



ВНИИНМ
РОСАТОМ

МАЯТ-2021

Исследования в обоснование технологии производства
кессонной трубы $\text{Ø}20 \times 1,5$ мм сплава Э635 для активной зоны
РУ РИТМ-400 атомного ледокола «Лидер»

Ожмегов К.В., Заводчиков А.С.
АО «ВНИИНМ», г. Москва

Постановка задачи и значимость

27.01.2020 Правительство РФ утвердило план развития инфраструктуры Северного морского пути (СМП) до 2035 года. Согласно которому в декабре 2027 года должен быть построен головной ледокол проекта «Лидер» мощностью 120 мегаватт, способный прокладывать путь во льдах толщиной до четырех метров. В ледоколе будут эксплуатироваться по 2 активных зоны РУ РИТМ-400, в каждой из которых по 800 шт. кессонных труб. С 2030 по 2032 год запланировано построить еще два таких атомохода.

В реакторных установках прошлых поколений используются трубы $\varnothing 20,0 \times 1,5$ мм и $\varnothing 19,0 \times 1,5$ мм из сплава Э110 серийно выпускаемые в АО ЧМЗ, однако ни прочностные характеристики, ни надежность (бездефектность, радиационная стойкость) данных труб не позволяли бы эксплуатировать их весь планируемый срок службы без замены. Тем самым снижая ресурс всей установки.

Ранее выполненные АО «ВНИИНМ» и АО «ОКБМ Африкантов» исследования показали возможность повышения эксплуатационных характеристик за счет применения сплава Э635.

Требование		Новое ТУ 001.470-2020	Старые ТУ
T=20°C	σ_B , кгс/мм ²	не менее 45	не менее 30
	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	не менее 33	-
	δ , %	не менее 26	не менее 20
T=350°C	σ_B , кгс/мм ²	не менее 22	-
	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	не менее 16	-
	δ , %	не менее 31	-
Сплошность		Ультразвуковой контроль	Визуальный контроль
Коррозионная стойкость, мг/дм ²		не более 22 / контроль внешнего вида	- / контроль внешнего вида
Коэффициент ориентации гидридов		не более 0,40	-
Геометрическая точность	Наружный диаметр	$\pm 0,08$	$\pm 0,1$
	Толщина стенки	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$
	Отклонение от прямолинейности	Не более 0,1 на 200 мм / Не более 0,5 мм на 1 м	- / Не более 1,5 мм на 1 м

Использование более требовательного к условиям деформирования и термообработки сплава Э635 (в сравнении с Э110), значимое ужесточение требований (таблица 1) к механическим свойствам, геометрической точности и появление новых требований по ориентации гидридов, коррозионной стойкости и бездефектности привело к необходимости разработки новой технологии изготовления и новых технических условий.

Цель и задачи

Цель работы: Постановка на производство кессонных труб $\varnothing 20 \times 1,5 \times \text{мм}$ из сплава Э635 на АО ЧМЗ.

Для реализации цели необходимо было провести следующие работы:

1. Выполнить анализ технологических параметров изготовления и контрольных характеристик труб $\varnothing 20,0 \times 1,5 \text{ мм}$ и $\varnothing 19,0 \times 1,5 \text{ мм}$ из сплава Э110 серийно выпускаемых в АО ЧМЗ.
2. Разработать деформационную схему изготовления экспериментальных труб с учетом возможностей существующего производства АО ЧМЗ.
3. Разработать предварительные рекомендации по режимам промежуточных и финишной термической и хим. обработки экспериментальных труб.
4. Разработать ПИ на технологическую документацию для выпуска экспериментальных партий по предложенным деформационно-термическим схемам.
5. Выполнить исследования структуры и определить механические свойства труб $\varnothing 20,0 \times 1,5 \text{ мм}$ из сплава Э635, изготовленных по различным технологическим вариантам, на разных стадиях их изготовления.
6. Выбрать вариант изготовления исходя из результатов оценки характеристик экспериментальных труб.
7. Разработать ПИ технологическую документацию на деформационно-термическую схему по выбранному варианту изготовления опытно-промышленных партий труб.
8. Разработать Технические условия.
9. Разработать Программу приемочных испытаний кессонных труб.
10. Разработать и аттестовать методики контроля кессонных труб.
11. Изготовить опытно-промышленную партию кессонных труб $\varnothing 20,0 \times 1,5 \text{ мм}$ из сплава Э635 и провести их контроль на соответствие требованиям ТУ и программе испытаний.
12. Провести приемочные испытания кессонных труб $\varnothing 20,0 \times 1,5 \text{ мм}$ из сплава Э635.

Наименование операции	$\epsilon_s, \%$	$\epsilon_D, \%$	$\epsilon_\Sigma, \%$
Закалка	β - области		
Термообработка	α - области		
Заготовка	-	-	-
Нагрев под прессование	α - области		
Прессование	-	-	~ 90
Мех. обработка	-	-	-
Термообработка	α - области		
Прокатка 1	40-45	25-35	50-70
Термообработка	α - области		
Прокатка 2	40-60	20-30	50-70
Термообработка	α - области		

Изготовление экспериментальных партий кессонных труб Ø20×1,5 мм из сплава Э635



ВНИИМ
РОСАТОМ

В связи с тем, что кессонные трубы Ø20×1,5 мм из сплава Э635 изготавливались в АО ЧМЗ впервые, было выполнено проектирование и изготовление нового технологического инструмента и оснастки для прессования, расточки и холодной прокатки, в том числе:

Зенкер для расточки;

Прокатный инструмент:

- Калибры и оправку для прохода 1;

- Калибры и оправку для прохода 2;

Для осуществления контроля готовых кессонных труб Ø20×1,5 мм из сплава Э635 изготовлены и аттестованы стандартные образцы для УЗ-контроля.

Были разработаны 9 ПИ к ТД и КД.

Отличие в изготовлении партий № 368-20-1/1 и 368-20-1/5 состоит в режимах термообработки труб промежуточного размера. Трубы партии № 368-20-1/1 на промежуточных размерах (после прессования и прокатки 1) термообработывали при температуре близкой к переходу из $\alpha \rightarrow \alpha+\beta$. Трубы партии 368-20-1/5 на тех же промежуточных размерах термообработывали в α -области. В процессе изготовления проведена отработка режима финишной термообработки. Критерием выбора режима окончательного отжига являлись результаты испытаний механических свойств (таблица 3).

Режим отжига	Продольное направление					
	Тисп.=20 ⁺¹⁵ ₋₁₀ °С			Тисп.=350±5 °С		
	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
партия 368-20-1/1, отжиг на промежутке $\alpha \rightarrow \alpha+\beta$ области						
Состояние после ХД	77,6	73,4	12,3	-	-	-
Т=540 °С (лаб.)	60,6	43,5	28,4	35,5	25,6	30,7
	61,0	43,2	26,2	34,3	24,6	33,1
Т=560 °С (лаб.)	55,7	38,0	32,7	30,6	18,7	39,0
	55,1	37,2	32,9	29,9	19,1	38,8
Т=560 °С (пром.)	54,2	37,8	32,8	30	20	35
	55,0	37,8	33,2	31	20	34
Т=580 °С (лаб.)	53,0	36,9	33,1	28,0	16,6	38,8
	52,7	37,0	35,1	27,8	16,7	41,1
Т=580 °С (пром.)	52,2	34,9	34,6	26,8	15,6	38,6
	51,8	35,6	36,3	26,7	15,7	39,0
Т=620 °С (лаб.)	51,7	34,8	33,7	26,8	15,4	38,0
	53,0	35,1	32,8	26,7	15,7	36,6
партия 368-20-1/5, отжиг на промежутках α -области						
Т=560 °С (лаб.)	54	38	37	29	19	41
	54	38	38	28	18	41
Требования, не менее	45	33	30	22	15	30

Контроль и испытания опытно-промышленных партий кессонных труб $\text{Ø}20 \times 1,5$ мм из сплава Э635



ВНИИМ
РОСАТОМ

Для контроля коэффициента ориентации гидридной фазы был разработан порядок подготовки изображений и обсчета коэффициента ориентации гидридов на образцах от труб $\text{Ø}20 \times 1,5$ мм сплава Э635 по ТУ 001.470-2020, который составлялся применительно методике ОИ 01.425 (далее Порядок).

Согласно разработанному «Порядку» проведен контроль коэффициента ориентации гидридов на образцах от труб $\text{Ø}20 \times 1,5$ мм из сплава Э635 по ТУ 001.470-2020.

Образец	общее	Внутренний слой	Средний слой	Наружный слой
Внутренний слой	0,060	0,137	0,040	0,028
Наружный слой	<u>0,127</u>	0,000	0,039	0,315
Итоговое , с округлением до сотых	0,13	-	-	-

Партия 368-20-1/2				Партия 368-20-1/3			
№ обр.	Наружный слой	Внутренний слой	Итог	№ обр.	Наружный слой	Внутренний слой	Итог
1	<0,100	<0,100	<0,10	1	0,193	0,190	0,19
2	0,153	0,127	0,15	2	0,200	0,100	0,20
3	<0,100	0,105	0,11	3	0,259	0,141	0,26
4	0,119	0,102	0,12	4	0,302	0,116	0,30
5	0,106	<0,100	0,11	5	<0,100	0,119	0,12
6	<0,100	0,109	0,11	6	<0,100	0,168	0,17

Контроль и испытания опытно-промышленных партий кессонных труб Ø20×1,5 мм из сплава Э635



№ партии	Тисп.=20±15 °С			Тисп.=350± 5 °С		
	σ _в , кгс/мм ²	σ _{0,2} , кгс/мм ²	δ, %	σ _в , кгс/мм ²	σ _{0,2} , кгс/мм ²	δ, %
368-20-1/2	55	38	32	31	19	38
	55	40	32	31	20	36
	55	40	32	30	19	39
	55	40	31	30	19	39
	55	39	32	30	19	39
	55	39	32	30	19	39
	55	39	32	31	19	39
	55	40	32	30	20	41
	55	40	31	30	19	38
	55	39	32	30	19	38
	55	39	31	30	19	40
	55	39	32	30	19	39
368-20-1/3	55	40	32	31	20	37
	55	40	33	31	20	38
	55	40	31	31	20	38
	56	41	31	31	20	38
	56	40	32	30	19	40
	56	40	36	31	20	38
	56	41	35	31	20	38
	56	40	32	31	20	38
	56	40	34	31	20	39
	56	40	33	30	20	38
	56	41	35	31	19	39
	56	40	36	31	20	39
ТУ 001.470-2020	не менее 45	не менее 33	не менее 30	не менее 22	не менее 15	не менее 30

Партия	Коррозия 400 °С, 200 кгс/см ² τ =72 час		Коэффициент ориентации гидридов*	Шероховатость Ra, мкм	
	привес, мг/дм ²	сост. пов.		нар. поверхн.	вн. поверхн.
368-20-1/2	18	удовл.	-	0,31	0,23
	18	удовл.		0,28	0,38
	18	удовл.		0,34	0,28
	18	удовл.		0,30	0,26
	19	удовл.		0,32	0,35
368-20-1/3	18	удовл.	-	0,28	0,31
	17	удовл.		0,33	0,22
	18	удовл.		0,48	0,27
	18	удовл.		0,33	0,29
	18	удовл.		0,45	0,27
ТС 001.470-2020	не более 22	соотв. контр. образцам	не более 0,4	0,36	0,31
				0,38	0,30
					не более 1,6
* - отсутствуют методики контроля при толщине стенки трубы более 1,0 мм					

Контроль и испытания опытно-промышленных партий кессонных труб Ø20×1,5 мм из сплава Э635



По результатам
испытаний опытные
трубы соответствуют
требованиям
ТУ 001.470-2020.

Партия	Коррозия 400 °С, 200 кгс/см ²				Коэф. ориент. гидридов*	Легирующие элементы и примеси		
	τ =72 час		τ =200 час			Элемент	Содерж., %	
	привес, мг/дм ²	сост. пов.	привес, мг/дм ²	сост. пов.				
368-20-1/2	17	удовл.	24	удовл.	<0,10	Sn	1,20	1,17
	17	удовл.	26	удовл.	0,15	Nb	1,1	1,1
	17	удовл.	24	удовл.	0,11	Fe	0,34	0,34
	17	удовл.	24	удовл.	0,12	O	0,09	0,09
	16	удовл.	24	удовл.	0,11	C	<0,01	<0,01
368-20-1/3	17	удовл.	24	удовл.	0,11	Cu	<0,001	<0,001
					0,11	H	0,0006	0,0007
	17	удовл.	25	удовл.	0,19	Sn	1,22	1,19
	17	удовл.	25	удовл.	0,20	Nb	1,1	1,1
	17	удовл.	24	удовл.	0,26	Fe	0,34	0,33
17	удовл.	24	удовл.	0,30	O	0,09	0,09	
17	удовл.	24	удовл.	0,12	C	0,01	<0,01	
17	удовл.	24	удовл.	0,17	Cu	<0,001	<0,001	
ТС 001.470-2020	не более 22	соотв. контр. образцам	не более 38	соотв. контр. образцам	не более 0,4	-		

* - порядок контроля изложен в аннотационном отчёте от 12.11.2020 № 19-407/72-ОТЧ

Заключение



№ партии	Поступило в ОТК, шт.	Отбор проб, шт.	Количество забракованных труб					Годные трубы	
			ПТК шт.	Качество наружной поверхности, длина, непрямолинейность, качество торцов, шт.	УЗ-КС, шт.	УЗ-КР шт.	Всего брак шт.	шт.	%
368-20-1/2	244	8	32	11- Качество наружной поверхности, 2 - длина	9	0	54	222	80,4
368-20-1/3	241	8	42	16- Качество наружной поверхности.	6	2	66	213	75,3

1. За 1 год (в условиях пандемии COVID-19) разработана технология изготовления кессонных труб Ø20×1,5 мм из сплава Э635.

2. Выполнены исследования структуры передельных и готовых труб, коррозионные и механические испытания экспериментальных и опытно-промышленных кессонных труб.

3. Разработаны ТУ 001.470-2020 «Трубы тонкостенные из сплава циркония марки Э635» и Программа от 21.10.2020 №349.000.003ПМ «Приемочных испытаний кессонных труб Ø20,0×1,5 мм из сплава Э635 по ТУ 001.470-2020».

4. По результатам испытаний опытные трубы соответствуют требованиям ТУ 001.470-2020.

5. По результатам Приемочных испытаний принято решение:

- «Трубы Ø20×1,5 мм из сплава Э635, партий №368-20-1/2 в количестве 222 шт. и №368-20-1/3 в количестве 213 шт. принять и считать выдержавшими приемочные испытания»;

- «присвоить ТУ литеру «О₁»»;

- «считать производство АО ЧМЗ готовым к серийному производству труб Ø20×1,5 мм Э635 по ТУ 001.470-2020...».

6. Разработка позволит повысить срок эксплуатации зоны РУ РИТМ-400 установки с 45 до 60 тыс. часов с одновременным повышением ее мощности на 30%.



ВНИИНМ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание!