

Подходящие корреляции для оценки прочности разданного соединения труба - трубная решётка

Стенли Йокелль
МГТ инк.
Болдер, Колорадо 80303-3607
Телефон 303 494-9608
Факс 303 499-1949
e-mail syokell@mgt-inc.com

1 РЕФЕРАТ

Данная статья написана в защиту предпочтительности корреляции крутящего момента мехвальцовки или давления гидравлической раздачи с усилием сдвига вместо степени развальцовки, как критерия достаточности раздачи для тонкостенных труб. Для оценки справедливости такого суждения в статье описывается общая теория раздачи труб, методы раздачи и кольцевые канавки. В статье сопоставляются отклонения измерений, необходимых для расчёта степени развальцовки, с суммарными допусками при сверлении отверстий в трубных решётках и производстве труб. График иллюстрирует как возрастает разброс результатов с ростом соотношения диаметра трубы к толщине стенки. В статье также приводятся требования к техпроцессу мехвальцовки и итоговые рекомендации по двухэтапной (гибридной) раздаче.

2 ВВЕДЕНИЕ

У обоих методов оценки раздачи тонкостенных высокопрочных труб с низким модулем упругости (по корреляции либо степени развальцовки либо крутящего момента с усилием сдвига) есть сторонники. Автор считает, что для таких труб предпочтительным методом является корреляция крутящего момента с усилием сдвига. Последующие рассуждения о теории раздачи труб и практике мехвальцовки подтверждают данное мнение.

3 ТЕОРИЯ РАЗДАЧИ ТРУБ

подавляющее большинство труб кожухотрубных теплообменников развальцованы механически. Вместе с тем комплексный анализ большого количества переменных, требующих учёта при мехвальцовке - очень трудная задача. По этой причине в основе большинства опубликованных исследований труб, разданных в трубных решётках, лежит модель равномерного распределения напряжения в конце трубы.

3.1 Модель разданного соединения труба — трубная решётка

Упрощённая модель трубы и окружающего металла следующая: труба — это цилиндр, состоящий из бесконечного количества бесконечно малых слоёв, находящихся в контакте друг с другом. Первоначально существует зазор между наружной поверхностью цилиндра и отверстием в трубной решётке. При появлении давления в трубе слои деформируются. Внутренний радиус трубы увеличивается до момента соприкосновения наружной поверхности трубы с отверстием. В этой ситуации деформация слоёв может носить либо полностью упругий, либо полностью пластический характер, либо внутренние слои могут быть деформированы пластически, а наружные упруго с некоторой границей между этими зонами. Положение границы зон зависит от размеров трубы и её предела текучести, σ_{yt} .

Теоретически, труба остаётся полностью упругой до момента увеличения давления до т. н. предела упругости $\sigma_{yt}/\sqrt{3}$ или $0,577\sigma_{yt}$. Когда конец трубы подвергается упругой деформации его стенки становятся тоньше, а длина короче в соответствии с эффектом Пуассона. Когда давление превышает данный предел начинается пластическая деформация. Увеличение внутреннего давления сдвигает границу между упруго и пластически деформированными слоями наружу. Когда труба касается трубной решётки аналогичный процесс начинается уже в металле трубной решётки. Цель — достичь уровня пластической деформации трубы, при котором при релаксации трубы и окружающей трубной решётки в зоне их соприкосновения сохранится остаточное напряжение.

Статья рассматривает это остаточное напряжение как контактное давление между трубой и трубной решёткой.

Одна из работ¹ для изучения раздачи трубы анализирует напряжения в двуслойной модели, которая рассматривает воздействие давления на отверстие в большой плите. В трубных решётках смежные отверстия, окружающие исследуемое, ограничивают применение данной модели, однако анализ методом конечных элементов показал, что такая модель даёт практическую возможность изучить раздачу трубы. В указанной модели, когда радиус зоны пластической деформации достигает 1.75 внутреннего радиуса трубы дальнейшее расширение невозможно, т. к. начинают выдавливаться внутренние слои стенок трубы. Давление, соответствующее данному пределу, равно $2\sigma_{\text{уп}}\sqrt{3}$ ($\sim 1.155\sigma_{\text{уп}}$). Попытки приложить большее давление распространяют выдавливание на смежные слои.

С ростом давления раздачи, давление, с которым внешняя сторона трубы воздействует на поверхность отверстия, вызывает деформацию в металле окружающей трубной решётки, который симметрично воздействует на трубу. Граница зон упругой и пластической деформации сдвигается вовне в сторону трубной решётки. Когда давление спадает релаксация практически упругая. Для создания соединения труба — трубная решётка остаточное напряжение по поверхности отверстия трубной решётки после релаксации должно быть больше нуля. Мы подразумеваем под остаточным напряжением на поверхности контактное давление. Различные исследования по соотношению и оптимизации контактного давления к давления раздачи учитывают размеры трубы, пределы текучести трубы и трубной решётки, а также другие характеристики трубы и трубной решётки.

3.1.1 Пределы текучести трубы и трубной решётки равны

В условиях, когда пределы текучести трубы и трубной решётки равны, зона пластической деформации, по существу, непрерывна. В данном случае оптимальное давление раздачи — максимум, который не приведёт к выдавливанию трубы. Это давление равно $1.155\sigma_{\text{уп}}$. Исследования по определению положения границы зон упругой и пластической деформации для данных условий были сведены к определению самой толстой трубы, которая может быть раздана в трубной решётке.

3.1.2 Предел текучести трубной решётки выше предела текучести трубы

Если предел текучести трубной решётки $\sigma_{\text{уп}}$ выше чем у трубы, то граница зон упругой и пластической деформации будет находиться в металле трубной решётки после достижения трубой полной пластичности. По мере того, как соотношение текучестей трубной решётки и трубы $\sigma_{\text{уп}}/\sigma_{\text{уп}}$ увеличивается радиус границы зон упругой и пластической деформации сдвигается ближе к трубе. При значении этого коэффициента 2 граница зон находится на поверхности соприкосновения трубы и трубной решётки, а материал трубной решётки остаётся полностью упругим.

3.1.3 Предел текучести трубной решётки ниже предела текучести трубы

Паровые поверхностные конденсаторы, в которых используются высокопрочные тонкостенные трубы с низким модулем упругости, разданные в трубных решётках из углеродистой стали с плакированием или из нержавеющей стали, наглядно демонстрируют данные условия. Здесь, когда соотношение $\sigma_{\text{уп}}/\sigma_{\text{уп}}$ больше единицы, относительная толщина трубы определяет максимально допустимое давление раздачи. Самый простой способ понять эффект давления на отверстия в трубной решётке — представить в плотном контакте с отверстием трубу с нулевой толщиной. В этих гипотетических условиях давление на внешней поверхности трубы (OD) будет идентичным давлению на внутренней поверхности (ID). Вследствие этого предельное давление в трубе будет равным предельному давлению для трубной решётки, которое равно $2\sigma_{\text{уп}}\sqrt{3}$. Таким образом предел текучести трубной решётки определяет максимальное давление раздачи.

В трубе с некоторой ненулевой толщиной, пребывающей в условиях полной пластической деформации, есть некая вычисляемая потеря давления, передаваемого через стенку трубы. Давление, с которым труба воздействует на отверстие, это давление раздачи за минусом некоторой потери по передаче через стенку полностью пластичной трубы. Для предотвращения выдавливания трубной решётки внешнее давление трубы не должно превышать предел пластической деформации

¹ Смотри Ст.Йокелль «Развальцованные и развальцованные со сваркой соединения труба — трубная решётка» для ознакомления

решётки $2\sigma_p\sqrt{3}$. Таким образом, максимальное давление раздачи в трубе не должно превышать сумму предела пластической деформации решётки и величины потери по передаче давления через стенку полностью пластичной трубы. Это даёт возможность определить максимальное давление на стенки трубы, на диаметр трубы и на конструкцию трубной решётки.

3.2 Воздействие механической вальцовки на конец трубы

Когда коническое веретено вальцовки прижимает закалённые ролики к поверхности трубы, зона контакта бесконечно узкая и представляет из себя условно прямую линию. Теоретически ширина этих линий нулевая. Площадь контактной поверхности нулевая, а давление, которое передают ролики, бесконечно велико. Однако, после соприкосновения, когда веретено в процессе вальцовки продвигается вперёд, ролики сначала деформируют трубу упруго в форме углублений с измеряемой площадью контактной поверхности. Направление вращения роликов противоположно направлению вращения веретена. В этой ситуации, в соответствии с эффектом Пуассона, конец трубы становится короче, а стенки трубы тоньше. Весьма скоро вальцовка начинает деформировать трубу пластически. Удельное давление, с которым ролики воздействуют на поверхность трубы, превосходит предел текучести, следовательно, в соответствии с моделью, описанной выше, слои, образующие трубу, постепенно выдавливаются, когда давление на каждую из камер превышает предел текучести. Выдавливание происходит за счёт уменьшения толщины стенки трубы. Пластическое утонение вместе с утонением по причине выдавливания металла составляет **степень развальцовки**.

На практике невозможно легко, быстро и точно измерить степень развальцовки соединения труба — трубная решётка, в следствии чего, как правило, эту величину определяют из соотношения параметров отверстия и трубы до развальцовки и внутреннего диаметра трубы после развальцовки. Увеличение внутреннего диаметра трубы после вальцовки включает в т.ч. некоторое невычисляемое расхождение окружающих отверстие перемычек, поэтому полученную «степень развальцовки» часто называют «условной».

3.3 Корреляция деформации конца трубы с усилием сдвига и герметичностью соединения

Ранние попытки вывести корреляцию выдавливания конца трубы с усилием сдвига были заброшены по причине сложности измерений и весьма неоднородных результатов. Большой успех был достигнут в относительно толстых трубах за счёт выявления корреляции усилия сдвига трубы со степенью развальцовки. Степень развальцовки стала наиболее часто используемым критерием оценки достаточности развальцовки при производстве и эксплуатации теплообменников. Однако теоретические изыскания по обоснованности использования корреляции силы сдвига от степени развальцовки отсутствуют до сих пор, поэтому, как правило, для нужд производства проводят замеры усилия сдвига на образцах, соотнося результаты с соответствующей степенью развальцовки.

В трудах по раздаче труб теме корреляции между ожидаемой степенью развальцовки и герметичностью соединения трубы и трубной решётки уделено мало внимания. Компания HydroPro (Калифорния) провела серию испытаний для определения усилия сдвига и герметичности соединения после гибридной раздачи с целью последующей аккредитации процедуры такой раздачи (гибридная раздача — это гидравлическая раздача труб на давлении, которое создаёт умеренное контактное напряжение трубы с трубной решёткой с последующей механической вальцовкой для повышения контактного напряжения, которое требуется для достижения желаемой прочности соединения). Для этих исследований специалисты компании связали давление гидравлической раздачи и крутящий момент механической вальцовки с силой и напряжённостью итогового соединения. Сила сдвига и напряжённость соответствовали поставленным критериям для аккредитации.

3.4 Пример расчёта степени развальцовки

Предлагаемые производителями вальцовочного инструмента увеличения диаметров труб после контакта со стенками отверстия меняются в зависимости от материала трубы, диаметра и допустимых отклонений по толщине стенки. Типичная рекомендация для трубы из нержавеющей стали с наружным диаметром 19.0 мм и толщиной стенки 0.5 мм (внутренний диаметр 18.0 мм)

предполагает увеличение на 0.1016 мм. Взяв зазор в 0.254 мм и пренебрегая утонением стенок в точке контакта труба — трубная решётка, получим наружный диаметр трубы в точке контакта $19.0 + 0.254 = 19.254$ мм. Внутренний диаметр в момент контакта будет $18.0 + 0.254 = 18.254$ мм. После раздачи внутренний диаметр трубы станет равен $18.254 + 0.1016 = 18.3556$ мм. Расчётная толщина стенки после раздачи будет равна $(19.254 - 18.3556)/2 = 0.4492$ мм. Степень развальцовки тогда составит $(0.5 - 0.4492)/0.5 = 5.08\%$.

3.5 Ограничения применяемости корреляций степени развальцовки с усилием сдвига

Применяемость корреляции степени развальцовки с усилием сдвига основывается на нескольких допущениях:

1. Наружный диаметр и толщина стенок труб одинаковы при любой температуре.
2. Отверстия в трубной решётке одинаковы и не меняются по всей толщине трубной решётки.
3. Усилие сдвига алгоритмически зависит от утонения стенки трубы как некоторая определённая функция и постоянно для конкретной степени развальцовки в трубах из одной партии.
4. Инструменты, используемые для измерения наружного и внутреннего диаметров неразданной трубы, внутреннего диаметра отверстия под трубу, а также внутреннего диаметра разданной трубы соответствуют задаче проведения измерений с точностью достаточной для минимизации погрешности измерений.

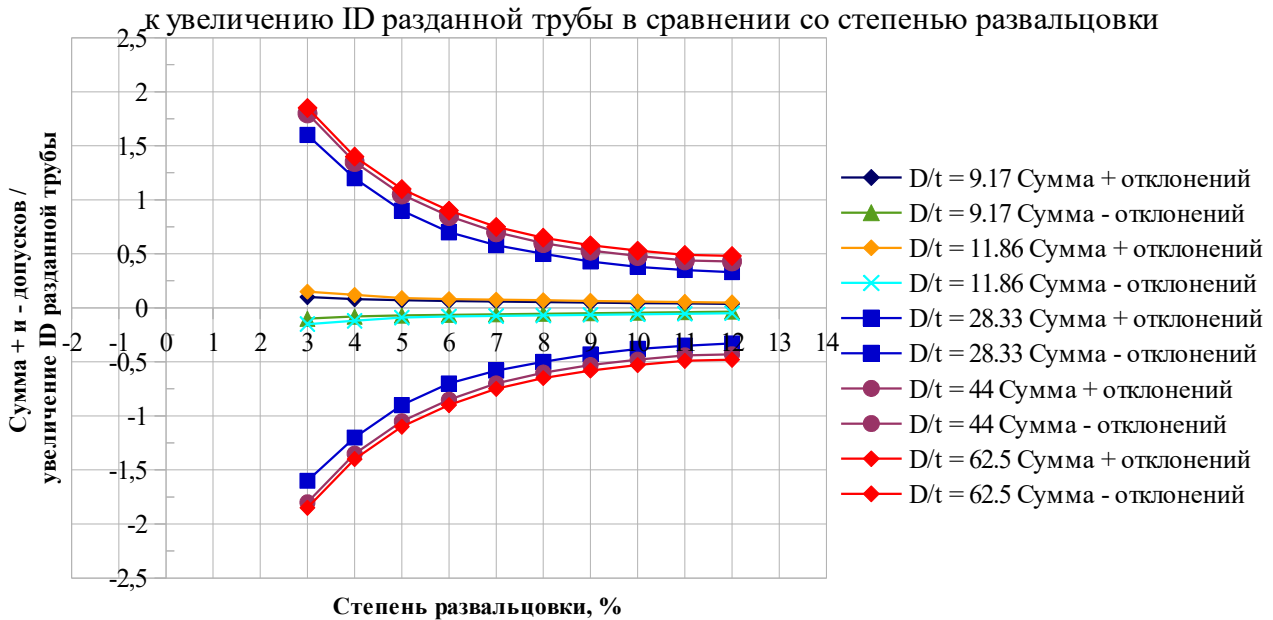
Однако следующие факты не позволяют опираться на вышеперечисленные допущения:

1. Обычно допуски по сверлению высокоточных отверстий трубных досок подогревателей сетевой воды и поверхностных конденсаторов берут из стандартов ТЕМА. Для труб с наружным диаметром 19.1 мм 96% отверстий должно быть с внутренним диаметром $19.25\text{мм} \pm 0.05\text{мм}$, а 4% отверстий могут иметь зазор более 0.25мм.
2. Диаметры отверстий по всей толщине трубной решётки не одинаковы, оставаясь, при этом, в допусках;
3. Трубы имеют свои допуски по точности изготовления. Так, например, титановые трубы, производимые по ASME-спецификации SB-338, диаметром до 25.4мм могут иметь отклонение $\pm 0.102\text{мм}$ по наружному диаметру и $\pm 10\%$ по толщине стенки.
4. В публикации, в которой были представлены измерения зависимости прочности соединения от степени развальцовки труб котла, автор не нашёл никаких теоретических и практических данных, свидетельствующих, что зависимость прочности соединения от степени развальцовки может быть описана какой-то алгоритмической функцией. Наблюдался существенный разброс в полученных результатах.
5. Разные исследователи, имеющие опыт в проведении измерений внутренних диаметров отверстий и труб трёхточечным нутромером, получают в значительной степени отличающиеся данные, не смотря на стандартную погрешность инструмента в $\pm 0.00254\text{мм}$.

На практике третье допущение и вовсе спорно, т. к. усилия сдвига в моделях, используемых для оценки процесса, считаются неизменными после выбора степени развальцовки, которая будет использована при производстве.

Не смотря на широкое распространение степени развальцовки как критерия, как видно из Графика 1, его достоверность падает с уменьшением толщины стенки трубы относительно диаметра. Толщина стенок большинства теплообменных труб лежит в диапазоне от 1.25 до 2.80 мм. Для подогревателей сетевой воды в зависимости от рабочего давления и выбранного материала, толщина стенок труб может варьироваться от 0.712 до 2.80 мм. Для очень тонкостенных труб диапазон внутренних диаметров, величины которых необходимы для выбора степени развальцовки, с учётом плюсовых и минусовых отклонений может быть очень большим. С ростом толщины стенки и снижением отношения наружного диаметра к толщине стенки диапазон разброса данных сужается. На Графике 1 наглядно видно, что выбор степени развальцовки по требуемой силе сдвига правомочно для тех аппаратов, в которых среднее соотношение D/t лежит в диапазоне 7-13. Однако это не подходящий способ определения достаточности раздачи тонкостенных труб, которые используются в подогревателях низкого давления и поверхностных конденсаторах.

График 1. Отношение суммы + и - допусков



Необходимо отметить, что Таблица 5 части В раздела II кодов ASME, спецификация SB-338, из которой были взяты начальные данные для построения Графика 1, озаглавлена «Допустимые отклонения наружных размеров, основанные на *индивидуальных* измерениях». График 1 иллюстрирует то, что сумма допусков по наружному диаметру, толщине стенки трубы и точности сверления отверстия под трубу превышает увеличение внутреннего диаметра трубы, которое измерялось для пяти приведённых вариантов соотношений D/t . Он показывает, что суммарные положительные и отрицательные отклонения могут существенно превышать увеличение внутреннего диаметра, необходимого для достижения ожидаемой степени развальцовки. Комбинация положительных и отрицательных отклонений для конкретных труб и трудности проведения точных измерений размеров труб и отверстий является причиной часто наблюдаемого разброса данных.

3.6 Предостережения по использованию корреляции усилия сдвига и крутящего момента развальцовки

Существуют некоторые предостережения по использованию корреляции усилия сдвига и крутящего момента, как определяющего фактора надёжности соединения:

1. Датчик крутящего момента в вальцовочном оборудовании не может учитывать сопротивление вращению роликов, возникающее от стремления стенок трубы сжаться или когда инородное тело в инструменте или в зоне между инструментом и трубой препятствует вращению. По этой причине чтобы получить адекватное соотношение необходимо, чтобы поверхности трубы и инструмента были в высшей степени чистыми.
2. Крутящий момент, требуемый для раздачи трубы в трубной решётке «на сухую», значительно выше, чем для вальцовки со смазкой. Поэтому квалификационные тесты, проведённые со смазанными роликами, не применимы для вальцовки на сухую.
3. В таблице 1.С приведены минимально и максимально допустимые значения предела текучести для трёх сортов отожжённых титановых труб (в соответствии со спецификацией SB-338). В ней также приведено соотношение этих пределов (максимального к минимальному) чтобы подчеркнуть величину диапазона. Для применения корреляции усилия сдвига с крутящим моментом значение предела текучести труб, используемых в производстве поверхностного конденсатора, должно быть максимально близко к таковому труб, использованных на образцах. В зависимости от количества труб в аппарате заказ на них может быть произведён за несколько нагревов печи и в полученных ящиках могут быть трубы из разных партий. По этой причине рекомендуется требовать от поставщиков партионную ведомость с привязкой трубы к номеру партии и учитывать, что в одном ящике могут находиться трубы из разных производственных партий. Такой учёт также в будущем облегчит задачу по поиску возможной причины пропусков соответствующей трубы.

3.7 Суждения по поводу процедуры вальцовки тонкостенных титановых труб в поверхностных пароконденсаторах

При условии учёта описанных выше предостережений, автор считает, что оценка усилия сдвига по крутящему моменту вальцовки высокопрочных тонкостенных труб с низким модулем упругости более предпочтительна чем по степени развальцовки.

3.8 Требования к техническим условиям механической развальцовки

Технические условия должны включать следующее:

1. Техпроцесс должен определять как производитель предлагает чистить отверстия под трубу в трубной решётке перед установкой труб. Стандартные методы — чистка паром с последующей продувкой горячим отфильтрованным воздухом либо чистка отверстий пропитанными ацетоном фетровыми пробками.
2. В техпроцессе должно быть требование очистки концов труб перед раздачей. Способ очистки также должен быть предложен производителем.
3. Формулировки «соответствующая защита» и подобные недостаточно конкретны. Техпроцесс должен устанавливать требование, в соответствии с которым рабочим запрещено вскрывать ящики с трубами до момента установки в конденсатор. Коробки с трубами, из которых рабочие берут трубы, в случае прерывания работ должны быть накрыты чистой целлофановой плёнкой с целью не допустить оседания пыли и грязи на поверхность труб.
4. Техпроцесс должен определять максимальное время между извлечением труб из ящиков и их установкой в аппарат. Рабочие не должны вскрывать ящики до полной готовности к установке труб в конденсатор. Если же нагрузка и сменность требуют после вскрытия ящика более часа простоя, то рабочие должны накрыть трубы целлофановой плёнкой.
5. Техпроцесс должен детально описывать как должны быть очищены трубы после раздачи.
6. Техпроцесс должен включать порядок установки и развальцовки групп и блоков труб в трубные решётки для равномерного нагружения трубной решётки.
7. Техпроцесс должен описывать процедуру калибровки контроллера крутящего момента и частоту таких калибровок.
8. Техпроцесс должен описывать правила технического обслуживания вальцовочного оборудования.
9. Техпроцесс должен включать систему определения позиции трубы.
10. Техпроцесс должен включать систему определения партии трубы.

3.8.1 Вальцовочный инструмент и оборудование

Автор считает, что параллельные 5-роликовые вальцовки, управляемые вальцовочной машиной с гидравлическим приводом, предпочтительнее косых (самоподающихся) 3-роликовых вальцовок. Такое оборудование производится предприятиями Азии, Северной Америки и Европы. Причина такого выбора в том, что хотя ролики соприкасаются с поверхностью трубы, которая на 67% больше, амплитуда деформации намного ниже. Как результат - меньше усталость металла трубы (см. рис.1). Ввиду того, что не всегда целесообразно производить 5-роликовые вальцовки для работы с внутренними диаметрами труб меньше 18мм, для таких труб могут использоваться 3-роликовые вальцовки.

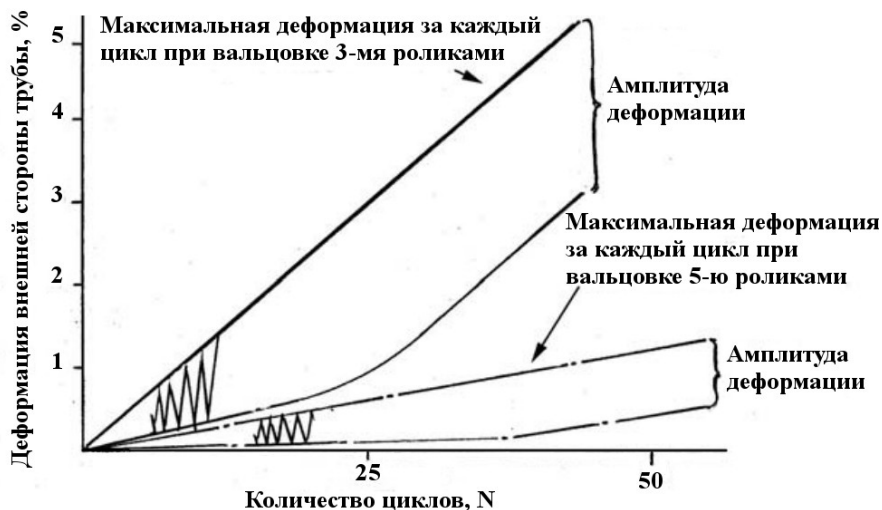


Рисунок 1: Деформация наружной стороны трубы в зависимости от частоты (адаптировано из патента Соединённых Штатов №4,142,581, выданного 06 марта 1979 года Юджи Йошитоми и другим)

Для большинства титановых поверхностных теплообменников используемые трубы твёрже трубных досок. В этих условиях косые самоподающиеся вальцовки деформируют металл по форме песочных часов, а контактное давление неравномерно по толщине трубы, что приводит к слабому неплотному соединению по сравнению с применением вальцовок с параллельными роликами. Стоит отметить, что ролики таких вальцовок тоже не идеально параллельны, они слегка развёрнуты для облегчения введения и извлечения конусного веретена гидравлическим плунжером.

3.9 Предлагаемый альтернативный метод раздачи труб (гибридная вальцовка)

Как показывает график (рис.1), приведённый из патента США 4,142,581 — большее число роликов приводит к меньшей усталости металла. Если представить, что количество роликов бесконечно, то усталость металла будет минимальной. Эта (нереальная) ситуация имитирует то, что происходит когда на раздаваемый конец трубы воздействует гидравлическое давление. Воздействие гидравлического давления на конец трубы раздаёт трубу без осевого выдавливания.

Насколько известно автору, крупный производитель поверхностных конденсаторов военно-морских кораблей недавно применил гибридную раздачу для оценки качества соединений труба — трубная решётка. Такая раздача включает гидрораздачу для преднапряжения соединения с последующей мехвальцовкой. Гибридная раздача имеет следующие преимущества:

1. Предварительная раздача повышает коэффициент прочности трубной решётки, тем самым увеличивая её жёсткость. Формула 1 определяет данный коэффициент:

$$\eta = \frac{p-d}{p} * 100$$

В этой формуле:

- η - коэффициент прочности трубной решётки;
- p – расстояние между центрами отверстий под трубы, мм;
- d – внутренний диаметр отверстия², мм.

Увеличение коэффициента при использовании труб 25x0.5мм невелико. Для меньших диаметров и более толстостенных труб увеличение существенно, хотя такая двухэтапная раздача повышает жёсткость трубной решётки во всём диапазоне толщин труб.

2. Контроль давления гидравлической раздачи на оборудовании, с которым знаком автор, возможно с точностью до ± 70 бар. За дополнительную цену производитель может обеспечить вдвое большую точность результата (± 35 бар). К корреляции текучести трубы с давлением гидрораздачи предъявляются те же требования, какие предъявляются при корреляции крутящего момента и усилия сдвига.
3. Переход от разданной к неразданной части трубы после гидрораздачи более плавный по сравнению с мехвальцовкой, поэтому остаточное напряжение в транзитной зоне ниже, чем после вальцовки.

3.10 Кольцевые канавки в трубном отверстии для раздачи титановых труб

3.10.1 Канавки для вальцовки

Канавки по стандарту ТЕМА, шириной 3.18мм и глубиной 0.4мм, не подходят для раздачи тонкостенных титановых труб и других материалов со схожими механическими свойствами - труба может треснуть на кромках канавки когда металл будет деформироваться чтобы принять нужную форму. Для таких материалов достаточную герметичность и прочность соединения обеспечивают несколько v-образных, неглубоких канавок³. Одна компания, специализирующаяся в перенабивке пучков поверхностных конденсаторов, обнаружила, что обработка трубных отверстий щёткой с зубцами обеспечивает в последствии отличную герметичность и прочность соединения⁴.

3.10.2 Канавки для гидравлической раздачи

Последняя редакция стандарта ТЕМА указывает, что канавки для гидравлической раздачи

2 В книге «Heat Exchanger Design Handbook» авторства Т.Курран, в параграфе 11.4.4.1 поясняется, что «если труба уже раздана в трубной решётке, то стенка трубы может учитываться при расчёте данного коэффициента»

3 Такие канавки изображены на стр.189 книги «A working Guide to Shell-and-Tube Heat Exchangers», изд-во McGraw-Hill, Нью-Йорк, 1990

4 Личное общение с Бобом Ханном из Atlantic Group, Норфолк, Вирджиния

должны быть шириной 6.35мм. Не смотря на то, что данная ширина подходит для большинства материалов, используйте Формулу 2 для расчёта оптимальной ширины канавки.

$$W = 1.56 \sqrt{Rt}$$

В этой формуле:

- W – оптимальная ширина канавки;
- R – средний радиус трубы, мм;
- t – толщина стенки трубы, мм.

4 ВЫВОДЫ

Нижеследующие выводы взяты из предшествующих рассуждений о теории раздачи и сложности создания методов, позволяющих достоверно прогнозировать процент степени развальцовки.

1. Для тонкостенных титановых труб использование соотношения усилия сдвига (тянущего усилия) с крутящим моментом является предпочтительным для достижения требуемых результатов.
2. Проектировщики должны учитывать, что вальцовочные соединения с тонкостенными титановыми трубами могут потребовать конфигурации кольцевых канавок отличной от той, что определена стандартами ТЕМА. Они также должны учитывать, что канавки для гидравлической раздачи должны быть как минимум 6.35мм шириной.
3. Двухэтапная гибридная раздача предпочтительна из-за усиливающего трубную решётку эффекта первого этапа раздачи.
4. Гибридная раздача имеет преимущества благодаря аккуратной фиксации трубы в отверстии, усилении трубной решётки после гидрораздачи на первом этапе, а также деформационного упрочнения слоёв конца трубы, которое препятствует упругому возвратному сжатию трубы. В сумме это даёт возможность получить соединение труба — трубная решётка, которое менее склонно к усталостным трещинообразованиям и имеет достаточную прочность для повседневной работы аппарата.

5 БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит компанию HydroPro (Сан Хосе, Калифорния) за информацию о гидрораздаче, полученную с помощью их оборудования.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1.А. Допустимые отклонения по наружному диаметру титановых труб (SB-338)

Номинальный OD, мм	С учётом допуска по диаметру		Допуск
	Максимум, мм	Минимум, мм	
17,000	17,102	16,898	±0,102
18,000	18,102	17,898	
19,500	19,602	19,398	
21,000	21,102	20,898	
22,000	22,102	21,898	
22,225	22,327	22,123	
22,500	22,602	22,398	
24,000	24,102	23,898	
25,000	25,102	24,898	
25,400	25,527	25,273	
28,575	28,702	28,448	

Таблица 1.В. Допустимые отклонения по толщине стенки титановых труб (SB-338)

Номинальная толщина стенки, мм	Допуски по толщине стенки		Допуск
	Максимум, мм	Минимум, мм	
0,400	0,440	0,360	±10%
0,500	0,550	0,450	
0,508	0,559	0,457	
0,600	0,660	0,540	
0,700	0,770	0,630	
0,711	0,782	0,640	

Таблица 1.С. Диапазон пределов текучести титановых сплавов (SB-338)

Марка титана по SB-338	Диапазон пределов текучести		Соотношение
	Минимум, МПа	Максимум, МПа	
1	138	310	2,25
2	275	450	1,64
3	380	550	1,45

Таблица 2. Относительная толщина труб

Наружный диаметр трубы D, мм	Толщина стенки трубы t, мм	Относительная толщина
17,000	0,400	42,50
17,000	0,500	34,00
17,000	0,600	28,33
18,000	0,400	45,00
18,000	0,400	45,00
18,000	0,500	36,00
18,000	0,600	30,00
19,000	0,400	47,50
19,000	0,500	38,00
19,000	0,600	31,67
20,000	0,400	50,00
20,000	0,500	40,00
20,000	0,600	33,33
20,000	0,700	28,57
21,000	0,400	52,50
21,000	0,500	42,00
21,000	0,600	35,00

21,000	0,700	30,00
22,000	0,400	55,00
22,000	0,500	44,00
22,000	0,600	36,67
22,000	0,700	31,43
23,000	0,400	57,50
23,000	0,500	46,00
23,000	0,600	38,33
23,000	0,700	32,86
24,000	0,400	60,00
24,000	0,500	48,00
25,000	0,400	62,50
25,000	0,500	50,00
25,000	0,600	41,67
25,000	0,700	35,71
25,400	0,500	50,80
25,400	0,600	42,33
25,400	0,700	36,29
28,575	0,500	57,15
28,575	0,600	47,63
28,575	0,700	40,82