

УДК 621.774
DOI: 10.12737/18714

В.М. Терехов, д.т.н.
(ПАО "ЗиО-Подольск", 142103, г. Подольск, М.О., ул. Железнодорожная, 2),
Л.А. Кондратенко, к.т.н.
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),
107023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38)
E-mail: v.terehov@eatom.ru

Прогрессивная технология роликового вальцевания теплообменных труб

На основании экспериментальных, численных исследований и производственного опыта показано, что процесс роликового вальцевания теплообменных труб отличается от широко распространенного представления. В действительности при вальцевании происходит деформация трубы в форме вращающегося треугольника (для 3-роликовой вальцовки) с увеличивающимися сторонами. Прижатие трубы к стенке отверстия осуществляется в некоторых точках, число которых растет с увеличением крутящего момента. При этом происходит только упругая деформация перемычек в доске трубной.

Ключевые слова: труба; доска трубная; перемычка; вальцовка; роликовое вальцевание; напряжение; радиальная деформация.

V.M. Terekhov, D.Eng.,
(Co. "ZiO-Podolsk", 2, Zheleznodorozhnaya Str., M.O., Podolsk, 142103)
L.A. Kondratenko, Can.Eng.
(Moscow State Engineering University (MAMI), 38, B. Semyonovskaya Str., 107023, Moscow)

Advanced technology of heat-exchange pipe roller rolling

In this paper on the basis of experimental numerical investigations carried out and factory experience it is shown that the process of heat-exchange pipe roller rolling differs from a widely used idea that in the course of rolling a pipe approaches uniformly to a cylindrical surface of an opening in a pipe plate and then presses itself causing at that elasto-plastic deformations in a pipe plate. In fact, at rolling a pipe deformation occurs in the form of a rotating triangle (for three-roller rolling) with increasing sides. Pipe pressing to an opening side is carried out in some points the number of which grows with the increase of a rotational moment. At that, only an elastic deformation of bridges in a pipe plate takes place. The final contact stress in a coupling is caused by the interaction of different metal layers, a part of which is stretched, and another part is compressed.

Keywords: pipe; pipe plate; bridge; rolling; roller rolling; stress; radial deformation.

Во многих отраслях применяются теплообменные аппараты, содержащие доски трубные (коллекторы), в перфорациях которых закрепляются концы теплообменных труб. В современных ответственных аппаратах их закрепление обычно осуществляют комбинированным способом, сваркой и пластическим деформированием, приводящим к увеличению внутреннего диаметра труб и созданию требуемого контактного напряжения между сопрягаемыми поверхностями. При этом оба указанных способа порознь или вместе должны обеспечивать требуемые показатели качества узла крепления: прочность, плотность, коррозионную стойкость и др.

Пластическое деформирование может состоять из двух стадий: объемной раздачи; ро-

ликового вальцевания. Первая выполняется разными методами: гидравлическая раздача давлением жидкости до 400 МПа; импульсом, например с помощью взрывчатых веществ; прессовая раздача. Такие методы в теплообменных аппаратах обычно не обеспечивают необходимую плотность соединения, поскольку для этого нужно развивать высокие давления, приводящие к деформации перемычек.

Правильно выполненное роликовое вальцевание позволяет создать требуемую плотность сопрягаемых поверхностей. Очевидно, что при некачественном креплении труб произойдет разгерметизация одного из каналов теплопередачи с последующими авариями и др.

В России в настоящее время практически одними из основных официальных нормативных документов, регламентирующих роликосное вальцевание, являются ОСТ 26-17-01-83 и ОСТ 26-02-1015-85, разработанные ОАО «ВНИИПТ-химнефтеаппаратуры» (г. Волгоград). Созданы этой организацией и другие документы, дополнительно регламентирующие рассматриваемый процесс. В основе указанных трудов лежат научные представления, изложенные в [1]. В ней была принята гидростатическая модель процесса развальцовки, включающая следующие стадии:

I стадия – упругое, упругопластическое деформирование трубы до соприкосновения с поверхностью отверстия;

II стадия – совместная пластическая деформация трубы и упругое, упругопластическое или пластическое деформирование трубной решетки;

III стадия – упругая разгрузка трубы и трубной решетки.

Кроме того, принят ряд допущений.

В основе выше изложенного подхода к анализу процессов вальцевания лежит представление, что труба по мере обкатывания её роликами равномерно прижимается к стенке отверстия и при этом её стенка оказывается как бы под действием некоторого давления, подобного гидравлическому. Тогда, следуя такому представлению, в ней до контакта со стенкой отверстия развиваются только окружные напряжения, а после контакта по всей зоне соприкосновения появляются практически одинаковые по величине сжимающие радиальные, напряжения.

Так происходит при гидравлической раздаче, прессовой раздаче труб, т.е. в случае воздействия на всю внутреннюю поверхность жидкостью, эластичной втулкой, дорном и т.д. Авторы данного направления в качестве критериев качества вальцевания предложили степень развальцовки и величину крутящего момента на выходном вале вальцовочной машины. Причем второй критерий не учитывает такие параметры вальцовки, как диаметры роликов и веретена, их конусность, угол перекрещивания осей роликов и веретена.

В действительности процесс роликосного вальцевания протекает по-иному. В каждый момент времени ролики опираются на поверхность трубы в z точках. В этих точках происходит изгиб, упругопластическая деформация. Поскольку здесь эквивалентное напряжение или, следуя В.И. Феодосьеву [2] – интенсивность напряжения s_i , по всему сече-

нию достигает значений, превышающих предел текучести, то происходит не только изгиб, но и удлинение каждой мгновенной хорды с последующим прижатием к стенке отверстия. Поэтому фактическая деформация трубы, увеличение диаметральных размеров, осуществляется при меньших затратах мощности и сил, контактное взаимодействие трубы со стенкой отверстия происходит по другим законам, нежели взаимодействие двух практически концентрических поверхностей, постепенно сближающихся друг с другом.

Кроме того, пренебрежение таким явлением, как упрочнение материала в процессе деформации, не оправдано, поскольку происходит холодная пластическая деформация, размеры которой всегда переводят металл в зону упрочнения. Из опыта известно, что материал трубы в процессе раздачи сильно упрочняется.

Несмотря на указанные недостатки, созданный в 1970–80-х гг. подход к проблеме закрепления теплообменных труб, дополненный экспериментальными данными, позволил в СССР разработать нормативные документы, обеспечивающие изготовление энергетического оборудования. Однако современные требования к оборудованию, в котором возрастают удельные мощности, приводят к необходимости использования более прочных труб, материалов досок. Логика же выше упомянутых работ часто не допускает этого.

На Западе, как следует из имеющихся открытых публикаций, процесс роликосного вальцевания обычно регламентирован указаниями, разработанными фирмами, изготовителями вальцовочного оборудования. При этом в основе лежит требование о раздаче трубы.

В работе [3] показано, что отмеченный подход ошибочен и не дает правильной информации. Более того, некоторые требования западных специалистов могут стать причиной остановки работы предприятия. Этот случай описан в книге [4].

Большой производственный опыт авторов настоящей работы, многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процесса роликосного вальцевания теплообменных труб позволили установить следующее:

1. В процессе вальцевания труба постепенно раздается и в некоторое мгновение происходит в z точках контакт трубы со стенкой отверстия (z – число роликов вальцовки). На рис. 1 изображено такое мгновение для 3-роликовой вальцовки.

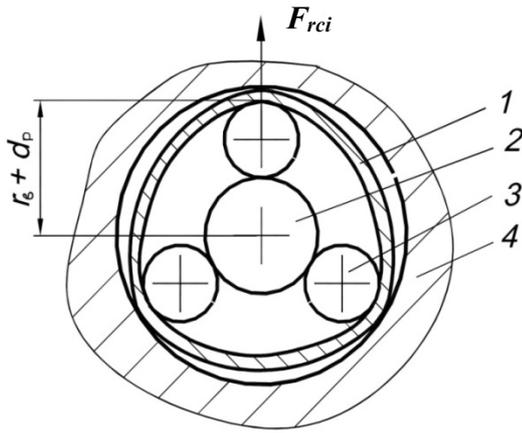


Рис. 1. Ориентировочный профиль трубы при первом ее касании стенок отверстия:
 1 – труба; 2 – веретено; 3 – ролик; 4 – доска трубная

После 1-го касания и дальнейшего качения роликов из-за упругости трубы контакт нарушается. Поскольку положение обоймы вальцовки, т.е. корпуса, где размещен упорный подшипник, относительно трубы не изменяется, а труба обычно закреплена от проворачивания, то через период вращения ролики опять попадают в зоны, находящиеся в окрестностях точек 1-го касания. Из-за осевого смещения конического веретена радиальное усилие и потребляемый крутящий момент возрастают. Это обстоятельство приводит к тому, что в некоторое мгновение после окружного смещения роликов контакт в z точках не нарушается. Одной из причин данного явления может быть адгезионное схватывание.

После образования устойчивого контакта трубы со стенкой отверстия в процессе вальцевания возникают новые условия, ведущие к изменению напряженного состояния в стенке трубы и ее деформации. Если в свободной трубе, т.е. не прижатой к стенке отверстия, каждый ролик 3-роликовой вальцовки деформировал 2/3 окружности трубы, то после устойчивого контакта в 3-х точках каждый ролик будет воздействовать на 1/3 окружности трубы.

2. Численные исследования [4] и производственный опыт подтвердили предположение, что в процессе вальцевания интенсивность напряжений и деформация стенки трубы следуют за движением роликов и их величины зависят от значения крутящего момента на хвостовике веретена (рис. 2).

3. Напряжения в перемычках досок трубных или охватывающей втулке значительно меньше пределов текучести [4] и поэтому доски или коллекторы в рассматриваемом процессе деформируются только упруго.

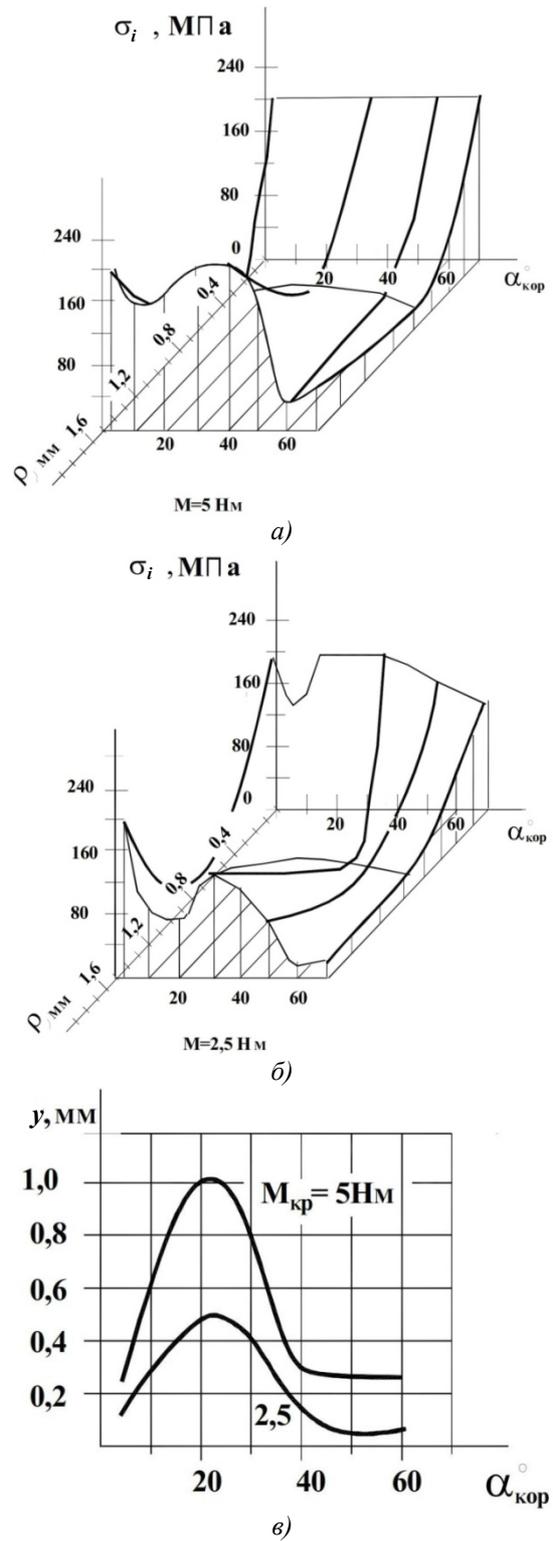


Рис. 2. Возможная радиальная деформация y и изменение интенсивности напряжений σ_i в стенке трубы $\varnothing 16 \times 1,5$ при вальцевании с разными крутящими моментами в зависимости от угла поворота $\alpha_{кор}$ корпуса вальцовки

Изложенное дало основание рассмотреть процесс образования остаточных напряжений в узле крепления, влияющих как на его ресурс, так и на ресурс теплообменного аппарата.

Обычно процесс вальцевания завершается,

когда крутящий момент на веретене достигнет некоторого значения. При этом в мгновение остановки вращения веретена между трубой и ложементом развивается требуемое радиальное нормальное напряжение в зоне контакта [2]:

$$\sigma_r = -4 M_{кр0} \operatorname{tg} \gamma / (s \pi l'_{крв} z d_{рс} \operatorname{tg} \alpha_b), \quad (1)$$

где $M_{кр0}$ – крутящий момент, затрачиваемый на деформацию трубы (контролируется по показывающим приборам вальцовочной машины); γ – угол перекрещивания осей роликов и веретена; s – толщина стенки трубы; z – число роликов; $d_{рс}$ – средний диаметр ролика; α_b – угол конусности веретена; $l'_{крв}$ – фактическая длина контакта прижимаемой трубы со стенкой отверстия ($l'_{крв} = l_{крв} - b_k$), b_k – суммарная ширина радиальных канавок в стенке отверстия.

Это напряжение после извлечения вальцовки обеспечивает в соединении выполнение всех предъявляемых требований. В принципе в это мгновение труба плотно прилегает не по всей поверхности вальцевания, а в n количестве зон контакта. Причем в z зонах контактное напряжение равно s_k , а в $(n - z)$ – оно отличается на величину, обусловленную разгрузкой, т.к. ролики ушли из этих зон.

Оценим величину остаточных напряжений после пробега ролика.

С этой целью опишем изменение внутреннего диаметра трубы, когда вращающееся веретено втягивается в трубу и вызывает тем самым ее диаметральною деформацию.

Из-за перекрещивания осей роликов и веретена последнее втягивается в трубу. При повороте веретена на угол α_b его осевое перемещение составит

$$x = \zeta_1 r_b \alpha_b \sin \gamma, \quad (2)$$

где ζ_1 – коэффициент проскальзывания ролика относительно веретена и ролика относительно трубы; r_b – радиус веретена.

По мере втягивания средний радиус веретена возрастает на величину

$$\Delta r_{\theta} = 0,5 K_b x, \text{ т.е. } x = \zeta_1 (r_{b0} + 0,5 K_b x) \alpha_b \sin \gamma;$$

где K_b – конусность веретена. Откуда после преобразований, получим

$$X = \zeta_1 r_{b0} \alpha_b \sin \gamma / (1 - 0,5 \zeta_1 K_b \alpha_b \sin \gamma), \quad (3)$$

где r_{b0} – начальный средний радиус веретена.

В процессе вальцевания происходит увеличение внутреннего диаметра трубы $\Delta d_i = K_b x$. Подставим сюда (3):

$$\Delta d_i = A_b r_{b0} \alpha_b / (1 - 0,5 A_b \alpha_b), \quad (4)$$

где $A_b = K_b \zeta_1 \sin \gamma$.

Следовательно, если в начале рассматриваемого движения диаметр ролика совпадает с линией ОА на рис. 3, то после поворота на не-

который угол $\alpha_k = 4\alpha_b$ и равный $\angle C$ точкой контакта станет В с радиусом

$$OB = a = 0,5(d_{b0} + \Delta d_i) + d_{рс},$$

где $d_{рс}$ – средний радиус ролика; d_{b0} – начальный диаметр веретена.

Длину отрезка АВ = c определим следующим образом:

$$C = a \sin(C) / \sin(A), \quad (5)$$

где $A = (\pi - C) / 2 + \operatorname{arctg}[(a - b)(a + b)^{-1} \operatorname{ctg}(C/2)]$; $b = 0,5 d_{b0} + d_{рс}$.

Если бы не было увеличения диаметра, то для угла α_k дуга перемещения составила бы $l_n = \alpha_k b$. Поэтому приращение дуги на указанном изменении равно

$$\Delta l = c - \alpha_k b, \quad (6)$$

а относительное перемещение будет

$$\varepsilon_{i1} = (c - \alpha_k b) / (\alpha_k b) = c / (\alpha_k b) - 1. \quad (7)$$

При описанном перемещении роликов во внутреннем слое разовьются напряжения, превышающие предел текучести материала.

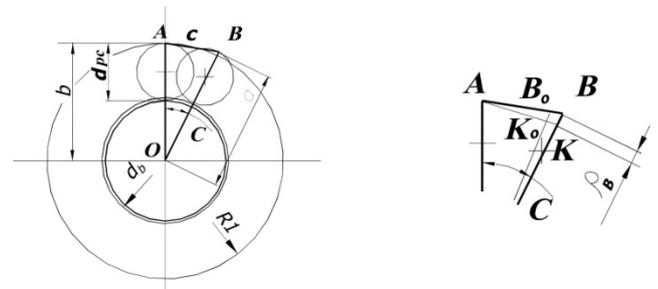


Рис. 3 Перемещение ролика при вальцевании

Для оценки этих напряжений разложим $1/3$ оборота корпуса вальцовки на множество α_k поворотов. Вычисляя для каждого из них по формулам (4), (5) элементарные приращения, и суммируя их, получим удлинение дуги окружности при смещении веретена на величину x , обусловленную поворотом корпуса вальцовки на угол α_k . Если значение d_{b0} соответствует условию окончательного прижатия трубы к стенке отверстия, то, учитывая (6), получим величину относительного окружного удлинения внутреннего слоя трубы при повороте корпуса на один оборот:

$$\varepsilon_i = 3 \Delta l / (2\pi b). \quad (7)$$

Для k -оборотов цикл вычислений следует повторить k раз, соответственно увеличивая значение d_{b0} .

Так, применительно к трубе $\varnothing 16 \times 1,5$ 08X18N10T с использованием 3-роликовой вальцовки с максимальным диаметром ролика $d_{p \max} = 4,5$ мм, максимальным диаметром веретена $d_{b \max} = 6,5$ мм, длиной вальцевания $l_{zk} = 30$ мм; углом перекрещивания осей роликов и веретена $\gamma = 1,5^\circ$ после первого прижатия, применив разработанную

программу вычислений OSTAT, получим диаметр $d_i = 13,37$ мм.

Выполнив 5 оборотов при коэффициенте проскальзывания $\zeta_1 = 0,5$, получим внутренний диаметр трубы $d_i = 13,50$ мм, а относительное окружное удлинение внутреннего слоя трубы $\varepsilon_i = 0,7$ %. Этому удлинению из диаграммы растяжения для этой стали соответствует напряжение $\sigma = 400$ МПа, при котором происходит пластическая деформация. В случае удаления вальцовки произойдет разгрузка, при которой изменение относительной деформации составит

$$\Delta\varepsilon_i = \sigma/E = 100 \% \cdot 400 / 2,1 \cdot 10^5 = 0,19 \%$$

Следовательно, на внутреннем слое образуется остаточная окружная деформация растяжения:

$$\varepsilon_{i0} = (0,7 - 0,19) \% = 0,51 \%,$$

которая составляет

$$\delta_{st} = \varepsilon_{i0} / \varepsilon_i = 0,51 / 0,7 = 0,728.$$

Допустим, что в зоне контакта ролика с трубой, например на дуге АВ, после 5-ти оборотов корпуса относительное удлинение составило ε_{ii} . Этому удлинению соответствовало радиальное перемещение точки В:

$$\rho_B = 0,5 \Delta d_i.$$

Поскольку после удаления вальцовки дуга АВ сократится на 0,19 % от образовавшейся длины, то из подобия треугольников АВК и АВ₀К₀ можно допустить, что и относительное радиальное перемещение точки В₀ будет меньше в такой же пропорции и составит:

$$\Delta\rho_{B0} = 0,5 \cdot 0,728 \Delta d_i = 0,364 \Delta d_i.$$

Расчеты по данному алгоритму с использованием программы OSTAT показали, что в момент остановки веретена при относительном радиальном сжатии $\varepsilon_{ri} = 3,64 \cdot 10^{-4}$ радиальное напряжение в стенке трубы составило $\sigma_r = E\varepsilon_{ri} = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3,64 \cdot 10^{-4} = 76,4$ МПа, а после разгрузки – $\sigma_{r0} = 0,728$; $\sigma_r = 55,6$ МПа.

Поскольку z роликов все же удерживают обе детали узла крепления от упругих деформаций при разгрузке, предположим, что в то мгновение, когда веретено остановилось, радиальное нормальное напряжение в зоне контакта между трубой и стенкой доски трубной или ложемент (при однотрубном образце) по всему периметру контакта равно s_k .

Под действием этого напряжения внутренний диаметр втулки (эквивалентной втулки) увеличится на величину

$$Dd_{2B} = 2s_k [(1-m)r_{20}^3 + (1+m)r_{20}r_{2H}^2]E^{-1} / [r_{2H}^2 - r_{20}^2], \quad (8)$$

а наружный диаметр – на величину

$$Dd_{2H} = 2s_k [(1-m)r_{20}^2r_{2H} + (1+m)r_{20}^2r_{2H}^2]E^{-1} / [r_{2H}^2 - r_{20}^2]. \quad (9)$$

Например, для отверстия диаметром 16,3 мм при $s_k = 40$ МПа, $Dd_{2B} = 0,0067$ мм; $Dd_{2H} = 0,0048$ мм.

Следовательно, относительное радиальное сокращение стенки втулки составляет:

$$e_r = -0,5(Dd_{2B} - Dd_{2H}) / s_2 = -0,5(0,0067 - 0,0048) / 6,85 = -0,00014,$$

а относительное окружное увеличение по среднему радиусу:

$$e_{i2} \{2p \{[(r_{20} + 0,5Dd_{2B}) + (r_{2H} + 0,5Dd_{2H})] / 2 - 2p(r_{20} + r_{2H}) / 2\} / (2p(r_{20} + r_{2H}) / 2)\} = 0,5(Dd_{2B} + Dd_{2H}) / (r_{20} + r_{2H}) = 0,00025. \quad (10)$$

Здесь $s_2 = 6,85$ мм – толщина стенки втулки (эквивалентной втулки).

Для принятых параметров трубы и отверстия, пользуясь методикой, изложенной в ОСТ 26-17-01-83, определим изменение диаметра трубы после касания сопрягаемых поверхностей трубы и отверстия значения внутреннего диаметра трубы, полученные в результате вальцевания: $d_{i1} = 12,558 \dots 13,443$ мм.

С помощью формулы [4] определим степень развальцовки:

$$V = V_0 + 0,0293(d - 16) + (s - 1,5)d^{0,92} = 0,09.$$

Тогда внутренний диаметр трубы вначале соприкосновения поверхностей будет следующим:

$$d_{i10} = d_{i1} - V = (12,558 \dots 13,443) - 0,09 = 12,468 \dots 13,353 \text{ мм.}$$

Положим, что на поверхности отверстия втулки нет каких-либо канавок, тогда изменение внутреннего диаметра рассматриваемой трубы после прижатия составит $B = 0,09$ мм.

Следовательно, относительное сокращение толщины стенки трубы равно

$$e_{r1} = - (0,09 - Dd_{2B}) / (16,3^{+0,12} - 12,468^{+0,885}) = - (0,021 \dots 0,028);$$

а относительное окружное удлинение

$$e_{t1} = 0,5(Dd_{1B} + Dd_{2B}) / (r_{10} + r_{20}) = 0,5(0,0067 + 0,09) / (0,5(16,3^{+0,12} + 12,468^{+0,885})) = 0,0032 \dots 0,00336.$$

Поскольку, охватывающая втулка деформируется упруго, то после извлечения вальцовки ее размеры должны восстановиться. Однако в наружных и внутренних поверхностях труб после вальцевания в ряде слоев образуются окружные и радиальные остаточные напряжения сжатия. Поэтому в процессе разгрузки будет происходить как сжатие, так и растяжение [5]. Аналитически оценить величину окончательного контактного напряжения в узле крепления в настоящее время затруднительно. Этот параметр целесообразней оценивать посредством эксперимента или же каким-либо численным моделированием.

На рис. 4 показаны графики распределения

окружных нормальных остаточных напряжений до вальцевания, на рис. 5 – графики распределения окружных остаточных напряжений после вальцевания, определенные по методу Давиденкова. Из них следует, что после вальцевания и удаления ложемента в наружных слоях наружной поверхности испытанных труб образовались окружные остаточные напряжения сжатия, т.е. $s_{\theta} < 0$, а на внутренних – окружные остаточные напряжения растяжения, т.е. $s_{\theta} > 0$.

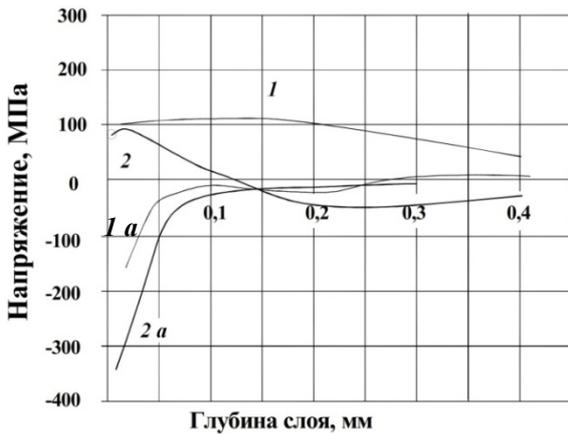


Рис. 4. Окружные остаточные нормальные напряжения в невальцованных трубах:
1, 1а – в слоях, прилегающих соответственно к наружной и внутренней поверхностям трубы из стали 08X14МФ; 2, 2а – в слоях, прилегающих соответственно к наружной и внутренней поверхностям трубы из стали 08X18Н10Т

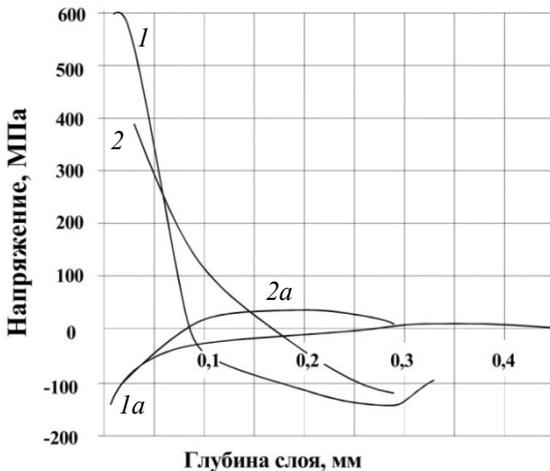


Рис. 5. Окружные остаточные нормальные напряжения в трубе Ø16x1,5 после вальцевания при $M_{кр} = 3,8...5$ Н·м, $n = 400$ об/мин, диаметре отверстия Ø16,4 мм:
1, 1а – соответственно, слои, прилегающие к внутренней и наружной поверхностям трубы из стали 08X14МФ;
2, 2а – соответственно, слои, прилегающие к внутренней и наружной поверхностям трубы из стали 08X18Н10Т

Используя формулу $\sigma_r = -2P \sin \varphi / (\pi r)$ [4], где r , φ – полярные координаты, при $\varphi = \pi/2$, оценим характер изменения радиальных нормальных напряжений, образующихся в процессе вальцевания. Вычисления представлены в табл. 1.

1. Распределение радиальных нормальных сжимающих напряжений в стенке трубы

r , мкм	2	4	10	100	1000	1500
σ , МПа	17951	8976	3590	359	35,9	23,9

В табл.1 приведены значения радиальных нормальных напряжений в стенке трубы после вальцевания при $M_{кр} = 5$ Н·м, что соответствует режимам получения зависимостей на рис. 5. В этой операции на ролик в конце вальцевания действует радиальная сила $F_{rci} = 1690$ Н [4].

Из данной табл.1 следует, что на глубине меньшей 0,1 мм после остановки веретена радиальные сжимающие напряжения превышают предел текучести. Причем на глубине до 10...15 мкм металл в окрестности линии контакта фактически является жидкостью.

Несмотря на формирование вблизи от внутренней поверхности трубы зоны с окружными растягивающими напряжениями, в стенке трубы развиваются радиальные сжимающие напряжения, а в слое внутренней поверхности трубы толщиной до 0,01 мм независимо от диаметра отверстия в доске трубной образуются напряжения или происходят явления, устраняющие микротрещины. Это обеспечивает необходимую коррозионную стойкость внутренней поверхности, что подтверждает многолетний опыт эксплуатации узлов крепления, изготовленных с применением роликового вальцевания.

После извлечения вальцовки труба остается в напряженном состоянии, обеспечивающем требуемую работоспособность узла крепления. Измерения твердости без удаления ложемента, производимые в 3-х точках по сечению стенки трубы в соответствии с ГОСТ 9012-59, приведены в табл. 2 .

Из нее видно, что средняя твердость материала труб после роликового вальцевания возрастает, в некоторых случаях весьма заметно. При этом обычно после вальцевания рассматриваемый параметр у труб оказывается выше твердости материала ложемента (доски трубной), что обусловлено не очень высокими контактными нагрузками между трубой и стенкой отверстия.

2. Изменения твердости некоторых труб в процессе вальцевания

Труба Сталь		Ø 25x2,5 09X18H9	Ø 16x1,4 08X18H10T	Ø 16x2 08X14MФ	Ø 16x2,5 10X2M-ВД
Показатель твердости*	До вальцевания	199 - 201HV5	158HV5	180HV5	169 - 199HV5
	После вальцевания	217HV5	192 - 195HV5	330HV5	249 - 302HV5
* Показатели HV5 и HB для этих сталей практически одинаковы.					

Микроструктура металла труб после вальцевания практически не изменяется, только в тонком слое, прилегающем к внутренней поверхности, образуется некоторое уплотнение.

Анализ остаточных напряжений после вальцевания в ложементе, т.е. модели охватывающей втулки, показал, что в зоне, прилегающей к поверхности отверстия, развиваются окружные сжимающие напряжения. Микроструктура практически не меняется.

Заключение

Проведенные исследования показали, что процесс деформации трубы при роликовом вальцевании представляется следующим:

1. Во время вальцевания свободная труба, т.е. не касающаяся стенки отверстия, упруго-пластически изгибается в зонах контакта с роликами. Причем, сначала деформируются только участки внутренней поверхности, расположенные под роликами, а затем по достижении требуемого крутящего момента и наружной поверхности. При этом напряженное состояние в указанных зонах в процессе изгиба становится таковым, что упруго-пластический изгиб затем, вероятно, переходит в чистопластический и при этом одновременно происходит удлинение в окружном направлении слоев металла трубы. Характер изгиба зависит от свойств металла трубы.

2. После того, как труба устойчиво прижалась в z точках к стенке отверстия, происходит следующий этап ее деформации. В это время из-за переносного движения ролика по кривой, подобной спирали Архимеда, происходит

растяжение в окружном направлении слоев, прилегающих к внутренней поверхности трубы и сжатие слоев, прилегающих к наружной поверхности трубы. Описанное явление имеет место для всех испытанных труб. Различия заключаются в основном в значениях напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Ткаченко Г.П., Бриф В.М. Изготовление и ремонт кожухо-трубной теплообменной аппаратуры. М.: Машиностроение, 1980.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, ФМЛ. 2001. 588 с.
3. Терехов В.М., Кондратенко Л.А., Даниленко В.Г., Белоусов В.П. О выборе критерия механического вальцевания теплообменных труб // Технология машиностроения. 2001. № 5. С. 21–23.
4. Кондратенко Л.А. Механика роликового вальцевания теплообменных труб. М.: Спутник. 2015. 158 с.
5. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Mechanics of materials*. S.Peterburg-Moskow: Лань, 2002. 670 с.

REFERENCES

- 1.Tkachenko G.P., Brif V.M. *Manufacturing and Repair of Shell-and-Tube Heat Exchange Equipment*. M.: Mechanical Engineering, 1980.
2. Fedosiev V.I. *Resistance of Materials*. M.: Science, FML. 2001. pp. 588.
3. Terekhov V.M., Kondratenko L.A., Danilenko V.G., Belousov V.P. On a choice of criterion for heat exchange pipe mechanical rolling // *Engineering Techniques*. 2001. № 5. pp. 21–23.
4. Kondratenko L.A. *Mechanics of Heat Exchange Pipe Roller Rolling*. M.: Sputnik . 2015. pp. 158.
5. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Mechanics of materials*. S.Peterburg-Moskow: Lan, 2002. pp. 670.

Рецензент д.т.н. В.Ю. Блюментейн

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 22.03.2016. Подписано в печать 06.04.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7