
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ГИДРОВАЛЬЦЕВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ
ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

© 2019 А.М. Смирнов*, В.В. Шишов**

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

***АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия*

Актуализирована проблема выхода из строя коллекторов парогенераторов и выявлены ее причины, одной из которых является применение нерациональных технологических процессов закрепления теплообменных труб в трубные решетки. Приведены результаты исследования влияния технологии гидровальцевания на состояние прессовых соединений, которые позволили провести анализ существующей технологии и определить надежные критерии оценки качества соединений «труба-трубная доска»

Ключевые слова: прессовое соединение, теплообменные трубы, коллектор, гидровальцевание, зазор, натяг.

Поступила в редакцию 17.04.2019

После доработки 24.05.2019

Принята к публикации 31.05.2019

В современных атомных, энергетических, химических, нефтяных и других установках широко используются теплообменные аппараты различной конструкции. В качестве нагревательных элементов в них применяются трубчатые системы, состоящие из большого количества труб (от нескольких сотен до нескольких тысяч), по которым под высоким давлением прокачивается теплоноситель в виде воды, газа, жидкого металла.

К трубчатым аппаратам вообще и к узлам запрессовки труб в трубные доски и коллекторы особенно предъявляются очень высокие требования по надежности.

Многочисленными исследованиями Российских ученых [1, 2, 3] установлено, что одной из причин преждевременного выхода из строя коллекторов парогенераторов являются нерациональные технологические процессы их изготовления и, в первую очередь, технологические процессы запрессовки в них теплообменных труб, до недавнего времени использующие импульсную энергию взрывчатых веществ (метод «взрыва»).

Поиск более «мягких» процессов запрессовки теплообменных труб в трубные решетки и коллектора остается и сегодня весьма актуальной задачей.

К настоящему времени имеется немало работ, посвященных прессовым соединениям теплообменных труб с трубной решеткой, изготовленных роликовым вальцеванием [4, 5, 6], в которых проведен тщательный анализ факторов влияния на качество закрепления.

Процессы гидровальцевания, широко применяемые в технологиях создания узлов крепления труб, пока еще не достаточно изучены. Опыт применения и выполнения

исследований показали, что в настоящее время имеются вопросы, знание ответов на которые весьма важны для производства [1, 2].

Так в статье В.М. Терехов «Математическая модель процесса закрепления теплообменных труб посредством гидрораздачи» [7] в процессе цифрового моделирования гидрораздачи с использованием контактных элементов изучалась радиальная и осевая деформация трубы. Авторами наряду с результатами, имеющими хорошую сходимость с практическими данными, получено также, что осевая деформация трубы $\varnothing 16 \times 1,5$ длиной 160 мм после гидрораздачи может составлять значительную величину. На практике такого не наблюдалось [7, 8, 9].

В данной работе приведены некоторые исследования влияния технологии гидровальцевания на состояние прессовых соединений.

В качестве образца для исследований была выбрана семнадцатитрубная модель, имитирующая геометрические параметры глубоких отверстий ответственных теплообменных аппаратов для АЭС (рис. 1).

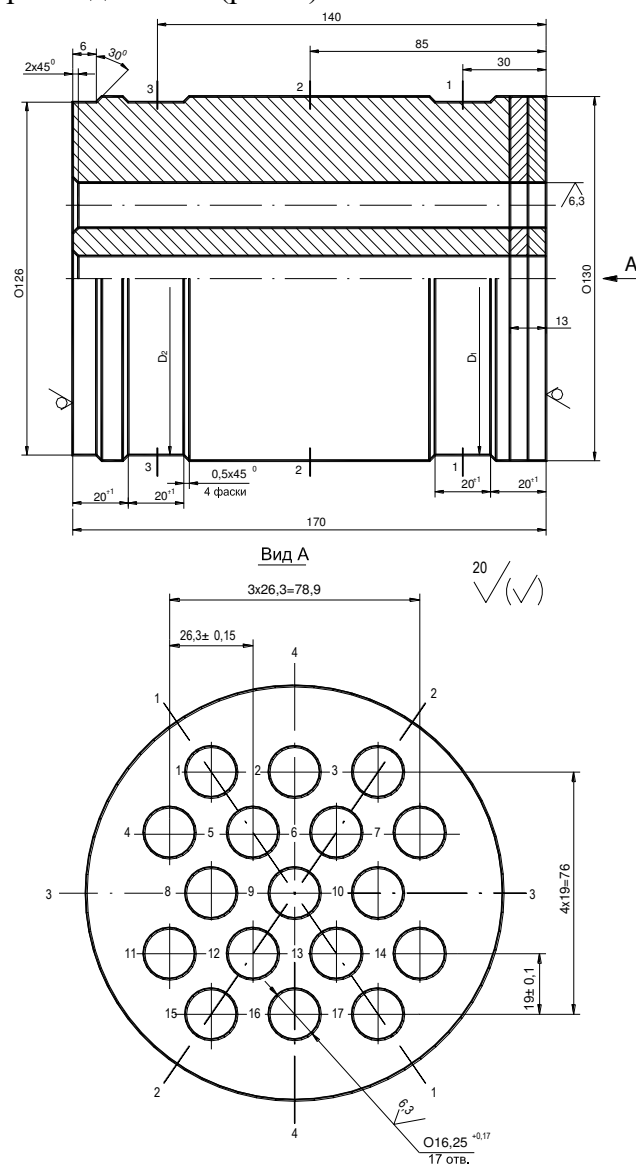


Рисунок 1 – Модель семнадцатитрубной доски [Model of seventeen pipe board]

До проведения гидровальцевания были проведены замеры труб по внутреннему и наружному диаметрам по трем сечениям (рис. 1) с определением максимального и минимального диаметра в каждом сечении. По размеру внутреннего диаметра ($d_{тр.вн}$)

проведена селекция на три группы: $d_{\text{тр.вн}} \leq 12,90$ мм; $d_{\text{тр.вн}} = 13 \pm 0,05$ мм; $d_{\text{тр.вн}} > 13,05$ мм. Аналогично проведены измерения минимальных, максимальных диаметров и селекция отверстий в моделях. Измерения наружных диаметров моделей D₁ и D₂ проводились в 4-х плоскостях (по осям 1-1; 2-2; 3-3; 4-4, рис. 1) на специально выполненных проточках.

После гидроразвальцевания труб в трубной решетке (модели) проводились следующие измерения:

- минимального ($d_{\text{тр.вн. min}}$) и максимального ($d_{\text{тр.вн. max}}$) внутреннего диаметра трубы в трех сечениях по длине;
- наружных диаметров трубной решетки (D₁ и D₂) в 4-х плоскостях;
- длины трубы L;
- длины участка гидрораздачи l_p и участка перехода от развальцованной к неразвальцованной части трубы.

По результатам измерений расчетным путем определялись следующие показатели прессового соединения:

- минимальные (S_{min}) и максимальные (S_{max}) зазоры между трубой и поверхностью отверстия в трубной решетке до вальцевания;
- минимальное (Δd_{min}) и максимальное (Δd_{max}) увеличение внутреннего диаметра трубы после вальцевания;
- изменение длины трубы (ΔL) в результате вальцевания;
- минимальную (ρ_{min}) и максимальную (ρ_{max}) степень запрессовки трубы в трубной решетке в сечениях 1-1; 2-2; 3-3 по формулам (1) и (2):

$$\rho_{\text{min}} = ((\Delta d_{\text{min}} - S_{\text{max}}) / d_{\text{отв. min}}) * 100\%, \quad (1)$$

$$\rho_{\text{max}} = ((\Delta d_{\text{max}} - S_{\text{min}}) / d_{\text{отв. max}}) * 100\%, \quad (2)$$

где $d_{\text{отв. min}}$, $d_{\text{отв. max}}$ – минимальный и максимальный размер диаметра отверстия в сечениях 1-1; 2-2; 3-3.

Кроме указанных параметров экспериментально определялась сила вырыва трубы из модели.

Исследования были выполнены на одиннадцати семнадцатитрубных моделях.

В таблицах 1 и 2 приведены наиболее характерные результаты исследований, полученные на моделях.

Таблица 1 – Параметры до гидроразвальцовки [Parameters before hydraulic expansion]

№ отв.	d _{отв. min} , (мм) d _{отв. max} , (мм)			d _{тр. нар. ср.} , (мм)			S _{min} , (мм) S _{max} , (мм)			d _{тр. вн. min} , (мм) d _{тр. вн. max} , (мм)		
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3
1	16,45	16,53	16,52	15,96	15,97	15,96	0,49	0,56	0,56	12,85	12,82	12,84
	16,57	16,55	16,55				0,61	0,58	0,59	12,95	12,93	12,97
2	16,51	16,55	16,53	15,97	15,98	15,97	0,54	0,57	0,56	12,85	12,86	12,83
	16,59	16,55	16,60				0,62	0,57	0,63	12,99	12,94	12,97
3	16,53	16,53	16,55	15,96	15,97	15,97	0,57	0,56	0,58	12,82	12,86	12,84
	16,57	16,55	16,60				0,61	0,58	0,63	12,95	12,92	12,96
4	16,59	16,55	16,59	15,98	15,97	15,97	0,61	0,58	0,62	12,84	12,84	12,84
	16,59	16,59	16,60				0,61	0,62	0,63	12,92	12,96	12,93
5	16,58	16,57	16,56	15,96	15,97	15,97	0,62	0,60	0,59	12,84	12,84	12,89
	16,60	16,60	16,57				0,64	0,60	0,60	12,92	12,98	12,99
6	16,52	16,50	16,49	15,96	15,96	15,97	0,56	0,54	0,52	12,83	12,83	12,93
	16,60	16,57	16,60				0,64	0,61	0,63	12,93	12,93	12,95
7	16,55	16,55	16,54	15,96	15,97	15,96	0,59	0,58	0,58	12,86	12,85	12,85
	16,55	16,55	16,60				0,59	0,58	0,64	13,00	12,98	12,94

Продолжение таблицы 1

№ отв.	d _{отв.min} , (мм) d _{отв.max} , (мм)			d _{тр.нар.ср.} , (мм)			S _{min} , (мм) S _{max} , (мм)			d _{тр.вн.min} , (мм) d _{тр.вн.max} , (мм)		
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3
8	16,54	16,50	16,54	15,97	15,98	15,98	0,57	0,52	0,56	12,85	12,82	12,84
	16,55	16,55	16,57				0,58	0,57	0,59	12,91	12,94	12,96
9	16,55	16,55	16,54	15,97	15,98	15,97	0,58	0,57	0,57	12,86	12,86	12,89
	16,55	16,60	16,60				0,58	0,62	0,63	12,92	12,99	12,95
10	16,54	16,55	16,54	15,88	15,88	15,89	0,66	0,67	0,65	12,80	12,85	12,85
	16,55	16,55	16,60				0,67	0,67	0,71	12,95	13,02	13,02
11	16,60	16,60	16,60	15,90	15,88	15,89	0,70	0,72	0,71	12,90	12,85	12,82
	16,60	16,60	16,60				0,70	0,72	0,71	13,07	13,02	12,92
12	16,53	16,50	16,55	15,89	15,88	15,89	0,64	0,62	0,66	12,82	12,80	12,82
	16,55	16,56	16,56				0,66	0,68	0,66	13,00	12,96	12,99
13	16,50	16,52	16,55	15,90	15,90	15,90	0,60	0,62	0,65	12,80	12,81	12,82
	16,60	16,57	16,56				0,70	0,67	0,66	12,98	13,20	13,00
14	16,53	16,52	16,55	15,88	15,86	15,87	0,65	0,66	0,68	12,80	12,83	12,81
	16,55	16,55	16,55				0,67	0,69	0,68	12,95	12,98	12,97
15	16,50	16,55	16,52	15,89	15,89	15,89	0,61	0,66	0,63	12,80	12,78	12,78
	16,57	16,60	16,60				0,68	0,71	0,71	12,95	12,90	12,96
16	16,55	16,50	16,55	15,88	15,87	15,88	0,67	0,63	0,67	12,78	12,82	12,83
	16,55	16,55	16,55				0,67	0,68	0,67	13,02	13,02	13,05
17	16,53	16,50	16,52	15,88	15,87	15,88	0,65	0,63	0,64	12,83	12,82	12,85
	16,55	16,57	16,56				0,67	0,70	0,68	13,03	12,98	13,02

Из гистограммы распределения длины гидрораздачи труб, представленной на рис 2. видно, что длина участка развальцовки труб в основном укладывается в размер 168 ± 1 мм.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что расчет степени запрессовки по существующему методу без учета отклонений от круглости отверстий, трубок и непрямолинейности продольной оси в большинстве случаев приводит к отрицательной степени запрессовки. Это значит, что в соединениях имеются зазоры, а не натяги, и сила вырыва должна равняться нулю.

Таблица 2 – Параметры после гидроразвальцовки [Parameters after hydraulic expansion]

№ отв.	$d_{тр.вн.min}$ (мм) $d_{тр.вн.max}$ (мм)			Δd_{min} (мм) Δd_{max} (мм)			ρ_{min} ,% ρ_{max} ,%			F, 10 ⁻³ Н	ΔL , (мм)
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3		
1	13,35	13,40	13,34	0,40	0,47	0,37	-1,27	-0,66	-1,33	15,6	1,7
	13,60	13,48	13,52	0,75	0,66	0,68	1,58	0,6	0,77		
2	13,30	13,38	13,30	0,31	0,44	0,33	-1,87	-0,79	-1,81	16,4	1,6
	13,40	13,48	13,46	0,55	0,62	0,63	0,06	0,08	0,42		
3	13,30	13,34	13,31	0,35	0,40	0,35	-1,58	-1,09	-1,69	13,8	1,75
	13,40	13,43	13,46	0,58	0,57	0,62	0,06	0,06	0,24		
4	13,30	13,39	13,33	0,38	0,37	0,40	-1,39	-1,51	-1,39	13,6	1,60
	13,40	13,49	13,42	0,56	0,56	0,58	0,3	0,12	0,24		
5	13,40	13,36	13,40	0,48	0,38	0,41	-0,96	-1,33	-1,09	13,1	1,65
	13,50	13,49	13,51	0,66	0,65	0,62	0,24	0,30	0,18		
6	13,35	13,40	13,31	0,42	0,47	0,42	-1,33	-0,84	1,27	14,0	1,95
	13,45	13,48	13,52	0,62	0,65	0,59	0,36	0,67	0,42		
7	13,37	13,40	13,39	0,37	0,42	0,45	-1,33	-0,97	-1,14	14,3	1,70
	13,50	13,52	13,48	0,66	0,67	0,63	0,79	0,54	0,3		

Продолжение таблицы 2

№ отв.	$d^{\lambda}_{тр.вн. min}$ (мм)			Δd_{min} (мм)			ρ_{min} ,%			F, 10 ⁻³ Н	ΔL , (мм)
	$d^{\lambda}_{тр.вн. max}$ (мм)			Δd_{max} (мм)			ρ_{max} ,%				
	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3	1-1	2-2	3-3		
8	13,30	13,32	13,35	0,39	0,41	0,39	-1,15	-0,97	-1,21	14,1	1,65
	13,40	13,50	13,50	0,55	0,68	0,66	0,12	0,97	0,6		
9	13,35	13,38	13,39	0,43	0,39	0,44	-0,91	-1,81	-1,14	15,1	1,65
	13,46	13,50	13,47	0,60	0,66	0,58	0,12	0,54	0,06		
10	13,40	13,44	13,45	0,35	0,38	0,47	-1,93	-1,75	-1,69	9,0	1,95
	13,60	13,65	13,65	0,80	0,80	0,80	0,85	0,79	0,54		
11	13,50	13,42	13,35	0,43	0,40	0,43	-1,63	-1,93	-1,63	14,1	2,20
	13,65	13,64	13,55	0,75	0,79	0,73	0,3	0,42	0,19		
12	13,43	13,42	13,44	0,43	0,45	0,45	-1,39	-1,39	-1,27	17,6	1,95
	13,60	13,59	13,60	0,78	0,79	0,78	0,85	1,03	0,73		
13	13,40	13,43	13,47	0,42	0,23	0,47	-1,69	-2,66	-0,97	16,9	1,95
	13,50	13,60	13,64	0,70	0,79	0,82	0,61	1,03	1,03		
14	13,35	13,47	13,42	0,40	0,49	0,45	-1,63	-1,21	-1,39	0	1,95
	13,45	13,62	13,59	0,65	0,79	0,78	0	0,79	0,60		
15	13,37	13,42	13,45	0,42	0,52	0,49	-1,57	-1,44	-1,33	16,88	2,0
	13,55	13,62	13,61	0,75	0,84	0,83	0,85	1,09	1,21		
16	13,40	13,50	13,50	0,38	0,48	0,45	-1,75	-1,21	-1,33	15,4	1,90
	13,57	13,65	13,62	0,79	0,83	0,79	0,73	1,21	0,73		
17	13,40	13,48	13,47	0,37	0,50	0,45	-1,85	-1,21	-1,39	15,75	2,15
	13,67	13,65	13,67	0,84	0,83	0,82	1,15	1,21	1,09		

Фактически же сила вырыва трубы из соединений с отрицательной степенью запрессовки находится на одном уровне с силой вырыва из соединений с положительной степенью запрессовки и слабо зависит от расчетной степени запрессовки.

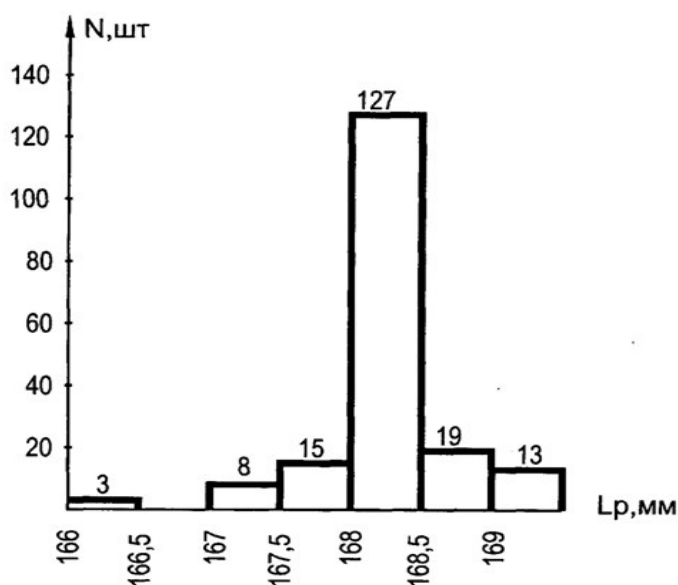


Рисунок 2 – Гистограмма распределения длины гидрораздачи труб в семнадцатитрубных моделях
[Histogram of the hydraulic distribution length distribution of pipes in seventeen pipe models]

Металлографические исследования зазоров в соединениях по периметру также показали, что их величина не связана с расчетной величиной степени запрессовки конкретного соединения и находится в пределах от 0 до 20 мкм. Анализ табличных данных не позволил выявить взаимосвязь силы вырыва с геометрическими параметрами отверстий и труб. Для этого необходимо проведение специальных исследований. Однако приведенные выше результаты дают основание считать, что именно отклонения от круглости и цилиндричности отверстий и труб с различной направленностью по длине отверстий приводят к значительным колебаниям степени запрессовки.

На рисунках 3 и 4 приведены гистограммы распределения степеней запрессовки, рассчитанных по средним значениям (ρ_{cp}) и по предельным значениям (ρ_{min} , ρ_{max}) для моделей 1-3 и 4-3.

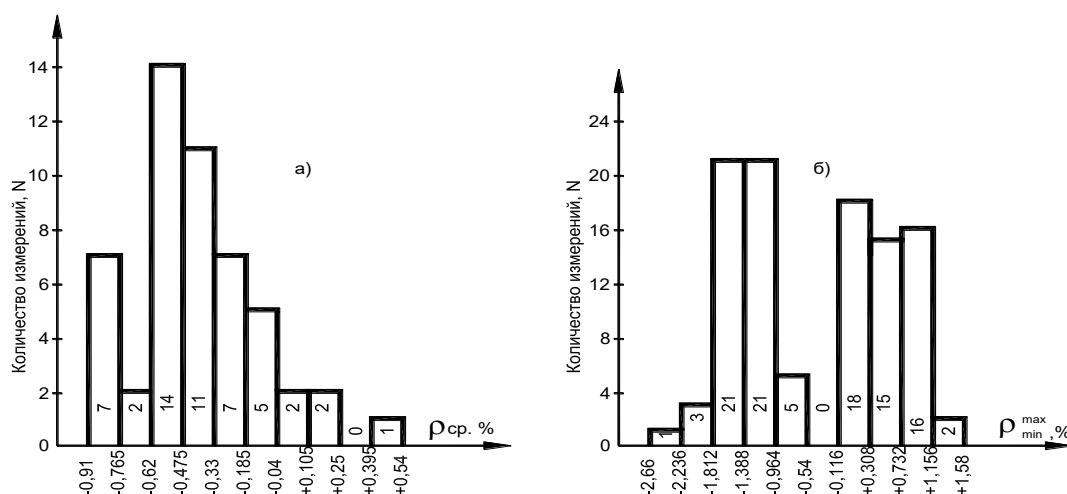


Рисунок 3 – Распределение степени запрессовки труб в семнадцатитрубной модели № 1-3, рассчитанной по результатам измерений в 3-х сечениях по глубине: а – по среднему сечению (ρ_{cp}); б – с учетом максимальных и минимальных значений ($\rho_{max_min}^{max}$) [The distribution of pipe pressing degree in the seven-pipe model No. 1-3, calculated by the results of measurements in 3 sections by depth: a – by average section ρ_{cp} ; b – taking into account the maximum and minimum values (ρ_{min}^{max})]

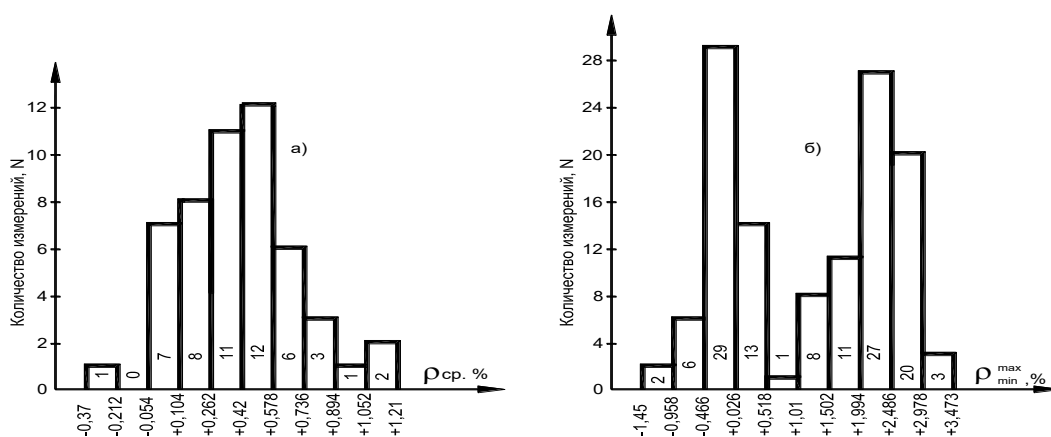


Рисунок 4 – Распределение степени запрессовки труб в семнадцатитрубной модели № 4-3, рассчитанное по результатам измерений в 3-х сечениях по глубине: а – по среднему значению (ρ_{cp}); б – с учетом максимальных и минимальных значений ($\rho_{max_min}^{max}$) [The distribution of pipe pressing degree in the seventeen-tube model No. 4-3, calculated from the results of measurements in 3 sections by depth: a – by the mean value (ρ_{cp}); b – taking into account the maximum and minimum values (ρ_{min}^{max})]

Расчеты велись по результатам измерения минимальных и максимальных диаметров отверстий и труб до запрессовки, а также внутренних диаметров после запрессовки в 3-х сечениях по глубине отверстия (30, 85 и 140 мм от поверхности «зеркала» модели). Из рисунка 3 следует, что при расчете по средней степени запрессовки только одно измерение из 51 обеспечивает положительную запрессовку (без зазора). Если же расчеты вести по $\rho_{\max}$, то соединений с положительной степенью запрессовки будет 51 из 102. Качественно такой же характер изменения степени запрессовки наблюдается тогда, когда превалируют соединения с положительным значением степени запрессовки (рис. 4).

Приведенные результаты исследований дают основание считать, что расчетная степень запрессовки при гидровальцевании труб не может служить надежным критерием оценки качества соединений «труба – трубная доска». Таким критерием может быть рабочее давление жидкости и время выдержки, гарантированно обеспечивающие требуемое качество соединения при условии строгого соблюдения требований по точности формы и размеров отверстий и труб. Это положение подтверждается зарубежным опытом («VITKOVICE» (Чехия), «BALCKE DÜRR» (Германия), а также работами, выполненными в ГНЦ РФ АО «ЦНИИТМАШ».

После установления рациональной конструкции и размеров зондов было проведено исследование и отработка рациональных режимов запрессовки теплообменных труб. Для этого было изготовлено 12 однотрубных образцов (рис. 5) из стали 08X18H10T-ВД, в которых трубы запрессовывались при различном рабочем давлении воды (от 196 до 343 МПа с интервалом 49 МПа) и времени выдержки (от 5 до 10 сек).

После гидрозапрессовки по 2 образца каждого режима были подвергнуты механической довальцовке и испытаниям на вырыв. Остальные образцы разрезались на темплеты и на них проводились металлографические исследования.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты измерения геометрических размеров и испытаний на вырыв и определения зазоров (табл. 5).

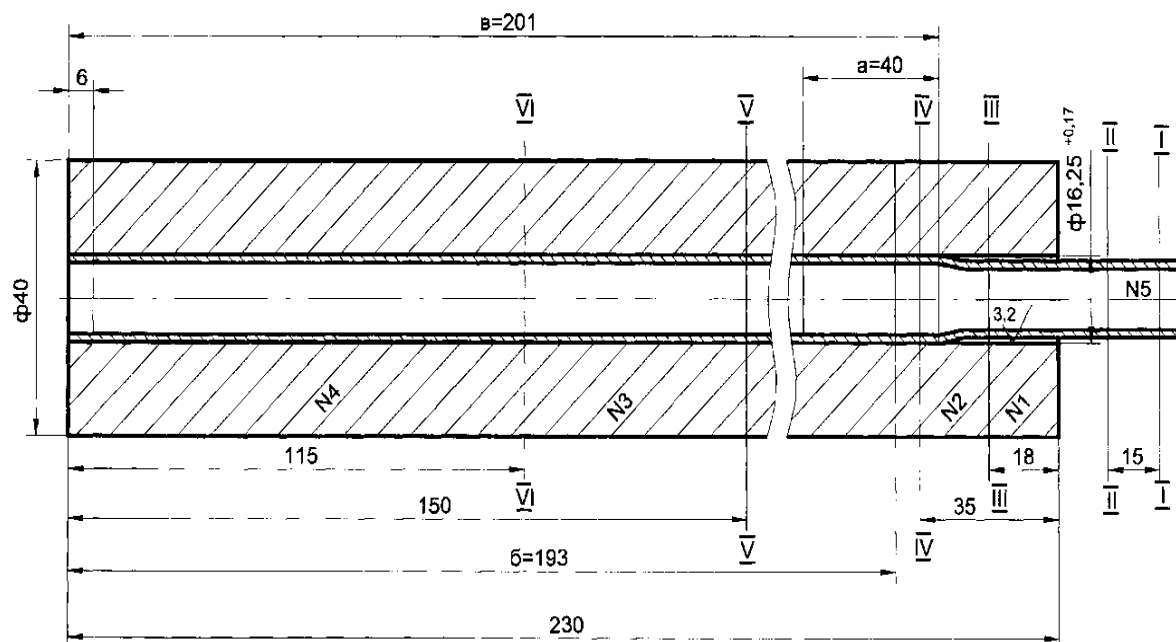


Рисунок 5 – Конструкция однотрубного образца и схема его разрезки для металлографических исследований: а – зона довальцовки; б – зона гидровальцовки; в – зона подвальцовки + гидровальцовки + довальцовки [Design of a single-tube sample and a scheme for its cutting for metallographic studies: a – further folding zone; b – hydrovalve zone; c – zone of rerolling + hydraulic rolling + uprolling]

Таблица 3 – Результаты замеров геометрических размеров и испытаний на вырыв [Results of measurements of geometric dimensions and tests for digging]

Номер образца	Режим гидрозапрессовки, МПа	Размеры до гидрозапрессовки					Геометрические размеры после гидрозапрессовки			
		Диаметр отверстия, мм	Наружный диаметр трубы, мм	Величина зазора, мм	Внутренний диаметр трубы, мм	Длина участка трубы l, мм	Внутренний диаметр трубы, мм	Величина раздачи, мм	Длина участка трубы l ₁ , мм	Длина участка переходной зоны, мм
1	196	16,39	16,01	0,38	12,81 13,01	52,3	13,23 13,48	0,41 0,47	51,0	6,0
2	196	16,39	15,95	0,44	12,94 13,03	52,4	13,41 13,55	0,47 0,52	51,5	6,0
3	196	16,40	15,98	0,42	13,01 13,09	52,1	13,52 13,58	0,51 0,49	51,1	6,5
4	245	16,35 16,38	15,99	0,36 0,39	13,06 13,15	52,6	13,52 13,60	0,46 0,45	51,6	6,0
5	245	16,38	16,00	0,38	13,06 13,10	52,5	13,48 13,52	0,42 0,42	51,4	6,0
6	245	16,37 16,39	15,92	0,45 0,47	12,80 13,13	51,3	13,32 13,58	0,52 0,45	50,1	6,0
7	294	16,40	15,96	0,44	13,02 13,11	52,4	13,54 13,62	0,52 0,51	51,2	6,0
8	294	16,40	15,95	0,45	13,01 13,13	52,6	13,55 13,68	0,54 0,55	51,4	7,5
9	294	16,40	15,96	0,44	12,86 12,93	52,8	13,38 13,44	0,52 0,51	51,6	7,0
10	343	16,39	15,90	0,49	13,01 13,16	52,5	13,59 13,78	0,58 0,62	50,4	6,0
11	343	16,40	15,96	0,44	12,80 13,05	52,3	13,38 13,62	0,58 0,57	50,1	7,0
12	343	16,40	15,93	0,47	12,86 13,15	51,4	13,34 13,66	0,43 0,51	50,3	6,5

Таблица 4 – Результаты замеров геометрических размеров и испытаний на вырыв [Results of measurements of geometric dimensions and tests for digging]

Номер образца	Величина изменения длины участка трубы (l-l ₁), мм	Размеры до довальцовки		Размеры после довальцовки		Величина раздачи в зоне довальцовки, мм	Величина изменения длины участка трубы (l ₂ -l ₁), мм	Разность внутренних диаметров труб, мм	Наличие (отсутствие) довальцовки, +(-)	Усилие вырыва трубы, Н
		Внутренний диаметр трубы, мм	Длина участка трубы l ₁ , мм	Внутренний диаметр трубы в месте довальцовки, мм	Длина участка трубы l ₂ , мм					
1	-1,3	12,80 13,0	51,0	13,21 13,44	51,2	0,41 0,44	+0,2	0,02 0,04	+	-
2	-0,9	12,97 13,04	51,5	13,41 13,55	51,7	0,44 0,51	+0,2	0 0	+	7840
3	-1,0	12,99 13,07	-	-	-	-	-	-	-	686
4	-1,0	13,05 13,16	-	-	-	-	-	-	-	1176
5	-1,1	13,05 13,10	-	13,45 13,54	51,6	0,40 0,44	+0,2	0,03 0,02	+	-
6	-1,2	12,81 13,07	50,1	13,39; 13,64	50,4	0,58 0,57	+0,3	0,07 0,06	+	7840
7	-1,2	12,98 13,05	-	-	-	-	-	-	-	784
8	-1,2	13,04 13,14	-	13,52 13,61	51,7	0,48 0,47	+0,3	0,03 0,07	+	-
9	-1,2	12,81 12,92	51,6	13,39 13,48	51,8	0,58 0,56	+0,2	0,01 0,04	+	6860
10	-1,1	13,00 13,17	50,4	13,63 13,67	50,6	0,63 0,60	+0,2	0,04 0,11	+	-
11	-1,2	12,83 13,06	50,1	13,40 13,67	50,4	0,57 0,61	+0,2	0,02 0,05	+	1724 8
12	-1,1	12,83 13,09	-	-	-	-	-	-	-	5292

Таблица 5 – Результаты замеров величин зазоров в соединениях «втулка-труба» [Results of measurements of the magnitudes of the gaps in the «sleeve-pipe» connections]

Номер образца	Режим гидрозапрессовки, МПа	Исследуемая зона	Номер темплета	Величина зазора, мкм	Протяженность зазора по периметру, %
1	196	гидрозапрессовка	2	2-5	80
				10-20	20
4	245	гидрозапрессовка	2	1-2	90
				5	10
7	294	гидрозапрессовка	2	2-5	80
				10-20	20
10	343	гидрозапрессовка	2	2-5	90
				10-20	10
1	196	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	1-2	70
				5-20	30
4	245	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	1-2	90
				5	10
7	294	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	2-5	80
				10-20	20
10	343	гидрозапрессовка плюс довальцовка	3	2-5	90
				10-20	10

По экспериментальным данным, приведенным в этих таблицах, можно сделать следующее заключение:

– При исходном зазоре 0,38...0,49 мм величина раздачи труб составляет 0,41...0,62 мм и находится в прямой зависимости от начального зазора (наружного и внутреннего диаметра трубы). Разность между величиной раздачи и величиной исходного зазора составляет 0,04...0,14 мм, что согласуется с данными, опубликованными в технической литературе.

– Укорочение труб после их гидрозапрессовки составляет 0,9...1,3 мм и при постоянной длине запрессовываемого участка зависит в основном от величины исходного зазора. Толщина стенки трубы практически не уменьшается.

– Механическая довальцовка после гидрозапрессовки трубы приводит к их удлинению на 0,2...0,3 мм.

– Разность внутреннего диаметра труб в зонах гидрозапрессовки и довальцовки составляет 0...0,11 мм.

– Сила вырыва трубы после гидрозапрессовки зависит от рабочего давления жидкости и составляет: 686...1176 Н при давлении 196...294 МПа; 5392 Н при давлении 343 МПа.

– Механическая довальцовка труб после гидрозапрессовки увеличивает силу вырыва до 6860...17248 Н. При таком большом диапазоне колебаний не прослеживается зависимость силы вырыва от рабочего давления гидрозапрессовки при его изменении в пределах 196...343 МПа.

– Опыты с изменением времени выдержки рабочего давления гидравлического зажима от 5 до 10 секунд показали, что при выдержке 5 секунд процесс упруго-пластических деформаций в системе «трубная решетка-труба-зонд-уплотнительные кольца» заканчивается, разрушений уплотнительных колец не происходит и обеспечивается заданное усилие вырыва.

– Величина зазора в соединении «труба-трубная доска» по всему периметру не превышает 20 мкм как после запрессовки, так и после довальцовки независимо от изменения рабочего давления в исследованном диапазоне (196...343 МПа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Терехов, В.М. Технологические основы обеспечения качества глубоких отверстий и соединений теплообменных труб с трубными решетками и коллекторами аппаратов атомных энергоустановок: дис. докт. техн. наук [Текст] / В.М. Терехов. – Москва, 2006. – 476 с.
- 2 Кондратенко, Л.А. Расчетно-экспериментальные методы исследования технологических напряжений и деформаций в неразъемных трубных соединениях энергоустановок: автореф. докт. техн. наук [Текст] / Л.А. Кондратенко. – Москва, 2017. – 48 с.
- 3 Овсёенко, А.И. Поверхностный слой деталей: проблемы технологического обеспечения качества [Текст] // Влияние технологии на состояние поверхностного слоя: материалы междунар. конф. – Познань, 2002. – С. 411-415.
- 4 Кондратенко, Л.А. К вопросу об упрочнении материала вальцовочных соединений в теплообменных аппаратах [Текст] / Л.А. Кондратенко, Л.И. Миронова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №3. – С. 106-112.
- 5 Кондратенко, Л.А. К вопросу о влиянии динамики роликового вальцевания на качество изготовления теплообменных аппаратов в атомных энергетических установках [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 10-14.
- 6 Кондратенко, Л.А. Анализ некоторых проблем механического закрепления теплообменных биметаллических труб в энергетических установках [Текст] / В.М. Терехов, Л.И. Миронова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2017. – № 3. – С. 83-88.
- 7 Терехов, В.М. Математическая модель процесса закрепления теплообменных труб посредством гидрораздачи [Текст] / В.М. Терехов, Л.А. Кондратенко // Технология машиностроения. – 2001. – № 1. – С. 55-57.

- 8 Кондратенко, Л.А. Технологические возможности теплообменных труб в операции закрепления [Текст] / Л.А. Кондратенко, В.М. Терехов, В.С. Винников, А.С. // Технология машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 28-33.
- 9 Смирнов, А.М. Исследование состояния поверхностного слоя теплообменных труб из высоколегированных сталей аустенитного класса [Текст] / А.М. Смирнов, Л.И. Миронова, В.М. Терехов, Л.А. Кондратенко // Новые материалы и перспективные технологии: материалы IV Междисциплинарного научного форума. Москва, 20-23 ноября 2018 г. – Т.1. – Москва : ИМАШ РАН, 2018. – С. 814-818.
- 10 Смирнов, А.М. Особенности технологии раздачи теплообменных труб достаточной толщины и оценка качества прессовых соединений [Текст] / А.М. Смирнов, В.М. Терехов, А.С. Аверин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 150-155.

REFERENCES

- [1] Terekhov V.M. Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva glubokih otverstij i soedinenij teploobmennyyh trub s trubnymi reshetkami i kollektorami apparatov atomnyh ehnergoustanovok: dis. dokt. tekhn. nauk [Technological Basis for Quality Assurance of Deep Holes and Heat Exchanger Tube Connections with Tube Sheets and Collectors of Nuclear Power Plants. Thesis]. Moscow. 2006 (in Russian).
- [2] Kondratenko L.A. Raschetno-eksperimental'nye metody issledovaniya tekhnologicheskikh napryazhenij i deformacij v neraz'emnyh trubnyh soedineniyah ehnergoustanovok: avtoref. dokt. tekhn. nauk [Computational and Experimental Methods for Studying Technological Stresses and Deformations in Permanent Pipe Joints of Power Plants: Thesis abstract]. Moscow. 2017 (in Russian).
- [3] Ovseenko A.I. Poverhnostnyj sloj detalej: problemy tekhnologicheskogo obespecheniya kachestva. Sbornik materialov: Vliyanie tekhnologii na sostoyanie poverhnostnogo sloya [Surface Layer Details: the Problems of Technological Quality Assurance]. Poznan'. 2002. P. 411-415.
- [4] Kondratenko L.A., Mironova L.I. K voprosu ob uprochnenii materiala val'covочных соединений v teploobmennyyh apparatah [Hardening of Material of Milling Connections in Heatexchange Devices]. Engineering & Automation Problems. 2016 № 3. P. 106-112 (in Russian).
- [5] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. K voprosu o vliyaniy dinamiki rolіkovogo val'cevaniya na kachestvo izgotovleniya teploobmennyyh apparatov v atomnyh ehnergeticheskikh ustanovkah [Effect of Roller Rolling Dynamics on the Quality of Manufacture of Heat Exchangers of Nuclear Power Units]. Heavy engineering construction. 2016. № 3. P. 10-14 (in Russian).
- [6] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. Analiz nekotorykh problem mekhanicheskogo zakrepleniya teploobmennyyh bimetallicheskih trub v ehnergeticheskikh ustanovkah [Analysis of Some Problems of Mechanical Fastening of Heat Exchange Bimetallic Tubes in Energy Apparatus]. Engineering & Automation Problems. 2017. № 3. P. 83-88 (in Russian).
- [7] Terekhov V.M., Kondratenko L.A. Matematicheskaya model' processa zakrepleniya teploobmennyyh trub posredstvom gidrorazdachi [Mathematical Model of the Process of Fixing the Heat Exchange Tubes by Means of Hydraulic Distribution]. Engineering technology. 2001. № 1. P. 55-57 (in Russian).
- [8] Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Vinnikov V.S., Averin A.S. Tekhnologicheskie vozmozhnosti teploobmennyyh trub v operacii zakrepleniya [Technological Capabilities of Heat Exchange Tubes in the Operation of Fixing]. Engineering technology. 2014. № 7. P. 28-33 (in Russian).
- [9] Smirnov A.M., Mironova L.I., Terekhov V.M., Kondratenko L.A. Issledovanie sostoyaniya poverhnostnogo sloya teploobmennyyh trub iz vysokolegированных сталей аустенитного класса [Investigation of the State of the Surface Layer of Heat Exchange Tubes of High-Alloyed Austenitic Steels]. Proceedings of the St. Moscow IMASH RAN. Moscow IMASH RAN. 2018. Vol. 1. P. 814-818 (in Russian).
- [10] Smirnov A.M., Terekhov V.M., Averin A.S. Osobennosti tekhnologii razdachi teploobmennyyh trub dostatochnoj tolshchiny i ocenka kachestva pressovyh соединений [Features of Technology of Radial Deformation of Heat-Exchanging Pipes of Sufficient Thickness and Assessment of Quality of Press Connections]. Engineering & Automation Problems. 2019. № 1. P. 150-155 (in Russian).

Study of the Impact of Hydraulic Rolling Technology on the Condition of Press Connections

A.M. Smirnov^{*1}, V.V. Shishov^{**2}

**Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

e-mail: v.terehov@eatom.ru

***Experienced Design Office «GIDROPRESS», Ordzhonikidze st., 21, Podol'sk, Russia 142103*

² e-mail: v.shishov@eatom.ru

Abstract – The problem of the failure of steam generator collectors is actualized and its causes are revealed, one of which is the use of irrational technological processes of fixing heat exchanging pipes to tube sheets. The results of the study of the hydraulic rolling technology influence on the state of press joints are given which allowed to analyze the existing technology and determine reliable criteria to assess the quality of the pipe-tube-board connections.

Keywords: press connection, heat exchange tubes, collector, hydraulic rolling, clearance, tension