

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»
Кафедра «Технология и автоматизация сварочного производства»

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 15.03.01 «Машиностроение»,
направленности
«Оборудование и технология сварочного производства»

Курган 2018

Кафедра: «Технология и автоматизация сварочного производства».

Дисциплина: «Электрошлаковая технология» (направление 15.03.01
«Машиностроение»).

Составил: канд. хим. наук, доц. А. К. Давыдов.

Утверждено на заседании кафедры « 07 » декабря 2017 г.

Рекомендовано методическим советом университета « 20 » декабря 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

В основе электрошлаковой технологии лежит электрошлаковый процесс. Первым промышленным применением нового процесса явилась электрошлаковая сварка вертикальных швов. В 1957 году первый промышленный металл дала печь электрошлакового переплава. Несколько позже электрошлаковый процесс нашёл применение в наплавочных работах, электрошлаковой подпитке и электрошлаковом обогреве передельных и кузнечных слитков. В последние годы бурно развивается ещё одно перспективное направление электрошлаковой технологии – электрошлаковое литьё. Совершенствование технологии и аппаратуры электрошлаковых технологий продолжается и в наши дни.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 (2 ЧАСА)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭШ ПРОЦЕССА

Цель работы: исследование влияния скорости подачи электрода на стабильность ЭШ процесса и определение диапазона устойчивого его протекания.

Оборудование и материалы:

- 1) установка для ЭШС А-550У с трансформатором ТШС-3000;
- 2) технологическая оснастка (поддон, кристаллизатор);
- 3) муфельная печь;
- 4) флюс АНФ-6, затравочная пластина $\delta = 4$ мм;
- 5) электрод круглого сечения $\varnothing 30 \div 40$ мм;
- 6) секундомер.

1.1 Сущность электрошлаковой технологии

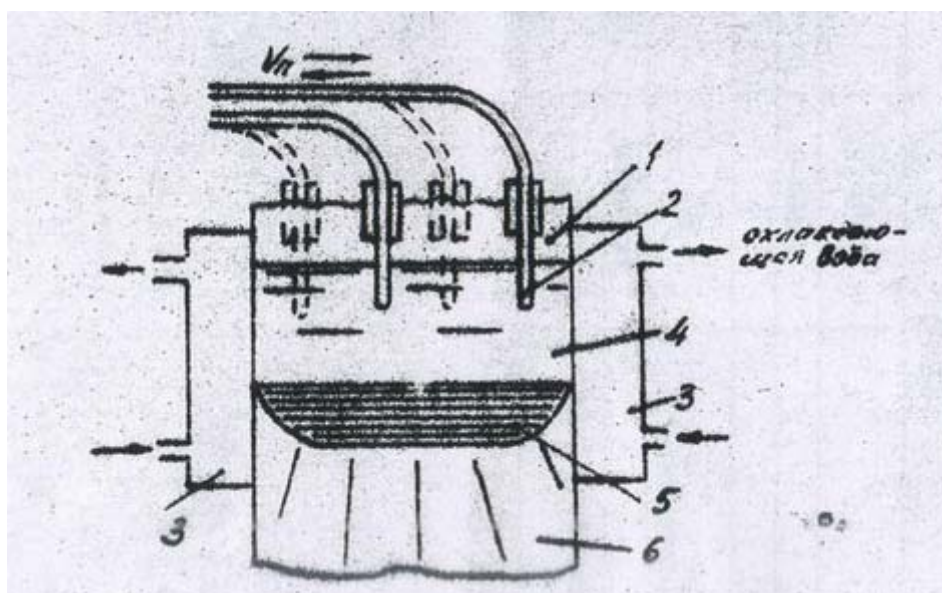
При прохождении электрического тока через слой расплавленного шлака-электролита в нём выделяется тепло, которое может быть использовано в целях плавления металла. На этом явлении основан широкий круг электрошлаковых технологий ЭШТ: электрошлаковая сварка и наплавка (ЭШС, ЭШН); электрошлаковый переплав (ЭШП); электрошлаковое литьё и выплавка (ЭШЛ, ЭШВ).

Принципиальная схема электрошлаковой сварки приведена на рис. 1.1. В пространстве, образованном кромками сваренных изделий 1 и шлакоудерживающими приспособлениями 3, создаётся ванна расплавленного шлака 4, в которую погружаются токопроводящие электроды 2. Температура шлаковой ванны должна превышать температуру плавления основного и

присадочного металлов. При этом шлак расплавляет погруженный в него электрод и кромки свариваемых изделий. Расплавленный металл создаёт металлическую ванну 5, которая кристаллизуясь, образует шов 6. По мере расплавления электрод подаётся вниз. Охлаждающие, шлакоудерживающие приспособления могут быть неподвижными и скользящими (ползуны).

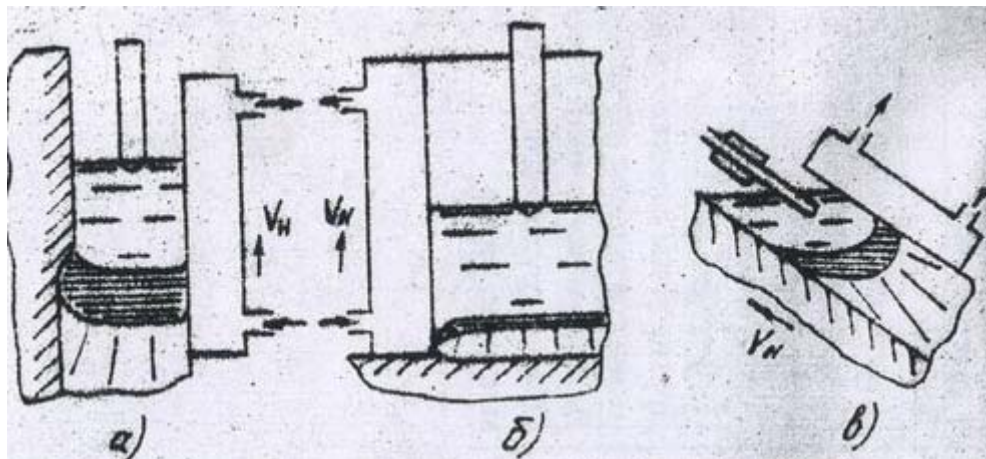
Особенностью ЭШН по сравнению с ЭШС является отсутствие второй оплавленной кромки и возможность ведения процесса с горизонтальным, вертикальным и наклонным расположением наплавляемой поверхности (рисунок 1.2).

Разработка способа ЭШП, в основе которого лежит сварочный электрошлаковый процесс, началось в 50-е годы, после того как было обнаружено, что швы ЭШС обладают весьма высокими механическими свойствами, практически лишены дефектов. Сущность ЭШП состоит в следующем (рисунок 1.3). Расходуемый электрод, изготовленный из металла обычного производства и подключенный к источнику тока, своим торцом погружают в слой расплавленного электропроводного рафинирующего шлака. Капли расплавленного электродного металла спускаются на дно шлаковой ванны и образуют металлическую ванну, которая последовательно затвердевая снизу в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе, образует слиток. По мере оплавления расходуемый электрод подается в шлаковую ванну, непрерывно восполняя объем кристаллизующейся металлической ванны. Шлакоудерживающие приспособления является формирующим и называется кристаллизатором.

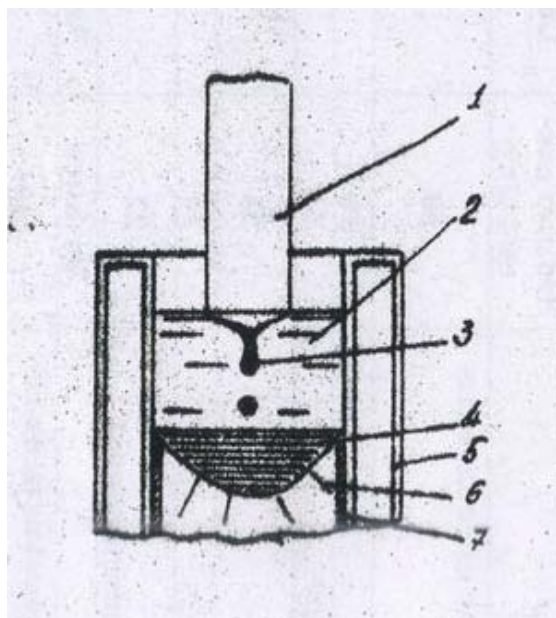


- 1 – кромка свариваемого изделия, 2 – электродная проволока,
 3 – шлакоудерживающие приспособления, 4 – шлаковая ванна,
 5 – металлическая ванна, 6 – сварной шов

Рисунок 1.1 –Схема ЭШС в вертикальном положении с принудительным формированием шва



а – наплавка вертикальной поверхности, б – наплавка горизонтальной поверхности, в – наплавка наклонной поверхности
 Рисунок 1.2 – Технологические варианты ЭШН



1 – расходуемый электрод, 2 – шлаковая ванна, 3 – капли электродного металла, 4 – металлическая ванна, 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор, 6 – слиток переплавленного металла, 7 – шлаковая корочка (гарнисаж)
 Рисунок 1.3 – Схема ЭШП

Электрошлаковое литье – это метод получения отливок фасонных изделий в литейной форме на основе применения электрошлакового процесса плавления расходуемого электрода. При этом достигается получение изделий сложной формы из металла самого высокого качества. В зависимости от степени сложности отливки в настоящее время находят применение три схемы ЭШЛ.

По первой схеме металл, идущий на формирование отливок, готовится и кристаллизуется непосредственно в литейной форме как при ЭШП.

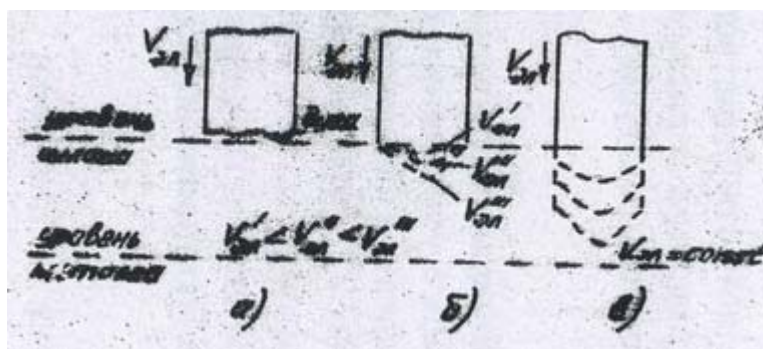
Согласно второй схеме процесс ведут с частичным или полным переливом жидкого металла из плавильной ёмкости в полость литейной формы, при этом плавильная ёмкость перемещается относительно неподвижной литейной формы по мере заполнения её металлом.

Третья схема применяется при выплавке отливок сложной формы, когда заранее накопленная в копильнике порция ЭШ металла подаётся в литейную форму. Эта технология требует применение специальной футерованной оснастки.

1.2 Плавление электродного металла

Тепло, выделяемое в шлаковой ванне при прохождении электрического тока, используется для плавления электродного металла и поддержания в перегретом состоянии шлаковой и металлической ванн. Основная часть тепла отводится охлаждающей водой от кристаллизатора и поддона, остальное излучается зеркалом шлаковой ванны, аккумулируется металлом слитка.

Отмечены три основные формы оплавления расходуемого электрода. При малой (недостаточной) скорости подачи электрода его оплавление происходит на поверхности шлаковой ванны. Электрический режим плавки характеризуется неустойчивостью и сопровождается дуговым разрядом между торцом электрода и зеркалом шлаковой ванны. Оплавляющийся электрод имеет плоский торец (рисунок 1.4, а).



а – при недостаточной скорости подачи; б – в области устойчивого процесса;

в – при чрезмерно высокой скорости подачи

Рисунок 1.4 – Характер плавления электрода

С увеличением скорости подачи оплавливающийся конец электрода приобретает коническую форму, ток плавки растёт и стабилизируется, (рисунок 1.4 б) с дальнейшим повышением скорости подачи торец электрода приобретает выпуклую форму, электрод погружается в шлак неоплавляющейся цилиндрической частью. Электрический режим становится неустойчивым из-за шунтирования расплавляющимся металлом сократившегося межэлектродного

промежутка (рисунок 1.4 в). В предельном случае возникают дуговые разряды между электродом и металлической ванной. Величина тока при прочих равных условиях связана со скоростью подачи электрода линейной зависимостью.

С увеличением сечения электрода область устойчивого процесса смещается в сторону меньших плотностей тока в электроде. С повышением напряжения область устойчивого процесса перемещается в сторону увеличения плотности тока в электроде.

В случае малого коэффициента заполнения кристаллизатора (отношение площади сечения электрода к площади сечения кристаллизатора) в пределах 0,3-0,4 практически весь ток протекает через слиток, и глубина шлаковой ванны практически не влияет на величину межэлектродного промежутка ($h_{\text{мэл}}$), что ведёт к увеличению погружения электрода в шлак ($h_{\text{эл}}$) (рисунок 1.5).

С увеличением коэффициента заполнения растёт доля тока, протекающего в цепи кристаллизатора, что приводит к стабилизации процесса оплавления при изменении глубины шлаковой ванны (рисунок 1.6).

В случае ухудшения контакта кристаллизатора с поддоном нормальное токораспределение нарушается, что может привести к пробое гарнисажа (тонкий слой твёрдого шлака, образующийся на водоохлаждаемой оснастке) и дефектности ЭШ металла. Вероятность возникновения электропробоя увеличивается с ростом коэффициента заполнения кристаллизатора, глубины шлаковой ванны и напряжения процесса.

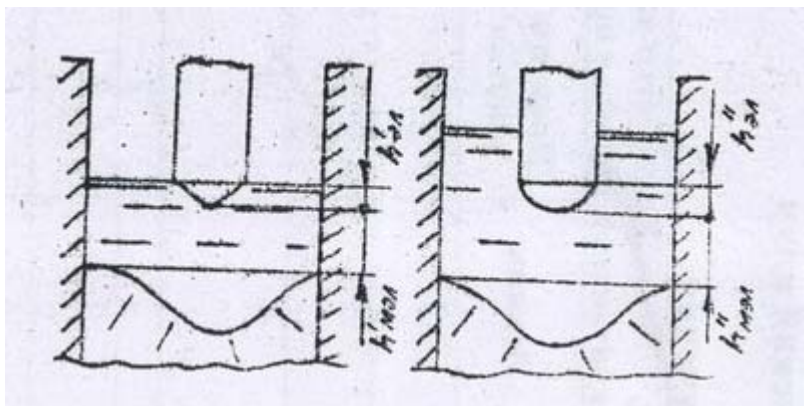
С изменением токораспределения в шлаковой ванне и, соответственно, её теплового баланса неразрывно связано изменение ряда показателей процесса ЭШП, в частности – производительности и удельного расхода электроэнергии. В диапазоне устойчивых режимов увеличение скорости подачи электрода и, соответственно, силы тока сопровождается снижением удельного расхода электроэнергии. Увеличение напряжения приводит к повышению температуры шлаковой ванны и производительности процесса, однако удельный расход электроэнергии может и возрасти. Электропроводность шлака, с точки зрения экономических показателей, имеет некоторое оптимальное значение.

Плавящийся металл расходуемого электрода переносится через шлаковую ванну в виде капель. На поверхности погруженного в шлак электрода образуется тонкая плёнка жидкого металла, стекающего к вершине конуса. Установлено, что частота отрыва капель с ростом тока увеличивается, а масса капель – уменьшается. С увеличением сечения электрода масса капель увеличивается, с повышением напряжения – уменьшается.

1.3 Кристаллизация ЭШ металла

Достигаемое при ЭШ процессах резкое повышение качества металла в большей степени связано со специфическими условиями его кристаллизации. Главная отличительная особенность в том, что в любой период кристаллизации масса находящегося в жидком состоянии металла во много раз меньше уже закристаллизовавшегося. При этом металл кристаллизуется постепенно и

направленно снизу вверх, в условиях непрерывного подвода тепла сверху и отвода тепла в нижнем направлении. Наличие шлакового гарнисажа обуславливает весьма гладкую поверхность отливки. Существенным является также тот факт, что металл, проходя через шлак, эффективно рафинирован от ликвидирующих примесей.



$$h'_{\text{мэл}} < h''_{\text{мэл}}; h'_{\text{эл}} < h''_{\text{эл}}$$

Рисунок 1.5 – Характер плавления электрода при малом коэффициенте заполнения кристаллизатора

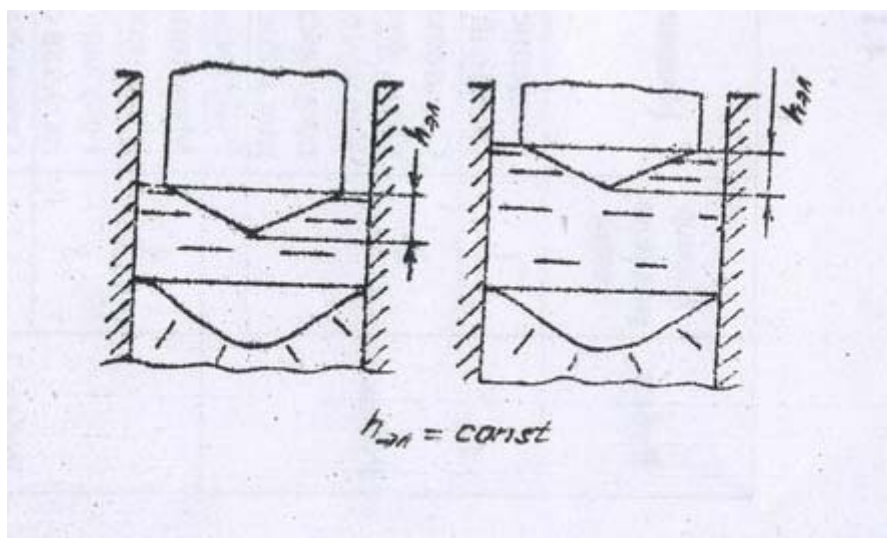


Рисунок 1.6 – Характер плавления электрода при большом (>0,6) коэффициенте заполнения кристаллизатора

Все эти факторы определяют плотную и однородную структуру ЭШ металла, состоящую из столбчатых кристаллов, сходящихся под острым углом, направленных нормально к поверхности фронта кристаллизации, т.е. дна металлической ванны.

Увеличение тока ведёт к практически пропорциональному росту глубины металлической ванны и переходу от продольно-осевой к почти радиальной

направленности кристаллов, повышение напряжение, наоборот, уменьшает глубину металлической ванны. При неизменном электрическом режиме увеличение глубины шлаковой ванны ведет к уменьшению глубины металлической ванны. Чрезмерно большая глубина металлической ванны может ухудшить качество металла, так как в нём могут «запутываться» частицы шлака. При неизменной скорости плавки увеличения сечения электрода не приводит к изменению глубины металлической ванны, что объясняется рассредоточением зоны тепловыделения в шлаке.

Характер кристаллизации ЭШ металла зависит также от состава шлака. В общем случае шлаки с повышенной электропроводностью позволяет получать более мелкую металлическую ванну.

В некоторых случаях, в крупных электрошлаковых отливках обнаруживаются грубые кристаллизационные полосы, отражающие форму металлической ванны. Содержание ликвирующих элементов в этих зонах значительно превосходит среднее содержание в слитке. Причиной этого явления могут быть резкие изменения теплового состояния расплава в результате нестабильности процесса, подсыпки твёрдого флюса в ходе плавки, перераспределением тока.

К мерам принудительного воздействия на кристаллизацию металла при ЭШП относятся: продувка металлической ванны инертными газами, взаимное перемещение электрода и кристаллизатора, наложение на слиток электромагнитных полей, ультразвука и др.

1.4 Экспериментальная часть

1 Предварительные работы: установить на поддон затравочную пластину и закрепить ее прижимами, прокалить порцию флюса (600 г) при $t = 400^{\circ} \text{C}$ в течение 0,5 часов, разместить на поддоне кристаллизатор и зажать в электрододержателе электрод, концентрически сориентировать электрод и кристаллизатор относительно друг друга, в режиме настройки поджать электродом к затравочной пластине сливную стружку токарной мехобработки стали.

2 Настроить установку на среднюю (по шкале пульта управления) скорость подачи электрода и, в автоматическом режиме, получить устойчивое протекание ЭШ процесса с фиксацией тока и скорости подачи электрода.

3 Снизить скорость подачи электрода до отрыва от шлаковой ванны, зафиксировать значения тока и скорости подачи в этот момент.

4 Увеличивать скорость подачи электрода вплоть до возникновения дугового разряда электрода на металлическую ванну, снова зафиксировать полученные результаты.

Содержание отчета:

1 Краткий конспект информационной части методических указаний.

- 2 Методика выполнения экспериментальной части работы.
- 3 Результаты эксперимента с приведением зависимости $I_{св} = f(V_{эл})$.
- 4 В выводах по работе отразить количественно полученный диапазон устойчивого ЭШ процесса.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 (4 ЧАСА)

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ, КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ, ПОДДОНЫ ДЛЯ ЭШТ

Цель работы: ознакомление с конструктивными особенностями и изучение условий надежного функционирования оборудования и оснастки для ЭШТ.

Оборудование:

- 1 Кристаллизаторы закрытого типа, орошаемые, панельные, их компоненты.
- 2 Поддоны с тарельчатой и змеевидной схемой охлаждения.
- 3 Источники питания: трансформаторы ТШС-3000-1, ТШС-3000-3.

Независимо от разнообразных конструктивных особенностей ЭШ установок они должны быть укомплектованы следующим оборудованием: источником питания, автоматом (полуавтоматом) с приборами управления и регулирования процесса, механическим и вспомогательным, предназначенным для установки и перемещения изделия, оснасткой для принудительного формирования ЭШ металла, системой охлаждения.

2.1 Источники питания, автоматы для электрошлаковой технологии

Автомат А – 550У является типичной конструкцией, предназначенной для электрошлаковой сварки пластинчатым электродом, но, при комплектации достаточно мощным источником питания, может быть использована и для других технологий (рисунок 2.1).

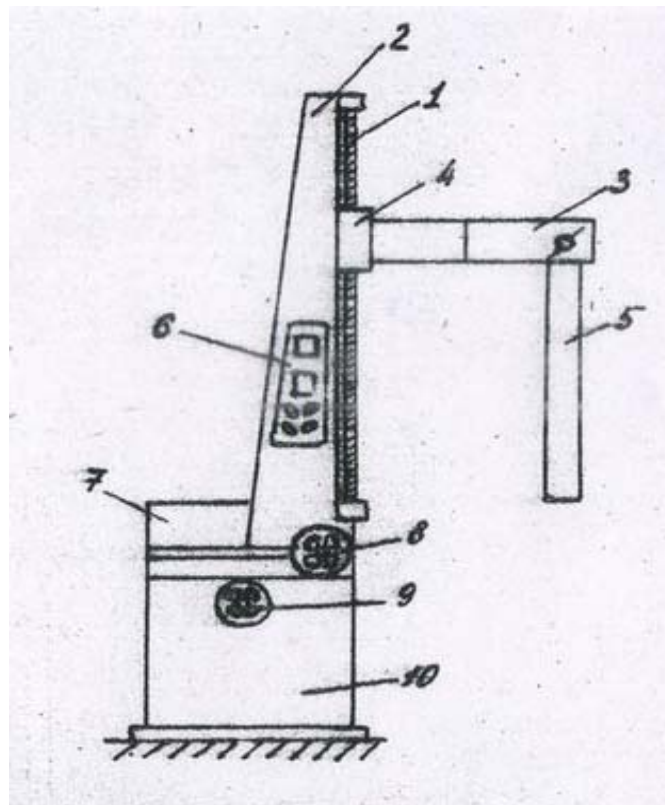
Электрод (5) крепится в винтовом зажиме (3), связанным с ползуном (4) суппорта винтового механизма (1).

Электрод, по мере оплавления, подается винтовым приводом (7), снабженным электродвигателем постоянного тока с регулируемым числом оборотов. Для установочных и корректировочных перемещений электрода, колонна (2) установлена на системе горизонтальных суппортов, один из которых при помощи корректора (9) обеспечивает перемещение вдоль оси установки, второй при помощи корректора (8) – поперек.

Электрошлаковый процесс обладает свойством саморегулирования. Это значит, что процесс может протекать длительно устойчиво, без каких-либо

управляющих воздействий из вне. Если возмущение, нарушившее процесс, сохраняется длительно, то процесс переходит в новое состояние, характеризующееся новыми параметрами режима, отличного от исходного. При использовании электродов с большим поперечным сечением процесс саморегулирования выражен слабо, что предопределяет необходимость применения регуляторов со стабилизацией тока. Регулирующим воздействием чаще всего является скорость подачи электрода (например в установке А – 550У). Функциональная схема системы стабилизации тока при ЭШ процессах приведена на рисунке 2.2.

Скорость подачи электрода V_3 определяется положением потенциометра R_2 , напряжением, с которого подается на одну из встречно включенных обмоток управления (ОУ) машинного усилителя (МУ). Величина тока ЭШ процесса снимается токовым трансформатором (ТТ). После выпрямления напряжения токового трансформатора через подстроечный потенциометр оно попадает на вторую обмотку управления МУ. Напряжение, вырабатываемое МУ, определяется суммарным магнитным потоком $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ (составляющие Φ_1 и Φ_2 зависят от напряжений на них) и подается на двигатель постоянного тока М. При снижении фактического значения тока процесса от заданного происходит уменьшение магнитного потока Φ_1 . В результате суммарный поток Φ – возрастает, что приводит к увеличению напряжения на М, скорости подачи электрода V_3 и возрастанию тока до номинального значения. Аналогично идет отработка возмущения при увеличении тока выше заданного. Источником питания могут служить трансформаторы для дуговой сварки, однако более стабилен процесс при использовании специализированных источников питания: с низким напряжением холостого хода, жесткой внешней характеристикой, малым сопротивлением короткого замыкания, широким диапазоном регулирования напряжения. Наибольшее распространение получили трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения изменением числа включенных витков первичной и вторичной обмоток (ТШС-3000-1, ТШС-3000-3).



1 – винт; 2 – колонна; 3 – зажим токоподводящий; 4 – ползун; 5 – электрод;
 6 – пульт; 7 – привод винтового механизма; 8 – корректор поперечный;
 9 – корректор продольный; 10 – станина
 Рисунок 2.1 – Автомат А – 550У для ЭШС

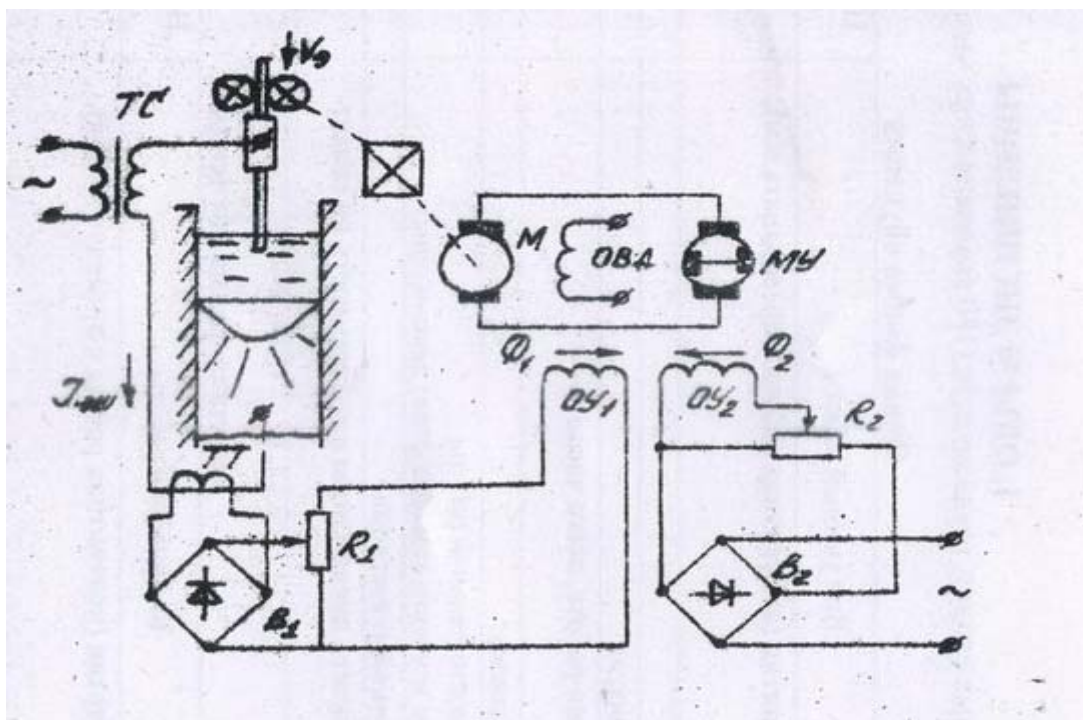
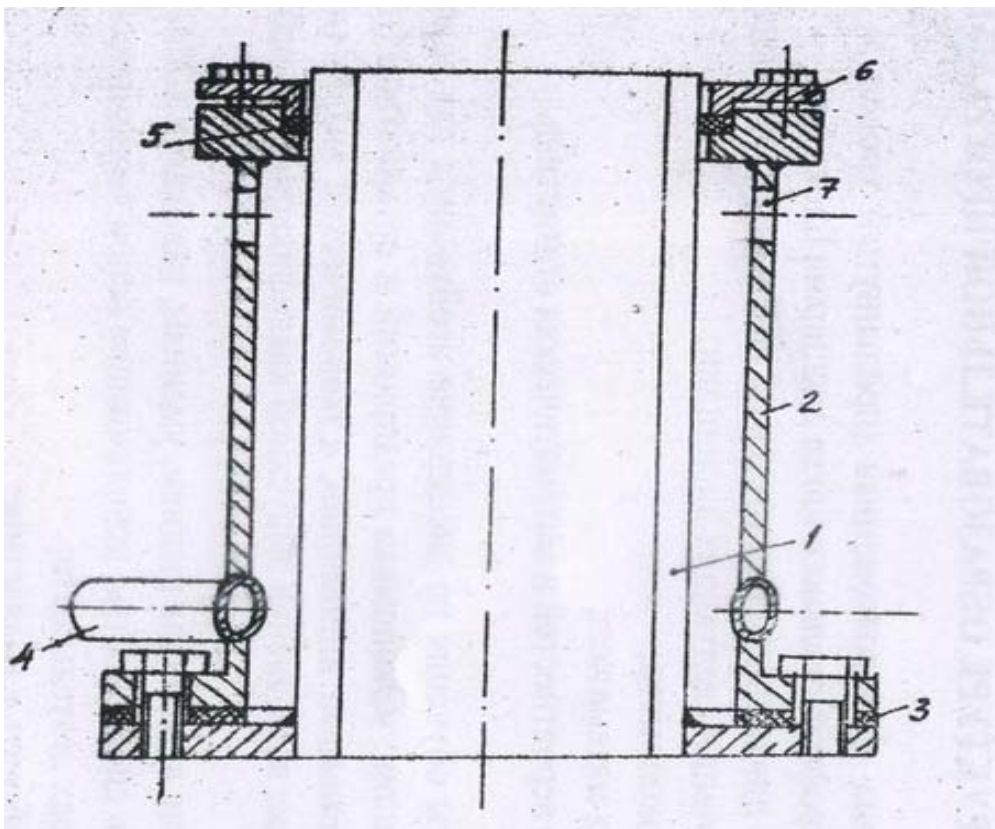


Рисунок 2.2 – Функциональная схема системы стабилизации тока при ЭШ процессах

2.2 Кристаллизаторы

Кристаллизатор является наиболее ответственным узлом печи ЭШП. В нем происходит плавление электродного металла, принудительное охлаждение и кристаллизация расплавленного металла, а также формирование отливки. Кристаллизатор также играет роль плавильной камеры. Внутри кристаллизатора находится перегретый высокоактивный шлак, температура которого может достигать $1900-2000^{\circ}\text{C}$. Высокая тепловая мощность, выделяемая в шлаке при прохождении через него электрического тока, а так же возможность протекания через кристаллизатор больших токов (до десятков тысяч ампер), создают тяжелые тепловые условия работы кристаллизатора. Величина плотности теплового потока на стенку кристаллизатора может достигать примерно миллиона килокалорий на квадратный метр поверхности в час. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к конструкции кристаллизатора, является обеспечение надежного отвода тепла.

Кристаллизатор является сменным рабочим элементом печи ЭШП. Форма кристаллизатора определяется сечением получаемых слитков. Поэтому, в зависимости от сортамента выплавляемых слитков, печь ЭШП комплектуется соответствующим набором кристаллизаторов. По типу охлаждения кристаллизаторы делятся на несколько групп.



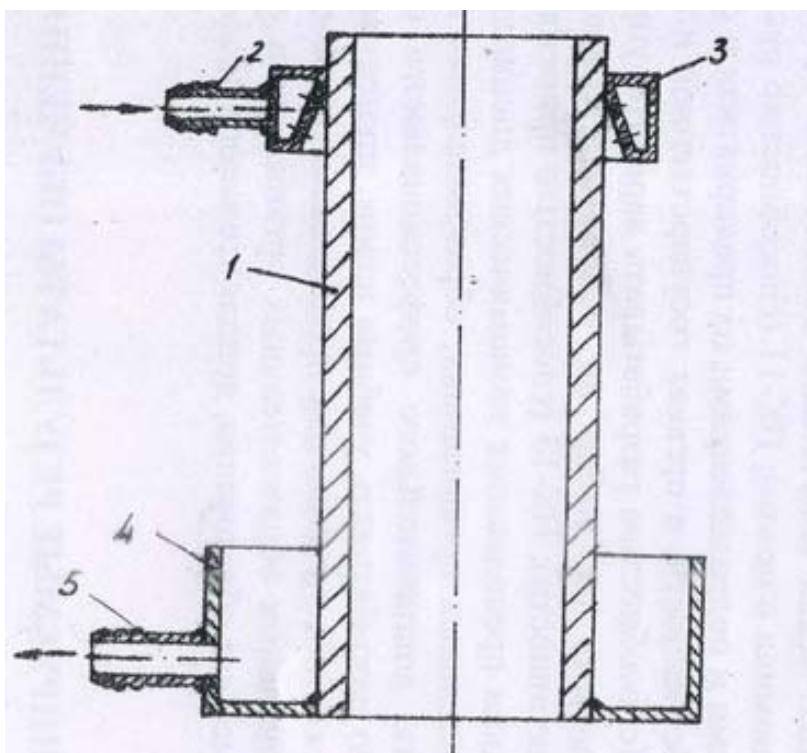
1 – кокиль; 2 – кожух; 3 – нижнее уплотнение; 4 – подводный патрубок; 5 – верхнее уплотнение; 6 – уплотняющее кольцо; 7 – отверстие сливного патрубка

Рисунок 2.3 – Схема кристаллизатора закрытого типа

Большое распространение получили кристаллизаторы закрытого типа со свободным омываемым кокилем (рисунок 2.3). Главной частью закрытых кристаллизаторов является кокиль. Снаружи он охвачен кожухом. В зазоре между кожухом и кокилем с относительно высокой скоростью движется охлаждающая вода, для отвода и подвода которой служат патрубки, ввариваемые в кожух. Герметичность водяной полости достигается применением уплотнений в нижней и верхней частях кристаллизатора. Кокиль, находящийся в контакте с расплавленным шлаком и воспринимающий значительную тепловую нагрузку, изготавливается из меди различных марок (М1, М2, М3) или из хромистой бронзы (Бр Х О 8). Толщина кокиля колеблется от 10 до 40 мм, причем большие размеры относятся к кристаллизаторам крупнотоннажных печей. Внутренняя поверхность кокиля, с целью обеспечения извлечения слитков, выполняется плавно уширяющейся книзу. Кожух кристаллизатора выполняется сварным из углеродистой стали.

Наиболее простым в изготовлении и более безопасным в работе являются одностенные кристаллизаторы с оросительной системой охлаждения. Для их охлаждения нужен меньший расход воды. Схема кристаллизатора с оросительным охлаждением приведена на рисунке 2.4. Кокиль такого кристаллизатора изготавливается из меди. Охлаждающая вода подается сверху через спрейерное устройство и стекает вниз в приемную емкость, а далее по патрубку поступает на слив. Для более равномерного распределения охлаждающей воды по поверхности кокиля целесообразно использовать металлическую сетку, обтянутую снаружи кокиля. Поскольку имеет место свободный слив воды, условный проход сливных патрубков выбирают с соответствующим запасом. Большая безопасность, в сравнении с кристаллизатором закрытого типа, обусловлена возможностью визуального наблюдения за охлаждением кокиля, а также исключением образования паровоздушных подушек, приводящих к ухудшению охлаждения кокиля.

Одной из разновидностей кристаллизаторов являются кристаллизаторы панельного типа. Одним из существенных преимуществ панельных кристаллизаторов является то, что путем перемещения панелей представляется возможным изменять форму поперечного сечения получаемых слитков. Незаменимы панельные кристаллизаторы при наплавке изношенных частей (например, штамповой оснастки). При разработке конструкций панельных кристаллизаторов часто пользуются принципом канального охлаждения панелей. Панельный кристаллизатор (рисунок 2.5) состоит из водоохлаждаемой медной или бронзовой плиты и из стального корпуса, к которому крепится рабочая плита, а также из системы подвода и слива воды. Для герметизации водяной полости применяют резиновые прокладки. Сборка панелей производится болтовыми соединениями. Технология изготовления закрытых кристаллизаторов должна обеспечивать их надежную герметичность в условиях эксплуатации.



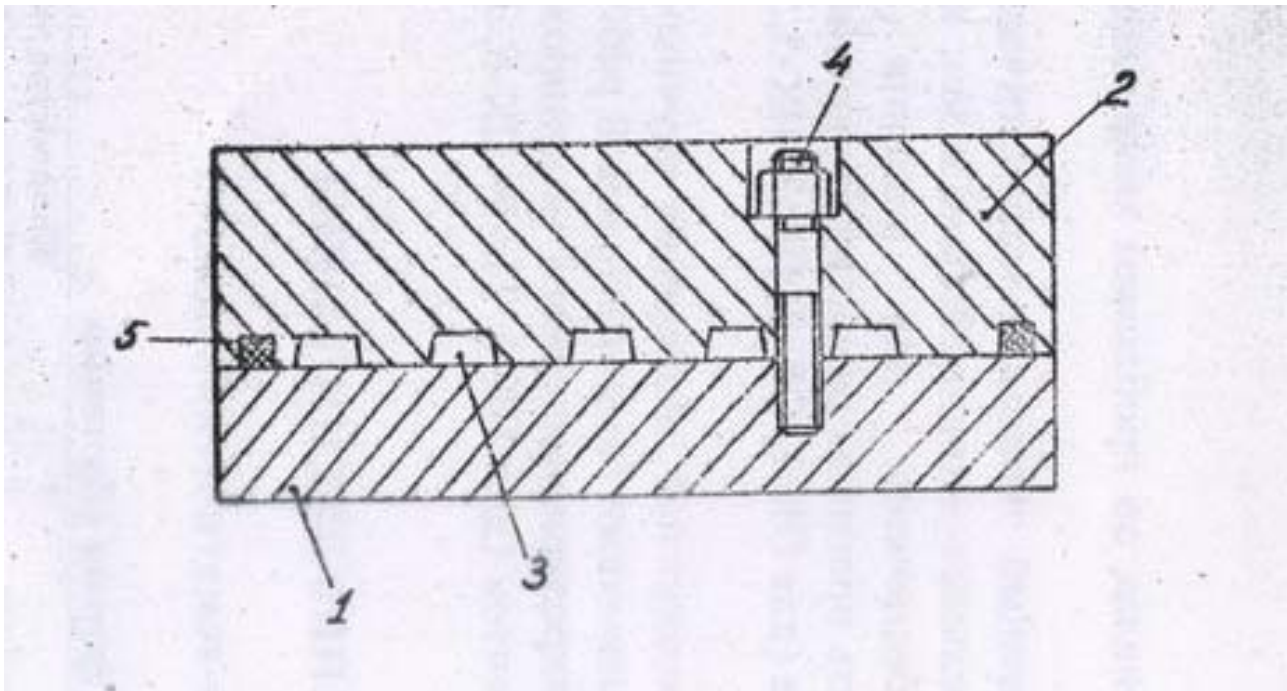
1 – кокиль; 2 – подводящий патрубок; 3 – спрейерный коллектор; 4 – сливной резервуар; 5 – сливной патрубок

Рисунок 2.4 – Схема одностенного кристаллизатора с оросительным охлаждением

2.3 Поддоны

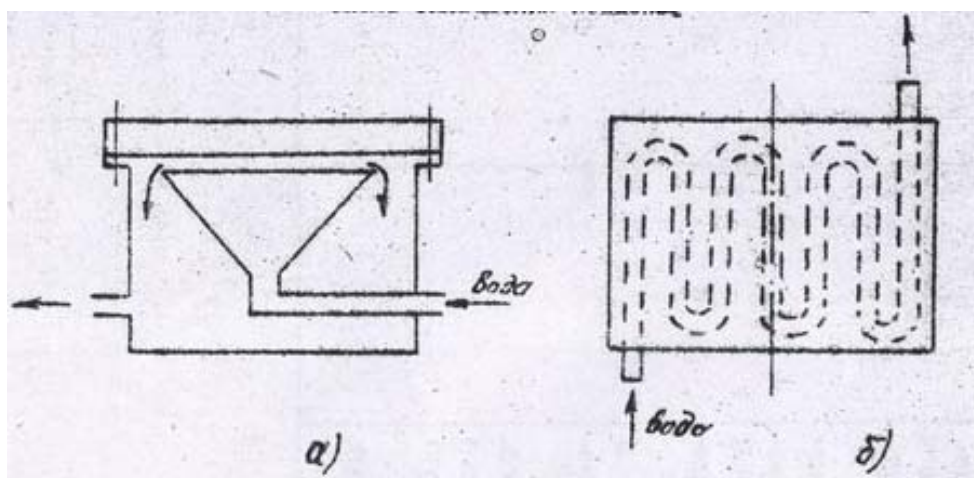
Поддон закрывает снизу плавильное пространство, образованное кристаллизатором и является основанием, на котором начинается выплавка слитка. Форма поддона может соответствовать конфигурации выплавляемых слитков (круглые, квадратные, прямоугольные). В зависимости от схемы переплава поддон в начале плавки может входить внутрь кристаллизатора (фасонные поддоны), либо кристаллизатор опирается на поддон своим нижним фланцем (плоские поддоны). При проектировании поддонов следует предусматривать меры по обеспечению надежного электрического контакта поддона с затравкой и с кристаллизатором во избежание электропробоев. Поддон в начальный период выплавки слитков воспринимает значительные тепловые нагрузки. Для обеспечения нормальной работы поддонов в условиях действия больших тепловых нагрузок и значительных токов верхняя часть их (рабочая плита) выполняется как правило, охлаждаемой. Конструкции поддонов предусматривают несколько схем протекания охлаждающей воды (рисунок 2.6). Элементы поддона показаны на рисунке 2.7. Корпус представляет собой металлоконструкцию, к которой крепятся все остальные элементы поддона. Изготавливается корпус сварным из конструкционной стали. Рабочая плита изготавливается из листовой меди или хромистой бронзы. Для подвода тока на рабочей плите предусматривают площадку, к которой крепятся кабели. На

рабочей плите располагается затравка, которая служит для обеспечения электрического контакта между слитком и поддоном и, кроме того, предохраняет рабочую плиту от чрезмерных тепловых нагрузок в начальный период плавки. Для обеспечения хорошего контакта поддона с кристаллизатором поддон оборудуют прижимными устройствами. Эти устройства чаще всего выполняются винтовыми или клиновыми с ручным приводом.

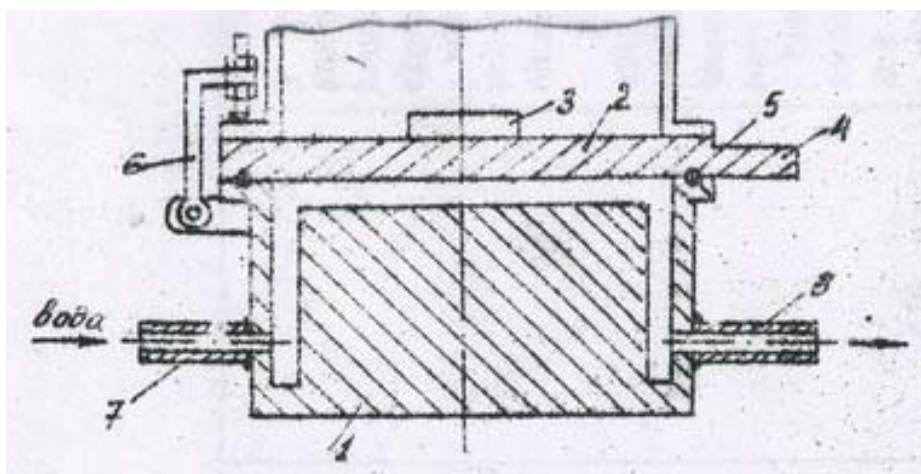


1 – рабочая плита; 2 – корпус; 3 – каналы для охлаждающей воды; 4 – шпилька;
5 – резиновая прокладка

Рисунок 2.5 – Поперечный разрез панели



а – тарельчатая (орошаемая); б – змеевидная
Рисунок 2.6 – Схема охлаждения поддона



1 – корпус; 2 – рабочая плита; 3 – заправка; 4 – место подключения электрического кабеля; 5 – уплотнительная прокладка; 6 – прижимная струбцина; 7 – водоподводящий штуцер; 8 – водоотводящий штуцер

Рисунок 2.7 – Схема плоского поддона

Содержание отчета

- 1 Краткий конспект информационной части настоящих методических указаний.
- 2 Сравнительная оценка эффективности применения и надежности в работе изученной технологической оснастки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 (4 часа)

ТЕХНИКА СТАРТА И ЗАВЕРШЕНИЯ ЭШ ПРОЦЕССА

Цель работы: освоение методик начала и завершения электрошлакового процесса, сравнительная оценка эффективности вариантов старта с позиций формирования донной части отливки.

Оборудование и материалы:

- 1 шахтная печь Таммана;
- 2 графитовый тигель;
- 3 флюс АНФ-6;
- 4 металлургические очки; металлические щипцы;
- 5 установка А-550У с технологической оснасткой.

Экспериментальная часть:

- 1) нагреть печь Таммана выше температуры плавления флюса;

- 2) постепенно добавляя твердый флюс в тигель, заполнить его флюсом в жидком состоянии;
- 3) залить флюс в кристаллизатор с предварительно настроенной установкой для А-550У в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе № 1 (данная операция осуществляется с непосредственным участием учебно-вспомогательного и преподавательского состава кафедры ТАСП);
- 4) вывести процесс на устойчивый режим оплавления электрода, постепенно добавляя сухой флюс в кристаллизатор вплоть до создания шлаковой ванны необходимого объема (общее количество шлака для кристаллизатора Ø80 мм составляет 600 г.);
- 5) вести плавку до полного заполнения кристаллизатора с учетом рекомендаций по ее завершению;
- 6) после остывания извлечь полученную отливку и оценить качество формирования донной части слитка.

3.1 Выбор режима плавки

Параметры режима ЭШ процесса можно подразделить на первичные, или независимые и вторичные, или зависимые. К основным первичным относятся: скорость подачи электрода в шлаковую ванну, глубина шлаковой ванны, сечение электрода, напряжение процесса. К вторичным относится, прежде всего, ток процесса, определяющийся сечением электрода и скоростью его подачи, в меньшей степени \square проводимостью шлаковой ванны и напряжением процесса.

Конкретные величины параметров режима определяются экспериментально. Основные критерии выбора: устойчивое электрошлаковое оплавление расходуемого электрода, хорошее формирование свободных поверхностей (со стороны водоохлаждаемой оснастки) и тонкий гарнисаж, качественное сплавление с основным металлом (в случае ЭШС и ЭШН), радиально-осевая кристаллизация ЭШ металла.

Ток процесса, в силу легкости его измерения и корреляции с характером плавления электрода, является одним из основных контролируемых параметров процесса, строго связанным со скоростью подачи электрода и расстоянием торца электрода от зеркала металлической ванны. При оптимальном токе отсутствуют дуговые разряды, внешние, проявляющиеся в характерном периодическом появлении треска (при горении дуги на поверхности шлаковой ванны – превышение тока) или клокотания в глубине шлаковой ванны (при горении дуги на поверхности металлической ванны \square недостаточность тока).

Напряжение на шлаковой ванне, в основном, зависит от напряжения холостого хода источника (в случае применения источников с жёсткой характеристикой) и определяет сплавление с основным металлом (в случае ЭШС, ЭШН) и толщину гарнисажа (при ЭШН). При напряжениях ниже оптимального значения образуются толстый гарнисаж, гофры на поверхности отливки, несплавление с наплавляемой деталью. Высокие напряжения

повышают вероятность перехода ЭШ процессов в дуговой. Глубина металлической ванны, а значит, и структура литого металла от напряжения зависят мало.

Глубина шлаковой ванны влияет, в основном, на устойчивость процесса и составляет, обычно, 0,5-1,0 ее ширины (диаметра).

При малой глубине шлаковой ванны вероятны дуговые разряды между электродом и металлической ванной, при большой – зоне тепловыделения смещается в верхние объемы шлаковой ванны, в результате может нарушиться формирование поверхности слитка (сплавление при ЭШС и ЭШН).

3.2 Техника старта

Начало электрошлакового процесса является весьма важным, с точки зрения качества ЭШ металла. Практически используют два основных способа наведения шлаковой ванны: твердый и жидкий старты (иногда применяют электропроводные в твердом состоянии флюсы).

Твёрдый старт не требует применения специального флюсоплавильного оборудования. Электрод замыкают накоротко на наплавляемое изделие или затравку слитка и дугой расплавляют твёрдый флюс, постепенно растягивают дуговой промежуток до разрыва. Дуговой процесс при этом, переходит в электрошлаковый. Для ускорения расплавления шлака используют различные технологические приемы: внутрь стартовых брикетов запрессовывают стальную стружку или проволоку, применяют экзотермические смеси, затравку или электрод выполняют с зажигательным острием. Такой способ наведения шлаковой ванны имеет существенный недостаток: нижняя часть слитка или наплавляемого слоя имеет многочисленные дефекты типа несплавлений, шлаковых включений, пережимов.

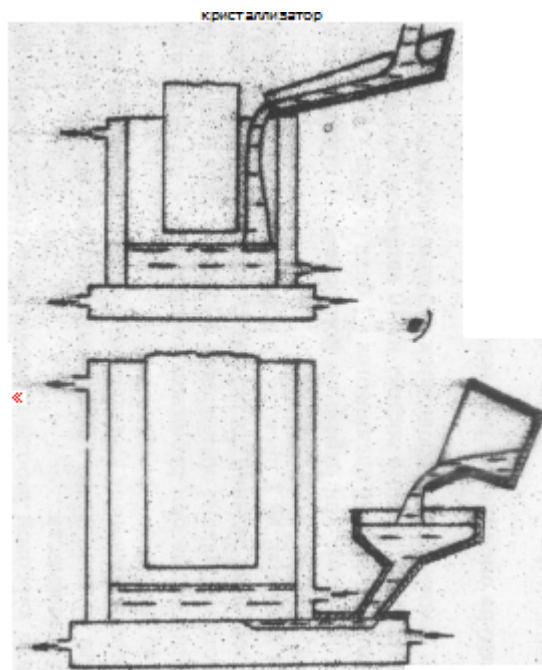
Остановимся несколько подробнее на жидком старте. Здесь прежде всего достигается резкое сокращение начального периода плавки (в 10 и более раз по сравнению с твердым стартом) и повышение качества донной части слитка за счет того, что весь объем шлака подается в кристаллизатор в жидком виде. Немаловажное значение имеет и тот факт, что при жидком старте существенно повышается срок службы поддона и кристаллизатора в результате почти полного подавления дуговых разрядов, неизбежных при твердом старте. Если кристаллизатор достаточно короткий, применяют заливку шлака сверху, так как, при этом мало вероятно образование настывлей и замыкание электрода на стенку.

В случае применения высоких кристаллизаторов и при больших коэффициентах их заполнения практикуется заливка снизу сифоном. Заливку можно производить при поданом на печь напряжении.

Применяется два вида приспособлений для заливки шлака в катализатор: желобы и воронки. Первые применяются для заливки шлака сверху, вторые □ снизу сифонным способом (рисунок 3.1) изготавливаются они, как правило, из листовой углеродистой стали с помощью сварки.

3.3 Техника завершения плавки

По окончании электрошлакового процесса появляется возможность возникновения усадочных раковин. Жидкий металл имеет больший объем, чем закристаллизовавшийся, поэтому металл в формирующем устройстве в процессе кристаллизации сокращается в объеме, что приводит к образованию пустот, называемых усадочными раковинами. Усадочные раковины могут быть сконцентрированы в одном месте, либо рассеяны по всему объему слитка или по его части. Они могут быть заполнены газами, растворимыми в жидком металле, но выделяющимися при кристаллизации. В хорошо раскисленной, так называемой, спокойной стали, усадочная раковина образуется в верхней части слитка. В процессе ЭШП в конце плавки выполняется операция по заполнению усадочной раковины. Эту операцию осуществляют следующим образом: не отключая ток плавки, отключают подачу электрода и ведут процесс до снижения тока до 0. Таким образом, в кристаллизующийся слиток некоторое время продолжает поступать расплавленный металл, который и заполняет усадочную раковину.



а)

б)

а – желоб для заливки шлака сверху; б – воронка для заливки шлака снизу сифонным способом

Рисунок 3.1 – Схемы приспособлений для заливки шлака в кристаллизатор

По окончании выплавки заготовки и полной кристаллизации металла, и шлаковой шапки, ее извлекают из кристаллизатора. После охлаждения слитка при помощи молотка удаляют шлаковую шапку и гарнисаж с заготовки. Эту операцию следует проводить в защитных очках во избежание попадания частичек шлака в глаза.

3.4 Техника получения жидкого флюса

Применяют два способа приготовления жидкого флюса: а) непосредственно в кристаллизаторе, б) на специализированных флюсоплавильных печах. Первый способ связан со сменой электрода или транспортировкой кристаллизатора после наведения шлаковой ванны. Более технологичен способ заливки в кристаллизатор жидкого шлака предварительно расплавленного в специальной флюсоплавильной печи. Расплавление шлака при этом производится нерасходуемым графитовым электродом в неохлаждаемом тигель-ковше с графитовой футеровкой. При небольших количествах шлака заливка его в кристаллизатор производится оператором вручную.

Внешне флюсоплавильные печи напоминают электрошлаковые, но конструктивно значительно проще их. Расплавление шлака производится в следующей последовательности: электрод опускают в тигель-ковш и закорачивают его на дно, засыпают в тигель-ковш небольшую порцию флюса, после чего включают электрический ток, расплавление первых порций флюса производится в дуговом режиме, а после наведения некоторого количества жидкого флюса процесс переводят в электрошлаковый отрывом электрода от дна тигля. Контроль за процессом плавки визуальный. Величины тока и напряжения поддерживаются в процессе плавки оператором вручную. При непрерывной работе тигель-ковш прогревается, и время расплавления флюса заметно сокращается (30-50%). После наведения требуемого количества жидкого шлака отключают напряжение и заливают сразу всю порцию шлака в кристаллизатор. Источником питания служит трансформатор электрошлаковой установки.

В некоторых случаях, когда флюс содержит окислительные компоненты (FeO , MnO , SiO_2 , MoO_2 , WO_3 , V_2O_5 и др.), например, с целью дополнительного легирования ЭШ металла, его расплавление в графитовом тигле нецелесообразно. Углерод может реагировать с активными компонентами шлака, восстанавливая их с последующим образованием карбидов. При этом создается опасность недопустимого науглероживания ЭШ металла. Поэтому легирующие компоненты флюса желательно добавлять в твердом виде непосредственно в кристаллизатор.

Содержание отчета

- 1 Конспект информационной части методических указаний.
- 2 Методика эксперимента.
- 3 Выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 (4 часа)

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ВЫПЛАВКА ЗАГОТОВОК ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: изучение возможностей ЭШ технологий для изготовления заготовок сложнолегированных инструментальных сталей.

Методическое обеспечение:

1 отчеты по научно-исследовательским работам, плакаты, мультимедиа оборудование.

Поскольку электрошлаковый металл характеризуется очень высоким качеством как по чистоте, так и по структуре, кафедрой ТАСП была предпринята успешная попытка внедрения электрошлаковых технологий применительно к изготовлению и ремонту штамповой оснастки на ОАО «Курганмашзавод», в частности – к выплавке заготовок штампов и матриц на пресс 1000-1600 тс.

При этом предварительно были проведены: анализ возможных металлургических взаимодействий металла и шлака, лабораторные исследования по влиянию переплава на химический состав и механические свойства ЭШ металла более часто применяемой стали 4х5МФС.

Изготовление штампов на предприятии осуществляется из кованных заготовок, имеющих значительные припуски на механическую обработку. Часть штампов, например, на прессы 1000 и 1600 тс, восстанавливаются «занижением» несколько раз, (при отсутствии в штампе трещин) после чего, отработанные штампы сдают в металлолом. Объем ремонта штампов на заводе оставляет 500 комплектов в год. Других технологий восстановления штампов на предприятии не используется. Годовой расход штамповой стали 4х5МФС составляет 135 т.

4.1 Взаимодействие металла и шлака при ЭШ процессах

Одной из основных особенностей электрошлакового процесса является довольно длительное существование и контактирование (по сравнению со сваркой) жидких фаз металла и шлака. В силу этого обстоятельства их физико-химическое взаимодействие получают значительное развитие. Схема основных взаимодействий показана на рисунке 4.1.

К процессам следует отнести поглощение шлаком газов и паров, содержащихся в атмосфере. Это прежде всего окисление шлака, растворение в нём кислорода и азота. Шлаковая ванна, в свою очередь, выделяет в атмосферу пары летучих компонентов шлака (в основном – фториды). Эти пары

оказывают защитное действие на электродный металл и шлаковую ванну, предохраняя от прямого контакта с воздухом (процесс 2).

К процессам 3 и 4 относится взаимодействие жидких металла и шлака: окисление – восстановление легирующих компонентов и примесей. Это взаимодействие может носить металлургический (преобладающий тип взаимодействия) и электрохимический характер (в случае протекания через границу раздела фаз постоянного тока).

Природа взаимодействия между шлаковой ванной и электродным металлом и каплей (процессы 5-6) такая же как в предыдущем случае. Основное отличие – большая интенсивность взаимодействия ввиду повышенных температур, удельной поверхности раздела, конвекции расплава.

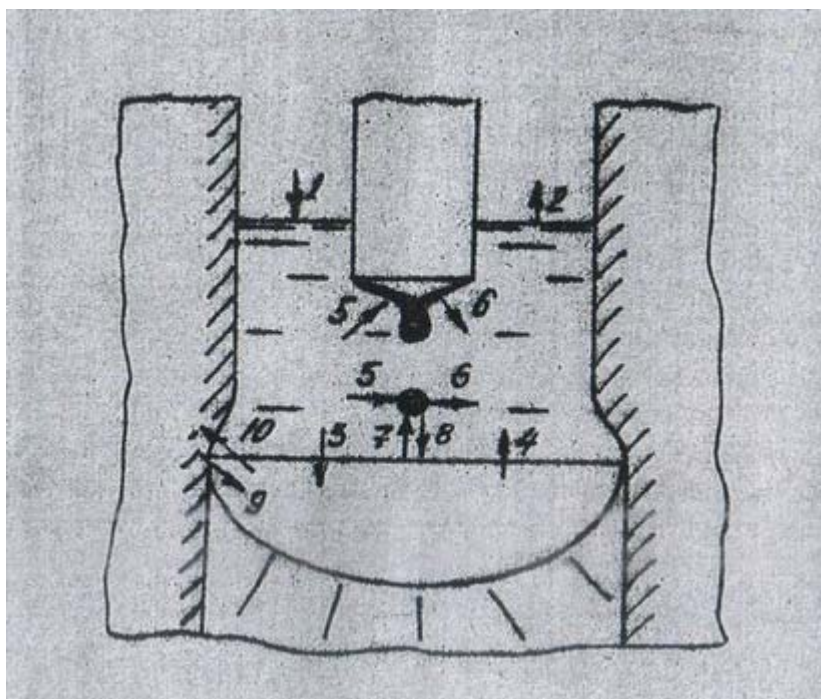
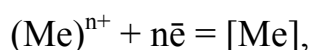
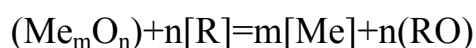


Рисунок 4.1 – Схема физико-химических взаимодействий при ЭШ процессах

Взаимодействие электродного и основного металла с металлической ванной (процессы 7-8 и 9-10) заключается в получении расплава, который после кристаллизации образует металл шва (для ЭШС и ЭШН). Доля их участия зависит от ширины зазора между свариваемыми кромками и глубины оплавления последних.

Как уже отмечалось, этот тип взаимодействия является основным с точки зрения формирования химического состава переплавленного металла. Окисление (восстановление) легирующего компонента или примеси шлаком происходит по двум направлениям, которые, в общем случае, можно записать в виде:



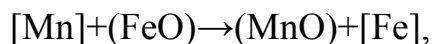
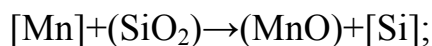
где (Me_mO_n) – окисел в шлаке,

R – окисляемый легирующий элемент в металле.

Эта же реакция при протекании справа налево отражает восстановление элемента из шлака. В общем случае направление, скорость, глубина протекания металлургического взаимодействия металла и шлака зависит от многих факторов.

Реакция марганца

Марганец используют, обычно, в качестве легирующей добавки к стали, в меньшей степени – в качестве раскислителя. В зависимости от конкретной композиции элементов электрода и состава шлака может происходить как окисление, так и восстановление марганца в переплавленный металл. При использовании флюсов на фтористокальциевой основе без скислительных компонентов (FeO , SiO_2) типа АНФ-6, АНО-III угар марганца обусловлен окислением, растворенным в шлаке кислородом атмосферы, и весьма невелик. Например, при переплаве стали 4X5ФМС под флюсом АНФ-6 содержание марганца в металле снижается на сотые доли процента. При использовании флюса с высоким содержанием SiO_2 , FeO (АН-8) может наблюдаться более существенное снижение содержания марганца в переплавленном металле за счет его окисления по реакциям:



при одновременном восстановлении Si и Fe. Повышение содержания MnO в шлаке и наличие кремния в электроде способствует переходу марганца из шлака в переплавленный металл.

Реакция кремния

Кремний используют в штамповых сталях как один из основных легирующих элементов со строго регламентированным содержанием. Применение безкремнезёмистых шлаков приводит к незначительному угару кремния ($\Delta Si = 0,07 \dots 0,09\%$), не приводящему к потере технологических свойств переплавленных штамповых сталей. Кремний, как и марганец, с повышением температуры уменьшает средство к кислороду, что способствует его восстановлению из шлака (при условии наличия MnO). С понижением температуры процесса он, наоборот, «охотнее» окисляется.

Реакция хрома

Хром один из самых распространённых легирующих элементов в стали. В ряду элементов, расположенных по степени убывания средства к кислороду, он стоит после алюминия, титана, кремния, ванадия и марганца, но перед железом. Поэтому окисление хрома, наиболее вероятно, обусловлено диффундирующим

в шлаке кислородом атмосферы и оксидами железа, присутствующими в шлаке, или попадающими туда с окисной пленки электрода. При использовании даже безокислительных флюсов угар хрома может достигать 0,1-0,2 от исходного содержания, так как он образует оксиды переменной валентности и служит, как и FeO, переносчиком кислорода из воздуха в шлак. Угар хрома можно ослабить добавлением в электродный металл или на поверхность шлаковой ванны таких активных раскислителей, как кремний и алюминий.

Реакция ванадия

Ванадий относится к важной легирующей присадке к штамповым сталям (например, 4X5МФС), увеличивающим их жаростойкость и жаропрочность. С кислородом он образует ряд окислов: VO, V₂O₃, VO₂, V₂O₅. При переплаве под шлаками без присадок оксидов ванадия наблюдается незначительное снижение его содержания в металле, в основном за счёт окисления FeO и кислородом атмосферы. Благодаря сравнительно небольшому сходству с кислородом, угар этого элемента при электрошлаковых процессах можно существенно уменьшить с помощью активных раскислителей.

Реакция молибдена, никеля и вольфрама

Эти элементы имеют сравнительно малое сходство с кислородом, а оптимальные, с точки зрения эксплуатационных свойств, концентрации в сталях невелики (до 1-2%). Поэтому, в присутствии раскислителей, можно ожидать, что угар этих элементов будет незначительным.

Реакция углерода

Углерод является весьма важным компонентом сталей. Его содержание должно быть строго регламентированным. С повышением температуры сходство с кислородом увеличивается, соответственно повышается реакционная способность. В электрошлаковых технологиях с применением «жидкого старта» углерод присутствует в шлаке в виде карбида CaC₂, который образуется в результате взаимодействия с плавильной емкостью, обычно изготавливаемой из графита. Углерод частично выгорает из металла электрода, взаимодействуя с оксидами и являясь раскислителем, частично переходит из науглероженного шлака в металлическую ванну. Обычно эти два процесса уравнивают друг друга, в результате содержание углерода в металле остаётся неизменным.

Поведение кислорода

Кислород проникает в переплавленный металл в виде оксидов с поверхности плавящегося электрода и через шлак из атмосферы. Проницаемость шлака для кислорода зависит от состава флюса и увеличивается с повышением его основности. Переход кислорода из шлака усиливается, если в шлаке содержится оксиды с высоким давлением паров (Na₂O, CuO,

FeO). Элементы-раскислители при оптимальной концентрации способствуют уменьшению содержания кислорода в металле (Al, Ti, Si).

Реакция серы

Сера – одна из наиболее вредных примесей в стали. Она служит причиной образования горячих трещин, снижая жаропрочность, деформируемость при горячей механической обработке. Сера попадает в ЭШ металл из электрода, основного металла направляемого изделия и шлака. Преимущество электрошлаковой технологии – снижение концентрации серы в ЭШ металле в 2-4 раза, по сравнению с металлом электрода, и равномерное ее распределение по высоте слитка. Десульфурierende свойства шлака тем выше, чем выше активность кислорода в шлаке. По степени убывания десульфурierende способности некоторые шлаки расположены в ряд: $CaF_2 - CaO$; $CaF_2 - MgO$; $CaF_2 - Al_2O_3$. В целом процесс десульфурации можно представить в виде:



4.2 Влияние переplava на химический состав и механические свойства

ЭШП стали 4X5МФС проводили на установке А-550У. Род тока переменный, величина тока 1500 А, напряжение 38 В. Переplав проводили в медный водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 80 мм. Диаметр электрода – 40 мм, вес слитка – 8 кг. Флюс АНФ – 6, вес флюса 630 гр.

Процесс ЭШП начинали с «жидкого» старта и вели в течении 16 мин. Полученные слитки после стандартной термической обработки подвергались исследованию микроструктуры, химического состава и изготовления образцов для механических испытаний.

Результаты химического анализа по высоте слитка приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты химического анализа по высоте слитка

| Высота слитка от низа, мм | Содержание элементов, % | | | | |
|---------------------------|-------------------------|------|------|------|------|
| | V | Si | Mn | Mo | Cr |
| 10 | 0,34 | 0,83 | 0,23 | 1,39 | 3,71 |
| 23 | 0,36 | 0,83 | 0,21 | 1,44 | 3,98 |
| 37 | 0,34 | 0,81 | 0,23 | 1,48 | 4,07 |
| 52 | 0,316 | 0,85 | 0,22 | 1,51 | 4,47 |
| 67 | 0,40 | 0,87 | 0,22 | 1,51 | 4,47 |
| 95 | 0,40 | 0,87 | 0,26 | 1,48 | 4,37 |
| 108 | 0,40 | 0,90 | 0,22 | 1,44 | 4,47 |
| 123 | 0,36 | 0,83 | 0,23 | 1,48 | 4,47 |

| Продолжение таблицы 4.1 | | | | | |
|-------------------------|---------|----------|-----------|---------|---------|
| 137 | 0,36 | 0,89 | 0,25 | 1,48 | 4,37 |
| 147 | 0,38 | 0,89 | 0,25 | 1,51 | 4,27 |
| 160 | 0,38 | 0,87 | 0,25 | 1,51 | 4,37 |
| Среднее | 0,369 | 0,86 | 0,23 | 1,47 | 4,28 |
| По ГОСТ 5950-73 | 0,3-0,5 | 0,8-1,20 | 0,15-0,40 | 1,2-1,5 | 4,5-5,5 |

Результаты анализа показывают, что ЭШП стали не приводит к изменению состава, выходящему за пределы, допускаемые ГОСТом. Это относится не только к среднему содержанию элементов, но и к распределению их по высоте слитка. Макроструктура характеризуется наличием крупных, параллельно расположенных дендритов, ориентированных под небольшим углом к оси слитка. Наряду с параллельно расположенными дендритами видны также произвольно ориентированные средние и мелкие дендриты. Микроструктура различных участков слитков представляет собой выделение игольчатого феррита, сорбитообразного перлита и избыточных карбидов.

В целом, изменение химического состава после ЭШП невелико, а механические свойства даже повышаются, по сравнению с прокатом. Это позволило использовать литой электрошлаковый металл для изготовления заготовок штампов.

4.3 Технология ЭШ выплавки заготовок штампов в вертикальный кристаллизатор

Технология выплавки заготовок в вертикальный орашаемый кристаллизатор состоит из следующих основных операций:

- 1 – получение жидкого флюса, состава АНФ-6;
- 2 – установка кристаллизатора;
- 3 – ЭШП расходуемых электродов сечением 60х60 мм, изготовленных свободной ковкой из отработанных штампов на режиме: ток – 5000 А, напряжение 48 В;
- 4 – выведение усадочной раковины снижением электрического режима;
- 5 – выемка слитка;
- 6 – охлаждение заготовки в термоизолированном контейнере.
- 7 – термообработка по штатному режиму для стали 4Х5МФС.

В результате производственных испытаний штампов, изготовленных из ЭШ металла, установлено повышение их стойкости, по сравнению с изготовленными из проката, в 1,2 – 1,5 раза.

Аналогичные работы были проведены по переплаву быстрорежущих сталей и сталей холодного деформирования, которые также показали высокую эффективность ЭШ процесса при работе и с этими материалами.

Давыдов Александр Константинович

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 15.03.01 «Машиностроение»,
направленности
«Оборудование и технология сварочного производства»

Редактор Н. Н. Погребняк

| | | |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Подписано в печать 16.01.19 | Формат 60x84 1/16 | Бумага 65 г/м ² |
| Печать цифровая | Усл.п. л. 1,75 | Уч.-изд. л. 1,75 |
| Заказ 14 | Тираж 25 | Не для продажи |

Библиотечно-издательский центр КГУ.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет