

Опрышко Л. В., Головняк Т. В., Полтава И. И.  
ГП «НИТИ»

## Перспективы использования в теплоэнергетике Украины труб зарубежного производства

Исследованы химический состав, микроструктура, механические свойства, в том числе жаропрочные, котельных труб стали марок 20 и 12Х1МФ, изготовленных по ТУ 14-3-460 зарубежными производителями: Z-Group Steel Holding divize Válcovny trub Chomutov (Чехия), TUBOS REUNIDOS INDUSTRIAL, S.L.U. (Испания), BENTELER Steel/Tube GmbH (Германия) и SHANGHAI RONGFA ENTERPRISE DEVELOPMENT LTD. (Китай).

Выявлены характерные особенности исследованных качественных показателей металла труб, обусловленные качеством исходной трубной заготовки, технологией их изготовления, а также требованиями национальных стандартов. Установлена перспективность использования в объектах теплоэнергетики Украины труб производства стран Западной Европы и Китая при условии аттестации после совершенствования технологии их изготовления и обеспечения качества труб в полном соответствии с требованиями отечественной нормативной документации. Ил. 4. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** котельные трубы, слиток стационарной разливки, слиток непрерывной разливки, химический состав, микроструктура, кратковременные механические свойства, характеристики жаропрочности

*Investigations were carried out to determine chemical composition, microstructure and mechanical properties (including high-temperature ones) of boiler tubes produced of steel grades 20 and 12Cr1MoV according to specification TU 14-3-460 by outside manufacturers: Z-Group Steel Holding divize Válcovny trub Chomutov (Czech Republic), TUBOS REUNIDOS INDUSTRIAL, S.L.U. (Spain), BENTELER Steel/Tube GmbH (Germany) and SHANGHAI RONGFA ENTERPRISE DEVELOPMENT LTD. (China).*

*Features of the studied qualitative indicators of tube metal determined by quality of the starting tube billets, their manufacturing process and requirements of national specifications were revealed. Availability of use of tubes produced in Western Europe and China at Ukrainian heat and power plants has been established provided that the tubes are certified after improvement of their production processes and their quality is ensured in a complete conformance to the national standards.*

**Keywords:** boiler tube, stationary cast ingot, continuously cast ingot, chemical composition, microstructure, short-time mechanical properties, high-temperature strength characteristics

Основными элементами котельного агрегата тепловой электростанции (ТЭС) являются трубы по ТУ 14-3-460 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов» из различных по химическому составу (степени легирования) сталей [1]. Наибольшая доля (~ до 90 %) приходится на трубы стали марок 20 и 12Х1МФ.

Сложные условия работы котлоагрегатов ТЭС (высокая температура газов, высокие давление и температура пара, большие напряжения, повышенная коррозия и эрозия металла в течение длительного времени) обуславливают жесткие требования к используемым для их изготовления трубам: по состоянию поверхностей, химическому составу, структуре, физико-механическим характеристикам, в том числе служебным свойствам [2].

Требуемый комплекс качественных показателей котельных труб и, соответственно, их эксплуатационную надежность в течение расчетного срока службы (100-200 тыс. часов) обеспечивают использование высокока-

чественной трубной заготовки и параметры технологии изготовления труб (горячее и холодное формоизменение, термическая обработка).

Согласно требованиям ТУ 14-3-460 промышленное производство и поставку потребителю котельных труб предприятия-изготовители осуществляют только после аттестации ГП «НИТИ» технологии их производства, с проведением исследований качественных показателей труб, в том числе характеристик жаропрочности [1].

Основными производителями котельных труб по ТУ 14-3-460 являются аттестованные ГП «НИТИ» трубные заводы Украины (ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ», ООО «НЗСТ «ЮТИСТ», ПАО «ДТЗ», ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ») и России (ОАО «СинТЗ», ОАО «ВТЗ», ОАО «ПНТЗ», ОАО «ЧТПЗ»).

В последнее время резко возросла потребность теплоэнергетики Украины в котельных трубах по ТУ 14-3-460, в первую очередь из стали марок 20 и 12Х1МФ.

Сложившаяся политическая и экономическая ситуация в Украине и России потребовала поиска новых производителей котельных труб. В настоящее время намерения изготавливать и поставлять в Украину трубы стали марок 20 и 12Х1МФ по ТУ 14-3-460 имеют предприятия стран Западной Европы (Германия, Чехия, Испания, Словения и др.), а также Китая. Для изготовления котельных труб эти страны используют подобное применяемому в странах СНГ деформирующее и термическое оборудование.

Трубные предприятия Западной Европы не имеют опыта производства котельных труб по ТУ 14-3-460, так как в Еuronормах (EN 10216-1 и EN 10216-2) отсутствуют полные аналоги отечественных котельных сталей [3, 4]. В теплоэнергетике Китая на протяжении многих десятилетий широко используются стали марок 20 и 12Х1МФ. Однако требования стандарта Китая (GB 5310) на трубы из этих марок по ряду показателей отличаются от отечественного стандарта [5].

Для зарубежных производителей характерно широкое применение в качестве котельной трубной заготовки слитков непрерывной и стационарной разливки (последние применяют на агрегатах с пилигримовым станом). ТУ 14-3-460 также предусматривают, наряду с ковальной или катаной заготовкой, полученной из слитка стационарной и непрерывной разливки, использование недеформированной непрерывнолитой заготовки стали марок 20 и 12Х1МФ. Такая технология разработана и внедрена с участием ГП «НИТИ» на трубных заводах России [6-8] и планируется – на предприятиях Украины. Использование же в качестве трубной заготовки на трубопрокатном агрегате с пилигримовым станом слитка стационарной разливки в странах СНГ разрешено только для изготовления котельных труб из углеродистой стали, эксплуатируемых при более низких температуре и давлении (по ТУ 14-3-190).

Отличительной особенностью предприятий Западной Европы является изготовление спо-

собом горячей деформации котельных труб из углеродистых и низколегированных сталей диаметром 57 мм и менее, традиционно производимых в странах СНГ холодной деформацией. Большинство предприятий Китая (в отличие от заводов Украины и России) изготавливают котельные холоднодеформированные трубы стали марок 20 и 12Х1МФ в один проход с меньшей деформацией, как правило, на волочильном стане. Кроме того, трубные заводы Китая, в большинстве случаев, проводят нормализацию котельных труб углеродистой стали из межкритического интервала температур, что разрешено китайским национальным стандартом и недопустимо требованиями ТУ 14-3-460.

Для оценки возможности использования в объектах теплоэнергетики Украины труб производства стран Западной Европы и Китая проведены исследования их качественных показателей (химический состав, структура, кратковременные механические свойства при комнатной и повышенных температурах, жаропрочность) на соответствие требованиям ТУ 14-3-460.

### Материал и методика исследований

Материалом послужили котельные горячедеформированные трубы производства BENTELER Steel/Tube GmbH (Германия), TUBOS REUNIDOS INDUSTRIAL, S.L.U. (Испания) и Z-Group Steel Holding divize Válcovny trub Chomutov (Чехия), а также холоднодеформированные трубы производства SHANGHAI RONGFA ENTERPRISE DEVELOPMENT LTD. (Китай) (табл. 1).

Горячедеформированные трубы изготовлены способом горячей прокатки на трубопрокатных агрегатах с пилигримовым (трубы 377×15 мм стали 20 и 426×20 мм стали 12Х1МФ, Чехия) и с непрерывным станом (трубы 32×6 мм стали 12Х1МФ, Германия и Испания; трубы 42×7 мм стали 20, Испания) с использованием в качестве трубной заготовки слитков собственного производства стационарной и непрерывной разливки соответственно.

Таблица 1

Сортамент труб зарубежного производства

Размер труб D×S, мм	Марка стали	Способ производства	Изготовитель
377×15	20	горячая деформация	Z-Group Steel Holding divize Válcovny trub Chomutov (Чехия)
426×20	12Х1МФ		
42×7	20	горячая деформация	TUBOS REUNIDOS INDUSTRIAL, S.L.U. (Испания)
32×6	12Х1МФ		
32×6	12Х1МФ	горячая деформация	BENTELER Steel/Tube GmbH (Германия)
32×6	20	холодная деформация	SHANGHAI RONGFA ENTERPRISE DEVELOPMENT LTD. (Китай)
32×6	12Х1МФ		

Холоднодеформированные трубы размером 32×6 мм изготовлены SHANGHAI RONGFA ENTERPRISE DEVELOPMENT LTD. (Китай) способом холодного волочения из передельных горячекатаных труб, полученных из деформированных непрерывнолитых заготовок производства Jiangsu Shagang Group Huaigang Special Steel Co., Ltd (сталь 20) и SHIJIAZHANG IRON & STEEL CO., LTD (сталь 12X1MФ).

Трубы указанного выше марочного и размерного сортамента, за исключением поставленных в состоянии после горячей прокатки труб испанского производства размером 42×7 мм стали 20, термически обработаны (нормализация с отпуском – трубы стали 12X1MФ, нормализация – трубы стали 20).

Химический состав металла труб определяли методом фотоэлектрического спектрального анализа на установке «СПЕКТРОМАХ» (Германия).

Микроструктуру металла труб исследовали после травления в 3 %-ном спиртовом растворе HNO<sub>3</sub> при 100 и 500-кратном увеличении и оценивали полосчатость структуры (сталь 20 и 12X1MФ), ориентацию феррита по видманштетту (сталь 20) и соотношение структурных составляющих (сталь 12X1MФ) по шкалам Приложений Б и В к ТУ 14-3-460.

Испытания на растяжение при комнатной температуре выполняли по ГОСТ 10006, при повышенных температурах – по ГОСТ 19040, на ударный изгиб (на образцах с U-образным надрезом) – по ГОСТ 9454.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145 при температурах 450 °С (сталь 20) и 550 °С (сталь 12X1MФ). Путем линейной экстраполяции графической зависимости времени до разрушения от напряжения в логарифмических координатах определяли предел длительной прочности за 100 тыс. часов.

рифмических координатах определяли предел длительной прочности за 100 тыс. часов.

**Результаты исследований**

По массовой доле нормируемых элементов металл труб всех исследованных производителей соответствует требованиям ТУ 14-3-460 (табл. 2). При этом металл труб размером 42×7 мм стали 20 (Испания) отличается от традиционно используемой в странах СНГ котельной углеродистой стали более высоким содержанием (~ в 2 раза) ненормируемого нормативной документацией упрочняющего элемента – Мо. В металле этих труб выявлено также повышенное содержание охрупчивающих легкоплавких цветных примесей: Cu (ближе к предельно допустимому значению), а также Pb, Sn, As и др., значительно превышающих требования действующих в странах СНГ современных стандартов на котельную непрерывнолитую заготовку.

В состоянии поставки микроструктура металла горячедеформированных труб из стали 20 размерами 377×15 мм (после нормализации) и 42×7 мм (после горячей прокатки) – феррито-перлитная и по нормированным показателям удовлетворяет требованиям ТУ 14-3-460: полосчатость структуры и ориентация по видманштетту не превышают 2-го и 1-го баллов соответственно (рис. 1а, 2а).

Структура металла труб размером 42×7 мм (Испания) отличается неравноосной формой зерен, свойственной горячедеформированному состоянию, а также неравномерностью по величине зерна с сохранением локальных участков, ориентированных по первичной дендритной структуре. Характерной особенностью микроструктуры указанных труб является образование обособленных выделений цементита перлита по границам отдельных зерен фер-

Таблица 2

**Химический состав металла труб**

Марка стали	Размер D×S, мм, изготовитель труб	Массовая доля элементов, %									
		C	Mn	Si	Mo	V	Cr	Ni	Cu	S	P
20	377×15, (Чехия)	0,20	0,54	0,24	-	-	0,12	0,01	0,16	0,010	0,012
	42×7, (Испания)	0,20	0,45	0,25	-	-	0,07	0,08	0,22	0,007	0,008
	32×6, (Китай)	0,19	0,53	0,24	-	-	0,02	0,01	0,02	0,005	0,017
требования ТУ 14-3-460 для стали 20		0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	-	-	не более				
							0,25	0,25	0,30	0,025	0,030
12X1MФ	426×20, (Чехия)	0,12	0,59	0,24	0,29	0,18	1,01	0,09	0,15	0,003	0,013
	32×6, (Испания)	0,12	0,52	0,24	0,30	0,18	1,04	0,06	0,16	0,005	0,006
	32×6, (Китай)	0,10	0,55	0,23	0,28	0,19	1,03	0,03	0,02	0,005	0,011
	32×6, (Германия)	0,14	0,68	0,28	0,30	0,16	1,05	0,13	0,08	0,004	0,004
требования ТУ 14-3-460 для стали 12X1MФ		0,10-0,15	0,40-0,70	0,17-0,37	0,25-0,35	0,15-0,30	0,90-1,20	не более			
								0,25	0,20	0,025	0,025



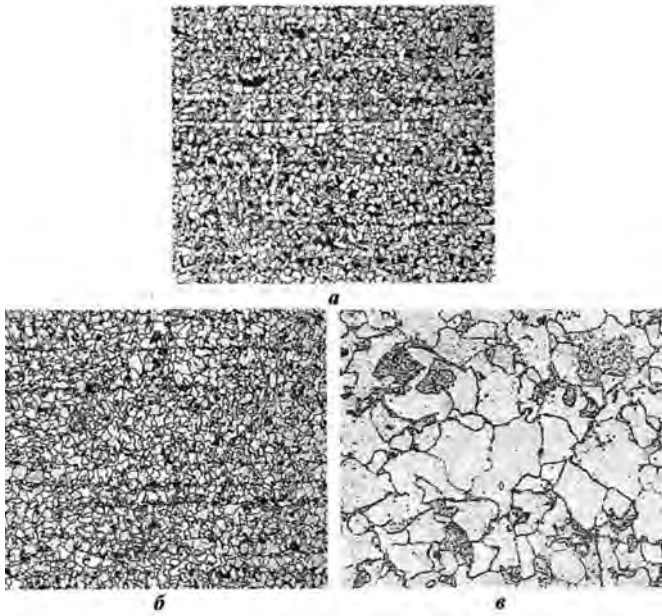


Рис. 1. Характерная микроструктура металла труб размерами 377×15 мм из стали 20 (а) и 426×20 мм из стали 12Х1МФ (б, в) (Чехия): а, б - ×100; в - ×500

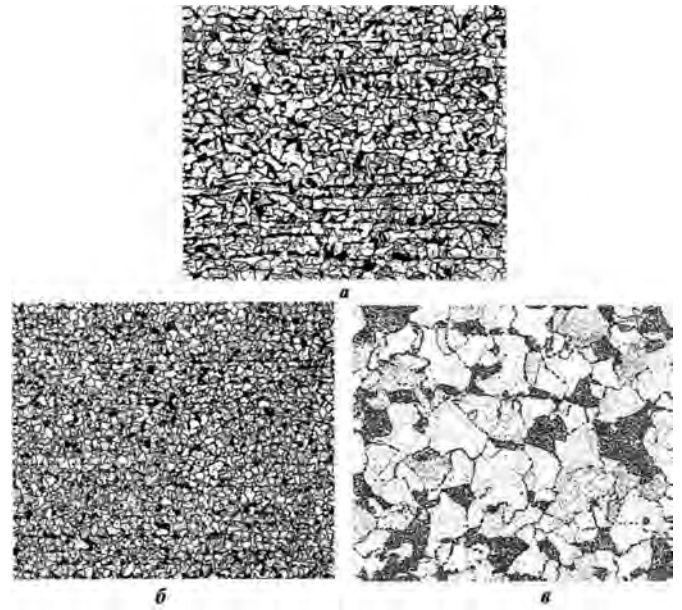


Рис. 2. Характерная микроструктура металла труб размерами 42×7 мм из стали 20 (а) и 32×6 мм из стали 12Х1МФ (б, в) (Испания): а, б - ×100; в - ×500

рита, значительно снижающих деформационную способность металла. Выявленные особенности структуры горячекатаных труб из стали 20 размером 42×7 мм связаны как с качеством исходной непрерывнолитой заготовки, так и температурно-деформационными параметрами их прокатки.

Микроструктура металла холоднодеформированных труб из стали 20 размером 32×6 мм (Китай) представляет собой структуру неполной перекристаллизации, состоящую из ферритных зерен, практически не претерпевших изменение при нагреве под нормализацию, и измельченных зерен перлита, с ярко выраженной полосчатостью 3-го предельно допустимого балла (рис. 3а). Образование такой структуры связано, в первую очередь, с низкой (в межкритическом интервале) температурой нормализации этих труб, не соответствующей требованиям ТУ 14-3-460.

Микроструктура металла всех исследованных труб из стали 12Х1МФ состоит, в основном, из отпущенных феррита и перлита (рис. 1б, в; 2б, в; 3б, в; 4а-г). В структуре металла горячедеформированных труб размером 32×6 мм (Германия) выявлены также единичные крупные зерна бейнита.

По соотношению структурных составляющих металл труб из стали 12Х1МФ, в основном, удовлетворяет требованиям ТУ 14-3-460 и оценивается 4-5 сдаточными баллами. В металле труб размером 426×20 мм (Чехия), наряду со структурой 5-го сдаточного балла, выявлены участки браковочной структуры 6-го балла (менее 15 %

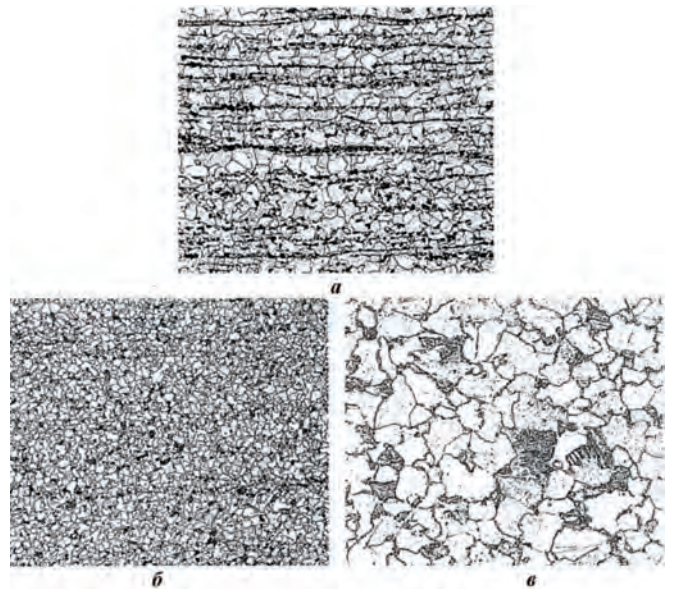


Рис. 3. Характерная микроструктура металла труб размером 32×6 мм из стали 20 (а) и 12Х1МФ (б, в) (Китай): а, б - ×100; в - ×500

перлита). Полосчатость структуры исследованных труб из стали 12Х1МФ соответствует норме технических условий. Характерной особенностью микроструктуры труб из стали 12Х1МФ всех производителей являются ее мелкозернистость и, как правило, преимущественное расположение перлита по границам зерен, связанное с температурно-временными параметрами термической обработки.

Металл труб из стали 12Х1МФ размером 32×6 мм (Германия) характеризуется также неоднородностью в распределении структурных составляющих и ярко выраженной по всей толщине



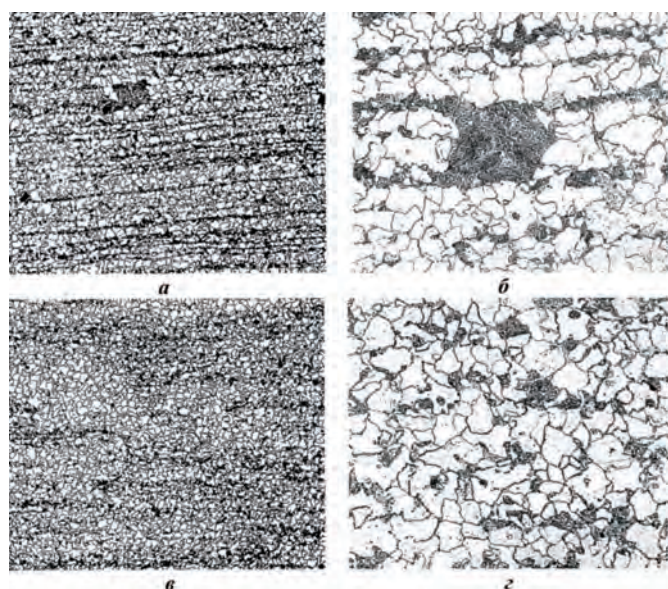


Рис. 4. Характерная микроструктура металла труб размером 32×6 мм из стали 12Х1МФ (Германия): а, в – ×100; б, г – ×500

стенки структурной полосчатостью 3-го предельно допустимого балла, обусловленных химической неоднородностью металла, наследованной от исходной непрерывнолитой заготовки.

Кратковременные механические свойства при комнатной и повышенных температурах металла труб размером 32×6 мм всех исследованных производителей, а также размерами 377×15 мм из стали 20 и 426×20 мм из стали 12Х1МФ (Чехия) удовлетворяют требованиям ТУ 14-3-460 (табл. 3, 4).

Металл горячекатаных труб из стали 20 размером 42×7 мм (Испания) отличается высоким

уровнем прочностных свойств при комнатной и повышенных температурах и, соответственно, низкими значениями относительного удлинения (на нижнем пределе, а на отдельных образцах – меньше нормы) (табл. 3). Это связано с особенностями химического состава и структурного состояния металла указанных труб.

Выявленная тенденция кратковременных механических свойств (высокая прочность и низкая пластичность) труб размером 42×7 мм сохранилась и при длительном их нагружении. Значение предела длительной прочности металла этих труб за 100 тыс. часов при температуре 450 °С превысило ~ в 2 раза норму ТУ 14-3-460 (табл. 4). Металл указанных труб характеризуется низкой длительной пластичностью (относительное удлинение – от 2,5 до 9,2 %), что может привести к их аварийному хрупкому разрушению при эксплуатации.

Длительная прочность металла труб остальных исследованных размеров и марок стали удовлетворяет требованиям ТУ 14-3-460, в том числе с учетом допустимого 20 %-ного отклонения от нормы (табл. 4). При этом значения предела длительной прочности за 100 тыс. часов труб из стали 12Х1МФ размером 426×20 мм (Чехия) при температуре 550 °С, а также труб из стали 20 размером 32×6 мм (Китай) при температуре 450 °С находятся на нижнем пределе, с учетом допустимого 20 %-ного снижения от нормы. Металл всех исследованных труб, кроме труб размером 42×7 мм, характеризуется, в основном, удовлетворительной длительной пластичностью (относительное удлинение – от 11,3 до 44,3 %).

Таблица 3

Механические свойства металла труб при комнатной температуре

Марка стали	Размер D×S, мм, (страна-изготовитель)	Механические свойства при комнатной температуре				
		Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{\text{T}} (\sigma_{0,2})$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta_5$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
20	377×15, (Чехия)	467-471*	304-312 *	31,0-33,0*	66,0-67,0*	152-181*
	42×7, (Испания)	482-508	327-352	23,5-26,5	-	-
	32×6, (Китай)	435-436	266-270	36,5-37,5	-	-
требования ТУ 14-3-460 для стали 20		412-549	не менее			
			216	24,0/22,0**	45,0/40,0**	49/39**
12Х1МФ	426×20, (Чехия)	489-494*	370-388*	28,0-32,0*	75,0-77,0*	228-300*
	32×6, (Испания)	535-556	(405-411)	31,0-31,5	-	-
	32×6, (Китай)	504-517	388-392	31,0-31,0	-	-
	32×6, (Германия)	527-541	(385-399)	23,0-29,0	56,0-65,0	-
требования ТУ 14-3-460 для стали 12Х1МФ		441-637	не менее			
			274	21,0/19,0**	55,0/50,0**	59/49**

Примечание. \* – испытания на поперечных образцах; \*\* – в числителе указаны нормы для продольных, в знаменателе – для поперечных образцов.

Предел текучести при повышенных температурах и предел длительной прочности металла труб

Марка стали	Размер D×S, мм, (страна-изготовитель)	Предел текучести $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ , Н/мм <sup>2</sup>			Предел длительной прочности за 10 <sup>5</sup> час. $\sigma_{дл}$ , Н/мм <sup>2</sup>	
		температура, °С			температура, °С	
		250	400	450	450	550
20	377×15, (Чехия)	(243-256)	(173-205)	(170-174)	94	-
	42×7, (Испания)	446-471	(344-350)	(268-312)	150	-
	32×6, (Китай)	(278-302)	(272-273)	(267-268)	63	-
требования ТУ 14-3-460 для стали 20		не менее			78±20 %	-
		196	137	127		
12Х1МФ	426×20, (Чехия)	-	(233-240)	(220-240)	-	77
	32×6, (Испания)	-	(419-439)	(359-391)	-	103
	32×6, (Китай)	-	(267-324)	(284-313)	-	103
	32×6, (Германия)	-	(282-328)	(264-300)	-	96
требования ТУ 14-3-460 для стали 12Х1МФ		не менее			-	97±20 %
		-	216	206		

**Выводы**

1. Выявлены особенности химического состава, структуры и свойств котельных труб из стали марок 20 и 12Х1МФ зарубежного производства, обусловленные качеством исходной трубной заготовки, технологией изготовления и влиянием требований национальных стандартов.

2. Показана необходимость совершенствования технологии изготовления по ТУ 14-3-460 котельных труб из углеродистых и низколегированных сталей на предприятиях стран Западной Европы и Китая.

3. Установлена перспективность использования в тепловой энергетике Украины труб предприятий стран Западной Европы и Китая (наряду с трубами стран СНГ) при условии аттестации технологии их изготовления и обеспечения качественных показателей труб, в том числе служебных свойств, в полном соответствии с требованиями ТУ 14-3-460.

**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. – 50 с.  
 2. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П. А. Антикайн. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

3. EN 10216-1:2002 Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 1: Non-alloy steel tubes with specified room temperature properties. – 25 p.

4. EN 10216-2:2002 Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties. – 40 p.

5. GB 5310 (2008) (Chinese) Seamless steel tubes and pipes for high pressure boiler. – 20 p.

6. Опрышко Л. В., Перепелица Т. В., Герасименко П. В. Особенности структуры и свойств котельных горячекатаных труб из недеформированной непрерывнолитой заготовки углеродистой стали // *Металлознание та обробка металів*. – 2012. – № 4. – С. 3-9.

7. Опрышко Л. В., Ващило Т. П., Кобус А. А. Внедрение непрерывнолитого металла в промышленное производство котельных труб на ОАО «Производственное объединение «Волжский трубный завод» // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 2001. – № 1. – С. 56-60.

8. Опрышко Л. В., Полтава И. И. Опыт производства котельных горячекатаных труб из непрерывнолитой заготовки // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 2010. – № 4. – С. 53-57.

**Поступила 04.06.2015**