

УДК 69:658.26

## ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УТОНЕНИЯ СТЕНКИ ПРИ ГИБКЕ ТРУБЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Д.О. РОДУЛЕВИЧ**

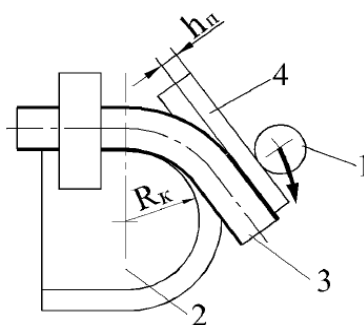
(Представлено: С.В. ПИЛИПЕНКО)

Выполнен анализ влияния величины радиуса гибки трубы на величину относительного утонения трубы и величину коэффициента запаса прочности трубопровода тормозной системы автомобиля. Установлено, что, увеличение диаметра гибки приводит к уменьшению относительного утонения стенки трубы. Из этого, 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 диаметра гибки. При моделировании процесса гибки использовались две формулы, выбрана наиболее целесообразная к применению из точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов.

**Вступление.** Изготовление криволинейных участков трубопроводов – сложная техническая задача, требующая применения специализированного оборудования [1–3]. В ходе гибки происходит изменение проходного сечения трубопровода, труба овализируется, изменяется толщина ее стенки, могут возникнуть трещины, складки и пр. [2]. 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 являются важной научной задачей [1].

**Целью статьи** является исследование влияния величины утонения стенки трубы в результате гибки на технологические свойства автомобильных трубопроводов.

**Анализ исследований.** На рисунке 1 показана один из вариантов проведения операции изгиба трубы (рис. 1, поз. 3) обкатывающим роликом (рис. 1, поз. 1) по копиру (рис. 1, поз. 2).



**Рисунок 1. – Один из вариантов проведения процесса гибки трубы [2, 3]**

Изначально труба имеет некую величину разностенности, поэтому, нейтральная линия гибки (рис. 2,  $R_{г\text{иб.нейтр.}}$ ) находится в эксцентриситете (рис. 2,  $e$ ) относительно нейтральной линии трубы [2].

В ходе гибки, наружная часть изгибаемой трубы находится в зоне растяжения, а внутренняя – сжатия (рис. 3) [4]. В зоне растяжения стенка трубы утоняется, в зоне сжатия – утолщается (рис. 5) [5]. Кроме этого, в зоне сжатия может произойти процесс складкообразования [4–5].

Как видно (рис. 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 [6–8]). Необходимо определить в какой мере процесс утонения влияет на уменьшение коэффициента запаса прочности автомобильных трубопроводов.

Утонение стенки в зоне максимального изгиба можно определить по формуле [9–10]:

$$S_{\text{тр.деф.1}} = \frac{S_{\text{ном.}}}{1 + \frac{D_{\text{тр.нар.}} + S_{\text{ном.}}}{D_{\text{г\text{иб.вн}}} + D_{\text{тр.нар.}}}}, \quad (1)$$

или [4]:

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

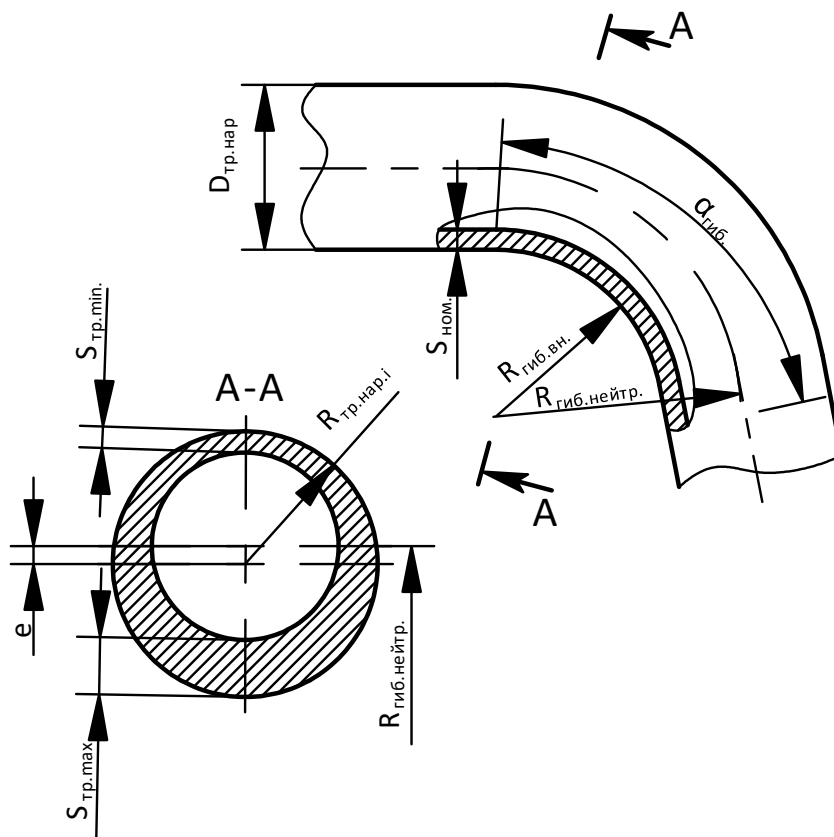


Рисунок 2. – Положение нейтральной линии деформаций в сечении трубы с учетом разнотолщинности стенки [2, 3]:  $e$  – эксцентриситет трубы

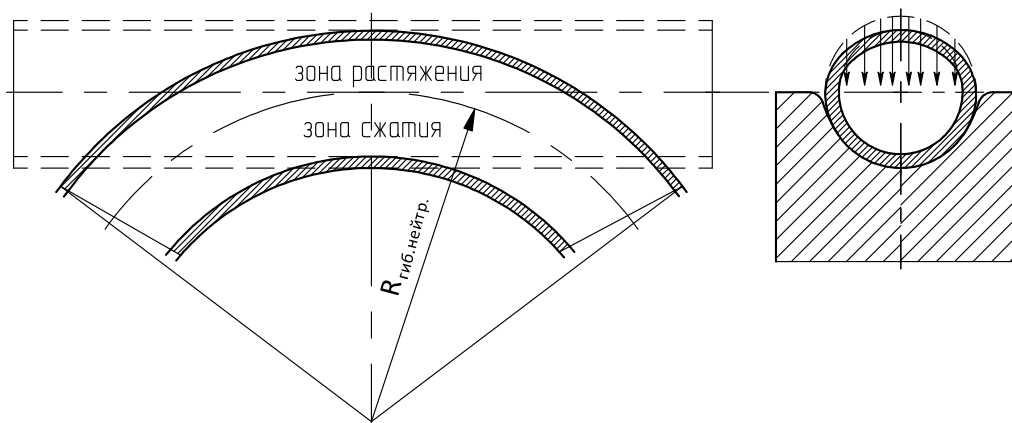


Рисунок 3. – Характерные для процесса гибки зоны деформации трубы [4]

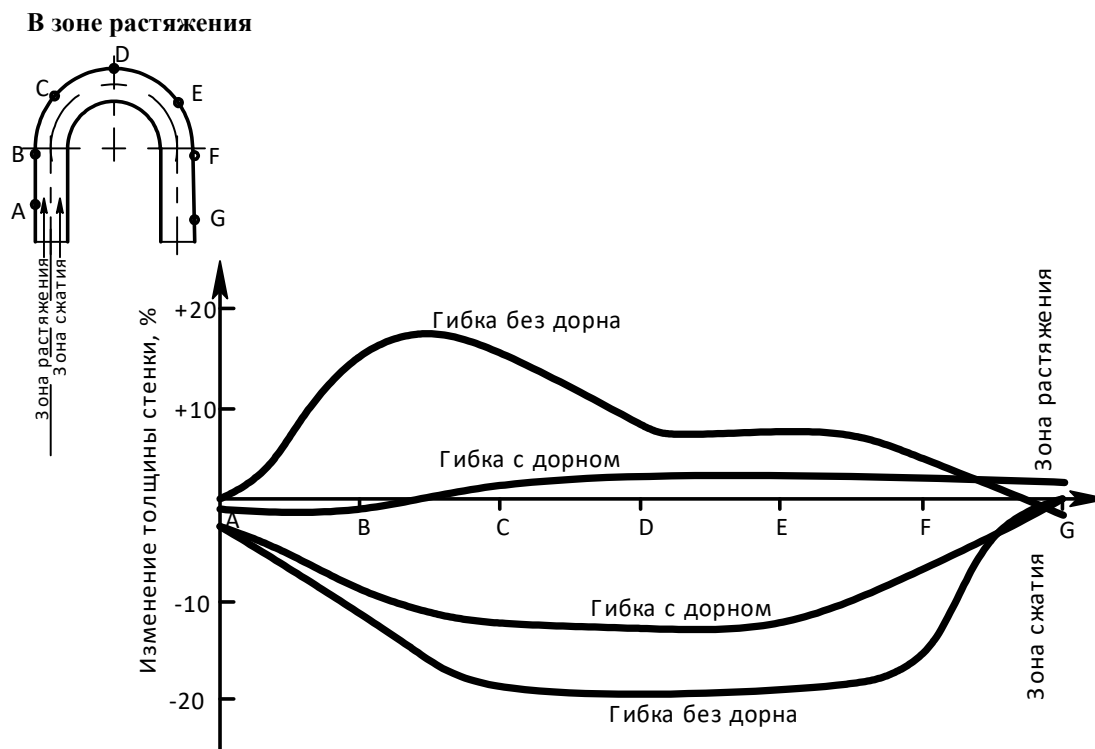


Рисунок 4. – Изменение толщины стенки в зонах гибки трубы [5]

Величина утонения стенки трубы в ходе деформации рассчитывается по формуле [3]

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

где  $S_{ном.}$  и  $S_{деф.}$  – 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 [11]:

$$P_{доп} = \frac{2 \cdot S_{ном.} \cdot \sigma_v \cdot m}{n \cdot D_{тр.вн.} \cdot K_1 \cdot K_{назн.}} , \text{ МПа} , \tag{4}$$

где  $S_{ном.}$  – номинальная толщина стенки трубы, мм;  $\sigma_v$  – временное сопротивление разрыву металла трубы, МПа;  $m$  – коэффициент категорийности трубопровода;  $n$  – коэффициент надежности по нагрузке;  $D_{вн.}$  – внутренний диаметр трубопровода, мм;  $K_1$  – коэффициент надежности по материалу;  $K_{назн.}$  – коэффициент надежности по назначению трубопровода.

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

**Основной материал.** Для исследования влияния величины утонения стенки трубы на изменение величины коэффициента запаса прочности трубопровода выбрано бесшовную трубу, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 617-2006 «Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия». Такая труба используется в тормозных системах автомобиля (материал – медь марки М1) и имеет следующие механические характеристики:  $\sigma_v=270$  МПа;  $\sigma_T=180$  МПа [11]. Для анализа выбран труба диаметром 4,76 (с допуском: +0; -0,1 мм) и толщиной стенки 0,8 (с допуском:  $\pm 0,08$  мм, или  $\pm 0,07$  для повышенной точности). 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 минимальное её значение согласно допуска 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. (рис. 5).

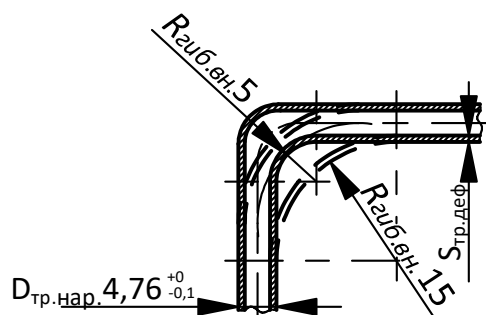


Рисунок 5. – Криволинейный участок трубопровода с разными радиусами гибки

В таблицах 1 и 2 показаны результаты расчетов изменения технологических параметров трубы в зависимости от радиуса гибки.

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

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

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

$D_{гиб.вн.}, мм$		10	15	20	25	30
Параметр	Внутр. диам. трубы	-				
	$P_{доп}$ (МПа)	$D_{внутр. max}$	93,61	98,16	101,24	103,46
Запас прочности (при $P_{раб.} = 50$ МПа)	$D_{внутр. min}$	96,33	101,30	104,48	106,76	108,49
	$D_{внутр. max}$	1,8721	1,9633	2,0248	2,0692	2,1026
$S_{тр.деф.1}$	$D_{внутр. min}$	1,9266	2,0260	2,0896	2,1353	2,1697
	$D_{внутр. max}$	0,6127	0,6346	0,6491	0,6593	0,6670
$\delta, \%$	$D_{внутр. min}$	0,6127	0,6357	0,6501	0,6603	0,6679
	$D_{внутр. max}$	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 (рис. 6). Увеличение диаметра гибки приводит к уменьшению относительной величины утонения от 2 до 5% с каждым шагом (13,5 и 7,5 суммарное изменение  $\delta$ , в зависимости от применяемой для расчета формулы). Изменение диаметра трубы в границах допусков согласно ГОСТ, не приводит к значительному изменению величины  $\delta$ , при любых диаметрах гибки.

На рисунке 7 показаны графики изменения коэффициента запаса прочности трубы в зависимости от диаметрах 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 Ф. (1) (25 % общий) и от 5 до 1,6% с каждым шагом при расчетах по Ф. (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.

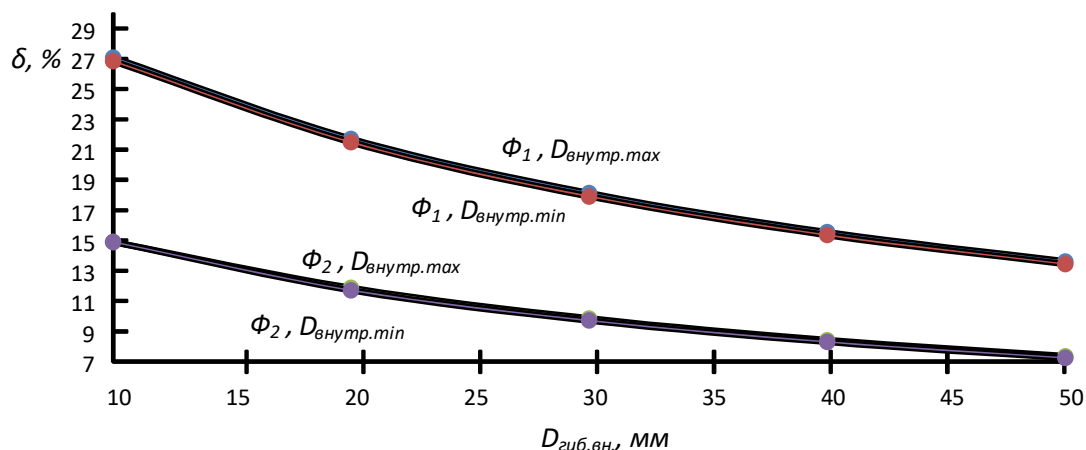


Рисунок 6. – Относительное утонение толщины стенки трубы при разных диаметрах гибки

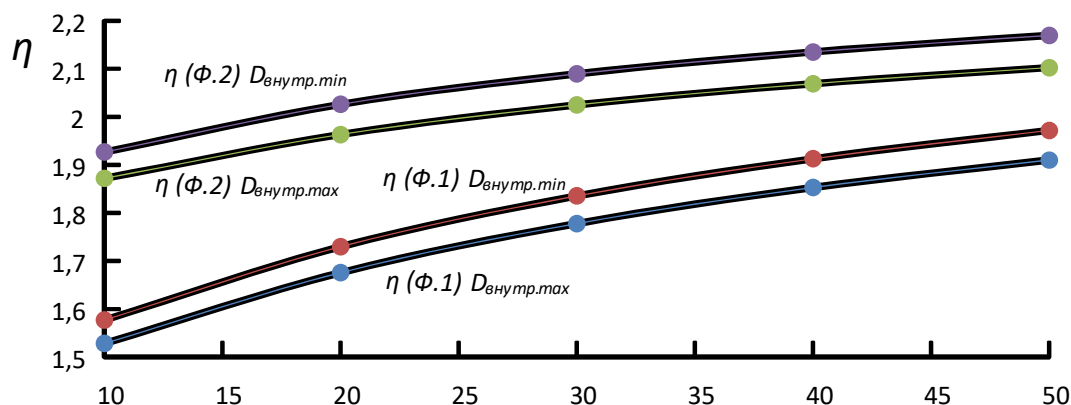


Рисунок 7. – Коэффициент запаса прочности трубы при разных диаметрах гибки (при  $P_{раб.} = 50$  МПа)

**Выводы.** Исследования влияния радиуса гибки на величину относительного утонения трубы показали, что увеличение диаметра гибки приводит к значительному уменьшению величины  $\delta$ . Так, увеличение диаметра гибки с 5 до 30 мм привело к уменьшению относительного утонения стенки трубы на 13,5 (Ф. 1) и на 7,5 (Ф. 2) %. Из этого, при увеличении диаметра гибки увеличивается запас прочности криволинейного участка трубопровода ( $\eta_{\Sigma} = 25$  % при ведении расчетов по Ф. 1 и  $\eta_{\Sigma} = 12,5$  % при ведении расчетов по Ф. 2). Уменьшение диаметра трубопровода в границах допусков приводит к увеличению запаса прочности криволинейного участка трубопровода на 2,5–3,5 % в зависимости диаметра гибки. Формула 1 дает более высокие результаты величины относительного утонения стенки. С точки зрения безопасной эксплуатации трубопроводов, желательно производить расчеты этой величины именно с ее использованием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев Д.Н. Совершенствование трубогибного производства предварительным деформированием сечения заготовок: Дис. канд. техн. наук: 05.02.09: Орел, 2014. – 124 с.
2. Вдовин С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел: Госуниверситет, 2013. – 93 с.
3. Никитин В.И. Проектирование станков горячей гибки труб / В.И. Никитин. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
4. Мосин И.Ф. Технология изготовления деталей из труб / И.Ф. Мосин. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1962. – 171 с.
5. Трубогибы и трубогибные станки для холодной гибки труб: [ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС] ГАЗОВИК. URL: <https://GAZOVIKPIPE.RU/TRUBOGIBY-I-TRUBOGIBOCHNYE-STANKI-DLYA-HOLODNOJ-GIBKI-TRUB> (ДАТА ОБРАЩЕНИЯ: 09.06.2019).

6. Пилипенко С.В. Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ / С.В. Пилипенко // Сталь, №3 - 2016 - с 32–37.
7. Григоренко В.У. Исследование изменения разностенности холоднокатаных труб / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко // Сталь, №9 - 2008 – 62–63 с.
8. Столетний М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт – М.: Metallurgia, 1975 - 239 с.
9. Энциклопедия по машиностроению XXL: [Электронный ресурс] Гибка труб: <https://mash-xxl.info/pics/98106/> (дата обращения: 09.06.2019).
10. Энциклопедия по машиностроению XXL: [Электронный ресурс] Трубопроводы и присоединительная арматура [https://mash-xxl.info/page/245125212242203008235116212113157228\\_050070153189/](https://mash-xxl.info/page/245125212242203008235116212113157228_050070153189/): (дата обращения: 09.06.2019).
11. Абрамов И.П. Расчет максимально допустимого рабочего давления при длительной эксплуатации магистральных нефтепроводов / И.П. Абрамов, И.Ю. Подалов // Записки Горного института. Т.167. Часть 2 - 2006 – 184–185 с.
12. ГОСТ 617-2006. Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия. М., 2008. – 34 с.