

# МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНЫХ СЛЯБОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ

Чжоу-хуа Цзян<sup>1</sup>, Сю Чень<sup>1</sup>, Синь Ген<sup>1</sup>, Цян Ю<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Факультет материаловедения и металлургии, Северо-Восточный университет.

<sup>2</sup>Факультет информатики и инженерии, Северо-Восточный университет.

Уеньхуа, район Хепин, Шеньян, Ляонин, 110819, КНР. E-mail: [jiangzh63@163.com](mailto:jiangzh63@163.com)

Разработаны и построены три типа печей для электрошлакового переплава с целью получения слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением 960×2000 мм. Налажено производство слябов из более 20 марок сталей толщинами 640, 760 и 960 мм, а также пластин толщиной от 20 до 410 мм. Представлены основные особенности печей ЭШП, технология процесса, свойства слябов и сверхтолстых плит ЭШП, применяемых для гидроэлектростанций. Для ЭШП применяли низкочастотный источник питания, бифилярное соединение, подвижной кристаллизатор, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления и другие передовые технологии. Низкое содержание водорода, кислорода и включений, а также хорошее качество слитка ЭШП получены за счет оптимизации технологического процесса. В качестве образца из сверхтолстых плит, применяемых для гидроэлектростанций, получены толстые пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм. Библиогр. 7, табл. 12, ил. 8.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; крупный сляб; сверхтолстая плита; сталь для гидроэнергетики; свойства; Z-направление

**Введение.** По мере развития индустрии производства оборудования быстро растет спрос на сверхтолстые плиты высокого качества [1]. Например, толщина пластины из высококачественной штамповой, котельной стали и стали, используемой в технике для освоения океана, ядерной энергетике и гидроэнергетике, превышает 150 и даже 400 мм. Сляб, полученный с помощью непрерывного литья, не может удовлетворить требованиям, предъявляемым к данной толщине. Более того, внутреннее качество сляба толщиной более 350 мм трудно контролировать. Несмотря на то, что при получении слитков с помощью литья в формы, требования относительно их толщины выполнить можно, однако низкое качество литья не соответствует требованиям, предъявляемым к толстой пластине высокого качества. Это, например, касается свойств в Z-направлении. Превосходство крупного сляба, полученного электрошлаковым переплавом (ЭШП), можно характеризовать следующими особенностями:

высокая чистота, мелкозернистая структура, стабильность химического состава, хорошие пластические свойства при обработке в широком диапазоне температур и возможность получения более тонких листов при прокатке. Например, сляб ЭШП толщиной 700 мм может быть переработан в пластину толщиной 350 мм;

с помощью тяжелого прокатного стана крупные слябы ЭШП могут быть прокатаны в пластины, что позволяет исключить процесс обжатия и,

таким образом, сократить потребление энергии и сэкономить рабочее время;

пластины, прокатанные из слитка ЭШП, имеют отличные свойства по сравнению с обычными. У них значительно улучшены пластичность по поперечному сечению, вязкость, а также анизотропия, вязкость разрушения, чувствительность к надрезу и показатель малоциклового усталости;

стальная пластина ЭШП обладает отличной свариваемостью. Послесварочная обработка нормализацией крупных сварных конструкций (сосудов высокого давления, котлов, корпусов реакторов) способствует получению меньшей зоны термического влияния при сварке;

стальная пластина ЭШП имеет хорошую устойчивость к хладноломкости при низкой температуре;

изделия, изготовленные из сверхтолстого сляба ЭШП, хорошего качества, а высокая текучесть, увеличивающаяся на 9...18 % по сравнению с литьем в формы, достаточна для того, чтобы компенсировать расходы на переплав. Более того, реальные производственные затраты можно сократить благодаря исключению процесса обжатия.

Три типа печей ЭШП для изготовления слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением 960×2000 мм разработаны и построены в сотрудничестве Северо-Восточного университета с компанией Wuyang iron and steel Co Ltd [2]. С 2007 г. налажено производство слябов ЭШП из марок сталей P20, WSM718R, 2,25Cr1Mo, 16MnR (HIC), S355J2 + N-Z35 и 20MnNiMo толщиной 640, 760 и

960 мм и готовых пластин от 20 до 410 мм. В этой статье представлены основные характеристики печей ЭШП, технологии процесса, металлургические характеристики слябов и свойства сверхтолстых плит, применяемых для гидроэлектростанций.

**50-тонная печь ЭШП для изготовления крупных слябов.** Для данных трех печей ЭШП были использованы низкочастотный источник питания, бифилярное соединение электродов, подъем кристаллизатора, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления электродов и другие современные технологии.

*Низкочастотный источник питания.* Для работы печи использовали трансформатор с трехфазным выпрямителем напряжением 35 кВ на вторичной обмотке. При этом трехфазный переменный ток преобразовывается в однофазный низкочастотный величиной 0,1...5 Гц, благодаря чему удается обеспечить равномерную нагрузку на трехфазную сеть. Это первый случай применения низкочастотного источника питания в крупной печи ЭШП отечественного производства, который позволяет значительно сэкономить электроэнергию.

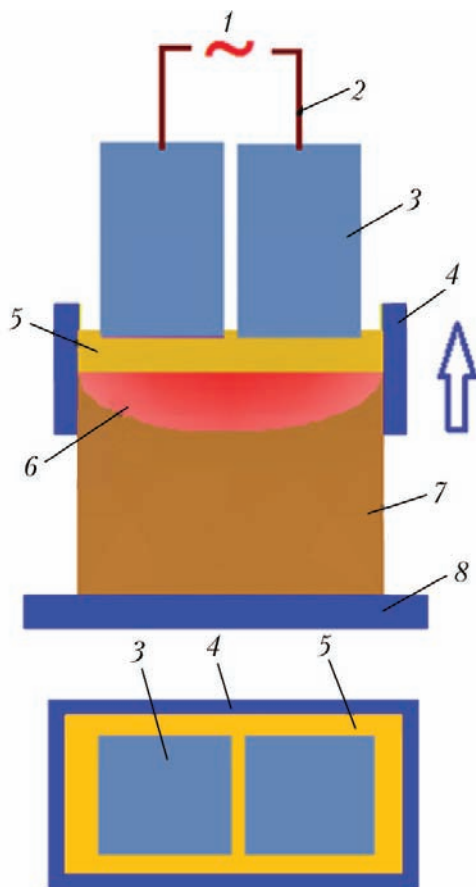


Рис. 1. Принципиальная схема 50-тонной печи ЭШП для производства крупного сляба: 1 — низкочастотный источник питания; 2 — контур первичной цепи; 3 — плавящийся электрод; 4 — кристаллизатор; 5 — расплавленный шлак; 6 — жидкая ванна металла; 7 — слиток; 8 — поддон

*Бифилярное соединение электродов.* Бифилярное соединение электродов приводит к уменьшению индуктивного сопротивления высоковольтного контура и увеличению коэффициента мощности, что значительно снижает энергопотребление, в результате чего при той же глубине жидкой ванны металла можно достичь более высокой скорости плавки.

*Система извлечения слитка.* Благодаря системе извлечения слитка из кристаллизатора с закрепленным поддоном и подъемом кристаллизатора, которая состоит из колонн и привода, можно значительно уменьшить высоту кристаллизатора, а также общую высоту печи.

*Контроль точности взвешивания электродов и скорости плавки.* Используя четыре точных датчика нагрузки и вторичный прибор, измерение массы плавящегося электрода можно провести в режиме онлайн. Скорость плавления электрода можно точно контролировать, чтобы обеспечить качество затвердевания металла с помощью регулировки тока и напряжения в реальном времени.

*Защита сухим воздухом.* Сухой воздух с точкой росы  $-70...-40$  °С использовали для защиты поверхности шлаковой ванны, чтобы значительно снизить накопление водорода в стальном слитке во время процесса переплава и улучшить качество пластин.

*Вторичное охлаждение.* Вторичное охлаждение осуществляли путем продувки сжатым воздухом поверхности сляба с нижней части кристаллизатора, чтобы ускорить затвердевание стали. Это позволяет улучшить условия затвердевания сляба.

**Технология процесса ЭШП для изготовления крупных 50-тонных слябов.** На рис. 1 показана принципиальная схема печи ЭШП для производства крупных 50-тонных слябов. Ее принцип работы заключается в том, что низкочастотный источник питания (0,1...5 Гц) обеспечивает электрические параметры (напряжение и ток), необходимые для процесса. При этом ток проходит по схеме электрод–шлаковая ванна–электрод и возвращается к низкочастотному источнику питания. Прямоугольный кристаллизатор размещается на поддоне, а два электрода вводятся в него параллельно так, что торцы электродов располагаются на расстоянии около 50 мм от поверхности поддона. Затем включается источник питания. Когда шлак, расплавленный в отдельной емкости, заливается в кристаллизатор, два электрода соединяются, образуя общий электрический контур. При увеличении тока, проходящего через ванну шлака, температура шлака повышается, электроды начинают плавиться и расплавленный металл постепенно затвердевает в кристаллизаторе. Когда высота слитка достигает 400...500 мм, кристалли-

Таблица 1. Состав шлака, мас. %

Шлак	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO
S1 (CAF3)	40	30	30	—	—
S2	35	20	20	15	10
S3	40	30	20	7	3
S4	50	25	18	5	2
S5 (АНФ-6)	70	30	—	—	—

затор начинает двигаться вверх со скоростью, которая должна совпадать со скоростью плавления электрода, чтобы поддерживать уровень расплавленного металла стабильным. Благодаря четырем датчикам нагрузки Меттлера Толодо для измерения массы электрода в реальном времени и расчета скорости его плавления, скорость плавления можно контролировать за счет регулирования мощности, подводимой к шлаковой ванне.

**Металлургический контроль качества крупных слябов ЭШП.** Влияние шлака на качество поверхности сляба ЭШП. Во время процесса ЭШП шлак выполняет функции нагрева, рафинирования и формирования расплавленного металла. Поэтому необходимо, чтобы шлак характеризовался и соответствующими свойствами, такими как проводимость, температура плавления и вязкость [3]. При плавке с относительным перемещением кристаллизатора и слитка изменение вязкости шлака в зависимости от температуры должно быть плавным, что соответствует свойствам «длинных шлаков». Аналогичные требования предъявляются и к шлакам, используемым при непрерывном литье. Соответствующие исследования показывают, что многокомпонентная система шлака способствует улучшению показателей вязкости, особенно для шлаков, содержащих SiO<sub>2</sub>. Поэтому в этом исследовании разработаны три вида пятикомпонентного шлака (S2, S3, S4) и их свойства сопоставлены с обычными системами шлаков S1 (CAF3) и S5 (АНФ-6) (табл. 1). Интервал плавления и вязкость пяти систем шлаков показаны в табл. 2 и на рис. 2 [4].

Как показано в табл. 2 температура плавления (размягчения) четырех шлаков S1, S2, S3, S4 ниже, чем у шлака АНФ-6, что позволяет выполнить требование относительно того, что температура плавления шлака ЭШП должна быть на 100...200 °С ниже температуры плавления металла. Начальная температура плавления (размягчения), температура образования капли и ее растекания у шлаков S3 и S4 очень близки друг к другу, откуда следует, что их состав близок к составу эвтектики и стабилен. Кроме того, шлак S2 полностью расплавляется при более высоких температурах из-за своей повышенной температуры растекания.

Высокотемпературная вязкость четырех шлаков близка друг к другу и ниже, чем у шлака

Таблица 2. Результаты исследования температуры плавления для разных шлаков

Шлак	Температура размягчения, °С	Температура образования капли, °С	Температура растекания капли, °С
S1	1210	1385	1401
S2	1205	1235	1390
S3	1191	1242	1278
S4	1211	1256	1271
АНФ-6	1395	1403	1438

АНФ-6 (рис. 2). За исключением шлака S1, вязкость других трех медленно снижается в зависимости от температуры и это доказывает, что эти шлаки подходят для процесса ЭШП при получении крупного сляба. Точка резкого перегиба на кривой вязкости шлака S2 отсутствует. Поскольку содержание SiO<sub>2</sub> в шлаке S2 самое высокое, то он относится к «длинному шлаку», что благоприятно сказывается на качестве поверхности крупного сляба, полученного в процессе ЭШП.

На рис. 3 показано, что электропроводность пяти шлаков рассчитана в соответствии с эмпирическим выражением [5]. Результаты расчетов показывают, что электропроводность четырех шлаков ниже, чем у АНФ-6, и уменьшается при снижении содержания CaF<sub>2</sub>. С другой стороны, эффективная теплопроводность корки шлака увеличивается при снижении содержания CaF<sub>2</sub> [6]. В результате, шлак с низким содержанием CaF<sub>2</sub> может снизить максимальную глубину высокотемпературной зоны шлака и его расход, а также уменьшить радиальные потери тепла, чтобы значительно снизить расход энергии, затраты и повысить производительность.

Исходя из требований к качеству поверхности крупного сляба ЭШП, шлаковые системы S3 и S4 являются пригодными для получения крупного сляба, поскольку точка плавления (размягчения) и вязкость этих шлаков относительно низкие. На рис. 4 пред-

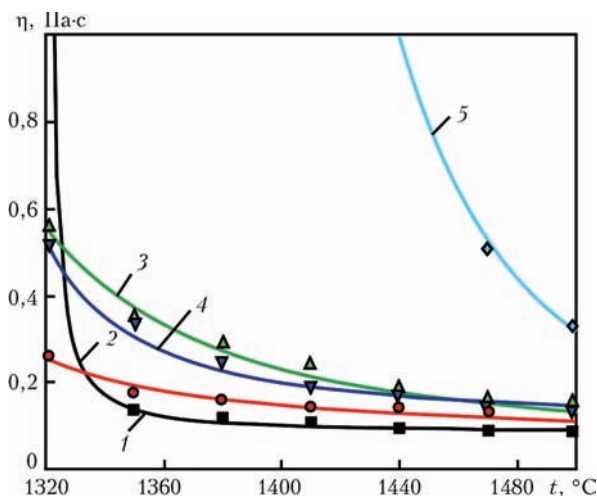


Рис. 2. Изменение вязкости различных шлаков в зависимости от температуры: 1 — S1; 2 — S2; 3 — S3; 4 — S4; 5 — АНФ-6

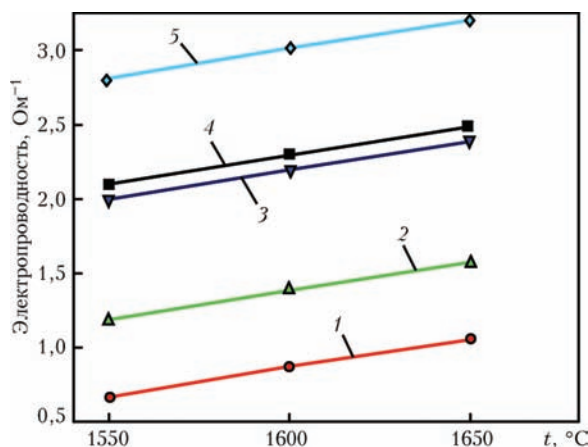


Рис. 3. Электропроводность различных шлаков: 1 — S2; 2 — S3; 3 — S4; 4 — S1; 5 — АНФ-6

ставлен сляб ЭШП, полученный с использованием шлака S3, из которого видно, что качество поверхности сляба хорошее и без дефектов, таких как образование наплывов металла, гофрирование, следы от проливов шлака и т. д.

*Контроль водорода во время процесса переплава.* Крупный слиток ЭШП очень чувствителен к водороду. Когда его содержание превышает определенное значение, сразу происходит образование большого количества дефектов. Большое количество дефектов обнаружили после прокатки, которые образовались в результате длительного процесса ЭШП крупного слитка. Переплав 50-тонного сляба длился 42 ч, что вызвало насыщение водородом расплавленной стали через шлак. Для того, чтобы снизить содержание водорода в стали приняты следующие меры:

использовали защитный кожух с сухим воздухом, который расположен на расстоянии 600 мм над кристаллизатором, а зазор между днищем защитного кожуха и верхним фланцем кристаллизатора устранили с помощью уплотнительного кольца. Существующие 68 сопел для подачи газа

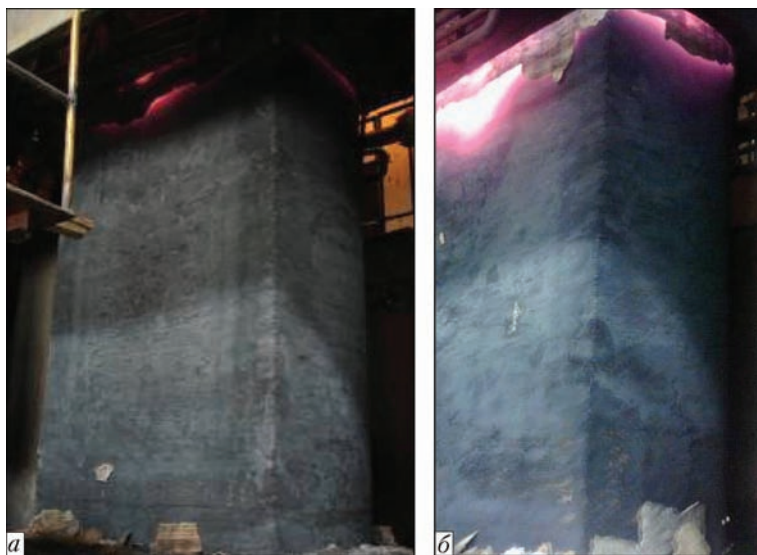


Рис. 4. Слябы ЭШП размерами, мм: 950×2000×2800 (а), 750×2000×2760 (б)

Таблица 3. Проницаемость водорода в различных шлаках,  $\times 10^{-6}$  моль·см<sup>-1</sup>·мин<sup>-1</sup>

Шлак	АНФ-6	S3	S4
Проницаемость водорода	0,48	2,18	2,388

диаметром 22 мм и углом наклона 75° устанавливают вокруг стенки кристаллизатора и над его верхним фланцем на высоте 128 мм. Влажность и скорость подачи сухого воздуха контролировали на отметке -50 °C ниже точки росы и 300 м<sup>3</sup>/ч соответственно;

шлак с низкой проницаемостью водорода также может использоваться для снижения содержания водорода. Хорошо известно, что CaO повышает проницаемость шлака, тогда как SiO<sub>2</sub> снижает. В нашей лаборатории была измерена проницаемость водорода нескольких шлаков (табл. 3) [7]. Проницаемость АНФ-6 без CaO самая низкая, но этот шлак не пригоден в случае относительного перемещения кристаллизатора и слитка. Проницаемость шлака S3 значительно ниже, чем у других, поэтому для ЭШП большого сляба выбрали шлак S3 с низкой проницаемостью водорода;

для предотвращения поглощения влаги компонентами флюса, особенно известью, применяли предварительно расплавленный шлак;

комбинация горячего старта с добавлением твердого шлака — это метод, который не только контролирует содержание водорода, но и помогает избежать трудности при затвердевании шлака. В случае бифилярного соединения электродов очень трудно начать процесс при использовании твердого шлака (холодный старт). Жидкий шлак легко впитывает влагу из воздуха во время заливки его в кристаллизатор из ковша, в результате чего в стали накапливается водород. Для решения этой проблемы применяли сухой воздух и заменяли часть жидкого шлака твердым. На практике 40 % жидкого шлака достаточно для формирования электрического контура между двумя электродами и нагревания шлака, а оставшиеся 60 % — это флюс, который должен быть добавлен после заливки шлака.

*Контроль кислорода и неметаллических включений в слябе ЭШП.* Кислород в слиток поступает в основном из плавящегося электрода, железной окалины, образующейся на поверхности электрода, нестабильных оксидов в шлаке и атмосферы во время процесса ЭШП. Для эффективного контроля содержания кислорода в слитке это следует учитывать.

В плавящемся электроде необходимо контролировать низкое исходное содержание кислорода. Для получения чистой стали применяют процесс EAF-

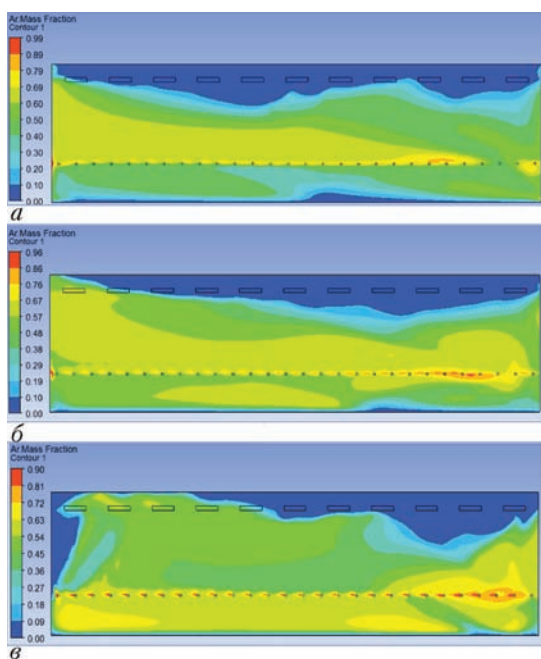


Рис. 5. Область концентрации аргона между электродом и камерой при разных углах наклона сопла, °С: а — 45; б — 60; в — 75

LF–VD–CC. Например, в слябе для гидроэлектростанций, полученном непрерывным литьем, содержание кислорода можно стабильно получать на требуемом уровне.

С помощью шлифования удаляют железную окалину, оставшуюся на поверхности электрода при получении сляба непрерывным литьем. Нестабильные оксиды в компонентах шлака, такие как  $\text{FeO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и т.д., должны контролироваться в соответствии с их допустимыми значениями для разных марок сталей и во время переплава в шлаковую ванну необходимо добавлять умеренное количество раскислителя. Из-за определенного количества  $\text{SiO}_2$ , содержащегося в шлаке, используемом в процессе ЭШП, при завершении плавки в шлак необходимо добавить больше  $\text{CaO}$ , чтобы снизить активность  $\text{SiO}_2$  и обеспечить бинарную основность ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), составляющую более 3...5.

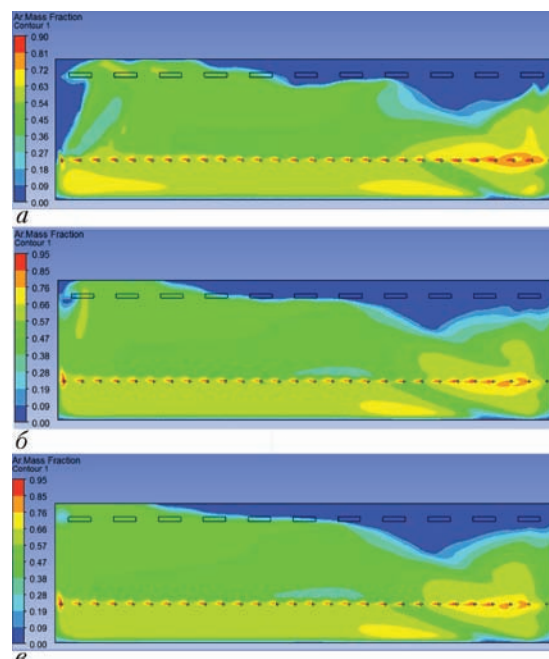


Рис. 6. Область концентрации аргона между электродом и камерой при разных скоростях расхода, м³/ч: а — 60; б — 80; в — 100

Чтобы в дальнейшем предотвратить окислительные поверхности электрода в процессе ЭШП, для контроля кислорода в атмосфере использовали инертный газ ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ). Для оптимизации процесса продувки аргоном применяли программное обеспечение FLUENT, позволяющее имитировать поле потока и концентрации газа ( $\text{Ar}$ ) во всей защитной камере над шлаковой ванной с учетом разного угла продувки. В результате моделирования угол сопла и скорость потока составляют 75 и 80 м³/ч соответственно (рис. 5, 6).

*Контроль процесса затвердевания слитка ЭШП.* Обоснованная скорость плавления необходима не только для обеспечения мелкой ванны жидкого металла, но и для предотвращения очевидных дефектов поверхности при затвердевании. Из-за сильного охлаждения поддоном скорость плавления в начале может быть относительно высокой, тогда как она должна быть ниже из-за эф-

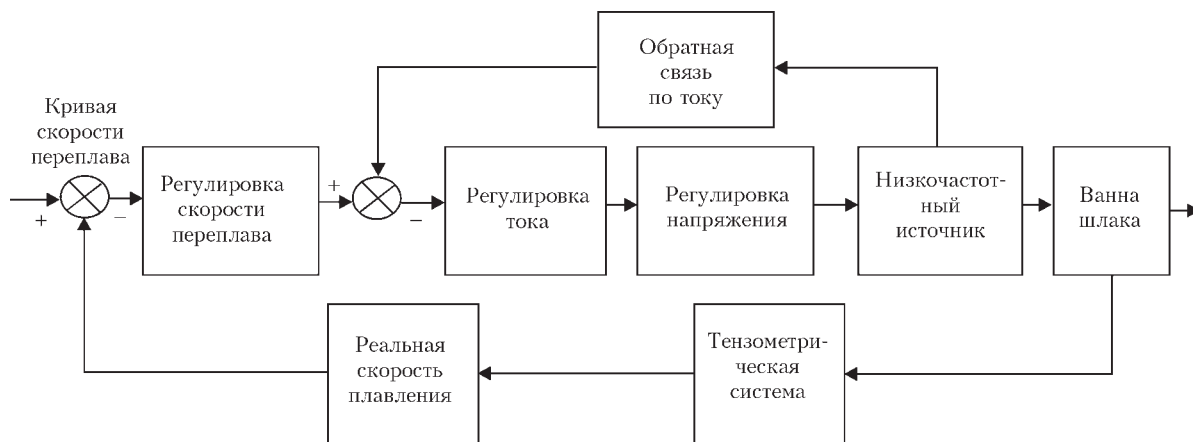


Рис. 7. Принципиальная схема системы автоматического регулирования скорости плавления

Таблица 4. Химический состав электрода для пластины S500Q/Z35, мас. %

Плавка	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo	V	Cr	Ni	Cu	Al	Ceq
12305444N2	0,14	0,27	0,95	0,008	0,003	0,022	0,002	0,42	0,005	0,39	0,95	0,25	0,062	0,54

Таблица 5. Химический состав пластины S500Q/Z35 (ЭШП) в различных зонах, мас. %

Место отбора проб	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Ti	Mo	V	Nb	Ceq	
Головная часть	Верх	0,13	0,25	0,94	0,005	0,001	0,91	0,38	0,25	0,012	0,009	0,44	0,004	0,023	0,53
	1/4	0,13	0,26	0,93	0,008	0,001	0,92	0,40	0,24	0,009	0,009	0,42	0,005	0,022	0,53
	Центр	0,15	0,28	0,97	0,006	0,001	0,94	0,39	0,25	0,014	0,012	0,45	0,005	0,025	0,54
	Ниже 1/4	0,14	0,24	0,95	0,005	0,001	0,93	0,38	0,25	0,014	0,009	0,43	0,004	0,020	0,54
	Низ	0,14	0,24	0,94	0,006	0,001	0,92	0,39	0,25	0,011	0,009	0,44	0,004	0,022	0,54
Нижняя часть	Верх	0,14	0,28	0,95	0,006	0,001	0,93	0,40	0,25	0,013	0,009	0,43	0,005	0,022	0,54
	1/4	0,13	0,28	0,92	0,007	0,001	0,92	0,41	0,24	0,012	0,009	0,42	0,005	0,022	0,53
	Центр	0,13	0,28	0,94	0,007	0,001	0,92	0,41	0,24	0,014	0,010	0,42	0,005	0,023	0,53
	Ниже 1/4	0,14	0,26	0,94	0,007	0,001	0,94	0,4	0,25	0,006	0,008	0,42	0,005	0,022	0,54
	Низ	0,13	0,26	0,91	0,008	0,001	0,93	0,4	0,25	0,017	0,009	0,42	0,005	0,021	0,53

Таблица 6. Содержание газов в различных зонах слитка, мас. %

Элемент	Верх	Низ
N	0,0059	0,0050
O	0,0010	0,0014

фективного охлаждения нижней части слитка при его высоте 1000 мм или по сравнению с моментом горячей подпитки слитка. Поэтому реальная скорость плавления снижается во время плавки. В этом исследовании скорость плавления на начальной, средней и конечной стадиях контролировали при 1500...1700, 1300...1500 и 1100...1300 кг/ч соответственно при сечении кристаллизатора 960×2000 мм. Скорость плавления автоматически контролировали в соответствии со схемой, показанной на рис. 7.

Конструкция кристаллизатора ЭШП аналогична конструкции кристаллизатора для непрерывного литья, который состоит из четырех медных пластин с водоохлаждаемыми каналами щелевого типа. Регулировка расхода воды используется для обеспечения скорости потока более 6 м/с, разница температуры воды на входе и выходе находится в пределах 3...5 °С.

На широкой и узкой стороне вторичного охлаждающего устройства установлены горизонтально два ряда сопел для распыления по 22 и 10 в каждом ряду соответственно. Угол распыления

сопла составляет 13°, что считается достаточным для охвата поверхности слитка. Два ряда сопел снабжаются водой и выполнены из стали SU11. Скорость охлаждающей воды рассчитана в соответствии с величиной 0,1 л/кг, что достаточно для получения хорошего результата.

**Качество и свойства сверхтолстой плиты S500Q/Z35 толщиной 265 мм, применяемой для крупных гидроэлектростанций.** Слиток сляба ЭШП (плавка 12030073DZ) массой 41,1 т и размерами 940×1960×2810 мм был выбран для изготовления на прокатном стане опытной плиты весом 30,68 т и размерами 265×2150×6900 мм со степенью сжатия около 3,5.

Технологический процесс производства слитков следующий: первичная плавка (UNP EAF); рафинирование в ковше; вакуумная дегазация; непрерывное литье сляба; электрошлаковый переплав; обработка поверхности сляба; нагрев; прокатка; медленное охлаждение для диффузии водорода; контроль; закалка + отпуск; резка; испытание свойств; складирование.

Химический состав электрода (сляб изготовленный непрерывным литьем) представлен в табл. 4.

Чтобы исследовать однородность химического состава и сегрегацию толстых пластин в разных местах готового изделия проведен анализ, результаты которого представлены в табл. 5.

Таблица 7. Макроструктура пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Место отбора проб	Толщина, мм	Пористость		Пятнистая сегрегация	Расслоение	Чешуйки	Включения	Пузырьки	Трещины
		общая	центральная						
Поверхность	265	Нет	0,5	0,5	Нет	Нет	0,5	Нет	Нет
Дно		Нет	0,5	Нет	Нет	Нет	0,5	Нет	Нет

Таблица 8. Содержание неметаллических включений в пластине S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Номер образца	Неметаллические включения (уровень)								Ds
	А		В		С		D		
	крупные	мелкие	крупные	мелкие	крупные	мелкие	крупные	мелкие	
112-1 (верхняя часть)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-2	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-3	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-4 (1/4)	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-5	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-6	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-7	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-8 (1/2)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-9	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-10	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-11	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-12(3/4)	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-13	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0
112-14	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0
112-15 (нижняя часть)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0

Однородный состав и незначительная сегрегация в разных местах пластины показывают, что технология процесса литья, прокатки и термической обработки являются вполне обоснованными.

Хорошо известно, что содержание газа является еще одним важным показателем, который отражает чистоту стали, а более низкое способствует улучшению всех характеристик стальной пластины (табл. 6).

Оценку дефектов пластин выполняли в соответствии с GB226-77 (табл. 7).

Как видно из таблицы, макроструктура пластины плотная, имеет незначительную пористость и сегрегацию, но без макроскопических дефектов, таких как пузырьки и трещины, что говорит о хорошем внутреннем качестве пластины.

Оценку наличия неметаллических включений в пластине проводили в соответствии с GB10561-89 (табл. 8).

Таблица 9. Результаты испытаний пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм

Место отбора проб	Ширина пластины	Толщина пластины	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\delta$ , %
Верх	1/4	1/4	474	591	24,0
		1/2	465	587	23
	1/2	1/4	478	589	22
Низ		1/2	469	587	20
	1/4	1/4	472	587	19,5
		1/2	470	573	19
	1/2	1/4	483	598	23
		1/2	468	577	19

Из таблицы следует, что стальная пластина имеет высокую степень чистоты судя по низкому содержанию неметаллических включений.

В соответствии со стандартом GB/T 2970 и UT были проведены испытания на наличие дефектов

Таблица 10. Значения ударной вязкости стальной пластины S500Q/Z35 в разных местах и разных направлениях

Место отбора проб		Направление	-20 °C, KCV, Дж/см <sup>2</sup>		
Верх	1/4 ширины	продольное	134	158	145
		поперечное	114	134	126
		Z	178	142	172
	1/2 толщины	продольное	110	102	89
		поперечное	114	96	101
		Z	112	95	96
Низ	1/4 ширины	продольное	198	176	203
		поперечное	167	141	123
		Z	153	126	123
	1/2 толщины	продольное	163	144	173
		поперечное	163	144	173
		Z	142	136	140

\*Испытания проводили на трех образцах.

Таблица 11. Результаты воздействия старения на стальную пластину S500Q/Z35 толщиной 265 мм при 5 % деформации

Номер пластины	Температура, °С	Надрез	Направление	Место	Деформация, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> *		
220306	0	V	поперечное	1/4	5	188	119	121
	0	V	->-	1/4	5	159	240	148
	0	V	->-	1/4	5	237	119	157

\*Испытания проводили на трех образцах.

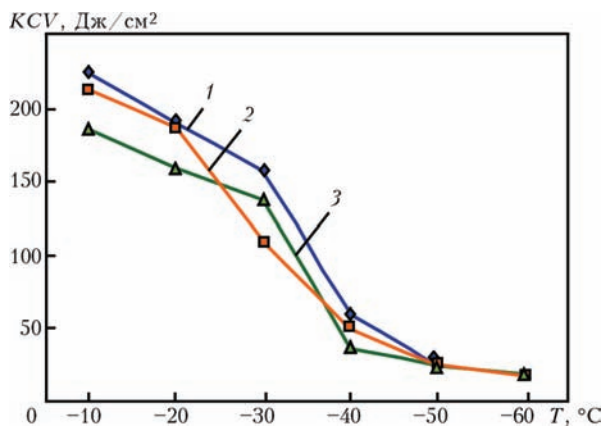


Рис. 8. Зависимость ударной вязкости от температуры в продольном (1), поперечном (2) и Z-направлениях (3)

в структуре периферийной и центральной зон пластины и квалификационный уровень составил 1.

Результаты испытаний пластины S500Q/Z35 толщиной 265 мм на растяжение и ударную вязкость показаны в табл. 9, 10.

Как видно из табл. 10, стальная пластина обладает надежной ударной вязкостью при низкой температуре. Ее свойства в продольном, поперечном и Z-направлениях верхней и нижней частей, 1/2 и 1/4 толщины отличаются незначительно, что свидетельствует о том, что сталь имеет хорошую изотропность. На рис. 8 показано, что температура вязко-хрупкого перехода (ДВТТ) составляет около  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Результаты воздействия старения на стальную пластину S500Q/Z35 толщиной 265 мм при 5 % деформации показаны в табл. 11.

Свойства пластины S500Q/Z35 в Z-направлении в разных местах показаны в табл. 12.

## Выводы

1. Три типа печей ЭШП для производства слябов весом 50 т с максимальным поперечным сечением  $960\times 2000$  мм успешно разработаны и введены в эксплуатацию. С 2007 г. налажено производство слябов из сталей марок P20, WSM718R, 2.25Cr1Mo, 16MnR(НІС), S355J2 + N-Z35 и 20MnNiMo толщиной 640, 760 и 960 мм и плит толщиной от 20 до 410 мм.

2. Для данных типов печей ЭШП использованы низкочастотный источник питания, бифилярное со-

Таблица 12. Свойства пластины S500Q/Z35 в Z-направлении в разных местах

Место отбора проб		$\psi, \%$ *		
Верх	1/4 ширины	56	57	59
	1/2 ширины	57	53	54
Низ	1/4 ширины	57	52	53
	1/2 ширины сляба	49	54	50

\*Испытания проводили на трех образцах.

единение электродов, схема перепада с подвижным кристаллизатором, защитные газы, вторичное охлаждение, регулирование скорости плавления электродов и другие современные технологии.

3. Разработанный пятикомпонентный шлак пригоден для использования в режиме подъема кристаллизатора, что обеспечивает хорошее качество поверхности, а также стабильность и однородность состава слитка ЭШП.

4. Оптимизируя процесс плавления шлака с применением защитных газов и раскисления, можно контролировать низкое содержание водорода, кислорода и включений в слитке-слябе ЭШП.

5. Путем комплексного применения различных технологий удалось изготовить сверхтолстую пластину ЭШП S500Q/Z35 толщиной 265 мм, обладающую отличными качеством и свойствами, которая применяется для гидроэлектростанций. Полученные пластины имеют высокую степень чистоты, однородный состав и микроструктуру, отличные механические и сварочные свойства. Показатели ударной вязкости в продольном, поперечном и Z-направлениях отличаются незначительно, что свидетельствует о хорошей изотропности стали. Все свойства соответствуют требованиям заказчиков.

6. Разработанная технология применена при изготовлении толстых плит из разных марок сталей толщиной 350 мм для нескольких гидроэлектростанций в Китае.

*Авторы выражают благодарность Национальному фонду естествознания китайского молодёжного проекта № 51104038 и Программе для инновационной исследовательской группы Ляонин в Северо-Восточном университете с грантом № LT20120008.*



## Список литературы/References

1. Quansheng Wang, Guoguang Cheng (2006) Technical analysis on feasibility of WISCO 40 t ESR ingot project. *Heavy Plate*, 12(2), 21–25.
2. Zhouhua Jiang, Yanwu Dong, Ximin Zang, Huabing Li (2011) The new development of special metallurgy technology for special steels. *China Metallurgy*, 21(12), 1–10.
3. Zhouhua Jiang. (2000) *Physical chemistry and transportation phenomena in electroslag metallurgy*. Shenyang, The Northeastern University press, 19–21.
4. Xin Geng (2009) *Process technology and quality control for electroslag remelting large slab ingots*. Shenyang, Northeastern University.
5. Kazumi Ogino, Shigeta Hara, Takashi Miwa and Shinji Kimoto (1979) The effect of oxygen content in molten steel on the interfacial tension between molten steel and slag. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 14(65), 2012–2021.
6. Tatsuhiko Kusamichi, Teruo Ishii, Toshio Onoye, Kiichi Narita (1980) Effect of composition of slag on heat transfer characteristics in electroslag remelting process, Tetsu-to-Hagane. *Ibid.*, 66(12), 1640–1649.
7. Yanwu Dong, Zhouhua Jiang, Lianke Liang, Zhengbang Li (2011) Hydrogen permeability of slags containing calcium fluoride. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 18(4), 1063–1067.

**МЕТАЛУРГІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЛИКИХ СЛЯБІВ,  
ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПЕРЕПЛАВОМ**

**Чжоу-хуа Цзян<sup>1</sup>, Сю Чень<sup>1</sup>, Синь Ген<sup>1</sup>, Цян Ю<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Факультет матеріалознавства і металургії, Північно-Східний університет.

<sup>2</sup>Факультет інформатики та інженерії, Північно-Східний університет.

Уеньхуа, район Хепін, Шеньян, Ляонін, 110819, КНР. E-mail: jiangzh63@163.com

Розроблено та побудовано три типи печей для електрошлакового переплава з метою отримання слябів вагою 50 т з максимальним поперечним перерізом 960×2000 мм. Налагоджено виробництво слябів з понад 20 марок сталей товщиною 640, 760 і 960 мм, а також пластин товщиною від 20 до 410 мм. Представлені основні особливості печей ЕШП, технологія процесу, властивості слябових і надтовстих плит ЕШП, що застосовуються для гідроелектростанцій. Для ЕШП застосовували низькочастотне джерело живлення, біфілярне з'єднання, рухомий кристаллизатор, захисні гази, вторинне охолодження, регулювання швидкості плавлення і інші передові технології. Низький вміст водню, кисню і включень, а також гарна якість зливка ЕШП отримані за рахунок оптимізації технологічного процесу. Як зразок з надтовстих плит, застосовуваних для гідроелектростанцій, отримані товсті пластини S500Q/Z35 товщиною 265 мм. Бібліогр. 7, табл. 12, іл. 8.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав; великий сляб; надтовста плита; сталь для гідроенергетики; властивість; Z-напрямок

**METALLURGICAL CHARACTERISTICS OF LARGE SLABS, PRODUCED BY ELECTROSLAG REMELTING**

**Zhou-hua Jiang<sup>1</sup>, Xu Chen<sup>1</sup>, Xin Geng<sup>1</sup>, Qiang Yu<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>School of Metallurgy, Northeastern University.

<sup>2</sup>School of Information, Northeastern University.

Wenhua Rd., Heping district, Shenyang, Liaoning, 110819, PR China. E-mail: jiangzh63@163.com

Three types of furnaces for electroslag remelting have been designed and manufactured for producing slabs of 50 ton weight with a maximum 960×2000 mm cross section. Production of slabs of more than 20 grades of steels of 640, 760 and 960 mm thicknesses, as well as plates from 20 up to 410 mm thickness was organized. Presented are the main peculiar features of ESR furnaces, technology of the process, properties of slabs and super-thick ESR plates, used for hydropower stations. A low-frequency power source, bifilar connection, mobile mould, shielding gases, secondary cooling, control of melting rate and other advanced technologies were used for ESR. The low content of hydrogen, oxygen and inclusions, as well as a good quality of the ESR ingot were obtained due to the technological process optimizing. As a sample of super-thick plates, used for hydropower stations, the thick plates S500Q/Z35 of 265 mm thickness were produced. Ref. 7, Tabl. 12, Fig. 8.

**Key words:** electroslag remelting; large slab; super-thick plate; steel for hydropower station; property; Z-direction

Поступила 30.12.17