



УДК 669.187.26:621.746

ЛИСТОВЫЕ ПЕЧИ И ТОЛСТОЛИСТОВАЯ СТАЛЬ ЭШП — ОПЫТ ИСТОРИИ И ТРЕБОВАНИЯ СОВРЕМЕННОСТИ

Л.Б. Медовар¹, А.П. Стовпченко^{1,2}, **Б.Б. Федоровский²**

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ЧП «Элмет-Рол».

03150, г. Киев, а. я. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Обсуждены причины низкого сопротивления металла толстого листа слоистому разрушению по его толщине. Приведены результаты применения электрошлакового процесса и общие сведения о конструкциях слябовых печей ЭШП. Обозначены основные сложности, возникающие при выплавке слябовых слитков, которые решаются как на этапе проектирования оборудования (правильный выбор схемы подключения, конструкции печи), так и при его работе (стабильный энергетический режим переплава), а также на этапе термообработки. Показана возможность получения из стали ЭШП качественного толстого листа с высоким выходом годного. Библиогр. 7, табл. 4, ил. 4.

Ключевые слова: листовой слиток ЭШП; слябовый слиток; толстолистовая сталь; бифилярное подключение

Современное строительство и машиностроение используют стальной лист как основной элемент конструкции различных перекрытий, платформ, оболочек и обшивок. Весьма ответственным изделием является толстый лист (до 250 мм), качество которого во многом определяет надежность гигантских и большегрузных машин и конструкций. Толстый лист является основным элементом крупных морских судов, оффшорных платформ, тяжелой техники, больших агрегатов в энергетике и нефтехимии, где авария чревата человеческими жизнями и/или серьезными загрязнениями окружающей среды. Обеспечение высокого и стабильного уровня механических свойств толстолистовой стали, при производстве которой степень деформации существенно ниже, чем для большинства других видов проката или поковок, представляет собой проблему, которую специалисты решают различными методами. Причем приоритетные пути меняются, что обусловлено имеющимися техническими возможностями, превалирующими научными взглядами и, всегда, экономическими соображениями.

В настоящей статье приведена экспертная оценка возможностей и перспектив электрошлакового переплава (ЭШП) в производстве толстого листа

высокого качества и результаты промышленного применения печей ЭШП для его изготовления.

Особое требование к толстолистовой стали — Z-пластичность. Требования к механическим, технологическим и эксплуатационным свойствам толстого листа зависят от марки стали и толщины, и, естественно, существенно отличаются. Однако, для толстого листа существует общая отличительная характеристика, которая является необходимым условием качества и одним из определяющих показателей выхода годной продукции. Это сопротивление слоистому разрушению по толщине листа в Z-направлении, определяемое на образцах, вырезанных по толщине проката. При таких испытаниях пластичность (относительные удлинение и сужение) при наложении растягивающих нагрузок и ударная вязкость существенно ниже, чем на образцах, вырезанных в двух других направлениях. В результате при приложении безопасной для них нагрузки в Z-направлении происходит характерное слоистое разрушение (растрескивание, разрывы).

Отличием Z-направления от остальных является значительно меньшая степень его деформации при ковке или прокатке. Решение проблем Z-свойств толстого листа часто связывают со степенью рафинирования металла, которая безусловно важна, поскольку определяет количество вредных



примесей, морфологию неметаллических включений и др.

Однако, сегодня, когда средства ковшевой металлургии позволяют получать жидкую сталь заданного химического состава с минимальным содержанием примесей, в том числе и газов, становится очевидным, что основным источником проблем является неоднородность структуры и состава металла слитка, возникающие при его затвердевании.

В структуре крупных листовых слитков, получаемых заливкой в изложницу большого объема металла неизбежно образуются такие дефекты, как зональная химическая и структурная ликвация, скопления неметаллических включений, междендритные рыхлости, а при нарушении технологии разлива могут возникать еще и пузыри, внутренние и поверхностные трещины, пленки и др. Уменьшение объема заливаемого металла при непрерывной разливке способствует уменьшению степени развития дефектов ликвационного характера, однако из-за высокой скорости вытяжки заготовки подпитка сердцевины нарушается и возникают сосредоточенные центральные усадочные полости или пористость.

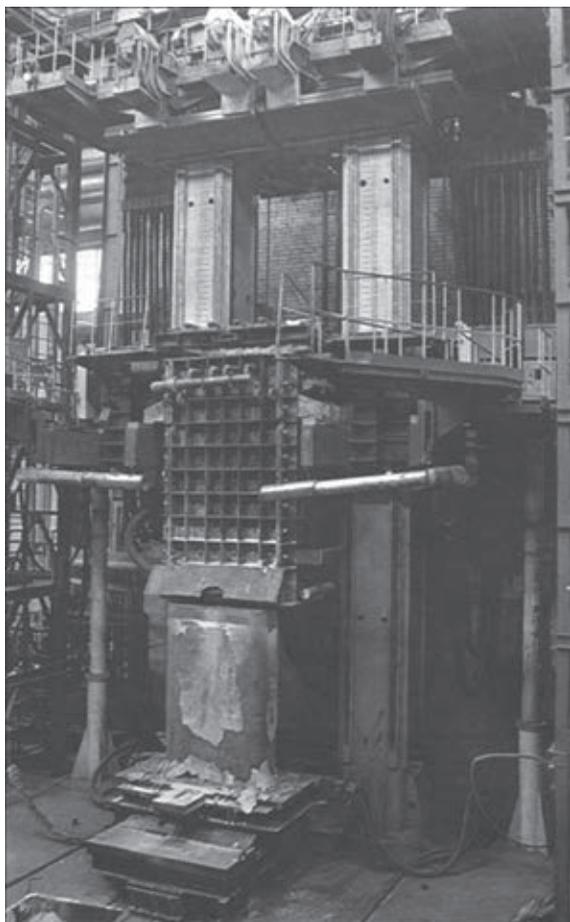


Рис. 1. Общий вид листовой печи ЭШП У-436 с выплавленным слитком

После прокатки дефекты литого металла проявляются в виде раскатынных плен, расслоений, волосовин, шиферного излома и других дефектов. Высокая степень деформации по длине и ширине листа при ковке или прокатке позволяет частично устранить усадочные несплошности и «растянуть» ликвационную неоднородность по высоте слитка. В то же время при малом обжатии по толщине структура металла сохраняет наследственные дефекты слитка и в результате Z-свойства становятся определяющими показателями качества толстого листа.

Из этого следует, чтобы повысить Z-свойства необходимо обеспечить однородность структуры и химического состава металла по сечению слитка. Эта задача успешно решается с помощью ЭШП, что уже давно доказано нашими предшественниками и собственным опытом. Рассмотрим получение листовых слитков способом ЭШП и основные параметры печей для их производства.

Печи ЭШП для производства листовых слитков. Задача производства стального листа особо высокого качества способом ЭШП впервые в мире была решена в промышленных масштабах на заводе «Днепроспецсталь». В 1967 г. были введены в эксплуатацию две электрошлаковые печи типа У-436, предназначенные для производства листовых слитков ЭШП массой 9...13 т по схеме заполнения стационарного кристаллизатора (рис. 1). Механическая и электрическая схемы реализации процесса ЭШП, заложенные в этих печах, просты и надежны, а технология процесса устойчива и обеспечивает высокое качество выплавляемых слябов [1, 2]. Именно на основании технических и технологических разработок, выполненных при создании и эксплуатации печей этого типа, впоследствии были созданы 20- и 40-тонные листовые печи ЭШП. Они успешно эксплуатировались в течение многих лет на заводах «Днепроспецсталь» и «Азовсталь» в Украине и «Ниппон стил» в Японии.

Удачным решением при создании этих печей было использование бифилярной электрической схемы подключения, которая разработана в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Бифилярная схема питания листовой печи ЭШП предусматривает применение расходуемых электродов кратное двум (рис. 2).

Токоподводы трансформатора присоединены к двум электродам или более (попарно) и основной ток проходит через шлак от одного электрода к другому. В отличие от прямой схемы (электрод–шлак–поддон) бифилярное подключение



обеспечивает благоприятную тепловую среду в слитке и меньшую глубину жидкометаллической ванны. Поэтому сегодня бифилярная схема является основной в печах для производства листовых слитков. Кроме того, при бифилярном подключении расходуемых электродов длина токоведущих цепей уменьшается, что позволяет свести к минимуму потери в короткой сети печи ЭШП. В результате снижается расход электроэнергии и эффективно используется печной трансформатор.

Эти печи позволяют и сегодня переплавлять как электроды-слябы, так и электроды квадратного сечения, полученные прокаткой или на МНЛЗ, а также отлитые в специальные изложницы. Именно простота конструкции и эксплуатации листовых печей позволила быстро освоить широкое промышленное производство листовых слитков массой до 20 т из конструкционных сталей ответственного назначения.

В табл. 1 приведены данные о листовых печах ЭШП, успешно работающих на металлургических предприятиях. Толщина листовых слитков ЭШП составляет 500...700 мм.

В 1974 г. в Японии на заводе «Ниппон стил корпорэйшн» введена в эксплуатацию самая крупная в мире печь ЭШП-40 для выплавки листовых слитков массой до 40 т. Проект этой печи разработан в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Выплавку листовых слитков проводили по однофазной бифилярной схеме в коротком уширенном кристаллизаторе Т-образного сечения с применением двух или четырех электродов. В основу печи положена идея встречного движения электродов и кристаллизатора. На печи изготовляли слитки-слябы толщиной до 700 мм. Отметим, что в середине 70-х годов прошлого века в эксплуатацию были введены две 50-тонные листовые печи ЭШП, спроектированные для работы по прямой схеме питания. Качество металла оказалось не-

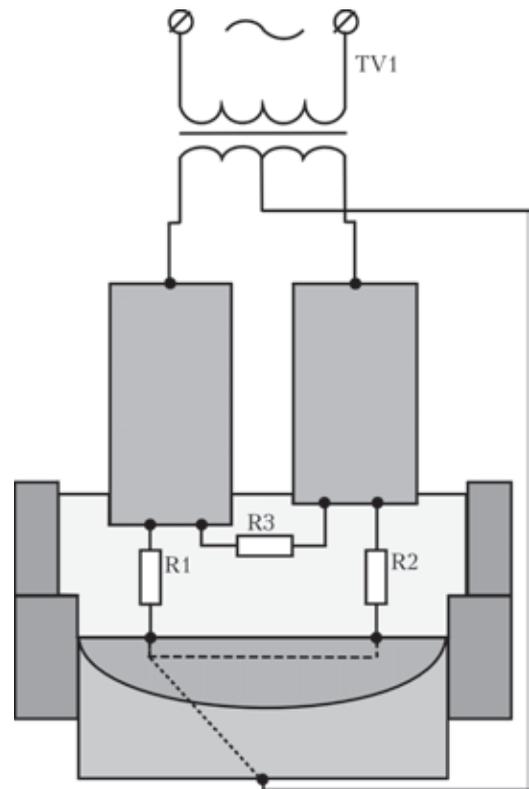


Рис. 2. Принципиальная схема бифилярного питания листовой печи от однофазного источника

довлетворительным из-за протяженной двухфазной зоны [2].

Для улучшения качества слитка и эффективности процесса в печи ЭШП-40 применили ряд новшеств. Вторичное охлаждение обеспечило дополнительное снижение макросегрегации слитка; повторное использование шлака и создание над плавильным пространством контролируемой атмосферы позволило устранить флокены. Результаты применения этих мероприятий по улучшению металлургического качества слитка толщиной 510 мм и более изложены в статье [4] и показывают высокое качество производимого толстого листа.

Таблица 1. Листовые бифилярные печи ЭШП

Масса слитка, т	Тип трансформатора/ток, Гц	Гарантированный удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	Страна, завод-изготовитель
10...12	Однофазный/50	1200	Украина, завод «Днепроспецсталь»
10...12	То же	—	Россия, завод «Красный Октябрь»
20	То же	1100...1200	Украина, МК «Азовсталь»
40	Два однофазных/50	—	Япония, «Nippon Steel»
40*	Однофазный/10	1100...1300	Китай, «Wisco»
20**	Однофазный/50	не более 1100	То же

* — толщина слитка-сляба 960 мм; ** — толщина слитка-сляба 320 мм.



Рис. 3. Вид листового слитка, вытягиваемого из кристаллизатора (а) и его головной части (б)

С окончанием «холодной войны» спрос на листовые печи ЭШП прекратился и на протяжении 35 лет такие агрегаты не строили. Сегодня в связи с увеличением единичной мощности агрегатов нефтегазового комплекса, химической промышленности, атомной энергетики, плавучих буровых установок и большегрузных машин, а также для решения новых задач нужны крупные листовые слитки высокого качества, получение которых без способа ЭШП весьма сложно.

Первыми такой продукцией заинтересовались китайские металлурги. В Китае построены несколько 40-тонных печей ЭШП для производства листовых слитков с размерами 980×2000×2800 мм. Слябы переделывают на плиты толщиной 410 мм (степень обжатия — 2,39). Металл плит демонстрирует хорошую пластичность, ударную вязкость и изотропные свойства во всех направлениях, а также в сварных соединениях [5–7].

Две новые печи для производства 20-тонных листовых слитков с самым высоким уровнем Z-свойств построены при непосредственном участии специалистов ИЭС им. Е.О. Патона в проектировании оборудования и системы управления на другом заводе в Китае. Эта печь предусматривает вытяжку слитка и применение Т-образного кристаллизатора. Максимальные размеры сляба (2000×4000×320 мм) определены исходя из имеющихся мощностей при нагреве слитка, что ограничило его толщину. Малая толщина слитка сказывается на качестве сляба двояко. С одной стороны благодаря этому ускоряется кристаллизация, однородность и качество внутренней структуры сляба высокое, а с другой — при малой производительности процесса ухудшаются условия формирования углов сляба, что требует применения специальных технологических приемов. Рассмотрим подробнее технологию производства и результаты исследования качества листо-

вых слитков, производимых в Китае на описанной 20-тонной печи ЭШП.

Результаты промышленного освоения технологии производства листовых слитков. Рассмотрим процесс электрошлаковой выплавки и качество слябовых слитков с размерами 320×1400×4000 мм массой 13 т, производимых на 20-тонной печи ЭШП (Китай) порталного типа с вытягиванием слитка (рис. 4).

Печь снабжена датчиками для определения веса электродов и современной системой управления процессом плавки. Электрическая схема подключения электродов — бифилярная. Для получения 13-тонных слитков переплавляют два электрода массой по 6,8 т каждый.

Процесс начинается с заливки жидкого шлака ($\text{CaF}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--SiO}_2$), предварительно расплавленного в флюсоплавильной печи, в кристаллизатор с уширенной верхней частью в количестве, обеспечивающем заданную высоту шлаковой ванны.

Поскольку печь работает с вытягиванием слитка, то начальный период плавки ведут на особом стартовом режиме, который позволяет надежно приварить формируемое дно слитка к закрепленным в кристаллизаторе затравкам. Вытягивание начинают при формировании слоя слитка достаточной толщины, чтобы избежать загибания углов сляба вверх.

Плавку ведут в рабочем режиме при электрической мощности, обеспечивающей достаточный прогрев металлической ванны для предупреждения образования на поверхности слитка гофр и шлаковых включений.

По окончании наплавления заданной высоты переходят на режим подпитки слитка, при котором скорость расплавления металла несколько снижают.

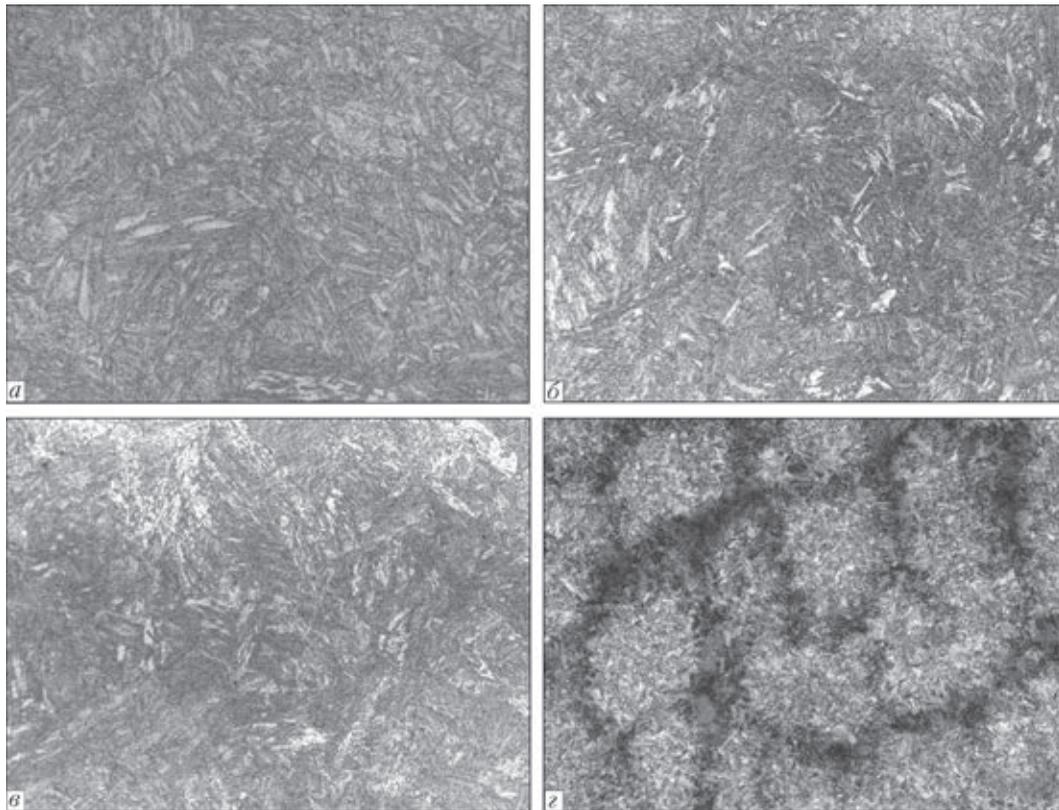


Рис. 4. Микроструктура образцов металла, вырезанных из толстолистового проката стали А514: а — поверхность; б — 1/4 толщины; в, г — середина; а, б, в — $\times 50$; г — $\times 500$

При плавке точно контролируют уровень заглибления электродов. Ведут ее с защитой плавильного пространства аргоном с расходом $40 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Общий удельный расход электроэнергии при выплавке сляба составляет $1000 \dots 1100 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$, включая затраты на плавку флюса в флюсоплавильной печи, что намного меньше, чем при получении кузнечных слитков по прямой схеме.

Заданное марочное содержание основных элементов в стали А514, а также химических состав металла расходуемых электродов и полученного слитка ЭШП по его высоте приведены в табл. 2.

Повышенное содержание углерода в донной части слитка обусловлено применением графитовых электродов для расплавления флюса в печи, имеющей графитовый тигель и электроды, что вызывает увеличение содержания углерода в шлаке, который затем переходит в металл. Разработаны способы, позволяющие снизить в шлаке содержание углерода до уровня, который не ведет к росту его в металле.

Для предотвращения угара активных элементов в ходе плавки шлак раскисляют алюминиевой дробью, присаживаемой порционно через опре-

Т а б л и ц а 2. Содержание основных элементов в стали А514, в расходуемом электроде и готовом листовом слитке ЭШП

Металл	Содержание элементов, % мас.									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Сталь А514 по требованиям стандарта	0,14... ...0,17	0,20... ...0,35	1,1... ...1,2	0,012	0,0050	1,3... ...1,4	1,2... ...1,3	0,18... ...0,28	0,45... ...0,55	0,05... ...0,07
Расходуемый электрод	0,171	0,30	1,2	0,007	0,0038	1,339	1,25	0,23	0,502	0,0620
Головная часть слитка ЭШП	0,161	0,30	1,15	0,006	0,0048	1,318	1,24	0,24	0,506	0,061
Донная часть слитка ЭШП	0,191	0,33	1,14	0,010	0,0041	1,361	1,24	0,23	0,518	0,061



Таблица 3. Оценка неметаллических включений и структуры стали

Место отбора проб	Балл неметаллических включений	Структура
Поверхность	A0.5 B0.5 C0 D0	Мартенсит и бейнит
1/4 толщины	То же	То же
1/2 толщины	То же	Мартенсит и бейнит, крупное первичное аустенитное зерно

Таблица 4. Механические свойства металла толстого листа из стали A514 после стандартной термообработки

Место отбора проб	Ударная вязкость, Дж/см ² *			Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Относительное сужение в Z-направлении, %
	1	2	3					
Поверхность	158	170	166	791	694	20,38	65,9	34,4
1/4	103	108	109	789	690	20,06	67,5	31,1
1/2	35,5	41,5	47,6	767	676	14,14	34,4	32,8

* Данные приведены по 3-м образцам.

деленные периоды времени. Следует отметить, что в период освоения технологии на целом ряде плавок обнаружены отклонения по содержанию марганца и кремния в пробах из головной части слитка, что потребовало корректировки температурного режима плавки и технологии раскисления шлака алюминием.

Полученные слитки-слябы охлаждали в колодах-термосах, а перед прокаткой нагревали в печи до заданной температуры. Темп прокатки сляба размером 110×2030×7300 мм рассчитывали таким образом, чтобы обеспечить температуру в конце прокатки не менее 800 °С. Прокатанный лист подвергали отжигу для обеспечения заданного комплекса свойств по режимам характерным для данной стали.

Для оценки качества полученных плит из проката вырезали образцы для исследования микроструктуры металла и его свойств. Результаты оценки балла неметаллических включений по китайскому стандарту GB/T10561-2005, гармонизированному с требованиями стандарта ASTM E45 приведены в табл. 3.

По требованию заказчика неметаллические включения всех классов должны быть менее 1 балла, что обеспечено полностью. Микроструктура образцов приведена на рис. 4.

Микроструктура металла регулярная, феррито-перлитная типа видманштеттовой. Размер фазовых составляющих увеличивается от края к центру слитка. На фото микроструктуры центральной зоны (рис. 4, з), видна темная окантовка по границам первичных аустенитных зерен, что говорит о необходимости корректировки режимов термической обработки для обеспечения полной перекристал-

лизации металла и улучшения его пластических свойств.

После оптимизации режимов термической обработки толстого листа из стали ЭШП его механические свойства соответствуют требованиям стандарта по всем направлениям, в том числе и по толщине листа (табл. 4).

При стабильном ходе переплава с заданными энергетическими показателями поверхность слитка не требует зачистки перед прокаткой. Результаты работы печи показали высокую стабильность технологического процесса и выход годного металла 93...98 %, а также низкий расход электроэнергии. Благодаря экономным показателям расхода электроэнергии и шлака в процессе ЭШП, себестоимость толстого листа из стали ЭШП конкурирует с продукцией, изготовленной из слябового слитка разлитого в изложницу, несмотря на дополнительные расходы на передел. Причем, чем больше длина и масса слитка, тем выше экономическая эффективность применения ЭШП.

Выводы

Ввиду особенности деформационной обработки и структуры толстого листа определяющим фактором его качества является сопротивление слоистому разрушению по его толщине. Последнее в большей степени обусловлено степенью развития ликвационных явлений и усадочных дефектов в слитке/заготовке.

Сегодня для изготовления слябовых слитков высокого качества успешно применяют ЭШП, принципы и технологические основы которого заложены специалистами ИЭС им. Е.О. Патона и



ЧП «Элмет-Рол» и реализованы в конструкциях печей, выполненных под их руководством.

Правильный выбор схемы подключения (бифиляр), конструкции печи, энергетических режимов переплава и термообработки гарантируют эффективный процесс производства качественного толстого листа с высоким выходом годного.

1. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. — М.: Металлургия, 1970. — 240 с.
2. Патон Б.Е., Медовар Б.И. Электрошлаковый металл. — Киев: Наук. думка. — 680 с.
3. Электрошлаковая печь для выплавки листовых слитков весом до 40 т (ЭШП-40) / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар,

А.Г. Богаченко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — № 3. — С. 28–31.

4. Эксплуатация крупной бифилярной печи ЭШП, предназначенной для производства слябов, качество литого металла слябов и толстого листа из них / М. Нисиваки, Т. Ямагучи, М. Коба и др. // Там же. — 1978. — № 8. — С. 65–70.
5. Manufacturing of Heavy Plates with Excellent Mechanical Properties by a 40t ESR Furnace for Slab Products / Xing Geng, Zhou Hua Jiang, Fu Bin Liu, Hao Peng. // Advanced Materials Research. — 2009. — 79–82. — P. 1747–1750.
6. Development of New-Generation Electroslag Remelting Technology / J. Zhouhua, D. Yanwu, Z. Ximin et al. // J. of Materials and Metallurgy. — 2011. — S. 1.
7. Technology development of the second-generation electro-slag metallurgy / J. Zhouhua, L. Medovar, G. Stovpchenko et al. // J. of Iron and Steel Research. — 2013. — 25, № 3.

Causes for low resistance of plate metal to lamellar cracking across its thickness are discussed. The paper gives the results of electroslag process application and general information on designs of ESR slab furnaces. The main difficulties arising in production of slab ingots are outlined, which are coped with both at the stage of equipment design (correct selection of connection diagram, furnace design), and during its operation (stable power mode of remelting), as well as at the heat treatment stage. Possibility of producing sound steel plates by ESR with a high metal yield is demonstrated. 7 References, 4 Tables and 7 Figures.

Key words: ESR plate ingot; slab ingot; plate steel; bifilar connection

Поступила 08.04.2015

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины



НИИ лазерной техники и технологии НТУУ «КПИ»



Исследовательский центр лазерных процессов и технологий
Дзеньянского технологического университета



Международная Ассоциация «Сварка»

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

г. Одесса, Украина, отель «Курортный»

14-18 сентября 2015 г.



Тематика конференции

- Лазерная сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Выращивание трехмерных объектов
- Гибридные технологии

<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2015>