



УДК 669.187.826

## ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТРАДИЦИОННОГО ЭШП ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛЫХ СЛИТКОВ–ТРУБ

Л. Б. Медовар<sup>1</sup>, Г. А. Дудка<sup>2</sup>, А. П. Стовпченко<sup>1</sup>, А. Н. Козьминский<sup>2</sup>,  
Б. Б. Федоровский<sup>3</sup>, В. А. Лебедь<sup>1</sup>, А. С. Лесунов<sup>2</sup>, А. С. Ронжин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ЗАО «Энергомаш (Белгород)–БЗЭМ».

308002, г. Белгород, пр-т Б. Хмельницкого, 111, Россия. E-mail: lesunov\_as@energomash.ru

<sup>3</sup>Элмет-Рол, Украина.

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

Рассмотрено качество серийного металла литых труб ЭШП – полых слитков, получаемых по стандартной технологии ЭШП на ЗАО «Энергомаш (Белгород)–БЗЭМ». Проведен статистический анализ производства, который показал высокий уровень и стабильность свойств литых труб ЭШП. Проанализированы основные типы неметаллических включений. Показано, что серийная технология обеспечивает высокое качество литого металла ЭШП – не хуже качества кованных труб того же химического состава, используемых в тех же трубопроводах в энергетике. Рассмотрены возможности и проблемы производства длинномерных полых слитков на традиционных электрошлаковых печах. Выявлены принципиальные отличительные особенности процесса кристаллизации и структуры полых слитков ЭШП, обуславливающие необходимость обеспечения стабильных технологических параметров. Библиогр. 22, табл. 4, ил. 3.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; полый слиток; труба; литой металл ЭШП; качество; свойства; неметаллические включения; энергетическое машиностроение

Трубное производство является одним из наиболее сложных процессов, что определяет высокую долю консерватизма во внедрении технологических новшеств. В частности, до сих пор не применяют исходную полую заготовку, что было бы вполне логично как с точки зрения технологии, так и экономики производства. Это связано и с реальными сложностями отливки полых слитков, и со сложившимися стереотипами, а также существующим оборудованием.

Наиболее перспективным при производстве полых заготовок для изготовления труб и других цилиндрических оболочек является ЭШП полых слитков. Благодаря высокой рафинирующей способности процесса и получению плотного слитка металл полых слитков ЭШП имеет высокое качество, позволяющее применять его даже в литом виде. Именно с такой целью изготовили первые полые слитки [1–3]. С тех пор электрошлаковый переплав для производства полых слитков успешно применяют более 40 лет.

Разработаны технологии и оснастка для изготовления полых изделий разнообразных размеров и форм, среди которых толстостенные трубы, применяемые в литом виде; круглые и квадратные заготовки под ковку с отверстиями различной формы (толщина стенок от 40 до 500 мм; диаметр от 100 до 1600 мм, длина до 6 (реже 9) м, масса до 16 т).

Несмотря на превосходные свойства металла даже в литом виде [4–6] и очевидные преимущества технологии выплавки полого слитка [7–9] последняя все еще не получила должного распространения. Это связано, на наш взгляд, с отсутствием опыта у большинства производителей оборудования, а также с применением устаревших конструкций печей и технологических схем.

Тем не менее даже при использовании традиционной схемы сегодня в России печи ЭШП производят тысячи тонн полых слитков ежегодно (например, ОАО ЗМЗ – 5000 т, «Энергомаш (Белгород)–БЗЭМ» около 3500 т (на двух печах), Ормето–



ЮУМЗ — плановая производительность двухмодульной печи (в стадии освоения 6000 т).

Рассмотрим возможности традиционного ЭШП при выплавке полых слитков и качество получаемых слитков—труб более подробно.

**Традиционные печи ЭШП для полых слитков: возможности и проблемы.** Существуют два основных способа электрошлакового переплава полых слитков, основное отличие которых состоит в креплении внутреннего кристаллизатора (дорна): на длинной вертикальной мачте (приблизительно равной длине слитка), закрепленной внизу по оси основного кристаллизатора; на поперечной перекладине, закрепленной на верхнем фланце основного кристаллизатора. Принципиальные схемы ЭШП для полого слитка многократно публиковались, в частности в работах [10, 11].

Основным достоинством первой схемы является переплав одного электрода с высоким коэффициентом заполнения. По аналогии с прошивкой труб, на пильгер-станах этот процесс называют еще электрошлаковой прошивкой. Стойкость «прошивающего» внутреннего кристаллизатора невысока, а ввиду низкой устойчивости длинных мачт и практически неизбежного эксцентриситета высота слитка ограничивалась 2...3 м. По нашим сведениям, в настоящее время этот способ не применяют.

Вторая схема используется в промышленном масштабе для выпуска длинномерных труб. Построенные в России (в том числе и в последние несколько лет) электрошлаковые печи ЭШП работают по бифилярной многоэлектродной схеме (переплав нескольких расходоуемых электродов) с установкой дорна на фланце наружного кристаллизатора. Именно это техническое решение является подходящим для получения длинных слитков: внутренний кристаллизатор не мешает вытягивать слиток вниз или двигать кристаллизаторы вверх.

Главным недостатком применения многоэлектродной схемы является малый коэффициент заполнения (обычно не более 0,5). Естественно, что длина электродов для выплавки полого слитка удваивается, а высота печи превышает трехкратную длину слитка.

Высота построенных печей существенно превышает максимальную длину выпускаемого слитка даже при организации встречного движения кристаллизатора и слитка. Следует отметить, что ни одна из этих печей не предусматривает применение камеры для защиты плавильного пространства. Реализовать плавку в защитной атмосфере проблематично, поскольку при использовании камеры требуется увеличение высоты печи еще минимум на одну длину электрода.

С точки зрения технологии производства основную проблему представляют изготовление, подъем и установка на печь, центровка, а также стабильность плавки длинных электродов. Так, даже при диаметре 100 мм прогиб электродов при их длине

около 8...9 м составляет сантиметры и заметен невооруженным глазом. Кроме того, большая длина электродов приводит к существенным потерям напряжения в короткой цепи печи, что вызывает повышенный расход электроэнергии, а нагрев электродов — к ускоренному окислению их поверхности кислородом атмосферы, что требует дополнительного расхода раскислителей и может отрицательно влиять на качество слитка.

По мере уменьшения длины электродов их сопротивление падает, поэтому необходимо постоянно корректировать режим плавки для обеспечения стабильных производительности процесса и качества слитка.

Однако даже при применении длинных катаных электродов себестоимость заготовки (и готовой продукции) намного меньше, чем при использовании альтернативных технологий. Даже в случае применения традиционного ЭШП себестоимость его не превышает затрат на передел ковкой или прокаткой, а для труднодеформируемых сплавов электрошлаковый способ производства полых слитков с размерами, равными или приближенными к готовому изделию, обеспечивает наилучшее соотношение качества и стоимости передела.

Поэтому несмотря на все недостатки оборудования и сложности обращения с электродами эффективность процесса переплава по многоэлектродной схеме с верхним расположением дорна вполне удовлетворительна.

**Особенности процесса кристаллизации и структуры полых слитков ЭШП.** Необходимость строгого соблюдения заданного режима выплавки полого слитка обусловлена высокой скоростью затвердевания его стенки, сопровождаемого сжатием внутреннего кристаллизатора (дорна) усаживающимся металлом.

В полом слитке жидкая металлическая ванна имеет небольшую глубину, поскольку его стенка формируется в узком зазоре между двумя водоохлаждаемыми поверхностями. Рассчитали отношение площади поверхностей охлаждения (без учета площади поддона) кристаллизатора(ов) (в табл. 1 высота кристаллизатора принята равной 500 мм) к площади затвердевающей поверхности жидкометаллической ванны (площадь фронта затвердевания) в сплошном и полом слитках. Максимальный объем жидкометаллической ванны для сплошного слитка определили в предположении того, что ванна представляет собой полусферу с радиусом, равным радиусу слитка. Для полых слитков жидкометаллическая ванна представлена полукором, внутренний и наружный диаметры которого совпадают с этими же параметрами цилиндрического слитка, а радиус поперечного сечения его приняли равным половине толщины стенки полого слитка (табл. 1).

Для полых слитков отношение площади фронта затвердевания к площади охлаждающих поверхнос-



**Таблица 1.** Соотношения площади поверхности тепловода  $Q$  и фронта затвердевания  $S_{ф.з}$  сплошного и полого слитков аналогичного диаметра

Диаметр слитка, мм	Диаметр внутреннего отверстия, мм	Толщина стенки, мм	Площадь поперечного сечения слитка $S$ , мм <sup>2</sup>	Площадь фронта затвердевания $S_{ф.з}$ , мм <sup>2</sup>	Площадь поверхности $Q$ (кристаллизатор высотой 500 мм), мм <sup>2</sup>	$S_{ф.з}/Q$
920	–	–	664424	5315392	1444400	2,17
920	200	360	633024	1987695	1758400	2,78
920	500	210	468174	1470066	2229400	4,76
920	700	110	279774	878490	2543400	9,09
920	800	60	162024	508755	2700400	16,67
920	820	50	136590	428892	2731800	20,00

тей выше, чем для полых, а для тонкостенных полых слитков — выше практически на порядок.

Поэтому при неверно выбранном соотношении вложенной мощности на плавление и скорости вытяжки может происходить быстрое затвердевание ванны или возникать затруднение подпитки усадки затвердевающего слитка. Иными словами, при повышенной производительности плавления и высокой скорости вытяжки возможно образование жидкометаллической ванны значительной глубины (как при непрерывном литье), затвердевание которой происходит в условиях недостатка поступления жидкого металла в зону соединения фронтов кристаллизации. В результате по линии стыка кристаллизующихся фронтов может образовываться распределенная внутренняя пористость, сопровождаемая выраженной дендритной ликвацией. При непрерывной разливке крупных сечений сегрегация и пористость частично устраняются в процессе последующей прокатки. Однако для труб ЭШП, используемых в литом виде, образование подобных макро- и микродефектов структуры недопустимо. Поэтому ЭШП производят при режимах, обеспечивающих небольшую глубину жидкометаллической ванны, что гарантирует получение плотной структуры металла по всему сечению стенки трубы.

**Статистический анализ показателей плавок текущего производства полых слитков-труб ЭШП.** Многолетний опыт производства и исследования качества полых слитков в бывшем СССР [12–17], а также в современном производстве — труб ЭШП в ЗАО «Энергомаш(Белгород)–БЗЭМ» — при участии многих независимых исследовательских организаций (исследования проводили НПО «ЦНИИТМАШ», ИМЕТ им. А. А. Байкова и др.) позволили рекомендовать их применение для трубопроводов тепловых и атомных электростанций в литом виде.

Сегодня в массовом масштабе выпускают литые трубы ЭШП четырех основных марок теплостойких сталей (Ст20, 15ГС, 16ГС, 15X1M1Ф), начато внедрение высокохромистой стали 10X9MФБ.

С целью подтверждения устойчивости и оценки текущего состояния технологии производства выполнили статистический анализ 433 плавок текущего производства всех диаметров наиболее массовых марок стали 16ГС (213 плавок), 15X1M1Ф (220 плавок) за период 2012 г.—начало 2013 г. (табл. 2).

Несмотря на меньшую степень легирования стали 16ГС на некоторых плавках обнаружены такие отклонения от марочного состава:

**Таблица 2.** Средние и максимальные значения содержания элементов в составе сталей труб ЭШВ, мас. %

Сталь труб ЭШВ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V /N	Al
<b>15X1M1Ф</b>											
Среднее	0,13	0,25	0,69	0,009	0,005	1,18	0,2	0,16	0,91	0,24	0,01
Минимальное	0,11	0,17	0,63	0,004	0,001	1,11	0,12	0,009	0,88	0,21	0,005
Максимальное	0,16	0,39	0,83	0,015	0,011	1,24	0,29	0,23	0,96	0,28	0,04
Требования стандарта	0,12...0,16	0,17...0,37	0,6...0,9	0,025	0,025	1,1...1,4	0,40	0,25	0,9...1,1	0,2...0,35	–
							Макс.	Макс.			
<b>16ГС</b>											
Среднее	0,16	0,48	1,00	0,012	0,004	0,12	0,17	0,18	0,02	0,01	0,008
Минимальное	0,12	0,37	0,92	0,001	0,001	0,01	0,11	0,02	2,0	4,0	0,002
Максимальное	0,19	0,84	1,15	0,020	0,012	0,25	0,28	0,24	0,05	0,018	0,016
Требования стандарта	0,14...0,18	0,4...0,7	0,9...1,2	0,03	0,035	0,30	0,30	0,3	0,15	0,012	–
				Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	

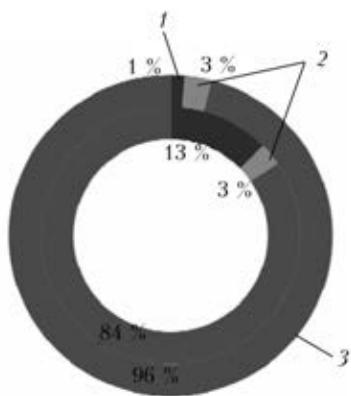


Рис. 1. Доля плавков труб ЭШП (всех диаметров) стали 15X1M1Ф (внутреннее кольцо) и 16ГС (наружное кольцо) с замечаниями по механическим свойствам (1) и макроструктуре (2); 3 – без замечаний

по содержанию углерода – в большую сторону на 8 плавках, в меньшую – на 4 плавках на значение 0,01...0,02 %, что, однако, не вызвало замечаний по макродефектам или механическим свойствам;

повышенное содержание азота (на 17 плавках), что тоже не привело к появлению каких-либо дефектов или отклонений по механическим свойствам.

С наибольшей степенью вероятности основной причиной отклонений по содержанию азота является его повышенное количество в исходных электродах, которое по условиям поставки не регламентируется.

Доля замечаний по макроструктуре (внутренние и поверхностные дефекты) для обеих марок стали не превышает 3 %, поскольку при штатных режимах ЭШП формируется плотная структура металла с минимальной сегрегацией (рис. 1). Замечания относительно механических свойств стали 15X1M1Ф (12,7 %) в основном связаны с малым значением предела текучести, что устраняют с использованием повторной термической обработки труб. Химический состав стали 15X1M1Ф анализируемых плавков не имел отклонений от марочного (табл. 2).

Поскольку статистическая выборка содержала данные по трубам/слиткам ЭШП разных диаметров, режимы выплавки которых существенно различаются, статистический анализ влияния послед-

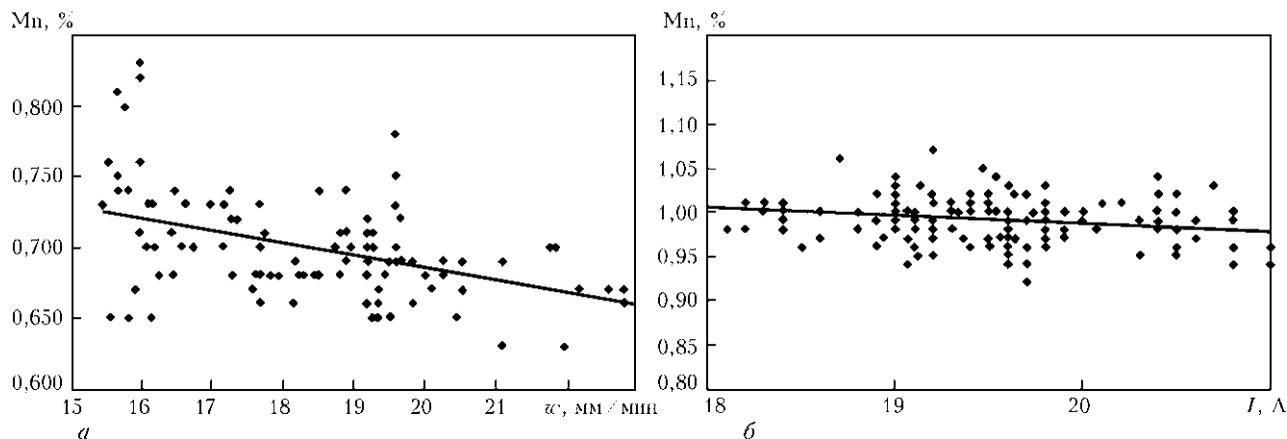


Рис. 2. Влияние средней производительности  $w$  плавки на стали 15X1M1Ф (а) и тока на стали 16ГС (б) при выплавке труб ЭШП диаметром 650 мм на содержание марганца при заданном (в технологической инструкции) постоянном расходе (а – 4,2; б – 3,5 кг) алюминия;  $R^2 = 0,1799$  (а) и  $0,3666$  (б)

них выполнили помарочно для наиболее массовых сходных плавков (количество плавков в статистических выборках 15X1M1Ф – 131 шт. и 16ГС – 182 шт.) с наружным диаметром труб 650 мм.

Для обеих марок стали обнаружена некоторая тенденция к уменьшению содержания марганца (в пределах марочного) при увеличении показателей производительности плавки слитков и постоянном заданном расходе алюминия на раскисление (рис. 2).

Повышенная производительность плавки приводит к некоторому снижению содержания алюминия в сталях при его постоянном расходе. Обнаруженные тенденции связаны с повышением температуры металла при более высоком значении тока процесса, что вызывает ускорение плавления электродов и, как следствие, – более высокую скорость вытяжки. Однако следует отметить, что минимальное регламентированное содержание марганца сохраняется в металле ЭШП в заданных пределах и, следовательно, указанное снижение не является браковочным признаком.

Поскольку режимы плавки строго соблюдаются, а заданные пределы варьирования основных параметров весьма узкие, то значимого влияния основных технологических параметров на состав и макроструктуру готового металла выявлено не было, что является свидетельством стабильности отработанной технологии плавки.

**Неметаллические включения в металле литых труб стали 15X1M1ФШ.** Для ответственных стальных изделий требуется не только контроль общего содержания и морфологии включений, но и принятие мер, предотвращающих появление размеров, больше критических (для стали труб ЭШП, согласно ТУ 1301-039-00212179–2010, регламентирован максимально допустимый балл по сульфидам 2, оксидам, силикатам – 3).

При увеличении количества оксидов или сульфидов ухудшается пластичность стали. Если включения присутствуют в сплавах с низкой пластичностью и высокой прочностью, то уменьшается вязкость разрушения. Подобное ухудшение свойств,

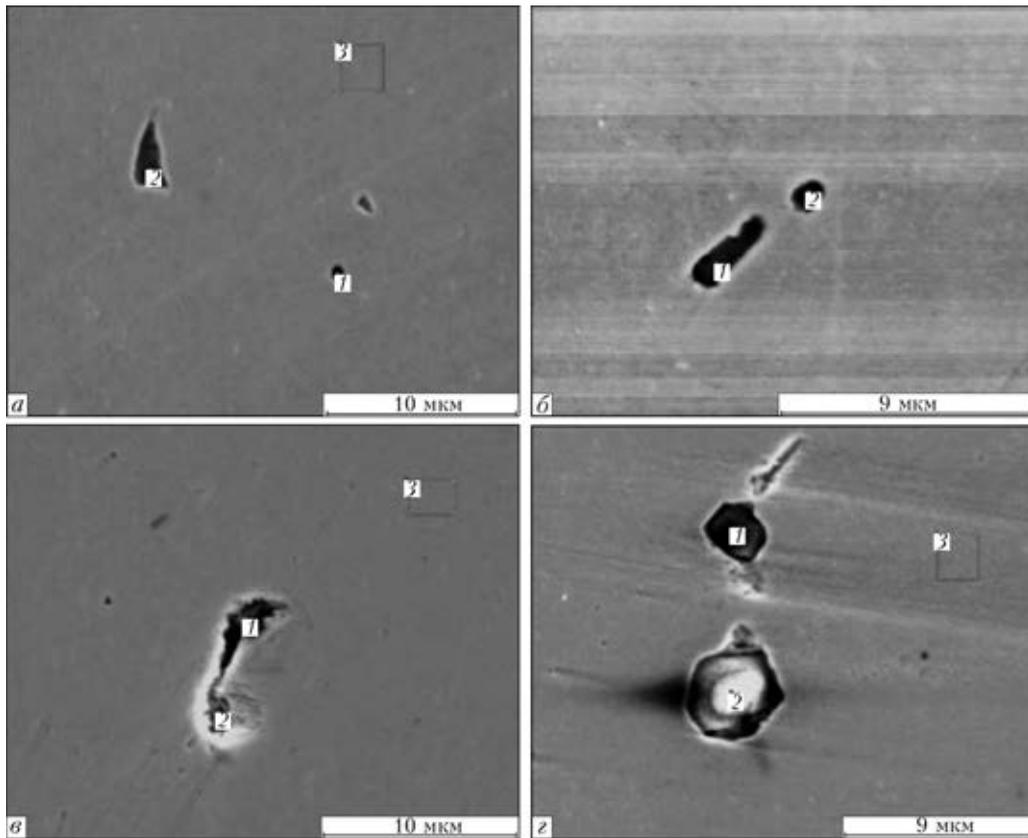


Рис. 3. Характерные неметаллические включения в металле слитка–трубы ЭШП диаметром 650 мм, сталь 15Х1М1Ф (×1000, нетравлено); 1–3 – номера спектров

вызванное включениями, отмечено в испытаниях, которые отражают медленные, быстрые или циклические показатели напряжения (на ползучесть, ударную вязкость и усталость). Включения могут быть причиной образования пустот, вызывать трещины и понижать сопротивление образованию флокенов. Источником большинства проблем, связанных с усталостью стали, являются твердые и хрупкие оксиды, особенно большие частицы глинозема размером более 30 мкм. Чтобы избежать этих проблем, нужно тщательно управлять размером и час-

тотой вредных включений, предотвращать образование включений выше критического размера.

Для определения морфологии неметаллических включений нами выполнен большой объем металлографических исследований литого металла труб ЭШП после термообработки и без нее. Следует отметить, что для стали 16ГС результаты оказались весьма близкими – морфология оксидных и сульфидных включений одинаковая, что может быть связано с применением одного и того же шлака в процессе ЭШП. На плавках текущего производства

Таблица 3. Содержание элементов в характеристических спектрах неметаллических включений (см. рис. 3)

Поле на рис. 3	№ спектра	C	Al	Si	S	O	V	Cr	Mn	Fe	Mo
a	1	5,19	1,72	0,96	3,03	–	0,41	1,39	4,58	82,72	0
a	2	23,78	0,08	39,96	0	–	0,15	0,54	0,35	34,54	0,61
a	3	1,14	0	0,17	0	–	0,18	1,33	0,59	95,45	1,13
б	1	4,36	–	–	23,92	–	0,70	0,52	46,50	20,14	–
б	2	4,17	–	–	18,81	–	1,02	2,18	41,97	26,99	–
в	1	73,83	–	0,05	0	2,38	0,07	0,51	0,35	22,82	0
в	2	6,15	–	0,14	0,16	1,19	0,23	2,58	1,50	88,05	0
в	3	2,44	–	0,27	0	0	0,40	1,40	0,74	93,10	1,65
г	1	8,30	41,17	0,12	–	47,70	–	0,21	0	2,50	0
г	2	6,30	44,26	0	–	47,29	–	0,13	0	2,01	0
г	3	1,85	0	0,21	–	0	–	1,19	0,63	94,94	1,17



Таблица 4. Механические свойства металла литых труб ЭШП (после термообработки)

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a$ , Дж/см <sup>2</sup>	
					KCU	KCV
16ГС-Ш	490...635	275	18	40	59	54
	485...630	290...400	27...3	51...70		111...300
15X1M1Ф-Ш	490...655	315	18	50	59	54
	490...630	265...530	18...37	54...78		100...291

*Примечание.* В числителе приведены требования ТУ 1301-039-00212179–2010, в знаменателе — статистические данные.

образцы отбирали из поперечных темплетов головной части слитка, используемых для оценки макроструктуры и механических свойств. Из одного опытного слитка для оценки структуры и неметаллических включений вырезаны темплеты на высоте, соответствующей пониженной производительности плавки.

Во всех исследованных образцах (более 50 образцов текущих плавов и 15 опытной) большинство обнаруженных включений имеют мелкие размеры (преимущественно менее 4 мкм, реже до 8 мкм), распределены в структуре равномерно и имеют близкие состав и морфологию. Это оксиды алюминия, сульфиды марганца и сложные оксисульфиды марганца-алюминия, редко — силикаты и нитриды.

Наиболее крупные и характерные неметаллические включения, обнаруженные при оптической металлографии, приведены на рис. 3 и в табл. 3.

Самые крупные включения имеют размер примерно 20 мкм, вытянутую или пленочную форму и по своим морфологическим признакам позволяют идентифицировать их как оксиды алюминия. Данные предположения подтверждены микрорентгоспектральным анализом.

Следует отметить, что обнаруженные на нетравленых шлифах типы включений характерны как для исходного литого, так и для термообработанного металла. Существенные отличия не обнаружены.

Для оценки содержания оксидных неметаллических включений (сульфидные разрушаются при выделении) выполнили электролитическое растворение металла опытной плавки без термообработки и после нее. Показано, что общая масса включений в литом металле составляет 0,010...0,018, а после термообработки — 0,4...0,9 мас. %. С учетом отсутствия существенных различий при количественной металлографической оценке неметаллических включений можно полагать, что в ходе термообработки активно протекают процессы карбидообразования. Поэтому представляет интерес исследовать влияние режимов термической обработки, оптимизация которой может обеспечить более высокие значения свойств, особенно при испытаниях на длительную прочность при высоких температурах.

**Качество и механические свойства металла слитков-труб ЭШП.** Слитки и трубы ЭШП используют в трубопроводах без деформации, но после термической

обработки и обточки. Поэтому точность их геометрии и качество поверхности удовлетворяют самым строгим требованиям. Каждая труба ЭШП проходит тотальный ультразвуковой контроль, что гарантирует отсутствие макро- и микродефектов.

В табл. 4 приведен требуемый техническими условиями уровень механических свойств металла, полностью совпадающий с аналогичными требованиями к катаным трубам из стали тех же марок. Это вполне закономерно, поскольку и литые, и катаные трубы имеют одинаковое назначение и применяются в одних и тех же трубопроводах. Следует подчеркнуть, что требуемые (и обеспечиваемые!!!) свойства литого электрошлакового металла не уступают металлу кованых труб. На практике трубы из литого металла ЭШП демонстрируют в 2...3 раза более высокую ударную вязкость, что подтверждает их высокое качество.

Металл труб ЭШП показывает высокие значения предела длительной прочности при повышенных температурах (до 500 °С для сталей 20, 16ГС и 16 ГС и до 600 °С — для сталей 15X1M1Ф и 10X9МФБ). Комплекс механических свойств труб ЭШП, определяющий их работоспособность, не уступает уровню требований, предъявляемых к кованым трубам из стали той же марки, что позволяет использовать их в системах трубопроводов энергетических установок, в том числе и для атомных электростанций.

Опыт производства литых труб для ТЭЦ и АЭС показывает, что ЭШП полого слитка в настоящее время — это устойчивая и хорошо зарекомендовавшая себя технология, позволяющая выпускать конкурентную продукцию высокого качества.

На основании анализа многолетнего успешного опыта и новых производственных результатов можно утверждать, что традиционный способ ЭШП обеспечивает высокое качество полых слитков.

В настоящее время разработаны и опробованы в промышленности новые технологии ЭШП полых слитков и соответствующее им новое поколение печей. Это ЭШП полых слитков со сменой электродов и прямым использованием жидкого металла без изготовления расходных электродов [18–22]. Новые технологии ЭШП позволяют расширить сортмент сталей и сплавов для получения полых слитков ЭШП, а также значительно увеличить их массу. Освоенная ЗАО «Энергомаш (Белгород)–БЗЭМ»



технология серийного производства литых труб ЭШП взамен кованных всесторонне проверена, получена статистически подтвержденная информация о качестве литого электрошлакового металла и стабильности его служебных свойств. Таким образом, не только на единичных изделиях, но и в массовом производстве полностью подтверждена возможность широкой замены кованого металла открытой выплавки литым электрошлаковым металлом.

1. Патон Б. Е., Медовар Б. И. Электрошлаковый металл. — Киев: Наук. думка, 1981. — 677 с.
2. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Бойко Г. А. Электрошлаковое литье. — Киев: Наук. думка, 1980. — 192 с.
3. Клейн Г. Дж., Венал У. В. Электрошлаковая выплавка полых слитков // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1979. — С. 155–169.
4. ЭШЛ длинных заготовок с получением одновременно нескольких отверстий малого диаметра / Б. Б. Федоровский, Г. А. Тимашов, Л. И. Бондаренко, М. Т. Левчук // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 3. — С. 38–39.
5. Электрошлаковая отливка заготовок корпусов двухчервячных грануляторов / Б. И. Медовар, Г. А. Тимашов, Б. Б. Федоровский и др. // Там же. — 1979. — № 1. — С. 41–43.
6. Электрошлаковая выплавка и термическая обработка полых слитков с прямоугольным отверстием из среднелегированных Cr–Ni–Mo и Cr–Ni–Mo–V сталей / Л. В. Чеботило, Б. И. Медовар, И. Е. Косматенко и др. // Спец. электрометаллургия. — 1985. — Вып. 59. — С. 24–31.
7. Tarmann R., Poppmeier W. Hollow tube round through continuous casting // J. of Metals. — 1966. — № 18. — P. 453.
8. Марченко И. К., Мошкевич Е. И. Производство стальных слитков полунепрерывным литьем. — Киев: Техника, 1981. — 160 с.
9. Medovar L., Stovpchenko A. ESR of the heavy hollow ingots // Proc. of 1st Intern. conf. on Casting, Rolling and forging, 3–7 June 2012, Aachen, Germany. — Aachen, 2012. — P. 131.
10. Evolution of ESR technology and equipment for long hollow ingots manufacture / L. Medovar, G. Stovpchenko, G. Dudka et al. // Proc. of Liquid Metal Processing and Casting conf. (LMPC2013) (Austin, Texas, September 2013). — Austin, 2013. — P. 37.
11. О возможности совмещения ЭШП и непрерывной разливки при получении полых слитков / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, Б. Б. Федоровский, Г. В. Нощенко // Электрометаллургия. — 2011. — № 7. — С. 2–6.
12. Исследование качества литого и деформированного металла из полых слитков ЭШП / А. К. Петров, Ю. С. Фурман, Б. М. Никитин и др. // Спец. электрометаллургия. — 1973. — № 20. — С. 18–24.
13. Качество электрошлаковых полых слитков стали ШХ15 / А. К. Петров, В. В. Лоза, Б. М. Никитин и др. // Там же. — 1979. — № 40. — С. 40–42.
14. Коваль А. Е., Лямцев К. К., Конрад Ю. Г. О свойствах и работоспособности штамповых сталей электрошлакового переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1982. — № 16. — С. 23–26.
15. Электрошлаковая выплавка заготовок сосудов высокого давления из аустенитной стали / Б. И. Медовар, А. Д. Дзепурной, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 1981. — № 15. — С. 13–15.
16. Электрошлаковая выплавка полых слитков из хромоникелемолибденованадиевой стали / Б. Е. Патон, Л. В. Чеботило, Б. И. Медовар и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 55. — С. 3–10.
17. Глушкин Л. Я., Житков В. В., Мизецкий В. Л. Опыт изготовления заготовок сосудов высокого давления из сталей переходного класса // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1988. — № 3. — С. 15–18.
18. О возможности совмещения ЭШП и непрерывной разливки при получении полых слитков / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, Б. Б. Федоровский, Г. В. Нощенко // Электрометаллургия. — 2011. — № 7. — С. 2–6.
19. Electroslag surfacing by liquid metal — a new way for HSS-rolls manufacturing / B. Medovar, L. Medovar, A. Chernets et al. // 38th MWSR Conf. Proc., Vol. XXXIV. — Cleveland, Ohio, 1996. — P. 83–87.
20. New technological process of producing super-large steel ingots by ESC LM method / B. E. Paton, L. B. Medovar, V. Ya. Saenko et al. // Advances in Electrometallurgy. — 2007. — 1. — P. 3–7.
21. Концепция универсальной печи ЭШП для производства крупных слитков / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, В. Я. Саенко и др. // Электрометаллургия. — 2010. — № 11. — С. 12–18.
22. Medovar L. B., Jiang Zh., Stovpchenko A. P. Continuous Casting of Hollow Tubular Billets // The 4th Intern. congress on the science and technology of steelmaking ICS 2008 (Gifu, Japan 6–8, Oct. 2008). — Gifu, 2008. — P. 120.

Considered is the quality of serial metal of cast ESR pipes-hollow ingots, produced by the standard ESR technology at the CJSC «Energomach» (Belgorod)–BZEM». Statistic analysis of production was made and deviations from technical specifications for chemical composition, structure and service characteristics were determined. Main types of nonmetallic inclusions were analyzed. It is shown that the serial technology provides the high quality of cast ESR metal, not inferior to the quality of forged pipes of the same chemical composition, used in parallel with cast ESR pipes in power engineering. Feasibilities and problems of production of long hollow ingots in traditional electroslag furnaces were studied. Principal peculiar features of the solidification process and structure of ESR hollow ingots, predetermining the need in minimum deviation of technological parameters from preset ones, were revealed. 22 Ref., 4 Tables, 3 Figures.

**Key words:** electroslag remelting; hollow ingot; pipe; cast ESR metal; quality; properties; nonmetallic inclusions; power machine building

Поступила 04.02.2014