



Опрышко Л. В., Головняк Т. В., Маленик А. О. Козьминский А. Н.
ГП «НИТИ» ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ»

Особенности структуры и свойств металла труб из стали 15X1M1Ф-Ш, изготовленных методом электрошлаковой выплавки

Приведены результаты исследований структуры и комплекса механических свойств при комнатной и повышенных температурах, в том числе характеристик жаропрочности, труб из стали 15X1M1Ф-Ш, изготовленных методом электрошлаковой выплавки (ЭШВ). Установлены характерные особенности качественных характеристик металла этих труб. Показана необходимость дальнейшего совершенствования технологии производства труб ЭШВ и перспективность их использования в оборудовании ТЭС. Ил. 2. Табл. 4. Библиогр.: 3 назв.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, котельная труба, структура, механические свойства, длительная прочность

Results of investigation of structure and mechanical properties at ambient and elevated temperatures including high-temperature strength characteristics of cast tubes of steel 15Cr1Mo1V-S produced by electroslag remelting method are given. Features of quality characteristics of these tubes metal were established. Necessity of further improvement of tubes manufacturing technology with the help of electroslag remelting method and prospects of their usage in fitting of thermal power plants were shown.

Keywords: electroslag remelting, boiler tube, structure, mechanical properties, long-term strength

Введение

В последнее время, в связи с исчерпанием ресурса эксплуатации труб в действующих котлоагрегатах и строительством новых энергоблоков, выросла потребность в трубах диаметром более 351 мм. В мировой практике трубного производства трубы указанного сортамента изготавливают методом деформации (горячая прокатка и прессование, свободная ковка) трубной заготовки или слитка. Такие трубы в течение нескольких десятилетий надежно эксплуатируются в энергооборудовании.

Наряду с трубами традиционных технологий изготовления, в теплоэнергетике были опробованы центробежнолитые трубы, не нашедшие широкого применения из-за ряда несоответствий их качественных характеристик требованиям нормативной документации (НД).

Альтернативным способом производства труб диаметром 377 мм и более является метод электрошлаковой выплавки (переплав), преимуществом которого является получение металла особо плотного и чистого по загрязненности неметаллическими включениями.

Наличие в ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ» (Россия) оборудования для электрошлаковой выплавки позволило заводу разработать технологию и нормативную документацию на изготовление труб методом электрошлаковой выплавки-переплава (ЭШВ) из стали марок 15ГС-Ш, 16ГС-Ш, 15X1M1Ф-Ш и 10X9МФБ-Ш (ТУ 1301-039-00212179-2010 «Трубы бесшовные из углеродистой и легированных сталей,

изготовленные методом ЭШВ для трубопроводов ТЭС и АЭС»), согласованную Управлением Федеральной службы России по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Цель настоящей работы – проведение исследований комплекса качественных характеристик металла труб ЭШВ из стали 15X1M1Ф-Ш производства ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ» (Россия) для установления возможности их применения в объектах теплоэнергетики Украины.

Материал и методика

Объектом исследования служили трубы ЭШВ из стали 15X1M1Ф-Ш двух плавок размерами 630×28 и 377×50 мм в состоянии поставки, изготовленные по следующей технологической схеме – электрошлаковый переплав, гомогенизирующий отжиг, нормализация с отпуском, механическая обработка. Образцы для исследований отбирали от верхней и нижней частей труб. Химический анализ выполняли фотоэлектрическим спектральным методом на установке SPECTROMAX X. Макроструктуру исследовали на поперечных кольцевых темплатах после глубокого травления в 50 %-ном водном растворе HCl при температуре 70-80 °С; микроструктуру – на продольных шлифах до и после травления в 3 %-ном спиртовом растворе HNO₃ с помощью светового микроскопа НЕОРНОТ 21. Ввиду отсутствия требований по микроструктуре металла труб ЭШВ в ТУ 1301-039-00212179-2010, оценку ее проводили по шкалам Приложения В к ТУ 14-3-460:2009 [1]. Контроль загрязненности неметаллическими вклю-

чениями осуществляли путем замера их линейных размеров, а также в соответствии с требованиями НД на трубы ЭШВ, по шкалам ГОСТ 1778-70. Механические свойства при комнатной температуре определяли на продольных и поперечных образцах. Испытания на растяжение при комнатной и повышенных температурах проводили по ГОСТ 10006-80 и ГОСТ 19040-81 соответственно; на ударный изгиб – по ГОСТ 9454-78. Оценку вязкой составляющей выполняли по ГОСТ 4543-71 (Приложение 3). Испытания на длительную прочность – по ГОСТ 10145-81 при температуре 550 °С. Путем линейной экстраполяции графической зависимости времени до разрушения и напряжения (в логарифмических координатах) определяли предел длительной прочности за 100 тыс. ч.

Результаты исследований

Химическим анализом установлено, что массовая доля основных легирующих элементов (V, Mo) в металле труб обоих типоразмеров находится на нижнем уровне допустимых техническими условиями значений (табл. 1). В металле исследованных плавок выявлено высокое содержание ненормируемых НД, но оказывающих негативное влияние на свойства труб цветных примесей (Pb, Sn, As, Al и др.).

Таблица 1. Результаты химического анализа металла труб ЭШВ из стали 15X1M1Ф-Ш

Размер труб, D×S, мм	Место отбора образцов	Массовая доля элементов, %																		
		C	Si	Mn	Cr	V	Mo	W	Zn	Bi	Al	N	As	Sn	Sb	Pb	Ni	Cu	P	S
630×28	верхняя часть	0,128	0,279	0,74	1,22	0,232	0,96	< 0,007	0,0012	0,0051	0,018	0,009	0,01	0,0061	< 0,007	0,012	0,151	0,084	0,012	0,0031
	нижняя часть	0,128	0,319	0,66	1,21	0,230	0,96		< 0,001	0,0055	0,015	0,009	0,0094	0,0061		0,011	0,155	0,082	0,013	0,0030
377×50	верхняя часть	0,123	0,276	0,70	1,22	0,227	0,96		0,0019	0,0038	0,013	0,011	0,0090	0,0059		0,013	0,150	0,092	0,009	0,0028
	нижняя часть	0,126	0,299	0,75	1,22	0,235	0,96		0,0012	0,0052	0,015	0,014	0,0090	0,0066		0,012	0,160	0,088	0,010	0,0029
нормы ТУ 1301-039-00212179-2010		0,12- - 0,16	0,17- - 0,37	0,60- - 0,90	1,10- - 1,40	0,20- - 0,35	0,90- - 1,10	-	-	-	-	-	-	-	-	не более				
нормы ТУ 14-3-460:2009		0,10- - 0,15	0,17- - 0,37	0,40- - 0,70	1,10- - 1,40	0,20- - 0,35	0,90- - 1,10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,40	0,25	0,025	0,025	
		0,10- - 0,15	0,17- - 0,37	0,40- - 0,70	1,10- - 1,40	0,20- - 0,35	0,90- - 1,10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,025	0,025	

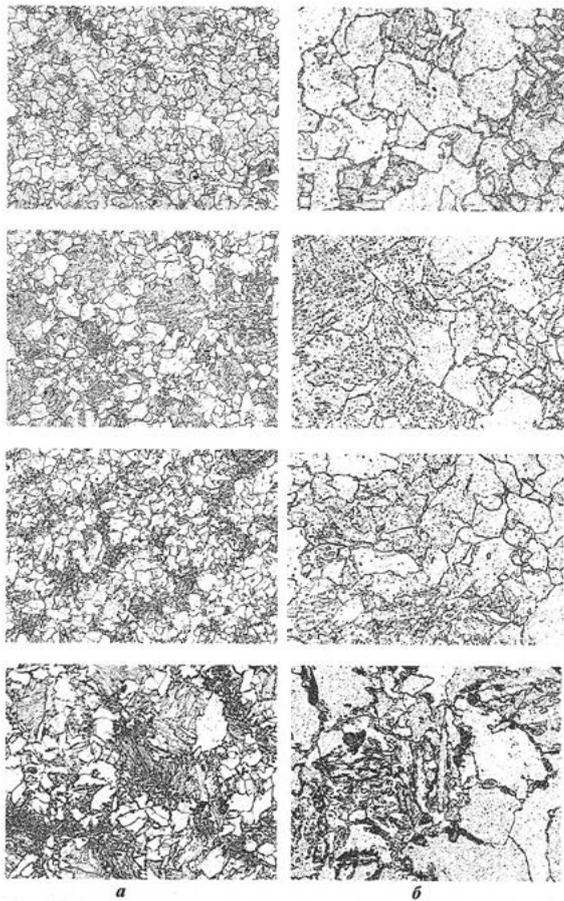
В макроструктуре всех исследованных труб не обнаружено недопустимых ТУ 1301-039-00212179-2010 дефектов – трещин, следов усадочных раковин, пузырей, шлаковых включений. Установлено различие макроструктуры металла труб размерами 630×28 и 377×50 мм. Относительно плотная и однородная макроструктура с хаотично расположенными точечными растрывами выявлена по всему сечению трубы размером 630×28 мм и в наружных участках трубы размером 377×50 мм (на глубине ~ 20 мм от поверхности). В средних слоях макро-

темплетов трубы размером 377×50 мм четко просматриваются остатки литой дендритной структуры с уменьшением степени развития к внутренней поверхности. В макроструктуре указанной трубы выявлены зоны различной травимости (послойная кристаллизация) – результат колебания теплового режима выплавки [2]. Точечные растрывы (размером до 0,5 мм) в макроструктуре трубы размером 377×50 мм расположены как хаотично по всему сечению, так и в виде скоплений в зоне повышенной травимости.

Основные виды неметаллических включений в металле исследованных труб, характер которых зависит от параметров электрического режима плавки и состава флюса [3], – глобулярные силикаты, оксиды алюминия, а также отдельные включения оксисульфидов и нитридов. Линейные размеры большинства включений, относительно равномерно расположенных по сечению, составляют от 10 до 25 мкм. Однако в микроструктуре нижней части трубы размером 377×50 мм обнаружены единичные глобулярные силикаты (размером ~ 60 мкм) до 5 баллов по шкале ГОСТ 1778-70, что не соответствует требованиям технических условий на котельные трубы. В микроструктуре металла всех исследованных образцов труб выявлена ненормируемая НД микропористость (преимущественно в сердцевине и внутренних слоях), в том числе в ме-

стах скопления включений вследствие их высокой выкрашиваемости и растрываемости.

Микроструктура металла труб обоих типоразмеров состоит из фрагментированного и безструктурного отпущенного бейнита, феррита, избыточных карбидов (с различным соотношением структурных составляющих по сечению и длине труб) (рис. 1, 2) и может быть оценена 3-5 сдаточными баллами по шкалам Приложения В к ТУ 14-3-460:2009. Исключение составила нижняя часть трубы размером 377×50 мм, где выявлена феррито-бейнитная структура с пере-



Результаты металлографических исследований свидетельствуют о необходимости контроля микроструктуры труб ЭШВ из стали 15X1M1Ф-III, целесообразности разработки специальных шкал и введения требований по микроструктуре в НД на трубы ЭШВ из низколегированной стали.

Кратковременные механические свойства металла трубы размером 630×28 мм при комнатной и повышенных температурах удовлетворяют требованиям НД (табл. 2, 3).

Таблица 2. Механические свойства металла труб ЭШВ при комнатной температуре

Размер труб, D×S, мм	Место отбора проб	Механические свойства*			
		предел прочности, σ_B , Н/мм ²	предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	относительное удлинение, δ_5 , %	относительное сужение, ψ , %
377×50	продольные образцы верхняя часть	<u>502-505</u> 503,5	<u>317-328</u> 322,5	<u>29,0-30,0</u> 29,5	<u>74,0-74,0</u> 74,0
	поперечные образцы верхняя часть	<u>513-518</u> 515,5	<u>326-328</u> 327	<u>30,0-31,0</u> 30,5	<u>73,0-73,5</u> 73,0
	продольные образцы нижняя часть	<u>491-498</u> 494,5	<u>315-322</u> 318,5	<u>31,0-31,0</u> 31,0	<u>74,0-74,0</u> 74,0
	поперечные образцы нижняя часть	<u>509-512</u> 510,5	<u>324-326</u> 325	<u>29,5-31,0</u> 30,0	<u>72,5-73,0</u> 72,75
630×28	продольные образцы верхняя часть	<u>549-560</u> 554,5	<u>383-392</u> 387,5	<u>27,0-28,0</u> 27,5	<u>74,0-75,0</u> 74,5
	поперечные образцы верхняя часть	<u>584-605</u> 594,5	<u>408-410</u> 409	<u>26,0-26,5</u> 26,25	<u>73,0-73,5</u> 73,25
	продольные образцы нижняя часть	<u>540-555</u> 547,5	<u>348-352</u> 350	<u>27,5-27,5</u> 27,5	<u>75,0-75,0</u> 75,0
	поперечные образцы нижняя часть	<u>557-585</u> 571	<u>376-415</u> 395,5	<u>27,5-28,0</u> 27,75	<u>73,0-75,5</u> 74,25
нормы ТУ 1301-039-00212179-2010		490-655	не менее		
нормы ТУ 14-3-460:2009	продольные образцы	490-686	315	18	50
	поперечные образцы	490-686	314	16	45

Рис. 1. Характерные микроструктуры металла труб ЭШВ из стали 15X1M1Ф-III в состоянии поставки: а - ×100, б - ×500

кристаллизованным перлитом (перегрев при отпуске), соответствующая 9 браковочному баллу.

Отличительной особенностью микроструктуры исследованных труб ЭШВ после термической обработки является ее неоднородность по периметру и длине труб. В структуре труб сохранилась радиально-осевая полосчатость в распределении структурных составляющих, характерная для литого металла ЭШВ, наиболее ярко выраженная в трубе размером 377×50 мм. Бейнит различной степени дифференциации в наружном и внутреннем слоях расположен под углом к поверхности в виде «елочки», а в сердцевине образует сетку различной степени замкнутости (рис. 2).

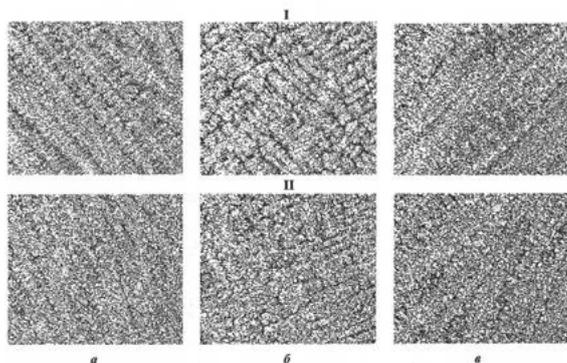


Рис. 2. Микроструктура металла по сечению труб ЭШВ из стали 15X1M1Ф-III размерами 377×50 (I) и 630×28 мм (II), ×25: а – наружная поверхность, б – сердцевина, в – внутренняя поверхность

* В числителе указаны минимальное и максимальное, в знаменателе – среднее значение характеристики

Таблица 3. Механические свойства металла труб ЭШВ при повышенных температурах

Размер труб, D×S мм	Место отбора проб	Температура испытания °С	Механические свойства*			
			предел прочности, σ_B , Н/мм ²	предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	относительное удлинение, δ_5 , %	относительное сужение, Ψ , %
377×50	верхняя часть	400	472	256	23,0	69,0
		450	439	222	22,5	71,0
		500	385	203	27,5	76,0
	нижняя часть	400	462	233	23,0	67,0
		450	441	216	24,0	70,0
		500	403	208	23,0	72,5
630×28	верхняя часть	400	506	289	21,0	71,0
		450	472	282	22,5	71,5
		500	427	278	25,0	74,5
	нижняя часть	400	503	294	23,5	68,5
		450	468	276	23,5	72,5
		500	413	259	24,0	75,0
нормы ТУ 1301-039-00212179-2010	не менее					
	400	-	245	-	-	
	450	-	230	-	-	
	500	-	210	-	-	
нормы ТУ 14-3-460:2009	400	-	235	-	-	
	450	-	225	-	-	

* Среднее значение характеристики

Металл трубы размером 377×50 мм отличается низкими прочностными свойствами (при высокой пластичности). Значения предела прочности при комнатной температуре находятся на нижнем уровне, а предела текучести при повышенных температурах – ниже норм, установленных техническими условиями.

Значения ударной вязкости при комнатной температуре труб ЭШВ исследованных размеров значительно превышают нормы НД, при этом доля вязкой составляющей в изломах всех образцов – более 50 % (табл. 4).

Особенностью труб ЭШВ являются несколько более высокие значения механических свойств на поперечных образцах по сравнению с продольными.

Металл труб обоих типоразмеров характеризуется невысоким уровнем длительной прочности, что связано с особенностями их структурного состояния и химического состава. Предел длительной прочности трубы размером 377×50 мм

Таблица 4. Результаты испытаний на ударный изгиб при комнатной температуре металла труб ЭШВ

Место отбора проб, направление вырезки	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ² ; доля вязкой составляющей, В, % труба 630x28 мм		Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ² ; доля вязкой составляющей, В, % труба 377x50 мм		
	КСУ	В	КСУ	В	
верхняя часть, продольные образцы	273,9	79	223	68	
	219,5	63	255	75	
			242	70	
			250	80	
нижняя часть, продольные образцы	200,5	61	211	61	
	211,1	64	214	61	
			217	66	
			219	61	
верхняя часть, поперечные образцы	205,8	61	214	68	
	261,1	72	242	75	
			238	75	
			252	68	
нижняя часть, поперечные образцы	195,2	52	207	61	
	221,8	66	216	66	
			221	63	
			230	66	
нормы ТУ 14-3-460:2009	не менее				
	продольные	49	-	49	-
	поперечные	39	-	39	-
нормы ТУ 1301-039-00212179-2010	59	-	59	-	

при температуре 550 °С за 100 тыс. ч составил 78 Н/мм², что ниже требований ТУ 1301-039-00212179-2010 и ТУ 14-3-460:2009 с учетом допустимого 20 %-ного снижения от нормы (105,0-84,0 и 104,0-83,2 Н/мм² соответственно). Значение указанной характеристики трубы размером 630×28 мм удовлетворяет требованиям НД с учетом допустимого снижения от нормы и составляет 101 Н/мм². Следует отметить высокую деформационную способность металла исследованных труб в условиях длительного нагружения при различных испытательных напряжениях и высокой температуре. Значения показателя длительной пластичности (относительное удлинение) – от 14,6 до 40,0 % и от 15,9 до 42,0 % для труб размерами 630×28 и 377×50 мм соответственно.

Таким образом проведенными исследованиями показана необходимость дальнейшего совершенствования технологии электрошлакового переплава и термической обработки труб ЭШВ из стали 15Х1М1Ф-Ш.

Выводы

Установлено соответствие механических свойств, в том числе характеристик жаропрочности, трубы из стали 15Х1М1Ф-Ш размером 630×28 мм требованиям ТУ 14-3-460:2009 и ТУ 1301-039-00212179-2010. Металл трубы размером 377×50 мм отличается низким уровнем (ниже норм технических условий) прочностных

свойств при повышенных температурах в условиях кратковременного и длительного нагружения.

Выявлены характерные особенности микроструктуры металла труб, изготовленных методом электрошлаковой выплавки, и показана целесообразность введения требований по микроструктуре в технические условия на трубы ЭШВ из низколегированной стали.

Показана перспективность использования в объектах теплоэнергетики Украины труб, изготовленных методом электрошлаковой выплавки из стали 15Х1М1Ф-Ш размером 630×28 мм.

Установлена необходимость совершенствования технологии производства труб ЭШВ из стали 15Х1М1Ф-Ш и продолжения дальнейших исследований качества металла таких труб.

Библиографический список

1. ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия.
2. Лейбензон С. А. Электрошлаковый переплав и качество металла. – М.: Металлургия, 1985. - 63 с.
3. Медовар Б. И., Латаш Ю. В. Электрошлаковый переплав. – М.: Металлургия, 1970. - 79 с.

Поступила 06.08.2013



ЖУРНАЛ «МГП» – ДЛЯ ТЕХ, КТО РАБОТАЕТ В МЕТАЛЛУРГИИ И ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ!

Стоимость рекламы (в гривнах):

<i>Площадь, формат</i>	<i>Черно-белая</i>	<i>Полноцветная</i>
<i>1 стр. обложки (1/2 стр)</i>		7 000
<i>4 стр. обложки:</i>		
<i>страница (А4)</i>	-	5 000
<i>на страницах журнала:</i>		
<i>страница (А4)</i>	1 000	2 000
<i>1/2 стр.</i>	500	1 000

Вложение в журнал рекламных листовок: А4 – 1 грн.; А5 – 0,5 грн.

Публикация статьи на правах рекламы – 750 грн. за страницу.

Адрес редакции:

49027, Днепропетровск, ул. Дзержинского, 23,

тел/факс: (0562) 46-12-95, (056) 744-81-66.

e-mail: metinfo@metinform.dp.ua;

http://www.metinfo.dp.ua