

УДК 69:658.26

**ВЛИЯНИЕ РАДИУСА ГИБКИ ТРУБ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН, Д.О. РАДУЛЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Выполнен анализ степени влияния величины разностенности и радиуса гибки криволинейных участков трубопроводов на их прочностные параметры. Определена степень влияния величины разностенности и величины овальности трубы на величину допустимого давления при прокачке жидкости через трубопровод. Сделан вывод о возможности эксплуатации трубопровода с трубами, имеющими колебания величины толщины стенки в нижней части допуска (в пределах ГОСТа). Выполнен анализ влияния величины радиуса гибки трубы на величину относительного утонения трубы и величину коэффициента запаса прочности трубопровода тормозной системы автомобиля. Установлено, что при увеличении диаметра гибки увеличивается запас прочности криволинейного участка трубопровода. Уменьшение диаметра трубопровода в границах допусков приводит к увеличению запаса прочности криволинейного участка трубопровода на 2,5–3,5% в зависимости от диаметра гибки. При моделировании процесса гибки использовались две формулы, выбрана наиболее целесообразная к применению с точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов.

Ключевые слова: *трубы, гибка, разностенность труб, овальность труб, поперечное сечение, утонение, радиус гибки, внутреннее давление, запас прочности.*

Введение. Величина толщины стенки любой бесшовной трубы колеблется в значительных пределах (в границах допуска согласно ГОСТ) [1; 2], однако при проектировании соединительных трубопроводов в машинах и агрегатах принимают, что трубы имеют постоянную толщину стенки [3]. Колебания толщины стенки наблюдаются как в поперечном сечении, так и вдоль трубы. Изменение геометрических параметров трубы оказывают определенное влияние на ее эксплуатационные характеристики. Входе изготовления автомобильных трубопроводов используется процесс гибки. Изготовление криволинейных участков трубопроводов – сложная техническая задача, требующая применения специализированного оборудования [4–6]. В ходе гибки происходит изменение проходного сечения трубопровода, труба овализируется, изменяется толщина ее стенки, могут возникнуть трещины, складки и пр. [5]. К изогнутым участкам трубопроводов ответственного назначения предъявляют жесткие технические требования, и важно, чтобы наведенные в ходе гибки изменения не выводили данный участок трубопровода за предъявляемые к нему требования. Исследования характера изменения параметров трубопроводов в результате гибки с учетом изначальной разностенности трубы являются важной научной задачей [4].

Цель представляемой работы – анализ влияния величин разностенности трубопровода, а также утонения стенки трубы в результате гибки на технологические свойства автомобильных трубопроводов.

Основная часть. В конструкции автомобилей с двигателем внутреннего сгорания применяются следующие трубопроводы: впускной; выпускной; соединительный трубопровод газобаллонного оборудования (ГБО); трубопроводы тормозных систем и т.д.

Главной функцией впускного трубопровода является подвод горючей смеси к цилиндрам, а также подогрев горючей смеси посредством тепла охлаждающей жидкости, которая циркулирует через рубашку трубы. Немаловажным фактором для впускного трубопровода является равномерное распределение горючей смеси к отдельным цилиндрам. Если речь идет о металлическом впускном трубопроводе, то его изготавливают из алюминия [7], давление внутри него колеблется в пределах 20–35 кПа.

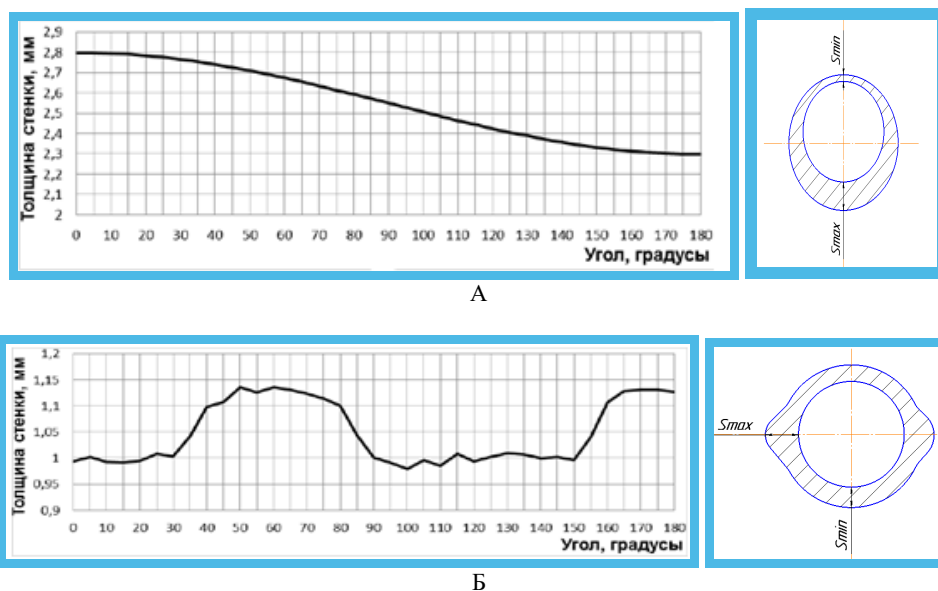
Выпускной трубопровод служит для отвода отработанных газов из цилиндров. Он должен обеспечивать их лучшую очистку, оказывая минимальное сопротивление перемещению газов и обеспечивая большее наполнение. Данный тип трубопровода изготавливают, в основном, из чугуна.

Функционал соединительного трубопровода ГБО представляет собой безопасную подачу компримированного природного газа (КПГ) под высоким давлением из баллонов к двигателю внутреннего сгорания. Соединительный трубопровод изготавливают из бесшовной холоднокатаной трубы из стали марки Сталь 20. Трубопроводы для систем питания ГСН изготавливают из медных трубок, давление газа в них колеблется в пределах 1,0 – 1,2 МПа [8].

Трубопроводы тормозных систем в автомобилях предназначены для передачи усилия от педали к основному цилиндру за счет тормозной жидкости. Трубки подведены к суппортам и соединяются с ними конусными муфтами. При эксплуатации автомобиля тормозные трубки переносят высокие нагрузки – давление внутри них при обычном торможении составляет около 60 бар (6 МПа). Если маши-

на нагружена и движется со скоростью 100 км/ч, рабочее давление повышается до 100 бар (10 МПа), а при экстренном торможении достигает 200 – 300 бар (20-30 МПа.) [9–10].

На рисунке 1 представлено распределение толщины стенки по периметру трубы на примере волочения толстостенной трубы с размерами 25×2,5 мм через 21,4×1,7 мм до тонкостенной трубы 20×1 мм [11]. На примере изменения геометрических параметров поперечного сечения при роликовом волочении одной трубы представлены два возможных вида поперечной разностенности – эксцентричная (А) и симметричная (Б). Большинство труб имеют одну из этих видов разностенностей [12].



А – труба с эксцентричной разностенностью; Б – труба с симметричной разностенностью.

Рисунок 1. – Распределение толщины стенки по периметру поперечных сечений [8]

Криволинейные участки трубопроводов, изготавливаемых из бесшовных труб, выполняют с применением процесса гибки. Из-за наличия разностенности трубы нейтральная линия гибки (рисунок 2, $R_{гиб.нейтр.}$) находится в эксцентриситете (рисунок 2, e) относительно нейтральной линии трубы [13].

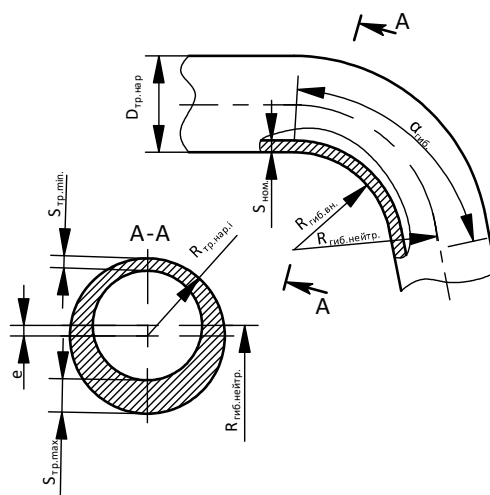


Рисунок 2. – Положение нейтральной линии деформаций в сечении трубы с учетом разнотолщинности стенки [13; 14]

В ходе гибки, наружная часть изгибаемой трубы находится в зоне растяжения, а внутренняя – сжатия (рисунок 3) [15]. В зоне растяжения стенка трубы утоняется, в зоне сжатия – утолщается (рисунок 4) [16]. Кроме этого, в зоне сжатия может произойти процесс складкообразования [15; 16].

Как видно (см. Рисунок 4), толщина стенки трубы в ходе гибки может изменяться в значительных пределах, особенно опасным является процесс утонения стенки трубы в зоне растяжения. Уменьшение толщины

стенки может вывести ее значения за минимально допустимые (с учетом того, что бесшовная труба изначально имеет некоторую величину разностенности [1; 2; 12]). Необходимо определить, в какой мере процесс утонения влияет на уменьшение коэффициента запаса прочности автомобильных трубопроводов.

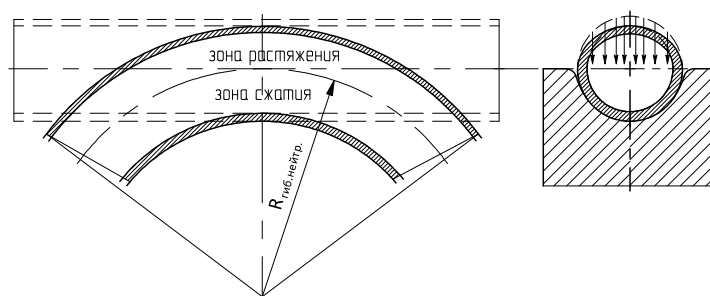


Рисунок 3. – Характерные для процесса гибки зоны деформации трубы [15] в зоне растяжения

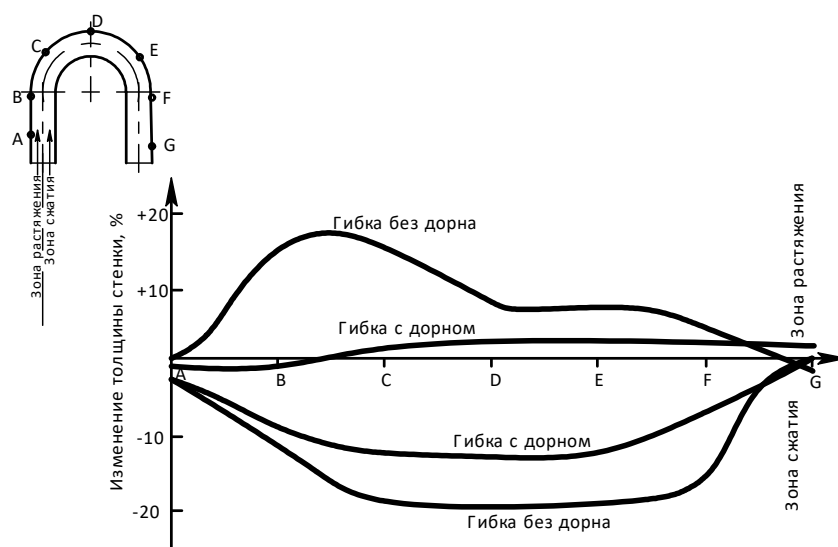


Рисунок 4. – Изменение толщины стенки в зонах гибки трубы [16]

Утонение стенки в зоне максимального изгиба можно определить по формуле [17–18]

$$S_{тр.деф.1} = \frac{S_{ном.}}{1 + \frac{D_{тр.нар.} + S_{ном.}}{D_{гнб.вн} + D_{тр.нар.}}} \quad (1)$$

или [15]

$$S_{тр.деф.2} = \frac{D_{гнб.вн} S_{ном.} + D_{тр.нар.}}{2 \left(\frac{D_{гнб.вн}}{2} + D_{тр.нар.} \right)} \quad (2)$$

Величина утонения стенки трубы в ходе деформации рассчитывается по формуле [14]

$$\delta_{\%} = \frac{S_{ном.} - S_{деф.}}{S_{ном.}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $S_{ном.}$ и $S_{тр.деф.}$ – толщина стенки до и после деформации соответственно.

Допустимое рабочее давление на участок трубопровода трубы в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы можно рассчитать по соответствующей формуле [19]:

$$P_{доп} = \frac{2 \cdot S_{ном.} \cdot \sigma_{\epsilon} \cdot m}{n \cdot D_{тр.вн.} \cdot K_1 \cdot K_{назн.}}, \quad \text{МПа}, \quad (4)$$

где: $S_{ном.}$ – номинальная толщина стенки трубы, мм; σ_{ϵ} – временное сопротивление разрыву металла трубы, МПа; m – коэффициент категоричности трубопровода; n – коэффициент надежности по нагрузке;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, мм; K_l – коэффициент надежности по материалу; K_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода.

В качестве рабочего давления автомобильного трубопровода можно выбрать $P_{раб.} = 50$ МПа.

Наиболее нагруженным является трубопровод тормозной системы. Для анализа влияния величины разностенности трубопровода на его способность сопротивляться внутреннему давлению выбираем трубу бесшовную холоднокатаную согласно ГОСТ 617-2006 «Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия». Материал медной трубы для тормозной системы (М1) имеет следующие механические характеристики: $y_6 = 270$ МПа (трубы холоднокатаные, полутвердое состояние материала); $y_T = 180$ МПа [20]. Для анализа выбрана труба диаметром 4,76 (с допуском: +0; –0,15 мм) и толщиной стенки 0,8 (с допуском: $\pm 0,08$ мм, или $\pm 0,07$ для повышенной точности). Во время расчетов, значение всех коэффициентов в формуле (1) были приравнены к единице. Расчеты проводились в одном из математических редакторов. Результаты расчетов показаны в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние точности геометрических характеристик поперечного сечения трубы на допустимое давление в медном трубопроводе 4,76×0,8 мм

S_{max}		S_{min}	
$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$	$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$
3	2,9	3,32	3,22
$P_{доп}$ (МПа)			
158,4	163,8621	117,1084	120,7453
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)			
3,2	3,3	2,3	2,4

Как видно из таблицы 1, коэффициент запаса прочности при минимальной толщине стенки и максимальном значении диаметра трубы минимальный (2,3), но этого вполне достаточно для работы трубопровода. При минимальном значении диаметра трубы и максимальной толщине стенки коэффициент запаса прочности принимает наибольшее значение (3,3). В целом, трубы с рядовыми допусками на величину разностенности вполне удовлетворяют требованиям для трубопроводов тормозных систем и применять более дорогие, высокоточные трубы не имеет смысла.

Так как геометрические характеристики поперечного сечения напрямую влияют на массу труб, целесообразно рассчитать экономию материала при изготовлении 1000 м трубы.

Массу трубы можно рассчитать по следующей формуле:

$$m = \rho V, \text{ кг}, \quad (5)$$

где: ρ – плотность материала трубы, кг/м³; V – объем материала трубы, м³.
Объем материала трубы:

$$V = S \cdot L, \text{ м}^3, \quad (6)$$

где: S – площадь поперечного сечения трубы, мм²; L – длина трубы.
Площадь поперечного сечения трубы:

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_{вн}^2), \text{ мм}^2, \quad (7)$$

где, D – наружный диаметр трубы, мм; $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, мм.

Геометрические характеристики поперечного сечения исследуемой трубы приведены в таблице 1. Во время расчетов значение длины трубы принимается равным одному метру. Расчеты проводились в одном из математических редакторов. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние точности геометрических характеристик поперечного сечения трубы на массу в медном трубопроводе 4,76×0,8 мм

S_{max}		S_{min}	
$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$	$D_{внутр. max}$	$D_{внутр. min}$
3	2,9	3,32	3,22
m (кг)			
0,095896	0,093425	0,081696	0,079674

Для исследования влияния величины утонения стенки трубы на изменение величины коэффициента запаса прочности трубопровода была выбрана бесшовная труба, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 617-2006. Для анализа выбрана та же труба с минимальной возможной толщиной стенки согласно ГОСТ. Во время расчетов, значения всех коэффициентов в формуле (4) были приравнены к единице.

Анализируя формулы (1) и (2) можно сделать вывод о том, что на величину утонения трубы влияют:
– наружный диаметр трубы (колеблется в границах допусков);

- величина толщины стенки (колеблется в границах допусков);
- внутренний радиус гибки (выбирается эмпирически из условий устойчивости профиля трубы).

В ходе моделирования процесса утонения использовались обе формулы (для сравнения результатов их работы). В качестве начального значения толщины стенки выбрано её минимальное значение согласно допуску ГОСТа. В качестве значений наружного диаметра выбраны экстремальные значения допуска на величину диаметра согласно ГОСТу. Внутренний диаметр гибки изменялся в пределах от 10 до 30 мм, с шагом в 5 мм. (рисунок 5).

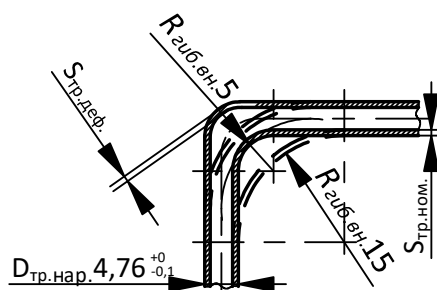


Рисунок 5. – Криволинейный участок трубопровода с разными радиусами гибки

В таблицах 3 и 4 показаны результаты расчетов изменения технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки.

Таблица 3. – Изменение технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки (расчет по формуле (1))

$D_{гнб.вн.}, мм$		10	15	20	25	30
Параметр	Внутр. диам. трубы	-				
$P_{доп}$ (МПа)	$D_{внутр. max}$	76,43	83,79	88,90	92,65	95,52
	$D_{внутр. min}$	78,86	86,49	91,77	95,64	98,60
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)	$D_{внутр. max}$	1,5285	1,6758	1,7780	1,8530	1,9104
	$D_{внутр. min}$	1,5772	1,7298	1,8354	1,9128	1,9719
$S_{тр.деф.1}$	$D_{внутр. max}$	0,5251	0,5637	0,5895	0,6080	0,6219
	$D_{внутр. min}$	0,5267	0,5653	0,5911	0,6095	0,6233
$D, \%$	$D_{внутр. max}$	27,0751	21,7116	18,1217	15,5505	13,6183
	$D_{внутр. min}$	26,8463	21,4856	17,9095	15,3539	13,4366

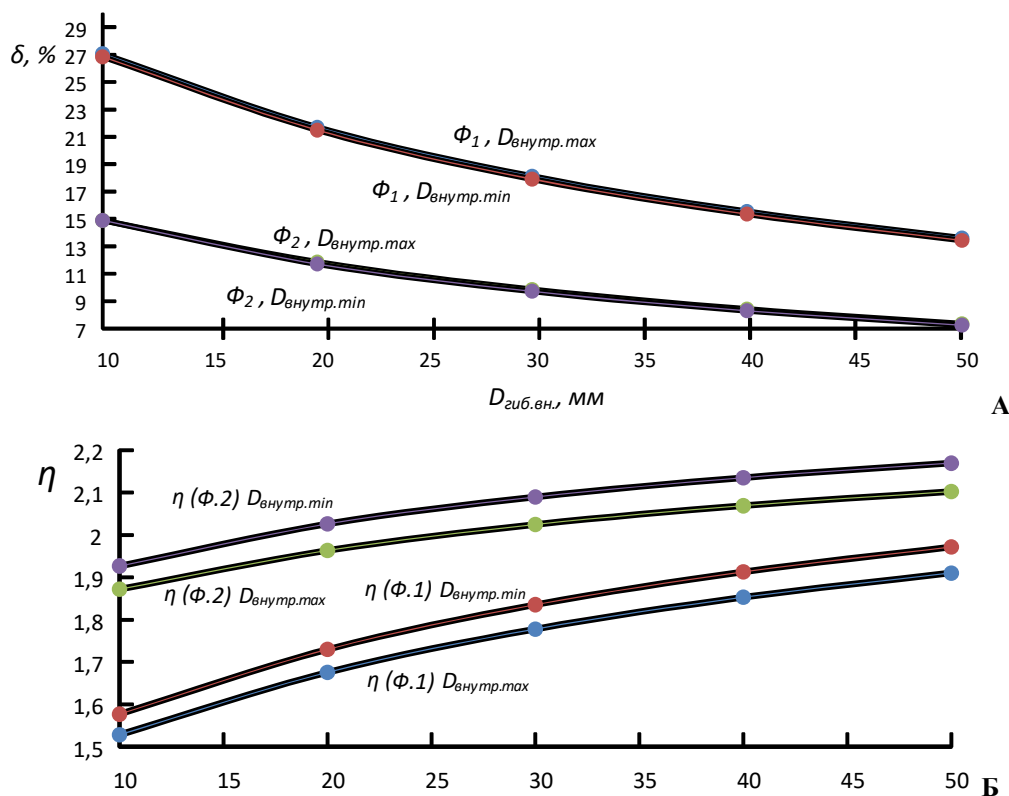
Таблица 4. – Изменение технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки (расчет по формуле (2))

$D_{гнб.вн.}, мм$		10	15	20	25	30
Параметр	Внутр. диам. трубы	-				
$P_{доп}$ (МПа)	$D_{внутр. max}$	93,61	98,16	101,24	103,46	105,13
	$D_{внутр. min}$	96,33	101,30	104,48	106,76	108,49
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)	$D_{внутр. max}$	1,8721	1,9633	2,0248	2,0692	2,1026
	$D_{внутр. min}$	1,9266	2,0260	2,0896	2,1353	2,1697
$S_{тр.деф.1}$	$D_{внутр. max}$	0,6127	0,6346	0,6491	0,6593	0,6670
	$D_{внутр. min}$	0,6127	0,6357	0,6501	0,6603	0,6679
$D, \%$	$D_{внутр. max}$	14,9021	11,8633	9,8540	8,4267	7,3605
	$D_{внутр. min}$	14,9021	11,7096	9,7127	8,2977	7,2426

Формула (1), по сравнению с формулой (2), дает на 80–88% большие результаты величины относительного утонения толщины стенки, однако характер изменения этого параметра в зависимости от диаметра гибки одинаков. Увеличение диаметра гибки приводит к уменьшению относительной величины утонения на 2–5% с каждым шагом (13,5 и 7,5 – суммарное изменение D в зависимости от применяемой для расчета формулы). Изменение диаметра трубы в границах допусков согласно ГОСТ не приводит к значительному изменению величины D при любых диаметрах гибки.

На рисунке 6 показаны графики изменения коэффициента запаса прочности трубы в зависимости от диаметра гибки (при $P_{раб.} = 50$ МПа). Из графиков видно, что увеличение диаметра гибки приводит к увеличению запаса прочности трубопровода от 9,45 – до 3% с каждым шагом при расчетах по формуле (1) (25% общий) и от 5 – до 1,6% с каждым шагом при расчетах по формуле (2) (12,5% общий). Колебания

диаметра трубы в пределах допуска приводят к изменению коэффициента запаса прочности на 2,5–3,5% в зависимости диаметра гибки.



А – Относительное утонение толщины стенки трубы при разных диаметрах гибки;

Б – Коэффициент запаса прочности трубы при разных диаметрах гибки (при $P_{\text{раб.}} = 50$ МПа).

Рисунок 6. – Графики изменения коэффициента запаса прочности трубы в зависимости от диаметра гибки

Заключение. Трубы, имеющие колебания толщины стенки в нижней части допуска (Согласно ГОСТ, от $S_{\text{среднее}}$ до $S_{\text{мин}}$) имеют достаточную степень запаса прочности для безопасной эксплуатации автомобильных трубопроводов. Из-за уменьшения массы труб возможна экономия дорогостоящего материала. В рассматриваемом примере разность между максимальным и минимальным значениями массы трубы составляет 0,016222 кг, что при изготовлении 1000 м труб даёт экономию материала в 16,222 кг. При этом коэффициент запаса прочности трубы с минимальной толщиной стенки и минимальным диаметром (а, следовательно, и с минимальной массой) равен 2,4, что является оптимальным вариантом для производства трубопроводов тормозных систем автомобилей. Исследования влияния радиуса гибки на величину относительного утонения трубы показали, что увеличение диаметра гибки приводит к значительному уменьшению величины относительного утонения стенки трубы. Так, увеличение диаметра гибки с 5 до 30 мм привело к уменьшению относительного утонения стенки трубы на 13,5% (формула (1)) и на 7,5% (формула (2)). При увеличении диаметра гибки увеличивается запас прочности криволинейного участка трубопровода ($Z_{\text{у}} = 25\%$ при ведении расчетов по формуле (1); $Z_{\text{у}} = 12,5\%$ – по формуле (2)). Уменьшение диаметра трубопровода в границах допусков приводит к увеличению запаса прочности криволинейного участка трубопровода на 2,5–3,5% в зависимости от диаметра гибки. Формула (1) даёт более высокие результаты величины относительного утонения стенки. С точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов, желательно производить расчеты этой величины именно с ее использованием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пилипенко, С.В. Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ / С.В. Пилипенко // Сталь. – 2016. – № 3. – С. 32–37.
2. Григоренко, В.У. Исследование изменения разностенности холоднокатаных труб / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 62–63.
3. Куликов, Ю.А. Динамика трубопроводов летательных аппаратов : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.03 / Ю.А. Куликов ; Йошкар-Ола, 1995. – 282 л.

4. Мальцев, Д.Н. Совершенствование трубогибного производства предварительным деформированием сечения заготовок : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Д.Н. Мальцев. – Орел, 2014. – 124 л.
5. Вдовин, С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел : Госуниверситет, 2013. – 93 с.
6. Никитин, В.И. Проектирование станков горячей гибки труб / В.И. Никитин. – СПб. : ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
7. Устройство автомобиля: впускные трубопроводы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/sistemy-vpryska/vpuskny-e-truboprovody/>. – Дата доступа: 10.07.2019.
8. Редукторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://auto.kombat.com.ua/reduktoryi-vyisokogo-davleniya-gazoballonogo-obogudovaniya-gbo-avtomobilye/>. – Дата доступа: 10.07.2019.
9. Белорусский ресурс автозапчастей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.braz.by/reverse/brake/brake-pipes/?of=s10136>. – Дата доступа: 10.07.2019.
10. Тормозные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://systemsauto.ru/brake/brake.html>. – Дата доступа: 10.07.2019.
11. Вагапов, Е.Н. Разработка математической модели роликового волочения труб на длинной оправке с целью прогнозирования точности : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Е.Н. Вагапов. – Екатеринбург, 2012. – 162 л.
12. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М. : Металлургия, 1975. – 239 с.
13. Вдовин, С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел : Госуниверситет, 2013. – 93 с.
14. Никитин, В.И. Проектирование станков горячей гибки труб / В.И. Никитин. – СПб. : ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
15. Мосин, И.Ф. Технология изготовления деталей из труб / И.Ф. Мосин. – М. : ГНТИ машиностроит. лит-ры, 1962. – 171 с.
16. Трубогибы и трубогибные станки для холодной гибки труб [Электронный ресурс] // Газовик. – Режим доступа: <https://gazovikpipe.ru/trubogiby-i-trubogibochnye-stanki-dlya-holodnoj-gibki-trub>. – Дата доступа: 09.06.2019.
17. Гибка труб [Электронный ресурс] // Энциклопедия по машиностроению XXL. – Режим доступа: <https://mash-xxl.info/pics/98106/>. – Дата доступа: 09.06.2019.
18. Трубопроводы и присоединительная арматура [Электронный ресурс] // Энциклопедия по машиностроению XXL. – Режим доступа: <https://mash-xxl.info/page/245125212242203008235116212113157228050070153189/>. – Дата доступа: 09.06.2019.
19. Абрамов, И.П. Расчет максимально допустимого рабочего давления при длительной эксплуатации магистральных нефтепроводов / И.П. Абрамов, И.Ю. Подалов // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167. Ч. 2. – С. 184–185.
20. Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия : ГОСТ 617-2006. – М., 2008. – 34 с.

Поступила 27.07.2019

INFLUENCE OF THE BENDING RADIUS OF PIPES ON STRENGTH PARAMETERS AUTOMOBILE PIPELINES

S. PYLYPENKO, A. DUGAN, D. RADULEVIC

The analysis of the degree of influence of the difference value and bending radius of curved sections of pipelines on their strength parameters is performed. The degree of influence of the difference value and the ovality value of the pipe on the permissible pressure when pumping liquid through the pipeline is determined. It is concluded that it is possible to operate a pipeline with pipes that have fluctuations in the wall thickness in the lower part of the tolerance (within GOST). The analysis of the influence of the bending radius of the pipe on the value of the relative thinning of the pipe and the value of the safety factor of the pipeline of the car's brake system is performed. It is found that when the bending diameter increases, the safety margin of the curved section of the pipeline increases. A decrease in the diameter of the pipeline within the tolerance limits leads to an increase in the safety margin of the curved section of the pipeline by 2.5–3.5%, depending on the bending diameter. When modeling the bending process, two formulas were used, and the most appropriate one was chosen from the point of view of safe operation of pipelines.

Keywords: pipes, bending, pipe difference, pipe ovality, cross-section, thinning, bending radius, degree of influence, internal pressure, safety margin.