Включения	Серьезность включений
Предельные величины по AMS 2300 A (для стали вакуумного переплава) .	Не более 0,50	Не более 1,00
Материал ВДП	0,05	0,43
Материал ЭШП	0	0
Материал открытой плав- ки (только для сравне- ния)	0,67	76,6

го состава инструментальных сталей при ЭШП. Чистота значительно улучшается; обычное стократное увеличение недостаточно для сравнения — часто регистрируются очень низкие величины (табл. 24). В табл. 25 приведены результаты магнитного испытания на содержание вклю-

чений в ступенчато обточенных прутках, которые также подтверждают превосходство материала ЭШП.

Свойства улучшаются, особенно усталостная стойкость. На рис. 50 показано улучшение ударной вязкости ненадрезанных образцов быстрорежущей стали 18-4-1 (Т1) при различных величинах твердости. Стойкость сверл, изготовленных из стали ЭШП, на 23% выше, чем изготовленных из материала обычной плавки (рис. 51). Аналогичные данные имеются относительно стали 6-5-2, сверхбыстрорежущих сталей, а также сталей с высоким содержанием кобальта. В СССР исследовались усталостные и износостойкие свойства быстрорежущих сталей. Сообщается, что предел выносливости стали ЭШП после 40×10^6 циклов на 35% выше, чем обычной стали, т. е. 74 кг/мм^2 вместо 54 кг/мм^2 при твердости 60 HRC и 78 кг/мм^2 вместо 58 кг/мм^2 при той же твердости. Средняя величина длительной проч-

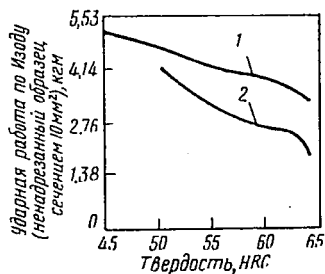


Рис. 50. Сравнительные величины работы ударного разрушения быстрорежущей стали ND (Т1) ЭШП и обычной плавки [4]:
1 — материал ЭШП; 2 — материал обычной плавки

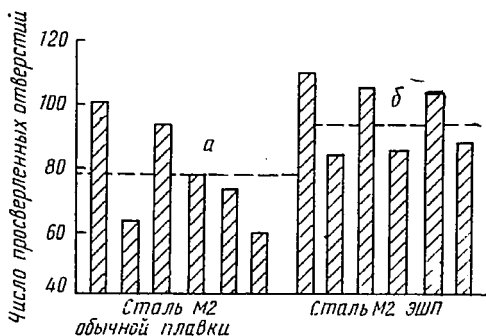


Рис. 51. Сравнительная стойкость сверл из быстрорежущей стали М2 ЭШП и обычной плавки при сверлении в стали Еп9 с временным сопротивлением $79,0 \text{ кг/мм}^2$ — слепых отверстий глубиной 17,7 мм при 732 об/мин (окружная скорость 27,4 м/мин) и при скорости подачи 255 мм/мин с ускорением на 25,4 мм/мин после каждых 20 отверстий [4]:

а — средняя стойкость сверл из стали обычной плавки; б — средняя стойкость сверл из стали ЭШП

ности образцов переплавленной стали на 30% выше, чем обычной стали, в среднем для данной испытательной машины она составляла 307 ч вместо 235 ч. Эта улучшенная стойкость материалов ЭШП подтверждена результатами аналогичной работы в Национальной технологической лаборатории в Шотландии, где применялось роликовое контактное испытание на усталостную стойкость.

Компани дез ателье э форж де ла Луар [3] подтверждает повышение качества быстрорежущей стали и указывает, каким образом могут быть обеспечены узкие пределы заданного химического состава. Сообщалось об исключительно однообразной структуре слитка массой 200 кг. Дендритная структура полностью отсутствовала, не было также скоплений эвтектоидных карбидов; все это способствовало распределению в слитке чрезвычайно тонких карбидов.

Подшипниковая сталь

Содержание включений в шарикоподшипниковых сталях играет важную роль в усталостной стойкости материала. Хотя за последние годы достигнуты значительные успехи в выплавке более чистых сталей обычными процессами, проблема случайных аварий еще не устранена полностью. Был выполнен значительный объем исследований по структуре и свойствам хромистых сортов стали, содержащих 1% С, и зависимость между содержанием кислорода и содержанием включений хорошо известна.

Влияние ЭШП на свойства стали типа Еп31 интенсивно изучали как в Англии, так и в СССР [1]. Чтобы применение этой стали было экономически оправданным, необходимо обеспечить придание ей значительных преимуществ в результате переплава. Установлено, что 94%-ный выход годного из жидкого металла до готового сортового слитка достигается легко и в течение всей операции переплава обеспечивается хорошее регулирование химического состава (табл. 26).

Достигалось хорошее удаление серы и кислорода; имела место также заметная потеря алюминия. Кроме небольшой потери кремния, содержание всех других элементов было постоянным и находилось в заданных пределах.

Таблица 26

Химический состав одной плавки шарикоподшипниковой стали Еп31 (АISI 52100) до и после ЭШП

Материал	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Al	O ₂
Электрод	1,20	0,35	0,54	0,012	0,14	1,55	0,009	0,0020
Слиток ЭШП	1,20	0,27	0,52	0,007	0,14	1,52	0,005	0,0010

Из обзора этих результатов можно сделать вывод, что содержание включений в переплавленном материале должно быть значительно меньше, чем в электроде; это подтверждается данными табл. 27, в которой показаны результаты подсчета включений.

После ЭШП количество сульфидных частиц невелико, а алюминаты, силикаты и окислы вообще не наблюдаются даже при увеличении в 400 раз. Однако следует заметить, что ведение процесса требует внимания и не исключена возможность увеличения загрязнения при неблагоприятных условиях, например поглощение алюминия из высокоглиноземистых шлаков.

Общая стойкость продуктов ЭШП приблизительно аналогична стойкости продуктов, полученных другими вторичными процессами рафинирования, такими как вакуумно-дуговой или электроннолучевой переплав, плазменно-дуговая или вакуумно-индукционная плавка. Ус-

Таблица 27

Число включений в шарикоподшипниковой стали Еп31 (АISI 52100) до и после ЭШП¹

Материал	Сульфиды размером, мм'			Алюминаты	Силикаты	Окислы
	<0,01	0,01— 0,02	>0,02			
Электрод	220	30	45	Нет	17	Нет
Слиток ЭШП	6	2	1	Нет	Нет	Нет

¹ Число включений в 25 полях, X400 (пруток диам. 28,6 мм).

тановлено, что усталостные свойства стали Еп31 в некоторых случаях были такие же или несколько лучше, чем у материала вакуумно-дугового переплава. Моделирование износостойкости в условиях эксплуатации, осуществленное скоростным испытанием на устройстве с четырьмя шариками, показало наличие тенденции к устранению преждевременных разрушений, что является результатом полного отсутствия крупных включений, вскрывающихся в результате обработки резанием. Эти включения не всегда устраняются при вакуумно-дуговом переплаве.

Таблица 28

Результаты сравнительного металлографического исследования шарикоподшипниковой стали открытой плавки и ЭШП [1, с. 127]

Марка стали	Исследуемый металл	Число исследованных плавок	Загрязненность, баллы, по ГОСТ 801—47		
			оксиды	сульфиды	глобули
ШХ15	Обычный	314	2,69	2,27	—
		177	2,62	2,25	—
ШХ15СГ	ЭШП	98	1,03	0,75	0,48
	Обычный	75	2,66	2,20	—
		87	2,69	2,37	—
	ЭШП	79	1,14	1,05	0,29

Как показано в табл. 32, в стали Еп31 несколько снижается число нитридов.

Указанные выше результаты английского исследования близки к результатам, полученным в СССР, как это можно видеть по данным проведенного там металлографического исследования (табл. 28).

Можно видеть, что устойчиво достигается значительное уменьшение содержания окисных и сульфидных включений; сообщается о небольшом числе сферических включений. Предполагается, что они типа алюминатов, что в свою очередь позволяет допустить наличие в СССР тенденции к применению глиноземистых шлаков. Применяемая ныне в Англии технология показывает, что можно устранить даже эти включения.

Углеродистые и легированные конструкционные стали

Хорошие результаты дает ЭШП хромомолибденованадиевых штамповых сталей. Сортамент этих сталей включает американские стали серии H, из которых наиболее популярной является сталь H.11 (0,35С, 5% Cr, 0,4% V, 1,5% Mo). Важным свойством крупных слитков, изготовленных процессом ЭШП, которое было предметом ряда исследований в Англии, является то, что полученные в результате ЭШП структуры требуют меньшего уплотнения ковкой перед прокаткой. Это объясняется тем, что в результате ЭШП получают материал без включений с тонкой, равномерно диспергированной структурой. Некоторые поставщики утверждают, что слитки можно

Таблица 29

Влияние ЭШП на механические свойства стали X40 Cr Mo V51 [5]

Характеристика образца	Местонахождение образца	σ_T , кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	σ , %	ψ , %	Отношение значений в поперечном направлении к значениям в продольном направлении	
						δ	ψ
До ЭШП	Корковая зона	$\frac{146,5^*}{139,0}$	$\frac{159,0}{152,0}$	$\frac{15}{7}$	$\frac{48}{12}$	0,465	0,250
		$\frac{144,5}{142,0}$	$\frac{161,0}{154,5}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{34}{5}$		
	Осевая зона	$\frac{146,5}{142,5}$	$\frac{157,5}{152,0}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{36}{6}$	0,160	0,167
		$\frac{164,0}{—}$	$\frac{173,0}{—}$	$\frac{12}{—}$	$\frac{47}{—}$		
После ЭШП	Корковая зона	$\frac{156,0}{157,5}$	$\frac{167,0}{169,0}$	$\frac{11}{—}$	$\frac{40}{—}$	1,00	0,95
		$\frac{156,0}{156,0}$	$\frac{167,0}{165,5}$	$\frac{9}{9}$	$\frac{30}{32}$		
	Осевая зона	$\frac{156,0}{156,0}$	$\frac{167,0}{165,5}$	$\frac{9}{9}$	$\frac{30}{32}$	1,06	1,07
		$\frac{156,0}{156,0}$	$\frac{167,0}{165,5}$	$\frac{9}{9}$	$\frac{30}{32}$		

* В числителе — в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном направлении.

прокатывать непосредственно после ЭШП, так как они вообще не требуют проковки. Таким образом, может быть достигнута значительная экономия на издержках производства (см. табл. 32).

Испытания на прочность показали, что, помимо улучшения деформируемости в горячем состоянии, у стали типа Н.11 электрошлакового переплава значительно

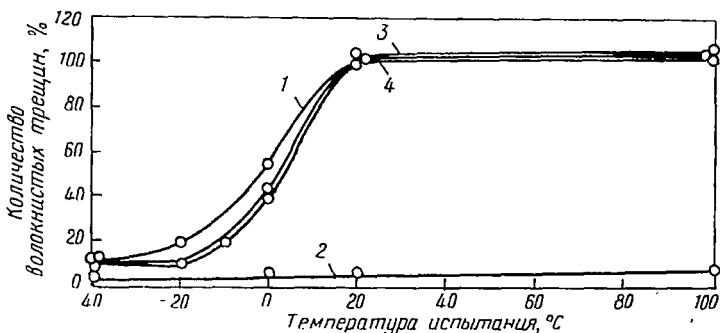


Рис. 52. Зависимость между температурой испытания и возникновением волокнистых трещин на образцах, применявшихся при испытании на работу ударного разрушения по Шарпи:

1 — сталь обычной плавки, в продольном направлении; 2 — то же, в поперечном направлении; 3 — сталь ЭШП в поперечном направлении; 4 — то же, в продольном направлении

улучшается пластичность в поперечном направлении (табл. 29) [5].

Значительный объем исследований был выполнен по установлению влияния ЭШП на пружинную сталь Еп42В, содержащую 0,70% С. Небольшие изменения в содержании углерода, азота и, возможно, марганца могут быть, по-видимому, отнесены за счет аналитической ошибки, а большая часть остальных изменений является выгодной. Содержание серы и кислорода снижалось до удовлетворительных уровней, а небольшое снижение содержания кремния было полезным. Наблюдался небольшой рост содержания алюминия, но это не считали вредным.

Соответствующие результаты испытаний прочностных свойств материала той же плавки, приведенные в табл. 30, свидетельствуют о значительном улучшении пластичности, особенно в поперечном направлении, что делает, таким образом, этот материал почти изотропным. Подтверждение этому дают результаты испытаний на удар-

ную вязкость (рис. 52 и 53), из которых видно, что в широком интервале температур наблюдаются почти идентичные свойства как в продольном, так и в поперечном направлениях в полную противоположность тому, что наблюдается в материале обычной плавки.

Методом испытания, особенно чувствительным к содержанию включений и поэтому очень полезным при

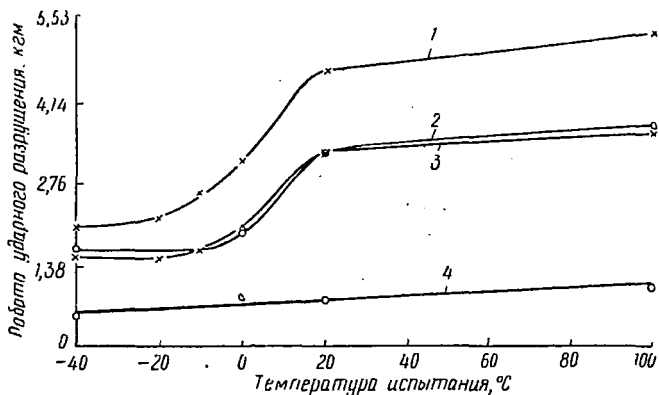


Рис. 53 Работа ударного разрушения на Шарпи (образцы стали Еп42В обычной плавки и ЭШП, закалка при 810° С, отпуск при 600° С):

1 — сталь обычной плавки, в продольном направлении; 2 — сталь ЭШП, в поперечном направлении; 3 — сталь ЭШП, в продольном направлении; 4 — сталь обычной плавки, в поперечном направлении

оценке свойств материала ЭШП, является испытание на кручение при высокой температуре. Испытания, проведенные фирмой ЭСРТ на стали Еп8, содержащей 0,40% С, выплавленной с применением различных шлаков, показали устойчивое улучшение торсионных свойств по сравнению с материалом обычной плавки (табл. 31).

Влияние переплава на химический состав легированных сталей может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от сорта переплавляемой стали и применяемого шлака (табл. 32).

Одной из важных целей процесса ЭШП является обычно удаление серы и кислорода, и эта цель, как правило, достигается без затруднений. Удаление других окисляемых элементов, например кремния и марганца, обычно бывает случайным, но их удаление можно регулировать различными методами. Удаление кремния, ко-

Влияние ЭШП на механические свойства стали Еп42В
при комнатной температуре

Характеристика образца	Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	δ , %	ψ , %
Открытой плавки	Продольное	85,0	100,0	14	51
	Поперечное	89,0	98,0	4	7
	—	83,0	96,0	4	7
	—	88,0	98,0	6	9
	Среднее по испытаниям в поперечном направлении	86,0	97,5	5	8
ЭШП	Продольное	84,0	98,0	14	52
	—	83,0	98,0	13	51
	—	73,0	96,0	17	52
	Среднее по испытаниям в продольном направлении	80,5	97,5	15	52
	Поперечное	90,0	104,0	12	44
	—	88,5	103,5	9	36
	—	89,5	103,0	12	39
	Среднее по испытаниям в поперечном направлении	89,5	103,5	11	40

Таблица 31

Испытания на кручение стали ЭШП Еп8 при высокой температуре

Тип шлага	Положение в слитке	Испытания на кручение при 1200° С, число оборотов до разрушения
(70F/10/0/20)	Верхняя часть слитка	60
	Средняя часть слитка	86
	Нижняя часть слитка	90
(100F)	Верхняя часть слитка	91
	Средняя часть слитка	118
	Нижняя часть слитка	190
(70F/0/0/30)	Верхняя часть слитка	83
	Средняя часть слитка	81
	Нижняя часть слитка	85
(70F/30)	Верхняя часть слитка	113
	Средняя часть слитка	170
	Нижняя часть слитка	180

Средние величины изменений химического состава сталей
в результате ЭШП
(в скобках — интервал величин), %

Сталь	C	Si	Mn	S	P	Cr ¹	Ni	Mo	Al ²	O ₂	N ₂
Еп31	0	-60 (10-74)	-10 (3-18)	-65 (25-75)	0	0	0	0	I до 700	-33 (0-50)	-46 (16-80)
Еп39В	0	-30 (15-40)	-3 (0-5)	-50 (18-75)	0	0	0	0	Не определялось		
5% Cr—Mo—V для горячих штам- пов	0	-21 (10-40)	-5 (0-15)	-60 (40-70)	0	0	0	0	Не определялось		
Еп24	0	-60 (40-80)	-5 (0-15)	-70 (70-85)	0	0	0	0	Не опр.	-45 (0-60)	Не опр.

¹ Установлена небольшая тенденция к увеличению содержания хрома в нижней части слитка.

² Поглощение Al нельзя предсказать, так как оно не зависит от содержания Al₂O₃ в шлаке.

торый в малой степени способствует прокаливаемости сплава, не носит серьезного характера и, по-видимому, способствует повышению чистоты продукта. Так как кремний обычно добавляют лишь в процессе выплавки стали в качестве раскислителя, попытки его задержать делаются в основном для того, чтобы обеспечить соответствие полученной стали техническим требованиям на нее. Особенностью слитков стали ЭШП является то, что их кристаллизация направлена более вертикально, чем у обычных слитков, что обеспечивает почти полное устранение поперечной ликвации вместе со связанным с этим явлением инготизма. Хотя по высоте слитка могут иногда обнаруживаться отклонения в содержании легирующих, они обычно не резко выражены, и, как правило, незначительны, за исключением очень длинных слитков.

Ликвация легирующих элементов может оказать большое влияние на прокаливаемость и может стать очень серьезной проблемой в поверхностно упрочняемых сталях, в которых местные отклонения в содержании легирующих могут привести к короблению при закалке. Эти стали обрабатывают резанием обычно до упрочнения их поверхности вследствие трудностей с их обработкой при наличии закаленной поверхности. После окончательной закалки эти стали подвергают лишь небольшой шлифовке, и поэтому чрезмерное и непредвиденное коробление в процессе термообработки является нежелательным. Равномерный состав сталей ЭШП значительно облегчает решение проблемы коробления.

Французское исследование по никельхроммолибденовой стали 16NCD13 (сталь типа En36C), как это видно из данных табл. 33, подтверждает характерное улучшение пластичности в поперечном направлении для этой группы сталей.

Свойства пластичности в поперечном направлении значительно улучшаются после ЭШП; этого нельзя в такой же мере сказать об отношении величин пластичности в продольном и поперечном направлениях, так как при ЭШП происходит, хотя и в меньшей степени, улучшение свойств в продольном направлении.

Результаты французского исследования, проведенного на двух непосредственно упрочняемых конструкционных сталях 35NCD16 (типа En28) и 35CD4 (типа En19), очень похожи, как это видно из данных табл. 34, и под-

Свойства стали 16 NCD 13* до и после ЭШП [3]

Материал	Содержание, %		Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	δ , %	ψ , %	А, кг/см
	O ₂	S						
До ЭШП	0,008	0,011	Продольное (П)	110,0	137,0	15	61	4,42
			Поперечное (п)	110,0	137,0	11	30	1,93
			П/п	—	—	1,4	2,0	2,3
После ЭШП (кислый HF)	0,003	0,003	Продольное (П)	110,0	137,0	15	65	5,52
			Поперечное (п)	110,0	137,0	14	55	4,00
			П/п	—	—	1,1	1,2	1,4

* Химический состав стали 16NCD13; 0,16% С; 3,2% Ni; 1,0% Cr; 0,25% Mo. Термическая обработка: закалка в масле при 825° С, отпуск в масле при 180° С.

Свойства двух легированных конструкционных сталей до и после ЭШП [6]

Сорт стали	Материал	Содержание, %		Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	σ_B , кг/мм ²	δ , %	ψ , %	А, кгм
		O ₂	S						
35С16	До ЭШП	0,005	0,004	Продольное (П)	154,5	194,0	13	46	2,48
				Поперечное (п)	154,5	194,0	6	12	1,52
				П/п			2,2	3,8	1,75
	После ЭШП	0,002	0,001— 0,002	Продольное (П)	154,5	194,0	13	48	2,90
				Поперечное (п)	154,5	194,0	10	37	2,35
				П/п			1,3	1,3	1,2
35С4	До ЭШП	0,005	0,003	Продольное (П)	115,0	126,0	15	50	3,45
				Поперечное (п)	115,0	126,0	10	21	2,21
				П/п			1,6	2,4	1,55
	После ЭШП	0,002	0,001	Продольное (П)	115,0	126,0	15	56	4,14
				Поперечное (п)	115,0	126,0	14	54	3,45
				П/п			1,03	1,04	1,20

Химический состав сталей: 35 NCD 16 : 0,38% С, 4% Ni, 1,75% Cr, 0,45% Mo; 35 CD 4 : 0,38% С, 1,15% Cr, 0,30% Mo.
 Термическая обработка: 35 NCD 16: закалка при 875° С, охлаждение до -70° С, отпуск при 220° С;
 35 CD 4: закалка в масле при 850° С, отпуск в масле при 550° С.

тверждают английский опыт в отношении этих сортов стали.

Французские исследователи сообщают также о значительном улучшении усталостных свойств этих сталей, величины которых в продольном направлении возросли приблизительно на 25%. Испытания на распространение трещин (рис. 54) также указывают на весьма значительное улучшение свойств.

Повышенная чистота ЭШП может оказать радикальное влияние и на улучшение характеристик ударной вязкости конструкционных сталей, как это имеет место в случае свариваемой молибденованадиевой стали 15MDV5, обладающей высоким пределом текучести, которая обычно применяется для труб. Результаты испытаний на

Таблица 35

Ударная вязкость листов толщиной 89 мм из стали 15MDV5 [3]

Характеристика образца	Температура испытания, °С	Работа ударного разрушения, кгм	
		в продольном направлении	в поперечном направлении
До ЭШП	+20	15,6	12,4
	-20	10,4	5,9
	-40	6,8	2,75
После ЭШП	+20	20,7	20,4
	-20	16,4	14,0
	-40	13,1	11,6

Таблица 36

Критические температуры хрупкости для образцов листов из стали 15 MDV5 [5]

Характеристика образца	Работа ударного разрушения, кгм	Температуры, при которых получены указанные величины работы ударного разрушения, °С	
		в продольном направлении	в поперечном направлении
До ЭШП	8,0	-34	-7
	12,0	-14	+17
После ЭШП	8,0	-55	-50
	12,0	-46	-37

Состав слитков различных сталей промышленного производства [1]

Марка стали	Объект анализа	Химический состав, %						состав, %						Состояние поверхности электрода	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Al	Ti	Nb	S		P
<i>Шарикоподшипниковые стали</i>															
ШХ15	Электрод	1,02	0,27	0,27	1,46	—	—	—	—	—	—	—	0,009	0,016	С окалиной
	Слиток	1,01	0,18	0,26	1,46	—	—	—	—	—	—	—	0,006	0,015	
	Изменение, %	-1,0	-33,3	-3,7	0,0	—	—	—	—	—	—	—	-33,3	-6,2	
ШХ15СГ	Электрод	1,06	0,53	1,07	1,48	—	—	—	—	—	—	—	0,010	0,019	С окалиной
	Слиток	1,04	0,46	1,03	1,47	—	—	—	—	—	—	—	0,007	0,021	
	Изменение, %	-1,9	-13,2	-3,7	-0,7	—	—	—	—	—	—	—	-30,0	+10,5	
<i>Среднелегированные, конструкционные, быстрорежущие и износостойкие стали</i>															
38ХМЮА	Электрод	0,40	0,36	0,46	1,51	—	0,21	—	—	0,78	—	—	0,007	0,014	Травленая
	Слиток	0,41	0,38	0,46	1,52	—	0,21	—	—	0,70	—	—	0,004	0,013	
	Изменение, %	+2,5	+5,5	0,0	+0,7	—	0,0	—	—	-10,2	—	—	-43,0	-7,0	
18ХНВА	Электрод	0,17	0,28	0,44	1,44	4,28	—	0,89	—	—	—	—	0,015	0,012	Ободранная
	Слиток	0,17	0,26	0,43	1,44	4,28	—	0,87	—	—	—	—	0,007	0,013	
	Изменение, %	0,0	-7,2	-2,3	0,0	—	-2,2	—	—	—	—	—	-53,0	+8,3	
Р18	Электрод	0,75	0,24	0,24	4,23	0,26	—	17,40	1,20	—	—	—	0,015	0,024	Зачищена наждаком
	Слиток	0,75	0,22	0,24	4,25	0,26	—	17,10	1,20	—	—	—	0,010	0,025	
	Изменение, %	0,0	-8,3	0,0	+0,5	0,0	—	-1,7	0,0	—	—	—	-33,3	+4,2	
Р18М	Электрод	0,75	0,24	0,16	4,40	0,22	0,45	17,85	1,19	—	—	—	0,024	0,027	Травленая
	Слиток	0,75	0,19	0,15	4,40	0,22	0,47	17,88	1,18	—	—	—	0,013	0,028	
	Изменение, %	0,0	-9,5	-6,2	0,0	0,0	+4,4	+0,1	-1,0	—	—	—	-45,9	+3,7	
Г13	Электрод	1,21	0,34	12,12	—	—	—	—	—	—	—	—	0,007	0,007	С ржавчиной
	Слиток	1,15	0,31	11,76	—	—	—	—	—	—	—	—	0,005	0,066	
	Изменение, %	-4,7	-8,8	-3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	-28,6	-14,3	
<i>Хромистые стали</i>															
Х17Н2	Электрод	0,15	0,51	0,44	16,5	2,0	—	—	—	—	—	—	0,013	0,035	Травленая
	Слиток	0,15	0,49	0,44	16,4	2,0	—	—	—	—	—	—	0,009	0,032	
	Изменение, %	0,0	-3,9	0,0	-0,6	0,0	—	—	—	—	—	—	-30,8	-8,6	
2Х13	Электрод	0,19	0,32	0,44	13,2	—	—	—	—	—	—	—	0,017	0,018	С окалиной
	Слиток	0,19	0,23	0,41	13,0	—	—	—	—	—	—	—	0,010	0,021	
	Изменение, %	0,0	-28,0	-6,8	-1,5	—	—	—	—	—	—	—	-41,2	+16,6	
Х28	Электрод	0,12	0,45	0,30	28,4	—	—	—	—	—	—	—	0,016	0,025	Травленая
	Слиток	0,13	0,47	0,30	28,6	—	—	—	—	—	—	—	0,014	0,027	
	Изменение, %	+8,3	+4,4	0,0	+0,7	—	—	—	—	—	—	—	-12,5	+8,0	

Марка стали	Объект анализа	Химический состав, %						Состояние поверхности электрода							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Al	Ti	Nb	S	P	
ЭИ736	Электрод	0,13	0,45	0,47	13,9	3,01	—	—	—	—	—	—	—	—	Травленая
	Слиток	0,14	0,40	0,45	13,9	3,10	—	2,1	0,25	—	—	0,009	0,023		
	Изменение, %	+7,7	-4,1	-4,2	0,0	+2,9	—	1,99	0,27	—	—	0,007	0,020		
ЭИ961	Электрод	0,12	0,23	0,34	11,35	1,71	0,42	-5,2	+8,0	—	—	-22,2	-13,0	Зачищена наждаком	
	Слиток	0,13	0,19	0,34	11,40	1,64	0,45	1,64	0,30	—	—	0,016	0,025		
	Изменение, %	+8,3	-17,4	0,0	+0,4	-4,1	+7,1	1,56	0,25	—	—	0,009	0,022		
1X118H9T	Электрод	0,12	0,48	1,20	17,7	9,20	—	-4,9	-16,6	—	—	-43,7	-12,0	Ободранная	
	Слиток	0,12	0,46	1,18	17,6	9,17	—	—	—	—	0,48	0,018	0,033		
	Изменение, %	0,0	-4,2	-1,7	-0,6	-0,3	—	—	—	—	0,40	0,010	0,032		
ЭИ769	Электрод	0,07	0,62	1,73	13,70	14,9	—	—	—	—	-18,0	-44,3	-3,0	Ободранная	
	Слиток	0,07	0,60	1,77	13,65	15,0	—	—	—	—	0,90	0,013	0,012		
	Изменение, %	0,0	-3,2	+2,3	-0,4	+0,7	—	—	—	—	0,80	0,006	0,014		
1X18H12T	Электрод	0,11	0,52	1,0	18,0	12,86	—	—	—	—	-11,0	-54,0	+16,8	Травленая	
	Слиток	0,11	0,50	1,0	18,0	12,90	—	—	—	—	0,53	0,018	0,030		
	Изменение, %	0,0	-4,0	0,0	0,0	+0,3	—	—	—	—	0,48	0,019	0,028		
ЭИ770	Электрод	0,07	0,66	1,67	13,70	18,9	—	—	—	—	-9,4	-50,0	-7,0	Ободранная	
	Слиток	0,07	0,63	1,57	13,50	18,9	—	2,63	—	—	1,05	0,015	0,009		
	Изменение, %	0,0	-4,5	-6,0	-1,5	0,0	—	2,70	—	—	0,81	0,006	0,010		
ЭИ726	Электрод	0,11	0,63	1,50	15,3	17,0	—	+12,7	—	—	-23,0	-60,0	+11,0	С окалиной	
	Слиток	0,11	0,45	1,42	15,3	17,2	—	2,14	—	—	1,30	0,016	0,014		
	Изменение, %	0,0	-28,6	-5,3	0,0	+1,2	—	2,16	—	—	1,26	0,012	0,015		
ЭИ481	Электрод	0,32	0,57	9,22	13,48	8,35	1,35	+1,0	—	—	—	-3,0	-25,0	+7,0	Зачищена наждаком
	Слиток	0,33	0,54	9,10	13,43	8,52	1,33	—	—	—	0,09	0,011	0,024		
	Изменение, %	+3,1	-5,2	-1,3	-0,3	+2,4	-1,5	—	—	—	0,06	0,043	0,006	0,024	

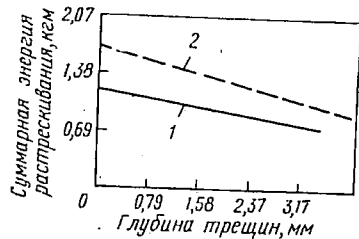


Рис. 54. Результаты испытаний на распространение трещин в стали 35 NCD 16 [3]:

1 — металл обычной плавки (квадрат 152 мм); 2 — металл ЭИП (квадрат 152 мм)

ударную вязкость этого материала приведены в табл. 35 и 36, которые иллюстрируют большой коэффициент надежности материала ЭИП при низких температурах. Обычная критическая температура хрупкости при установленных уровнях снижалась на 20—30°С при испытаниях, проводимых в продольном направлении, и более чем на 50°С — в поперечном направлении.

Советские исследователи затратили много времени и энергии на исследования очень широкого сортамента сталей. Результаты исследований влияния ЭИП на химический состав показаны в табл. 37. Эта таблица служит также подтверждением того, какой широкий сортмент сталей может быть экономично подвергнут ЭИП.

Табл. 38, воспроизведенная из опубликованной японской работы, показывает, что пластичность в поперечном направлении после ЭИП превышает соответствующие характеристики не только у стали обычной плавки, но и у стали ВДП. Степень укова также оказывает значительное влияние на полученные результаты и в этом отношении меньшие степени укова являются, по-видимому, более выгодными.

Влияние ЭШП, ВДП и укова на механические свойства крупных поковок для роторов* [6]

Материал (сталь)	Уков	Направление испытания	$\sigma_{уп}$ кг/мм ²	$\sigma_{в}$ кг/мм ²	δ , %	ψ , %	A_5 кгм/см ²
Мартеновская (без внепечного вакуумирования)		Продольное (П)	71,0	85,0	15,2	49,6	6,7
		Поперечное (п)	71,0	85,0	6,7	9,6	5,2
		П/п			0,44	0,19	0,37
После ЭШП	5	Продольное (П)	63,0	81,0	20,6	61,0	8,9
		Поперечное (п)	63,0	80,5	17,5	50,0	5,8
		П/п			0,94	0,89	0,65
После ЭШП	2	Продольное (П)	64,5	81,0	18,3	53,5	7,2
		Поперечное (п)	63,5	81,0	17,2	47,1	6,0
		П/п			0,94	0,89	0,83
Мартеновская (с внепечным вакуумированием)		Продольное (П)	61,5	85,0	18,2	52,0	6,1
		Поперечное (п)	64,5	89,0	8,5	14,0	3,0
		П/п			0,47	0,27	0,49
После ЭШП	5	Продольное (П)	65,5	79,0	20,5	64,0	10,9
		Поперечное (п)	63,0	79,0	16,8	52,5	7,9
		П/п			0,82	0,82	0,72
То же	2	Продольное (П)	64,5	80,0	18,9	58,6	8,4
		Поперечное (п)	66,0	80,0	18,5	52,2	8,4
		П/п			0,98	0,89	1,00

* Химический состав стали: 0,34% С; 1,0% Cr; 1,5% Ni; 0,4% Mo; 0,2% V.

Цветные металлы

Кроме уже описанного исследования по сплавам на никелевой и кобальтовой основе, выполнен значительный объем работ по ЭШП цветных металлов.

Титан с успехом обрабатывался советскими [7] и американскими [8, 9] исследователями. Основной проблемой в этом случае является очень высокое сродство этого металла с кислородом; обычно применяют переплав с бескислородным шлаком (как правило, чистый фтористый кальций) в инертной атмосфере. Аусмус и Биолл

применяли гелий при давлении 0,5 атм, и полученные ими результаты аналогичны достигаемым при ВДП. Гомогенность сплавов хорошая, но при ЭШП невозможно удаление водорода. Поэтому может оказаться нужным переплавить слиток ЭШП в вакууме, если в сыром материале (губка, содержание водорода в которой в очень значительной степени зависит от метода подготовки) содержание водорода было высоким.

Биолл с сотрудниками [9] переплавляли также молибден процессом ЭШП. В качестве шлака была избрана окись иттрия; деформируемость продукта в горячем состоянии была значительно лучше, чем материала ВДП.

Другими исследуемыми металлами являются хром и медь и их сплавы; можно полагать, что исследования быстро распространятся на другие металлы.

Список литературы

1. Медовар Б. И. и др. Электрошлаковый переплав. Metallurgizdat, 1963, с. 124.
2. Paton B. et al. 1st International Conference on ESR, Pittsburgh, 1967.
3. Antoine L. et al. 1st International Conference on ESR, Pittsburgh, 1967.
4. Kirk F. A. Steel Times, 1969, Feb.
5. Holzgruber W. and Plöckinger E., Stahl und Eisen, 1968, Bd 88, H. 12, S. 638.
6. Kusamichi H. and Fukuhara Y., Tetsu to Hagane, 1966, 52, S. 1890.
7. Гуревич С. М. и др. Автоматическая сварка, 1963, № 4, (16), с. 26.
8. Beall R. A. et al. 1st International Conference on ESR, Pittsburgh, 1967.
9. Ausmus S. L. and Beall R. A. Trans. International Vacuum Metallurgy Conference, 1967, Amer. Vac. Soc., 1968, p. 695.

ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

СТРУКТУРА ИЗДЕРЖЕК ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ЭШП

Издержки производства при ЭШП складываются из расходов на производство электродов, шлак, электроэнергию, рабочую силу, накладных расходов, расходов на воду, кристаллизаторы и амортизацию.

Производство электродов

Электроды могут изготавливаться из жидкого металла следующими способами:

- 1) непрерывной разливкой;
- 2) разливкой в формы из литого чугуна;
- 3) разливкой в огнеупорные гильзы;
- 4) разливкой на обычные слитки с последующей прокаткой или ковкой.

Непрерывная разливка, осуществляемая хорошо известными методами, обходится приблизительно в 7 *ф. ст./т* и обеспечивает выход годных электродов в размере 95% от массы разлитого жидкого металла. Если оборудование для непрерывной разливки уже имеется и его мощность достаточна для производства электродов для ЭШП, то дальнейшие капиталовложения не требуются. Строительство УНРС должно, однако, потребовать капиталовложений, по меньшей мере, равных и, по-видимому, даже больших, чем сама установка ЭШП, и если УНРС не имеется, то капиталовложения на ее сооружение не могут рассматриваться в качестве экономически обоснованных.

Применение литых чугунных форм для производства электродов является довольно обычным. Эти формы могут быть различных типов, такие, например, как разъемные по горизонтали, разъемные по вертикали с желобом для сифонной отливки слитков или обычные формы квадратного сечения с наклонными стенками. Чугунные формы обеспечивают возможность самого дешевого производства электродов, расходы на которые колеблются от 3,5 до 5 *ф. ст./т*. Стойкость форм до ремонта составляет в среднем 80—100 разливок. При применении форм типа Фаулер расходы на формы могут быть несколько ниже приведенных, так как все секции этих форм взаимозаменяемы.

Отливка электродов в огнеупорные гильзы стоит сравнительно дорого, а именно 10—12 *ф. ст./т* при максимальном выходе годного 90—92% по сравнению с 96% при применении литых форм. Поэтому разливку в огнеупорные гильзы обычно применяют для отливки небольших количеств электродов с целью определения их оптимального размера. В дальнейшем разливку ведут в разъемные литые формы.

Метод отливки обычных слитков применяют при оценочных испытаниях процесса ЭШП на типовом материале. Когда процесс ЭШП осуществляется в нормальных производственных условиях, разливку на слитки обычно не применяют, так как слитки необходимо подвергать сначала прокатке или ковке, что необоснованно удорожает процесс.

Отлитые для ЭШП электроды не отбраковывают по причине рыхлости или химических дефектов, которые легко могут быть исправлены путем выбора шлака соответствующего состава. Однако в некоторых случаях может потребоваться небольшая подготовка поверхности, например дробеструйная обработка, особенно когда при переплаве металлов, содержащих значительные количества алюминия и титана, с поверхности необходимо удалить огнеупорные окислы. Стоимость дробеструйной обработки зависит от отношения площадь поверхности/масса электрода.

Шлак

Стоимость основных материалов для большинства шлаков. — фтористого кальция (20 ф. ст./т) и извести (10 ф. ст./т) — сравнительно невелика. Однако некоторые другие компоненты, такие как глинозем (50 ф. ст./т), окись магния (40—200 ф. ст./т) и двуокись титана (50 ф. ст./т), стоят дороже, а цена циркония может составить до 600 ф. ст./т. Стоимость этих сравнительно мало используемых компонентов может в дальнейшем снизиться, но, как правило, стоимость шлака в Англии составляет не менее 65 ф. ст./т. Современное отношение массы шлака к массе переплавленного металла колеблется от 20 т металла на 1 т шлака или от 40 т металла на 1 т шлака в зависимости от размеров кристаллизаторов и электродов. Поэтому, считая, что шлак стоит 65 ф. ст./т, средняя стоимость шлака на тонну переплавленного металла составляет от 1,5 до 3 ф. ст./т.

Электроэнергия

Удельное потребление электроэнергии в процессе ЭШП снижается по мере увеличения масштабов процесса, потому что основное количество тепла теряется с охлаждающей водой, а отношение площадь поверхно-

сти/объем уменьшается при увеличении размеров кристаллизатора. Например, на небольшой однофазной установке мощностью 180 *кв*а расход электроэнергии может достигать 1600 *квт·ч/т*, в то время как на крупной установке производительностью несколько тысяч тонн в год этот показатель может снизиться до 1200 *квт·ч/т*. Стоимость электроэнергии в Англии зависит от ее расхода.

Рабочая сила

Стоимость рабочей силы сильно колеблется на различных металлургических заводах, поэтому трудно сделать обобщения. При хорошо налаженной работе для обслуживания каждой печи требуется не более двух рабочих — один управляет работой печи, другой выполняет все вспомогательные работы. Если несколько печей могут работать одновременно, то расходы на рабочую силу на каждую печь могут быть снижены.

Накладные расходы

Обычно практикуется относить накладные расходы к стоимости рабочей силы, выражая их в процентах. Это будет показано ниже на нескольких примерах.

Вода

Стоимость воды, как правило, сравнительно невысокая, особенно при наличии эффективной системы рециркуляции. Обычно она составляет не более 0,25 *ф. ст/т* металла.

Кристаллизаторы

Стоимость кристаллизаторов невысока, если заранее был определен оптимальный размер и тип кристаллизатора для каждого слитка. Вообще говоря, если предполагается в течение длительного времени изготавливать слитки одного и того же размера, то более высокая стоимость эффективного медного кристаллизатора с водяной рубашкой или погружаемого в резервуар с водой вполне окупается их высокой стойкостью. Если, однако, производство слитков данного размера не будет носить

длительный характер, то экономичнее применять стальной кристаллизатор со струйным охлаждением, исходя из его меньшей стоимости и с учетом меньшей стойкости.

Амортизация

Амортизация капитала, вложенного в печное оборудование и т. д., обычно погашается в установленном проценте ежегодно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗДЕРЖЕК ПРОИЗВОДСТВА

Хотя уже имеется много установок ЭШП, работающих за пределами СССР, еще нельзя привести данных о средних издержках производства, основанных на практическом опыте, потому что, хотя многие из этих установок уже применяются для обычного промышленного производства, во многих случаях они используются для проведения оценочных испытаний. Однако два важных поставщика оборудования ЭШП — фирмы Бэрлек в Англии и Консарк в США — сообщили данные о работе промышленных установок, что позволяет оценить издержки производства в тех случаях, когда печная установка непрерывно производит материал определенного типа.

Ниже приведены данные фирмы Бэрлек об издержках производства для однофазной установки мощностью 180 *кв*а, производящей слитки при производительности 90 *кг/ч* или более крупные слитки при производительности 360 *кг/ч* [1]:

Статьи расхода	Издержки производства, ф. ст/т
<i>Производительность при 40-ч неделе и 50 неделях в году 90 кг/ч или 180 т/год</i>	
Амортизационные отчисления (8000 ф. ст./10 лет или 800 ф. ст/год)	4,4
Рабочая сила (2 оператора, 2400 ф. ст/год)	13,2
Электроэнергия (1600 <i>квт·ч/т</i> , 1,2 <i>пенса/квт·ч</i>)	8,0
Ремонт и обслуживание (800 ф. ст/год)	4,4
Стоимость шлака и воды	2,0
<hr/>	
Итого	32,0
Дополнительно 7% на простои и другие непредвиденные расходы	34,0

*Производительность при 40-ч неделе
и 50 неделях в году 360 кг/ч или 720 т/год*

Амортизационные отчисления (24 тыс. ф. ст/10 лет или 2400 ф. ст/год)	3,3
Рабочая сила (2 оператора, 2400 ф. ст/год)	3,3
Электроэнергия (1200 квт·ч/т, 1,2 пенса/квт·ч	6,0
Ремонт и обслуживание (1600 ф. ст/год)	2,2
Стоимость шлака и воды	2,0
Итого	16,8
Дополнительно 7% на простои и другие непредвиденные расходы	18,0

Увеличение производительности очень сильно снижает издержки производства.

Данные фирмы Консарк об экономических показателях работы однофазной установки ЭШП, производящей слитки диам. 610 мм в количестве 3175 т/год, представлены в табл. 39 [2], в которой приведены также для

Таблица 39

Годовые издержки производства при работе вакуумной дуговой печи и двухпозиционной печи ЭШП для выплавки слитков диам. 610 мм, тыс. долл

Статьи расхода	ВДП	ЭШП
Прямые расходы на рабочую силу (два рабочих, оператор и его помощник могут с удобством управлять работой двух автоматизированных печей)	48,0	48,0
Накладные расходы, средние при двух печах (включая общие, административные и эксплуатационные, освещение, отопление и другие службы в размере 140% от расходов на рабочую силу)	67,0	67,0
Стоимость электроэнергии для переплава:		
а) при ВДП 0,66 — 0,88 квт·ч/кг (считая в среднем 0,77 квт·ч/кг, 455 кг/ч, 1,2 цента/квт·ч, 15 смен/неделю, 50 недель/год)	23,5	—
б) при ЭШП 0,88 — 1,18 квт·ч/кг (считая в среднем 1,10 квт·ч/кг, 565 кг/ч, 1,2 цента/квт·ч, 15 смен/неделю, 50 недель/год)	—	42,5

Статьи расхода	ВДП	ЭШП
Стоимость охлаждающей воды с системой рециркуляции	3,5	4,1
Амортизация в течение 10 лет при капитальных затратах:		
две 610-мм печи ВДП — 480 тыс. долл.	48,0	—
две 610-мм печи ЭШП — 384 тыс. долл. (в эту стоимость включены система энергоснабжения печей, фундаменты и стальные конструкции)	—	38,4
Амортизация в течение 20 лет зданий и служб (считая 93 м ² /печь и стоимость 269 долл/м ² , капитальные затраты при двух печах составят 50 тыс. долл.)	2,5	2,5
Стоимость шлака 0,88 цент/кг переплавленного металла при «жидком старте»	—	28,0
Суммарные годовые издержки производства	192,5	230,5
Суммарный объем производства, т/год	2540	3175
Удельная стоимость, цент/кг	7,45	7,4

Таблица 40

Анализ издержек производства при ЭШП шести слитков диам. 203 мм в шести двухпозиционных печах (по одному слитку в каждой) или в одной двухпозиционной печи (при выплавке нескольких слитков одновременно)

Статья расхода	Издержки производства, тыс. долл.	
	шесть двухпозиционных печей ЭШП	одна двухпозиционная печь ЭШП
Стоимость рабочей силы за год (при 15 сменах в неделю):		
три оператора и три помощника на шести печах	144	—
один оператор и два помощника на одной печи	—	72,0

Статья расхода	Издержки производства, тыс. долл.	
	шесть двухпозиционных печей ЭШП	одна двухпозиционная печь ЭШП
Накладные расходы, включая общехозяйственные и эксплуатационные, освещение, отопление и другие службы в размере 140% от расходов на рабочую силу	200,0	101,0
Стоимость электроэнергии (расход 1,1 квт·ч/кг, производительность 180 кг/ч, стоимость 1,2 цент/квт·ч, 15 смен/неделю, 50 недель/год)	86,0	86,0
Стоимость охлаждающей воды с системой рециркуляции	8,0	8,0
Амортизация в течение 10 лет при капитальных затратах:		
шесть печей ЭШП — 495 тыс. долл.	49,5	—
одна печь ЭШП — 275 тыс. долл.	—	27,5
Амортизация в течение 20 лет зданий и служб (74,4 м ² на каждую из шести печей и 148,8 м ² на одну печь для нескольких слитков; стоимость площади 269 долл/м ²) при капитальных затратах:		
шесть печей ЭШП — 120 тыс. долл.	6,0	—
одна печь ЭШП — 40 тыс. долл.	—	2,0
Стоимость шлака (0,88 цент/кг переплавленного металла при «жидком старте»)	57,2	57,2
Суммарные годовые издержки производства	550,7	353,7
Суммарный объем производства, т/год	6400	6400
Удельная стоимость, цент/кг	8,6	5,5

сравнения соответствующие данные о работе вакуумно-дуговой печи. Данные в табл. 39 приведены в долларах, так как распределение издержек несколько отличается от приведенного выше и, следовательно, прямое сравнение провести нельзя. Конечные цифры могут быть сопоставлены с соответствующими цифрами фирмы Бэрлек, так как по современному курсу 1 цент равен 1 пенсу. Если масштаб работы цеха ЭШП фирмы Консарк возрастает до 6400 т/год, как это показано в табл. 40 [1], то преимущества применения одной двухпозиционной печи ЭШП для выплавки нескольких слитков по сравнению с применением шести двухпозиционных печей ЭШП, рассчитанных на переплав одного слитка каждая, является совершенно очевидным. Ниже показана оценка стоимости работы батареи из шести трехфазных установок мощностью по 540 ква, работающих в три смены с расчетной производительностью 13 тыс.т/год [1]:

Производительность при трехсменной работе (2175 кг/ч, 120 ч/неделю и 50 недель/год), тыс. т/год	13,0
Амортизация в течение 10 лет при капитальных затратах 144 тыс. долл., долл/т	1,1
Стоимость рабочей силы (6 рабочих, включая доплату за ночные смены) 24 тыс. долл/год, долл/т	1,8
Стоимость электроэнергии при расходе 1200 квт·ч/т и стоимости 1 пенс/квт·ч, долл/т	5,0
Ремонт и обслуживание (17 тыс. долл/год), долл/т	1,3
Стоимость шлака и воды, долл/т	2,0
<hr/>	
Итого	11,2
Дополнительно 7% на простои и другие непредвиденные расходы, долл/т	12,0

Приведенные данные показывают, каким образом стоимость ЭШП может быть снижена с 35 до приблизительно 12 ф.ст/т при условии, что масштабы работы и коэффициент использования достаточно велики. Следует, конечно, помнить, что в эти данные не включены расходы на подготовку электродов, о которых говорилось выше, так как они колеблются в значительной степени и их нельзя использовать в целях сравнения. Мож-

но считать, что при небольших издержках на производство электродов суммарная стоимость ЭШП может быть снижена до приблизительно 15 ф. ст/т. Было бы однако неправильным считать, что где-либо, помимо СССР, имеется печь ЭШП, производящая металл по этой стоимости. Вообще говоря, себестоимость производства на промышленных предприятиях составляет в настоящее время от 40 до 100 ф. ст/т в зависимости от масштабов работы и эффективности производства, но, как уже говорилось выше, эти высокие издержки обусловлены частично тем фактом, что многие фирмы все еще проводят опытные плавки и это, конечно, уменьшает коэффициент использования печей и увеличивает издержки.

СРАВНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ВДП И ЭШП

Вакуумно-дуговой переплав и электрошлаковый переплав являются двумя методами достижения высокой чистоты металла в сочетании с хорошей структурой, что, как известно, необходимо для изготовления ответственных металлических деталей. Выбор процесса, удовлетворяющего данному спектру металлургических требований, становится все более трудным, поэтому целесообразно при сравнении процессов давать подробные оценки переплаву определенных сплавов за значительный период времени.

Если взять за основу для сравнения современные установки, то разница в себестоимости производства этими двумя способами будет очень небольшой. Низкая капитальная стоимость оборудования для электрошлакового переплава и высокая производительность, свойственная этому процессу, в значительной степени перекрываются высоким удельным расходом электроэнергии и стоимостью самого шлака. Однако при переплаве ряда сплавов, особенно быстрорежущих сталей и сплава «хастеллой Х», при правильно выбранном шлаке достигается значительное повышение выхода годного и электрошлаковый процесс обладает явным преимуществом перед ВДП.

Большое число степеней свободы, свойственные ЭШП, не может быть обеспечено без расходов и не может быть использовано надлежащим образом без контроля.

При сравнении стоимости производства слитков диам. 610 мм при ВДП и ЭШП (табл. 39) предполагалось, что оборудование рассчитано в обоих случаях именно для той работы, на которой оно используется, и что на нем применяются все современные методы автоматизации и быстрого перехода от одного цикла работы к другому.

Стоимость шлака зависит от используемых компонентов. Вследствие необходимости в достижении высоких уровней чистоты должны применяться только наилучшие из имеющихся сырых материалов, что отражается на их цене. Суммарная стоимость шлаков системы $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$ в США оценивается в 35,5 *цент/кг* в жидком состоянии для «жидкого старта». При отношении массы металл/шлак, равном 40:1, это дает стоимость шлака 0,88 *цент/кг* (см. табл. 39).

ОДНОВРЕМЕННЫЙ ПЕРЕПЛАВ НЕСКОЛЬКИХ СЛИТКОВ

Большое число степеней свободы, свойственное ЭШП, дает возможность применять новые концепции в целях снижения издержек производства. Одной из таких новых концепций является одновременный переплав нескольких слитков, возможный при ЭШП вследствие самовыравнивания величин тока, проходящего по нескольким цепям. При условии, что массы всех переплавляемых электродов приблизительно одинаковы, этот метод позволяет выплавлять одновременно любое приемлемое число небольших или средних слитков при удельной стоимости переплава, приблизительно равной наименьшей стоимости переплава крупных слитков в современной автоматизированной печи.

Преимущества одновременной выплавки нескольких слитков подтверждаются данными табл. 40, в которой стоимость производства слитков диам. 203 мм из быстрорежущей стали (материала, чувствительного к ликвации, скорость наплавления которого ограничена в настоящее время 180 *кг/ч* для слитков указанного диаметра) в однослитковых печах сравнивается со стоимостью производства того же материала при одновременной выплавке нескольких слитков.

Еще одним перспективным применением метода одновременной выплавки нескольких слитков является

применение сравнительно крупной, скажем 15-т печи ЭШП (диаметр слитков 915 мм), для одновременного (и поэтому экономичного) переплава трех 203-мм или 255-мм круглых или квадратных слитков.

ПРОЧИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Малая эффективность процесса, которая иногда бывает меньше, чем у других процессов выплавки или рафинирования металла, является дополнительной причиной повышения его стоимости. Большая часть тепловой энергии, поступающей в процесс и выделяющейся в шла-

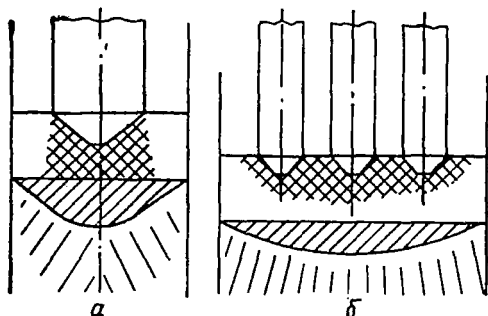


Рис. 55. Зоны выделения тепла при ЭШП:
а — однофазная схема; б — трехфазная схема

ковой ванне, не используется для расплавления электрода и рафинирования металла. Рассмотрим типичное распределение тепловых потерь при ЭШП.

При электрошлаковом переплаве тепло выделяется в шлаковой ванне во время прохождения по ней электрического тока. Количество тепла Q , выделившееся в шлаковой ванне, определяется в соответствии с формулой

$$Q = 0,24vI \text{ кал/сек},$$

где v — напряжение на шлаковой ванне, в;
 I — сила тока, а.

Выделение тепла по всему объему шлаковой ванны происходит неравномерно. В случае применения однофазного тока основная часть тока в шлаковой ванне

проходит от торца электрода к поверхности металлической ванны. Тепло также выделяется главным образом в этой зоне, называемой разрядным промежутком (рис. 55, а) [3].

При трехфазной схеме процесса с тремя электродами, переплавляемыми в одном кристаллизаторе, ток может проходить не только от торцов электродов к металлической ванне, но также и непосредственно между торцами электродов, причем чем больше глубина шлаковой ванны, тем большая часть тока протекает между электродами. Зона тепловыделения при трехфазном трехэлектродном переплаве схематически показана на рис. 55, б.

Рассмотрим отдельные статьи расхода тепла, выделяющегося в шлаковой ванне (рис. 56) [3] (цифры относятся к графику):

1 — тепло, расходуемое на предварительный подогрев расходуемого электрода, его расплавление и перегрев капель электродного материала в разрядном промежутке после их отрыва от торца электрода; большая часть этого тепла (исключая потери на радиацию от поверхности нагретого электрода в атмосферу) вводится с каплями металла в металлическую ванну;

2 — тепло, отводимое от шлаковой ванны в стенку водоохлаждаемого кристаллизатора путем передачи тепла на границе соприкосновения жидкого шлака со стенкой; это тепло отводится с охлаждающей водой;

3 — тепло, излучаемое слитком на стенку кристаллизатора через зазор, образующийся между ними в результате усадки слитка; это тепло также уносится охлаждающей водой;

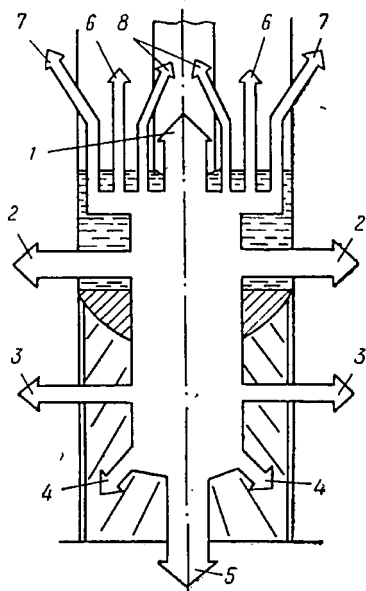


Рис. 56. Распределение тепла, высвобождающегося в шлаковой ванне

4 — тепло, аккумулируемое в слитке в процессе наплавки; это тепло может быть в дальнейшем (после окончания плавки и извлечения слитка из кристаллизатора) утрачено, если слиток охлаждается до температуры окружающей среды, или оно может быть использовано, если слиток будет немедленно посажен в печь для нагрева под ковку или прокатку;

5 — тепло, отводимое от слитка в поддон и уносимое с водой, охлаждающей поддон;

6 — тепло, излучаемое с поверхности шлаковой ванны в атмосферу, а также тепло, уносимое с отходящими газами;

7 — тепло, излучаемое шлаковой ванной на стенку кристаллизатора и уносимое водой;

8 — тепло, излучаемое шлаковой ванной на электрод; оно способствует предварительному подогреву электрода.

Теоретический расход электроэнергии, необходимый для расплавления 1 т углеродистой стали, составляет примерно 400 квт·ч. На практике удельный расход электроэнергии при применении шлака (70F/30) равен в среднем 1200 квт·ч. Таким образом, только приблизительно 33% подводимой активной мощности при электрошлаковом переплаве расходуется на непосредственное плавление электрода. Более подробный количественный анализ тепловых потерь с охлаждающей водой, подаваемой к кристаллизатору, сделан ниже.

Тепло, поступающее к шлаковой ванне, лишь частично используется в процессе переплава. Большое количество тепла проходит через шлаковую ванну к стенкам водоохлаждаемого кристаллизатора. Эти потери тепла тем больше, чем больше расстояние, отделяющее электрод от металлической ванны, и, таким образом, чем больше глубина шлаковой ванны. Тепловой баланс процесса переплава квадратного слитка сечением 200×200 мм иллюстрирует, каким образом тепло, поступившее в процесс, расходуется в различных зонах. Как установлено по перепаду температур в охлаждающей кристаллизатор воде (условия переплава — квадратный электрод со стороной 100 мм, 42 в, 4500 а), 66% всего подведенного тепла уносится с водой, охлаждающей кристаллизатор; небольшое количество тепла, приблизительно 5% от всего подведенного тепла, сохраняется

в слитке, тогда как приблизительно 29% всего тепла теряется излучением с поверхности шлака.

Распределение тепла, отводимого с охлаждающей водой от различных зон кристаллизатора, представляет особый интерес и может быть определено путем при-

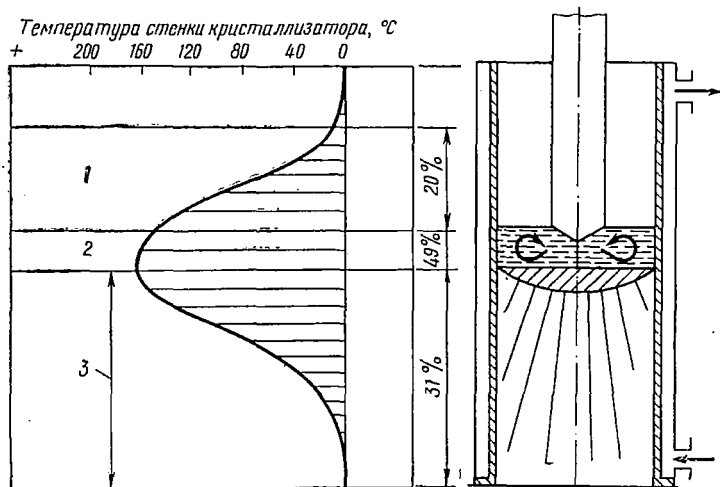


Рис. 57. Отвод тепла с охлаждающей водой от различных зон кристаллизатора: 1 — излучение у стенки кристаллизатора; 2 — тепло, выделившееся из шлаковой ванны; 3 — тепло, выделившееся из слитка ЭШП

крепления термопар к стенке кристаллизатора. Приблизительно 50% всего тепла, отводимого с охлаждающей водой, теряется на уровне шлаковой ванны (рис. 57). Приблизительно 20% передается с поверхности шлака на стенки кристаллизатора излучением и около 30% тепла передается от переплавленного горячего слитка к стенкам кристаллизатора. Наибольшая тепловая нагрузка на стенки кристаллизатора отмечается в зоне шлаковой ванны и составляет приблизительно $750 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эти измерения показывают, что глубина шлаковой ванны и, следовательно, площадь поверхности передачи тепла от шлаковой ванны к стенкам кристаллизатора оказывают большое влияние на тепловой баланс и, таким образом, на потребление энергии в процессе электрошлакового переплава. Исходя из этой точки зрения, было бы полезно иметь возможно

меньшую глубину шлаковой ванны с учетом соответствующих электрических и геометрических условий с тем, чтобы избежать больших потерь тепла через стенки кристаллизатора. Поскольку, однако, все факторы, которые влияют на тепловой баланс процесса, влияют также на глубину металлической ванны и, таким образом, на первичную структуру переплавленного слитка, это требование может быть выполнено лишь в том случае, если оно не оказывает неблагоприятного влияния на глубину металлической ванны.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА ГОДНОГО

Повышение выхода годного в результате применения слитков электрошлакового переплава является той характеристикой, которая может быть использована в качестве основы для расчетов с целью установления стоимости материала, выше которой становится экономически выгодным применять слитки ЭШП благодаря повышению выхода годного, т. е. стоимость ЭШП окупается уменьшением, например, частично обработанного брака поковок.

Отношение массы поковки к массе слитка обычно составляет 60—65%. Выход годного 65% означает, что в процессе изготовления поковки потери составили 35% и что масса слитков для поковок должна быть в 1,5 раза больше массы получаемых из них поковок. 35% потерь состоят из следующих компонентов. Головная обреза составляет приблизительно 15%, донная 3—5% от общей. Поковки обычно изготавливают на 10% большими, чем размеры деталей, получаемых из них после механической обработки; только вследствие этого излишняя масса поковки кубической формы составляет 33%. При использовании металла ЭШП хорошего качества допуски можно уменьшить с 10 до 2,5%, что дает экономию 11% при выходе годного 65% или 13% при выходе годного 100%. Потери при нагреве ограничиваются 2% на каждую операцию нагрева. Потери при неоднократном нагреве поковок сложной формы больше, чем при однократном нагреве поковок. Улучшенная деформируемость слитков ЭШП в горячем состоянии позволяет уменьшить эти потери при нагреве.

Слитки ЭШП могут быть прокованы без предвари-

тельной обрезки, что обеспечивает им преимущество по сравнению с самым лучшим теоретическим слитком, отлитым в изложницу. Однако современным процессамковки свойственны некоторые потери. Расчеты показывают, что при стоимости ЭШП 15 ф.ст/т применение ЭШП является экономически целесообразным в том случае, когда цена обычных слитков превышает 29 ф.ст/т. При этом предполагается, что стоимость сырых материалов для электродов ЭШП аналогична стоимости этих материалов для кузнечных слитков. Однако это условие не всегда выполняется, так как могут быть разработаны методы непосредственного переплава лома с применением нерасходуемых электродов.

Следовательно, стоимость исходных слитков может снизиться при непрерывной разливке до 23 ф.ст/т или даже до 10 ф.ст/т при переплаве лома, но стоимость их дальнейшей обработки может возрасти.

РОСТ ПРИБЫЛИ В РЕЗУЛЬТАТЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫХОДА ГОДНОГО

При помощи сравнительного графика зависимости продажной цены от издержек производства может быть показано, что наиболее выгодным будет повышение выхода годного из материала ЭШП по той причине, что при данном объеме производства обрабатывается меньше материала.

Термин «сравнительный» характеризует положение, при котором суммарные издержки производства при применении ЭШП равны издержкам производства при обычном методе получения слитков.

Кривая 1 на рис. 58 характеризует стоимость продукта при обычном методе производства (без ЭШП), кривая 2 — фиксированную стоимость для процесса ЭШП. Кривая 3 характеризует наиболее неблагоприятный и маловероятный случай, когда все другие процессы неизменны и экономия невозможна. Дополнительная стоимость ЭШП должна поэтому быть отражена в увеличении продажной цены (если это приемлемо на рынке сбыта) или в снижении прибыли.

При использовании материала ЭШП неизменно повышается выход годного, и поэтому расходы на ЭШП в некоторой степени окупаются (кривая 4). Совпадение

кривых в точке *A* говорит о том, что ЭШП наиболее экономичен для продуктов со средними и высокими ценами. По мере увеличения выхода годного наклон кривой *З* будет уменьшаться, передвигая точку *A* к более низким уровням цен.

Второй важной причиной экономии, достигаемой при применении ЭШП, является уменьшение стоимости пе-

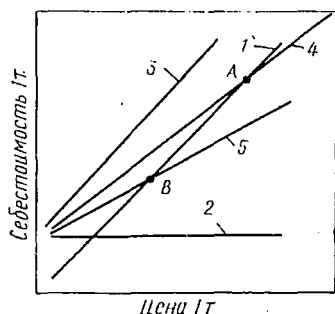


Рис. 58. Рост прибыли в результате увеличения выхода годного:

1 — стоимость прибыли при обычном методе производства; 2 — дополнительные расходы на ЭШП; 3 — стоимость с применением ЭШП без получения экономии; 4 — стоимость с применением ЭШП и экономией в результате повышения выхода годного; 5 — стоимость с применением ЭШП и экономией за счет увеличения выхода годного и снижения издержек производства

реработки слитков, что при суммировании с экономией от повышения выхода годного ведет к ситуации, характеризуемой кривой *5*. Нижняя точка совпадения (*B*) делает ЭШП целесообразным и для дешевых материалов. В этом случае экономия достигается благодаря следующему:

а) часто можно применять слитки меньших размеров, полученные ЭШП, при тех же конечных размерах продуктов;

б) могут быть изготовлены слитки наиболее желательной формы (например, широкие и тонкие слитки для листовой продукции);

в) горячая деформируемость материала может быть улучшена в результате ЭШП;

г) необходимость в процессе первичного обжатия может быть исключена (пп. а и б);

д) число повторных нагревов при горячей обработке может быть уменьшено (пп. а, б и в).

Не было сделано попыток выразить численно зависимость, показанную на рис. 58, вследствие большого разнообразия данных, но тенденция совершенно очевидна и указанный принцип может быть применен для част-

ных случаев. Показано, что процесс с применением ЭШП часто может дать значительную экономию даже при переработке сравнительно недорогих материалов.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ТЕНДЕНЦИИ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ЭШП

Несмотря на то что процесс ВДП начали применять в Англии значительно раньше, чем процесс ЭШП, установленные мощности ВДП (при сравнении по числу рабочих смен) несколько ниже мощностей ЭШП. Прогнозы в США предсказывают примерно одинаковую степень прироста мощностей ВДП и ЭШП; суммарный рынок сбыта продукции обоих этих процессов возрастет, как ожидается, на 50% в течение следующих пяти лет. Хотя для некоторых сплавов оба процесса рассматриваются как дополняющие друг друга, можно предположить, что металл ЭШП заменит большую часть металла, производимого ВДП, как только новые методы станут приемлемыми с точки зрения технических требований.

На рис. 59 показано, каким образом изменялась стоимость ЭШП по сравнению со стоимостью ВДП (за тридцать лет). График свидетельствует о том, что стоимость процесса ЭШП может быть меньше стоимости процесса ВДП, причем разница в будущем может стать значительной.

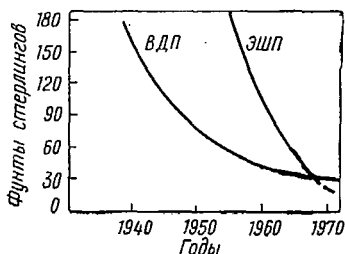


Рис. 59. Сравнительная стоимость процессов ЭШП и ВДП

Список литературы

1. Allen A. G. Vith International Congress on Electro-Heat, Brighton, 1968.
2. Wooding P. J. and Cerstvik M. S. Vith International Congress on Electro-Heat, Brighton, 1968.
3. Медовар Б. И. Электрошлаковый переплав. Metallurgizdat, 1963, с. 77.
4. Holzgruber W. Stahl und Eisen, 1968, Bd 88, H. 12, S. 638.

У. Дакуорт, Д. Хойл

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ

Перевод с английского *А. Б. Парцевского*

Редактор *Я. Д. Розенцвейг*
Художественный редактор *Д. В. Орлов*
Технический редактор *Л. В. Добужинская*
Корректоры *В. Б. Левин* и *К. В. Шин*
Обложка художника *Е. Т. Яковлева*

Сдано в набор 12/1 1973 г. Подписано в печать 21/IV 1973 г.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂, бумага типографская № 2. Усл.
печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 9,90. Тираж 3500 экз. Заказ 38.
Изд. № 2503. Цена 99 коп.

Издательство «Металлургия»
119034, Москва Г-34, 2-й Обыденский пер., 14
Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

61972

04

99 коп.

5407



«МЕТАЛЛУРГИЯ»