

Совершенствование технологии электрошлакового переплава с использованием цифровой модели процесса

Введение

Аннотация. В статье продемонстрирован способ решения задачи доработки технологии электрошлакового переплава для повышения качества стального слитка. Процессы переплава исследованы при помощи цифровой модели, реализованной в системе компьютерного моделирования «ПолигонСофт», с последующей доводкой технологических решений в цеховых условиях. Особое внимание при моделировании уделяли отработке режимов снижения подводимой электрической мощности в период выведения усадочной раковины. Корректировки, внесенные в технологический процесс по результатам выполненной работы, позволили исключить присутствие шлаковых включений и снизить глубину залегания усадочных дефектов в головной части слитка, создать условия для повышения производительности и экономии металла.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, цифровое моделирование, усадочные дефекты, шлаковые включения, металлическая ванна, разработка технологии.

Summary. The article describes a method for solving the problem of upgrading the technology of electroslag remelting to improve the steel ingot quality. The remelting processes were studied using a digital model developed in PoligonSoft simulation software, followed by refinements of technological solutions in workshop conditions. During the modeling, special attention was paid to developing of regimes for reducing the supplied electrical power within the period of removing the shrinkage cavity. The adjustments implemented to the technological process based on the results of the work made it possible to eliminate the slag inclusions and reduce the depth of shrinkage zone in the ingot head, as well as provide a background for productivity increase and metal savings.

Keywords: electroslag remelting, digital modeling, shrinkage cavities, slag inclusions, metal bath, technology development.

В настоящее время на рынке металлургической продукции растет потребность в металле, полученном способом электрошлакового переплава (ЭШП). Таким способом производят слитки, в частности, из стали марки 45ХН2МФА-Ш, применяемой при изготовлении ответственных деталей, работающих на скручивание при повторных знакопеременных и динамических нагрузках.

Задачи совершенствования качества продукции и увеличения выхода годного являются первостепенными для промышленных предприятий. Одной из мер содействия решению этих задач является отыскание оптимальных параметров технологического процесса и режимов работы производственного оборудования. Практическое изучение тепловых режимов формирования слитков методом ЭШП в условиях действующего металлургического производства сопряжено со сложностью термометрирования слитка, шлака и расходного электрода, необходимостью исключить риски выпуска продукции, несоответствующей требованиям по качеству, и нарушения работоспособности установки при вмешательстве в ее конструкцию. На этом фоне экономичным и информативным способом диагностики процесса изготовления слитков разного сортамента являются исследования с использованием их цифровых моделей для анализа процессов затвердевания. Построение и верификации соответствующей математической модели для численных расчетов открывает возможность исследовать индивидуальные тонкости процесса затвердевания, установить динамику распределения жидкой фазы шлака и металла, отыскать

условия ведения переплава, обеспечивающие оптимальное сочетание производительности и качества продукции.

Характеристика проблемы и методика проведения работы

Металлургический комплекс АО «Металлургический завод «Петросталь» располагает установкой ЭШП, оборудованной колпаком для проведения переплава в защитной среде нейтрального газа (аргона) и автоматическим контролем ведения процесса. Базовая технология производства слитков ЭШП квадратного сечения со стороной 500 мм номинальной массой 4 т из стали марки 45ХН2МФА-Ш при использовании имеющейся на предприятии установки не гарантировала получение заготовок без залегания шлакового включения в головной части. Независимо от марочного сортамента в верхней части готовых слитков под открытой усадочной раковиной, могли обнаруживаться рыхлоты и закрытые раковины, заполненные шлаковыми включениями (рис. 1).

Для гарантированного поступления слитков в дальнейший деформационный передел без шлаковых включений установлена норма на удаление до передачи в прокатный цех в головной части 4,65 % металла от массы слитка. При производстве проката из слитков ЭШП присутствует технологическая необходимость удаления концов раската, что, в конечном счете, приводит к увеличению сквозного рас-

ходного коэффициента. В условиях, когда возможно удаление технологических отходов в условиях прокатного производства, предварительная отрезка головной части слитка является избыточной операцией.

Целью проведенной работы явилась разработка комплекса технологических решений для предупреждения склонности к образованию заполненных шлаком раковин и рыхлот в слитках ЭШП. Основной причиной появления подобного дефекта является избыточная глубина ванны жидкого металла [1–4].

Результаты экспериментов в условиях производства не дают достаточно очевидной картины влияния изменения параметров плавки, в связи с чем было принято решение сочетать эксперименты на натуре с проведением математического моделирования процессов формирования слитков. Такой подход позволяет заметно сократить число физических экспериментов, существенно повысить объем извлекаемых данных, позволяя судить о течении процессов затвердевания не косвенно, лишь на основе контроля металла в готовых слитках, но и непосредственно наблюдать динамику изменения температурно-фазовых поле в ходе переплава на цифровой модели слитка.

Процесс ЭШП включает три основных периода:

— стартовый (по технологии «твердого» старта) для наведения шлаковой ванны, запуска плавления расходуемого электрода и выхода на заданную скорость;

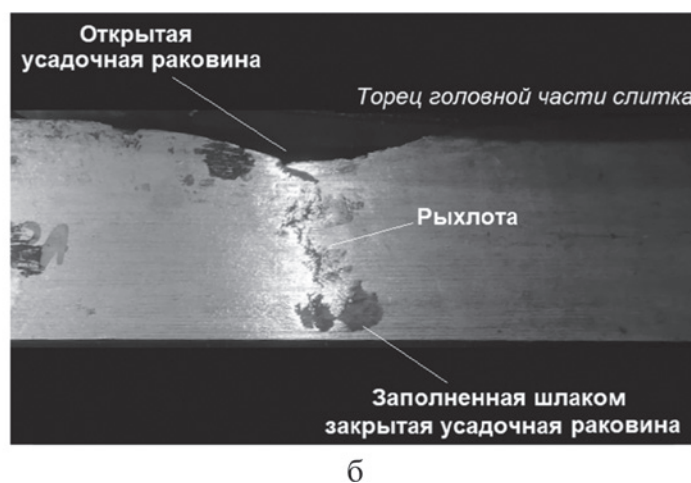
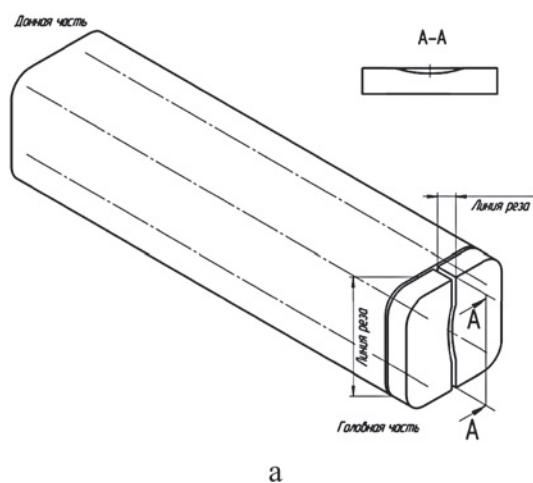


Рис. 1. Схема разрезки слитка при отделении отходной части с сопутствующим изучением металла в ее продольном сечении (а) и типичный результат контроля наличия шлакового включения и глубины залегания усадки в технологической обрезе (б)

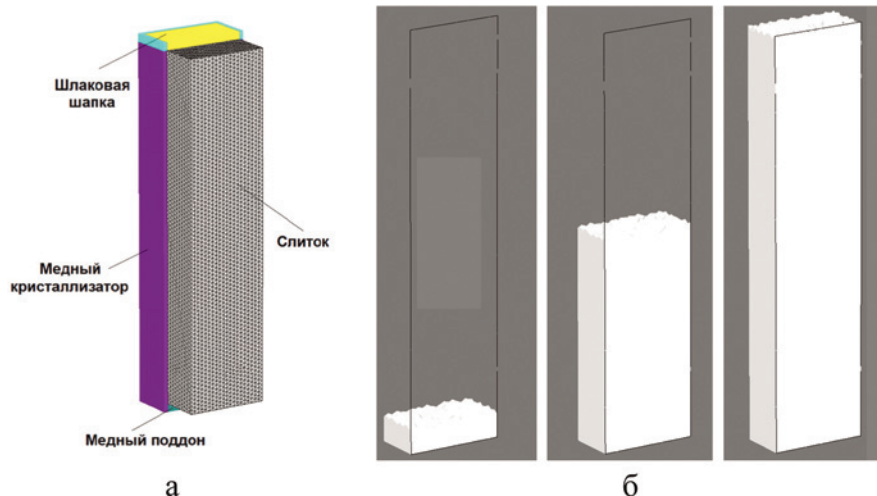


Рис. 2. 3D-модель для анализа процесса переплава: *а* — конечно-элементная модель объекта; *б* — фактически вовлеченные в расчет части слитка в разные моменты времени (показано сечение; один из начальных шагов, в середине процесса и по завершении)

— основной электрический режим переплава, в ходе которого формируется наибольшая часть тела слитка;

— период вывода усадочной раковины (ВУР), в рамках которого требуется создание таких условий компенсации усадки, что позволят обеспечить минимальную высоту занятого рыхлотами и раковинами участка в верхней части готового слитка.

Моделирование наплавления слитка исследовали на цифровой модели, реализованной в среде системы компьютерного моделирования (СКМ) «ПолигонСофт». При реализации модели процесса принимали следующие основные допущения:

— пренебрегали конусностью слитка, задаваемой геометрией медной гильзы кристаллизатора;

— не включали в структуру модели режим оплавления электрода и таким образом не учитывали возмущения, вносимые разными его размерами и формой сечения;

— не учитывали этап стартового нагрева, поскольку его влияние пренебрежимо мало на фоне значительной длительности цикла переплава и формирования наибольшей части слитка за период основного электрического режима и ВУР;

— принимали постоянной температуру поступающего сверху металла.

На рис. 2 представлена конечно-элементная 3D модель, использованная для расчета формирования слитка в процессе ЭШП. Для имитации условий постепенного заполнения

кристаллизатора использовали доступный в СКМ «ПолигонСофт» инструмент задания перемещений, обычно используемый при расчете теплообмена в условиях скользящего контакта тел, при анализе процессов непрерывной разливки и др. В случае с моделированием ЭШП был реализован прием, согласно которому предварительно сформированная геометрия полноразмерного слитка постепенно вовлекается в расчет, а те слои конечных элементов, что находятся за пределами достигнутой к определенному моменту времени высоты слитка, не активны.

В рамках численного анализа, задавая подлежащий исследованию режим переплава, выполняли расчет затвердевания слитка с учетом теплообмена с водоохлаждаемым кристаллизатором, шлаковой ванной, поддоном, окружающей средой. Расчетное исследование для каждого варианта технологии выполняли в два этапа:

— наплавление слитка во время основного периода и периода ВУР при заданной скорости переплава и соответствующем режиме снижения подводимой мощности;

— охлаждение слитка в кристаллизаторе вплоть до момента извлечения.

В ходе серий расчетов исследовали влияние технологических параметров процесса на глубину и конфигурацию металлической ванны. Варьирование указанных параметров осуществляли в пределах, предусмотренных возможностями производственного агрегата. По результатам расчетов получали картину

распределения температурно-фазовых полей в теле слитка в ходе и по окончании переплава, а также прогноз усадки — макро- и микропористости. В соответствии с известной рекомендацией [2, 4] оптимальная глубина металлической ванны $h_{\text{МВ}}$ должна составлять половину ширины кристаллизатора акр, поэтому такой уровень был принят целевым при анализе и сопоставлении результатов расчетов для разных режимов формирования слитка.

Результаты и обсуждение

Верификация модели была основана на сравнении температур, измеренных при помощи пирометра на поверхности натурального слитка сразу после извлечения из кристаллизатора, с наблюдаемыми в такой же момент времени на компьютерной модели. Показано хорошее согласование результатов расчетов с данными измерений (рис. 3).

Моделирование формирования слитка в процессе ЭШП и на финальной стадии охлаждения в кристаллизаторе проводили для разных массовых скоростей переплава:

— скорость в период основного электрического режима G , соответствующая базовой технологии, ранее утвержденной на предприятии;

— сниженные значения скорости — $0,84G$ и $0,94G$;

— повышенные значения — $1,1G$ и $1,2G$.

Для каждой скорости переплава подобрали подходящие режимы ВУР в соответствии с необходимостью плавного снижения подводимой мощности P и, как следствие, скорости переплава и глубины металлической ванны. Согласно [5], относительное снижение мощности за период ВУР

$$P_{\text{отн}} = (P_0 - P_k)/P_0$$

(P_0 и P_k — мощность в начальный и конечный момент соответственно) должно составлять 30—50 %. На рис. 4 показаны траектории снижения мощности за период ВУР в зависимости от предшествовавшей ему скорости переплава, разработанные с учетом настоящей рекомендации. Для удобства сравнения все кривые представляют отношение текущей мощности на протяжении периода ВУР (т.е. в продолжение периодов переплава со скоростями $0,84G$, $0,94G$, G , $1,1G$ и $1,2G$) к начальной для базовой технологии переплава со скоростью G :

$$P/P_0^G.$$

Графическая характеристика глубины (сопоставлена с рекомендованным уровнем

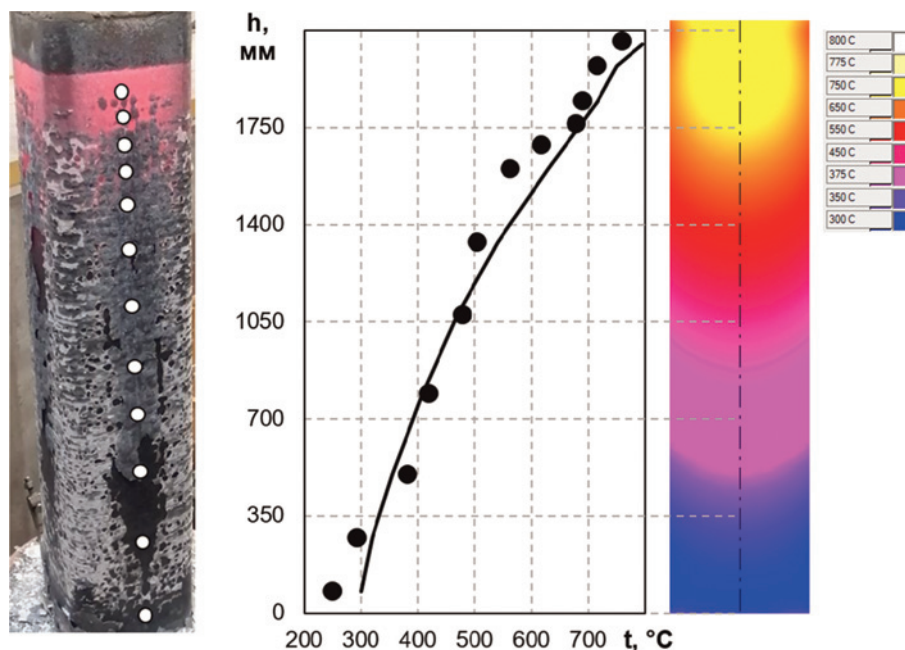


Рис. 3. Распределение температур по высоте готового слитка по результатам пирометрирования (точки) и расчета (сплошная линия)

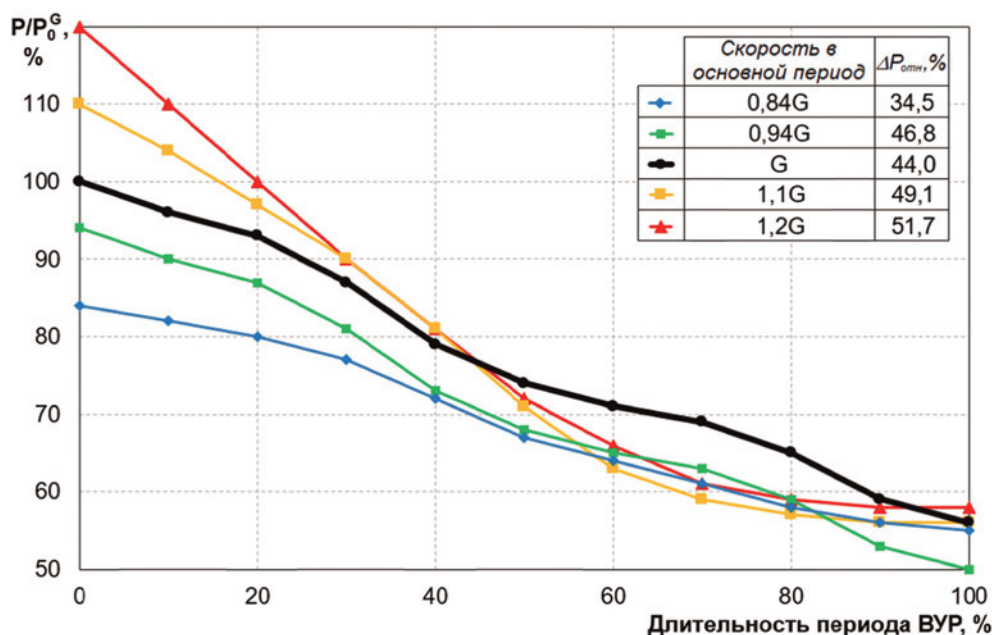


Рис. 4. Траектории снижения подводимой мощности в период ВУР для разных скоростей переплава

$h_{\text{МВ}}^{\text{опт}} = a_{\text{кр}}/2$) и конфигурации металлической ванны при разных скоростях переплава дана на рис. 5. Профиль и глубина металлической ванны, сложившиеся за период основного электрического режима, составляют набор исходных данных для решаемой за период ВУР задачи обеспечения таких условий про-

текания процесса затвердевания (на самом этапе ВУР и при последующем охлаждении), которые будут способствовать как можно более полному выводу усадки из головной части в открытую раковину на поверхности слитка. Основные количественные характеристики процесса ЭСП и качества слитка, получен-

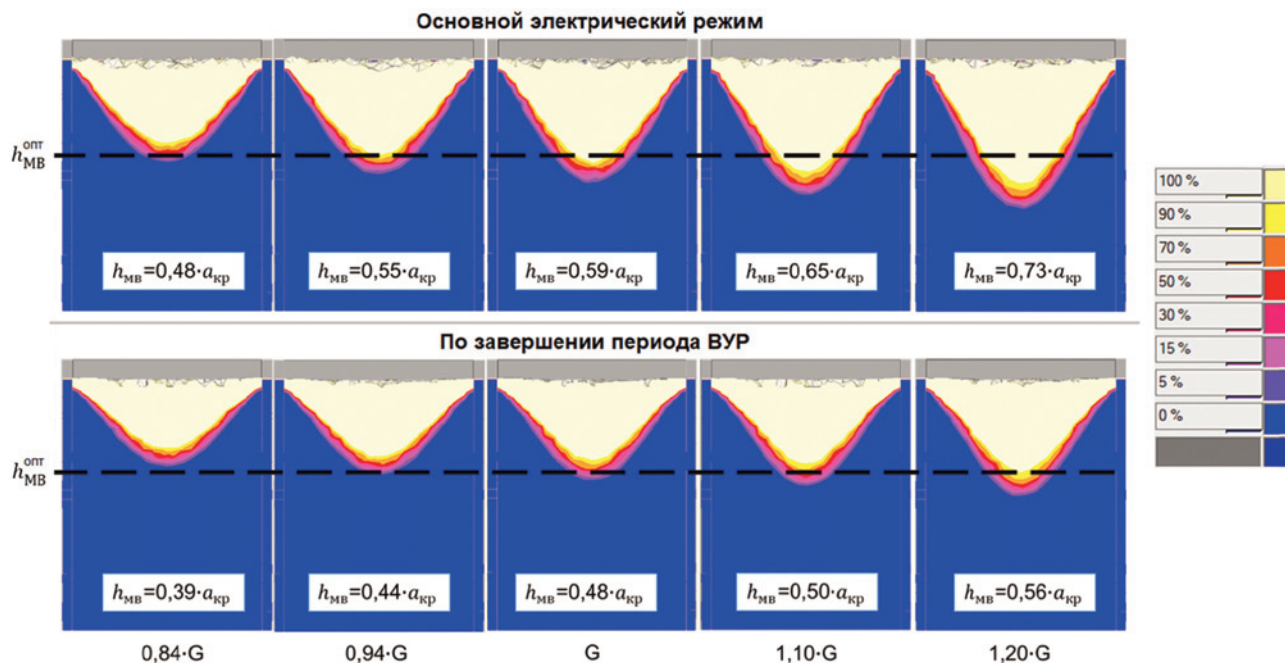


Рис. 5. Распределение жидкой фазы в зоне затвердевания при стабилизации металлической ванны после выхода на основной электрический режим и по завершении ВУР

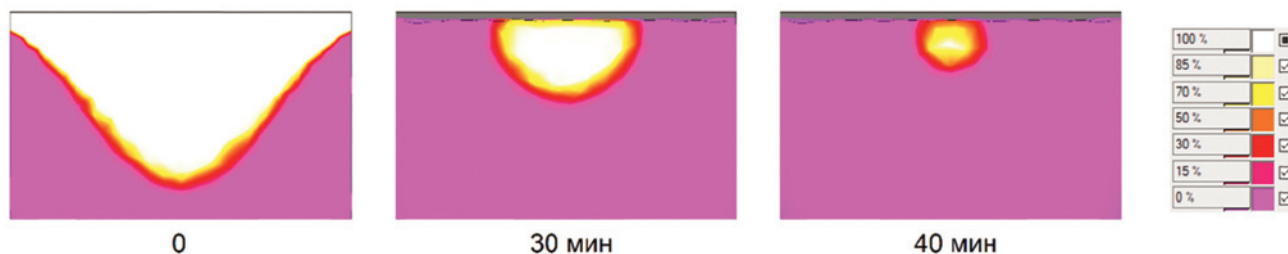


Рис. 6. Изменение содержания жидкой фазы на этапе охлаждения слитка в кристаллизаторе после периода ВУР (на примере варианта со скоростью переплава G)

ные по результатам моделирования переплава с разными скоростями, приведены в таблице (см.).

Повышение скорости переплава приводит к закономерному увеличению глубины металлической ванны. Это происходит в основном посредством повышения объема жидкой фазы, в то время как ширина переходной двухфазной зоны практически не меняется за период ВУР и лишь незначительно увеличивается с ростом скорости переплава (с $0,10a_{кр}$ до $0,13a_{кр}$). С увеличением скорости переплава длительность затвердевания на этапе финального охлаждения слитка повышается незначительно.

В силу различающейся в каждом вычислительном эксперименте исходной глубины металлической ванны на этапе ВУР и особенностей разработанных режимов снижения мощности условия развития усадки в головной части слитков обладают индивидуальными тонкостями. Тенденция к увеличению глубины залегания дефектов при увеличении скорости переплава является, однако, вполне выраженной. В то же время продукция, которая может быть изготовлена согласно исследованным режимам, формально удовлетворяет нормативу на технологическую обрезь.

При скоростях переплава $G...1,2G$ металлическая ванна приобретает умеренно или явно избыточную глубину, что способствует развитию радиальной направленности кристаллизации, затрудняет рафинирование металла от неметаллических включений, приводит к увеличению пораженной усадочными дефектами зоны. Чрезмерно низкая скорость переплава $0,84G$ приводит к недостаточной глубине ванны с сопутствующими рисками ухудшения условий для раздела по границе металл-шлак со снижением эффективности процесса рафинирования, образованию поверхностных дефектов в виде пережимов и др.

По мере приближения к завершению процесса затвердевания на этапе охлаждения слитков в кристаллизаторе после периода ВУР (рис. 6) во всех случаях характерна локализация небольшого участка жидкого металла ниже моста твердой фазы, сформировавшегося под открытой усадочной раковиной.

Скорость переплава $0,94G$ может являться рекомендованной с точки зрения оптимальной глубины металлической ванны, однако не удовлетворяет требованию по меньшей мере не снижать производительность процесса. За подходящие для дальнейшей доработки приняли варианты переплава со

Таблица

Расчетный прогноз характеристик процесса и качества слитка для разных скоростей переплава и назначенных траекторий снижения мощности

Характеристика	$0,84G$	$0,94G$	G	$1,1G$	$1,2G$
Относительное снижение P за период ВУР, %	34,5	46,8	44,0	49,1	51,7
Относительное снижение h_{MB} за период ВУР, %	19	20	19	23	23
Длительность затвердевания при охлаждении в кристаллизаторе, мин	42	44	45	45	47
Высота содержащей усадочные дефекты части от общей высоты затвердевшего слитка, %	3,0	4,1	3,5	4,0	4,2

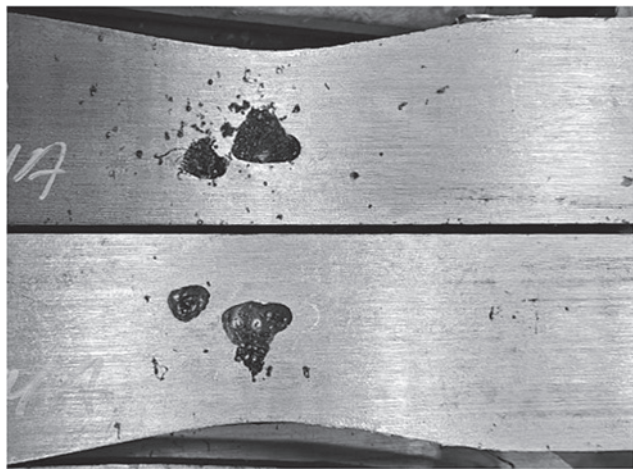


Рис. 7. Свободные от шлака закрытые усадочные раковины в сечении технологической обрезки опытного слитка (показаны обе части после разрезки)

скоростью G и $1,1G$ с соответствующими режимами ВУР, предполагающими утвержденное при помощи моделирования снижение подводимой мощности в диапазоне 44–50 % для эффективного сокращения h_{MB} . В общем случае наложение дополнительного ограничения на $\Delta P_{отн}$ внутри рекомендованного в литературе диапазона надлежит всякий раз устанавливать индивидуально в связи с типоразмером слитка, маркой стали, скоростью переплава и др.

Доработку и отладку выбранных технологий ЭШП затем производили на практике посредством обращения к дополнительным способам и приемам, направленным на дальнейшее снижение глубины металлической ванны. В рамках настоящих мероприятий выполнили серии опытных переплавов с изменением химического состава флюса, уменьшением погружения торца расходомерного электрода в шлаковую ванну, увеличением массы рабочего флюса. Из трех перечисленных мер последние две показали наибольшую эффективность — при их сочетании по завершении настоящей расчетно-практической работы удалось добиться получения закрытой усадочной раковины, свободной от шлака, а также снижения глубины ее залегания до 3,7 % (рис. 7).

Заключение

С помощью построенной в среде СКМ «ПолигонСофт» цифровой модели ЭШП

были изучены разные технологические режимы формирования слитка и установлен ряд закономерностей при управлении параметрами металлической ванны с целью снижения склонности к внедрению шлаковых включений в головную часть слитка и сокращения зоны залегания усадочных дефектов. По результатам проведенных вычислительных экспериментов с последующей отладкой и специальными доработками в цеховых условиях утверждены режимы переплава, позволившие достичь повышения качества продукции, а также усовершенствовать показатели экономичности и производительности:

- устранена склонность к диффундированию шлака в головную часть слитка, что избавляет от необходимости удаления головной части перед передачей на деформационный передел и в целом исключает связанные риски при выполнении прокатки;

- достигнуто повышение производительности процесса ЭШП около 10 %;

- снижение глубины залегания усадки в головной части создало условия для сокращения норматива на технологическую обрезку товарных слитков ЭШП до 20 % от текущего уровня.

Примененный подход к решению производственной задачи отличает рациональный баланс между трудоемкостью построения, эксплуатации цифровой модели и числом опытных переплавов, потребовавшихся при доработке выявленных перспективных технологических решений.

Литература

1. Глебов А.Г. Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1978. — 333 с.
2. Воробьев А.А., Пожидаев Ю.В. Электрошлаковый переплав. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2002. — 116 с.
3. Протокилов, И.В., Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. // Современная электрометаллургия, 2014, № 3, с. 7–15.
4. Медовар Б.И., Шевцов В.Л., Маринский Г.С., Демченко В.Ф., Махненко В.И. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве. Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
5. Павлов В.А., Лозовая Е.Ю., Бабенко А.А. Спец-электрометаллургия стали и сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 168 с.