

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГИБКИ ТРУБ

NEW PROCESSES AND EQUIPMENT FOR BENDING OF THE TUBES

А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов
ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
г. Челябинск
kozlov@zb-susu.ru

The method of curvilinear pipeline sections being obtained by cold bending of the tubes with effect of a roller tool on internal tube has been stated.

Для рациональной компоновки трубопроводов и других изделий, изготавливаемых из труб, требуется большое количество их криволинейных участков. Гибка труб является основной операцией технологического процесса изготовления криволинейных деталей трубопроводов. Она широко применяется в коммунальном хозяйстве, различных отраслях общего и специального машиностроения: автостроении, самолетостроении, нефтяной и газовой промышленности и т.д. В то же время качественная гибка тонкостенных труб диаметром более 40...50 мм в холодном состоянии затруднена или практически невозможна, поскольку она сопровождается такими нежелательными для последующей эксплуатации явлениями как сплющивание поперечного сечения, образование гофр и изломов на внутренней части трубы, что обусловлено значительными усилиями изгиба, поэтому не удастся получить радиусыгиба менее 3,5–4,5 диаметра трубы [1].

Гибка труб диаметром 100–200 мм и выше на такие радиусыгиба как правило осуществляется в горячем состоянии с применением узкозонального нагрева токами высокой частоты (ТВЧ). Часть криволинейных вставок в трубопроводы изготавливается путем проталкивания нагретой трубы через рогообразный сердечник-дорн.

Методы горячей гибки требуют исключительно дорогостоящего и энергоемкого технологического оборудования. Достаточно сказать, что станки для горячей гибки стоят в десятки раз дороже станков для холодной гибки и затрачивают на

операцию в сотни раз больше энергии. Например, станок для холодной гибки труб диаметром до 100 мм имеет мощность 14 кВт, а станок для горячей гибки аналогичных труб – более 200 кВт.

Поэтому исследование и совершенствование процесса гибки труб в холодном состоянии, в котором значительное снижение изгибающих усилий обеспечивается без нагрева, является крупной и актуальной научно-технической проблемой.

В ряде работ нами было показано, что воздействие на изгибаемую трубу вращающимся деформирующим инструментом, например шариковым раскатником, существенно снижает потребные изгибающие усилия, что расширяет возможности холодной гибки труб и повышает качество изделий (рис. 1) [2–4].

Теоретические обоснования этого способа холодной гибки были предварительными и весьма приблизительными [3, 5, 6]. При раскатывании тонкостенной трубы с достаточно большими натягами возникает сложное пространственное напряженное состояние трубы далеко за пределами упругости в зоне контакта и облегания трубой деформирующего элемента. С достаточной точностью это физическое явление может быть лишь численно смоделировано трехмерной моделью цилиндрической оболочки, находящейся в условиях контактной задачи в упруго-пластическом состоянии. Но, к сожалению, и при численном моделировании вычлнить главные теоретические механизмы явления достаточно затруднительно [7].

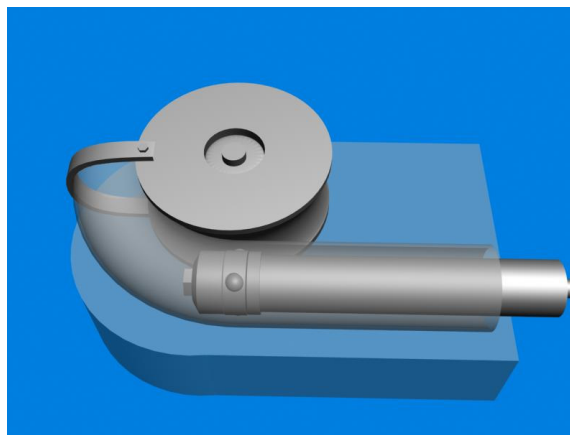
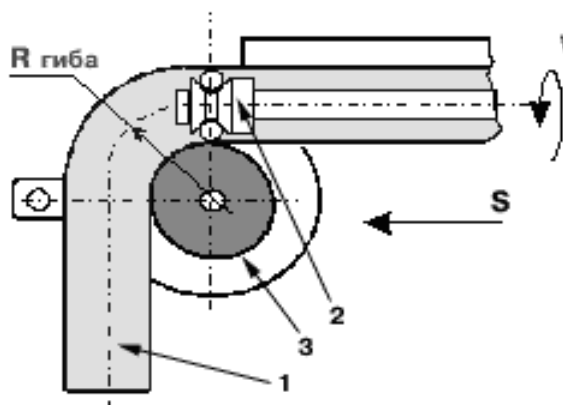


Рис. 1. Схема гибки труб с раскатыванием

Мы считаем, что в явлении снижения усилий гибки при раскатывании труб возможно участие двух механизмов. Для уяснения механизмов снижения усилий гибки приведем некоторые соображения и оценки. Тонкая стенка трубы облегает поверхность шарика и принимает кривизну, при-

мерно равную его радиусу (с учетом толщины стенки) как в продольном, так и в поперечном направлениях (рис. 2). Так, например, для гибки с раскатыванием стальных труб диаметром 100 мм с толщиной стенки 3–4 мм применялись шарики, диаметром 30–40 мм.

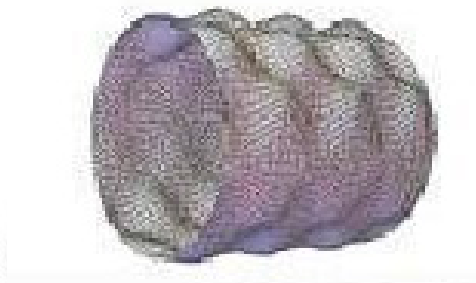
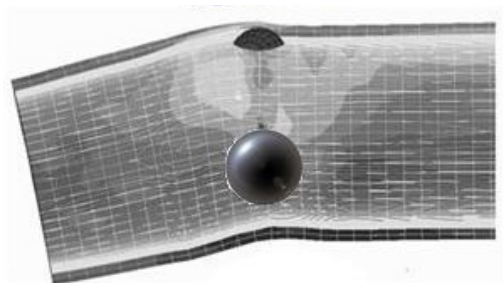


Рис. 2. Деформация стенок трубы вращающимся шариковым раскатником

Из известной формулы $2\gamma = 2\rho\sigma_t/E$ имеем оценку толщины упругого слоя порядка 0,1 мм, что по сравнению с толщиной стенки величина пренебрежимо малая. Таким образом, можно приближенно полагать, что в трубе наблюдаются пластические шарниры как в продольном (рис. 3), так и в окружном направлениях (рис. 4).

Изгибающий трубу момент раскладывается на пару сил, сжимающую в нижней части трубу и растягивающую в верхней ее части. Поэтому есть смысл рассмотреть, как влияют на сопротивление растягивающей силе (или сжимающей, что эквивалентно) моменты, изгибающие растягиваемый элемент с образованием пластических шарниров.

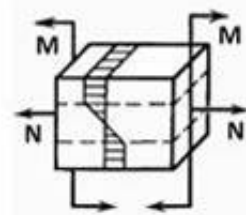
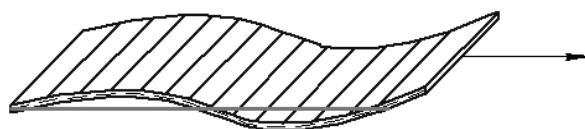


Рис. 3. Образование пластических шарниров при продольных циклических нагрузках

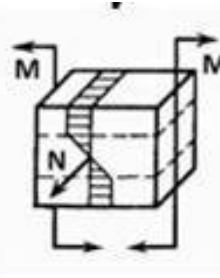
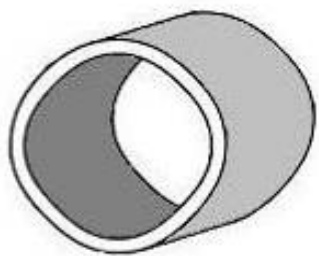
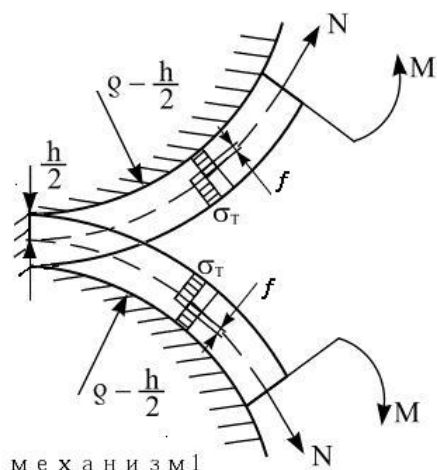


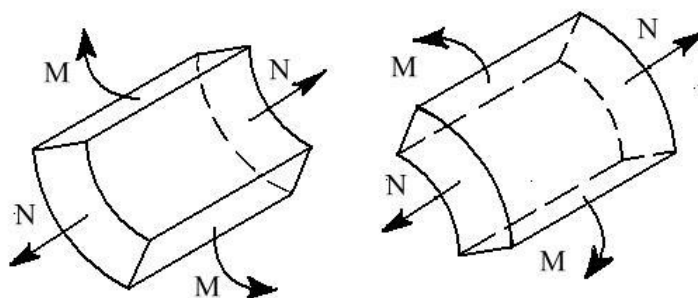
Рис. 4. Образование пластических шарниров при поперечных циклических нагрузках

Из предварительных теоретических оценок выясняется, что и в случае, когда растягивающая сила и изгибающий момент лежат в одной плоскости (механизм 1), и в случае, когда эти сила

и момент лежат в перпендикулярных плоскостях (механизм 2), величина растягивающей силы может быть как угодно мала (рис. 5) [6, 8].



а)



механизм 2

б)

Рис. 5. Механизмы растяжения элемента трубы при циклическом изгибе:

а – в той же плоскости, б – в перпендикулярной плоскости

Для уяснения первого механизма рассмотрим стержень шириной равной единице, нагружаемый знакопеременным моментом M , так что средняя линия принимает кривизну $\pm 1/\rho$. Пусть относительная толщина стержня h/ρ достаточно велика, чтобы пренебречь толщиной упругого слоя (2у).

При приложении к стержню растягивающих сил N , как бы ни были малы эти силы, пластические шарниры становятся асимметричными, а нейтральный слой сдвигается на величину f . Нетрудно видеть, что $f = N/2\sigma_T$ (рис. 6).

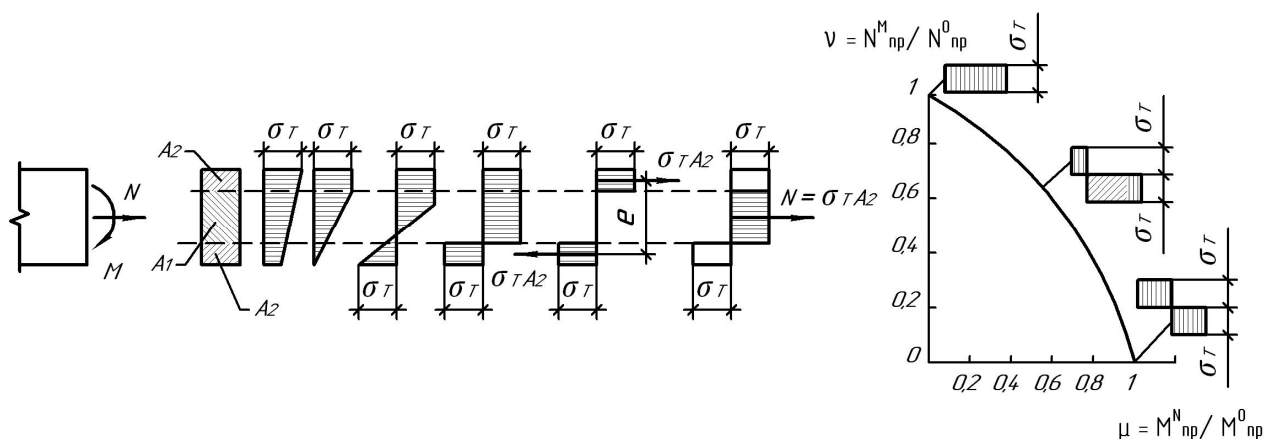


Рис. 6. Соотношение влияния изгибающего момента и растягивающих сил

При изгибе только нейтральный слой не испытывает ни удлинения, ни укорочения, следовательно средний слой стержня и в верхнем, и в нижнем положениях, то есть при изгибе обоих знаков, испытывает удлинение, равное

$$\Delta \ell' = \ell f / \rho,$$

а за полный цикл знакопеременного изгиба удлинение составит

$$\Delta \ell = 2\Delta \ell' = 2\ell f / \rho = \ell N / \rho \sigma_T.$$

Рассмотрим действие второго механизма. Как известно, пластические деформации пропорциональны и коллинеарны девиатору напряжений:

$$\varepsilon_1 = 1,5 K [\sigma_1 - \sigma_{cp}];$$

$$\varepsilon_2 = 1,5 K [\sigma_2 - \sigma_{cp}];$$

$$\varepsilon_3 = 1,5 K [\sigma_3 - \sigma_{cp}].$$

Определим деформации в слое, где растягивающее окружное напряжение равно пределу текучести $\sigma_1 = \sigma_T$, а $\sigma_3 = 0$:

$$\varepsilon_1 = 1,5 K [\sigma_T - (\sigma_2 + \sigma_T)/3];$$

$$\varepsilon_2 = 1,5 K [\sigma_2 - (\sigma_2 + \sigma_T)/3].$$

Деформация продольного растяжения будет $\varepsilon_2 > 0$, если растягивающее напряжение $\sigma_2 > 0,5\sigma_T$.

Если оба напряжения одного знака, то даже, если одно достигло σ_T , второе, тем не менее, должно быть не меньше $0,5\sigma_T$.

Если же в сжатом слое $\sigma_1 = -\sigma_T$, а $\sigma_3 = 0$, то

$$\varepsilon_1 = 1,5 K [-\sigma_T - (\sigma_2 - \sigma_T)/3];$$

$$\varepsilon_2 = 1,5 K [\sigma_2 - (\sigma_2 - \sigma_T)/3].$$

То есть $\varepsilon_2 > 0$, даже если $\sigma_2 = 0$ (точнее, уже при $\sigma_2 > -0,5\sigma_T$).

Таким образом, при окружном растяжении оболочки, ее достаточно продольно растягивать половинным предельным нагружением, тогда как при окружном сжатии она растягивается сама. Однако зоны пластического шарнира вообще не ока-

зывают сопротивления осевым напряжениям, поскольку необходимо рассматривать совместное решение для растягиваемого и сжимаемого при изгибе слоев выделенного элемента. Сжимаемая половина ширины оболочки «тянет» вторую, растягиваемую половину в продольном направлении (рис. 7).

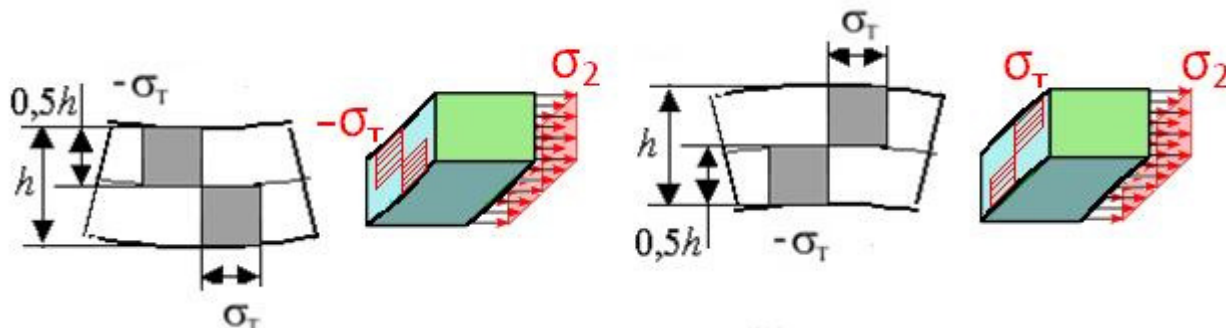


Рис. 7. Распределение напряжений при раскатывании изгибаемой трубы

После поворота раскатки на угол π/n (где n – число шариков), сжимаемая и растягиваемая половины поменяются местами (возникнет пластический шарнир другого знака).

Таким образом, при гибке труб с раскатыванием имеет место суммарное действие обоих механизмов, что существенно снижает необходимые для удлинения наружной или укорочения

внутренней стенок силы растяжения или сжатия соответственно.

Для проверки описанных выше механизмов была произведена серия принципиальных экспериментов [8]. В частности была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка на базе станка мод. 6Н81Г для проверки первого и второго механизмов (рис. 8).

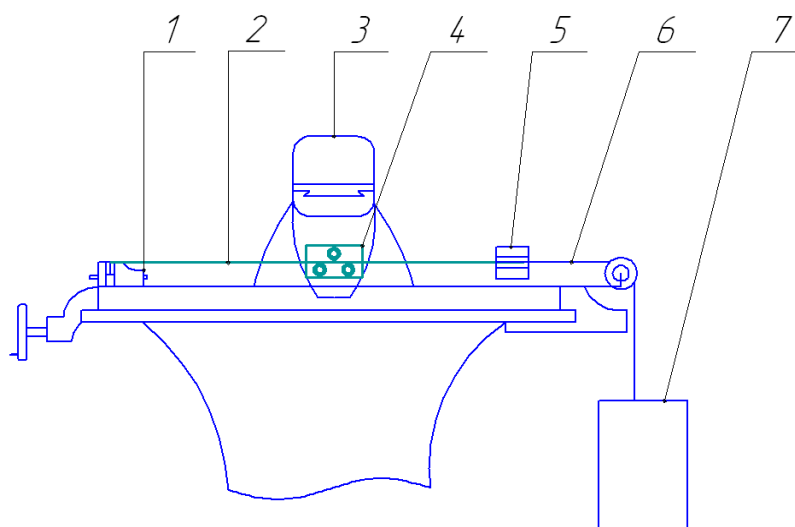


Рис. 8. Экспериментальная установка: 1 – тисы; 2 – полоса, подвергаемая деформации; 3 – передняя бабка станка; 4 – деформирующая головка для создания знакопеременных циклических деформаций полосы; 5 – зажимные губки; 6 – трос; 7 – сменные грузы

В качестве деформирующих инструментов применялись соответственно трехроликовая вальцовка (рис. 9) и четырехроликовая головка с двумя парами выпуклых и вогнутых роликов (рис. 10). При перемещении головки 4 вдоль растягиваемой с

тарированной силой полосы в одном случае ее знакопеременный изгиб действует в направлении действия растягивающей силы, а в другом – в направлении перпендикулярном действию силы.



Рис. 9. Трехроlikовая вальцовка

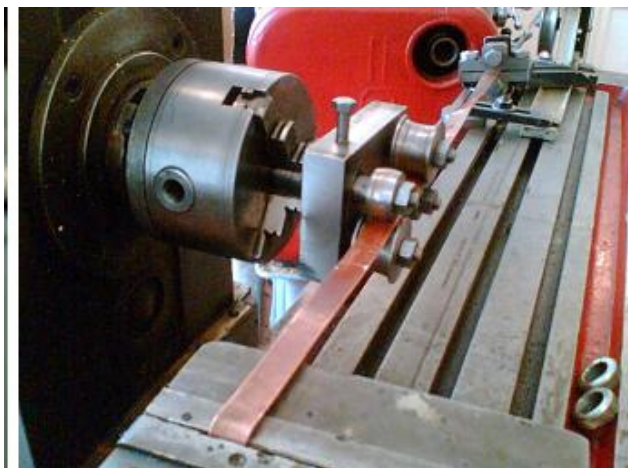


Рис. 10. Установка и головка для поперечного изгиба

Эксперименты проводились на медных полосах, $\sigma_T = 0,5$ МПа. При поперечном изгибе пластина толщиной 2 мм имела ширину 15 мм, а при продольном – 5 мм. Опыты проводились при раз-

личной массе грузов: 20 кг, 28,6 кг и 37,2 кг соответственно. Результаты изменения величин удлинения образцов показаны на рис. 11, 12.

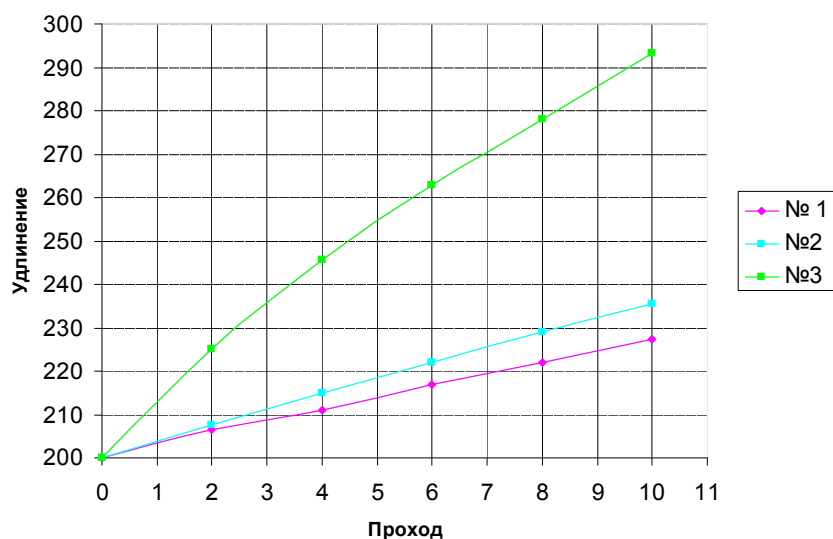


Рис. 11. Графики зависимости удлинения полосы от нагрузки при ее деформации трехроlikовой вальцовкой

В экспериментах использовались также полосы из других материалов: свинцовые, алюминиевые, бронзовые и стальные. Как правило, за один рабочий ход деформирующей головки удлинение

полосы составляло от 0,3 до 2 мм в зависимости от величины растягивающей силы. Механизмы продолжают «работать», а полоса удлиняться вплоть до удвоения начальной длины полосы.

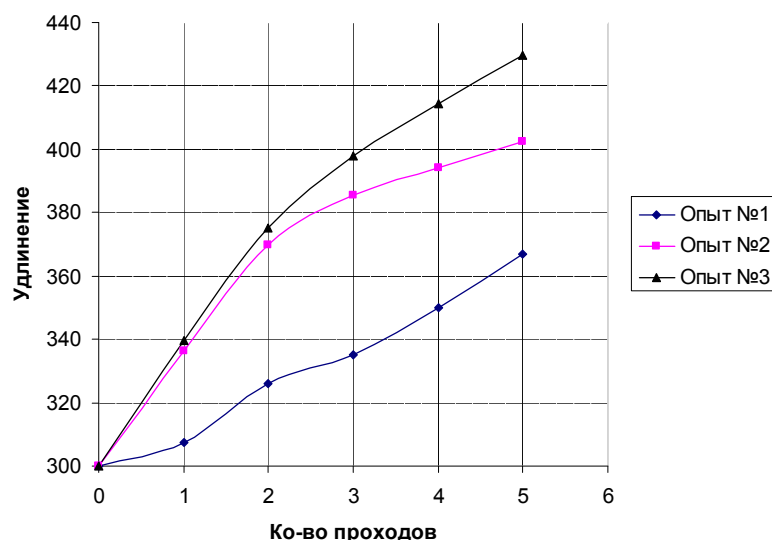


Рис. 12. Графическая зависимость величины удлинения от натяга

Таким образом, изгиб тонкостенного элемента резко снижает потребные силы для удлинения (или укорочения) элемента в любом направлении, как для сил, лежащих в плоскости циклического изгиба, так и для сил, перпендикулярных плоскости циклического изгиба, а также и под произвольным углом. То есть все составляющие пространственного изгиба при контакте стенок трубы с шариками или роликами обеспечивают снижение потребного момента изгиба трубы.

Описанный выше механизм отвечает и за задачу, т.е. увеличение диаметра раскатываемых трубы или кольца от действия растягивающих окружных реакций. При небольшом числе шариков или роликов растягивающие кольцо силы малы, во много раз меньше, чем необходимая в статике сила текучести или разрыва. Однако с каждым оборотом раскатки диаметр и длина окружности трубы и кольца неуклонно увеличиваются. В проведенных нами экспериментах раскатывалось тонкостенное латунное кольцо диаметром 70 мм с толщиной

стенки 1 мм, шириной 20 мм. Начальный натяг – 2,5 мм. Удлинение кольца составило 6 мм за 10 оборотов раскатки.

Однако поскольку не все точки сечения трубы испытывают одинаковый изгиб одновременно (рис. 13), реальное снижение изгибающих усилий обеспечивается только в 2,5–3,5 раза по сравнению с холодной гибкой без дополнительного воздействия на изгибаемую трубу.

Из теоремы Кастильяно можно получить минимальный натяг, необходимый для образования пластических шарниров:

$$H = 3R^2 \alpha \sigma_T [1 + \cos \alpha + \cos^2 \alpha - \sin \alpha (1 + 2 \cos \alpha) / \alpha] / Eh \sin \alpha \sin^2 0,5\alpha.$$

Приняв приближенные равенства:

$$\sin \alpha \approx \alpha - \alpha^3/6 + \alpha^5/120; \cos \alpha \approx 1 - \alpha^2/2 + \alpha^4/24; \sin \alpha/2 \approx \alpha/2 - \alpha^3/48,$$

получим простую и удобную логарифмируемую форму:

$$H = 1,2 R^2 \alpha^2 \sigma_T / Eh (1 - 0,0555 \alpha^2).$$

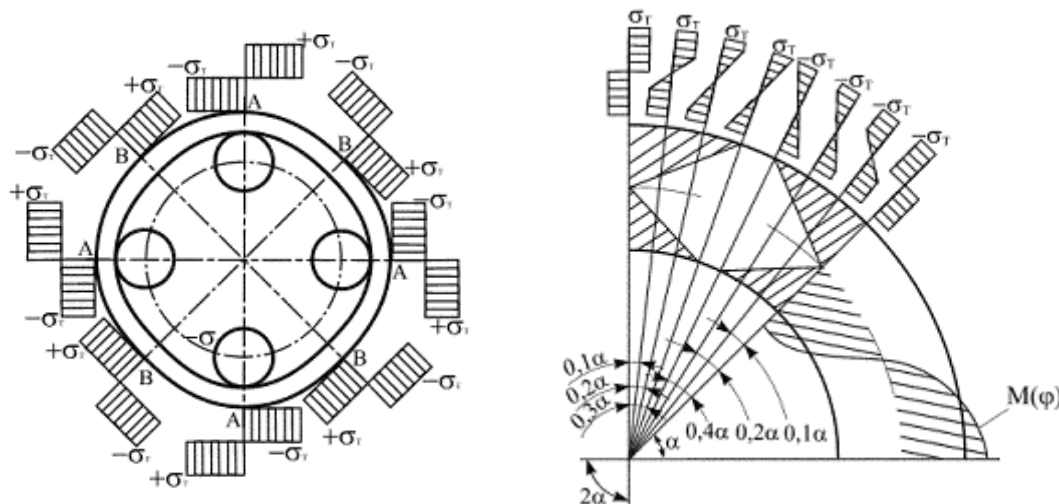


Рис. 13. Распределение напряжений по поперечному сечению изгибаемой трубы

Расчеты показывают, что уже при минимальном натяге момент, потребный для гибки труб, снижается по меньшей мере в 2 раза. При значительном увеличении натяга можно обеспечить еще большее снижение момента гибки. Экспериментальное определение усилий (рис. 14) показало, что при раскатывании с натягами в 1,5–3 раза больше минимального, изгибающий момент снижается в 2,5–3,5 раза. Вследствие того, что усилия гибки становятся меньше тех усилий, при ко-

торых сжимаемая часть трубы теряет устойчивость и образуются складки, качество гибки повышается.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса гибки труб с раскатыванием было разработано несложное по конструкции оборудование [1, 2, 4, 9]. Предварительная проверка возможных принципиальных схем гибки показала, что наиболее эффективно и просто применение схемы гибки с использованием ролика-шаблона в сочетании с механизмом раскатывания.

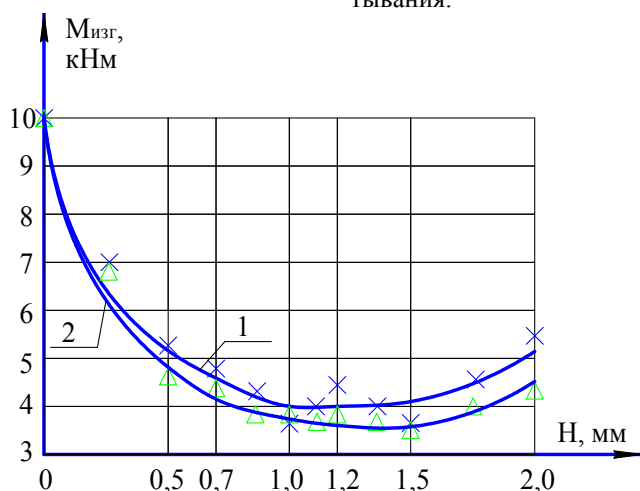


Рис. 14. Зависимость изгибающего усилия от натяга: 1 – графики для трехшарикового раскатника; 2 – для четырехшарикового раскатника с попарным расположением ДЭ

Разработка оборудования велась по двум направлениям: путем модернизации серийно выпускаемого оборудования для холодной гибки и создания оригинальных установок [1, 2, 4, 9]. В частности была выполнена модернизация серийно выпускаемых Саранинским заводом кузнечно-

прессового оборудования станков мод. ИВ-3428 и ИВ-3430 (рис. 15). Установка на эти станки механизма раскатывания трубы позволила существенно повысить технологические возможности станков (см. таблицу).

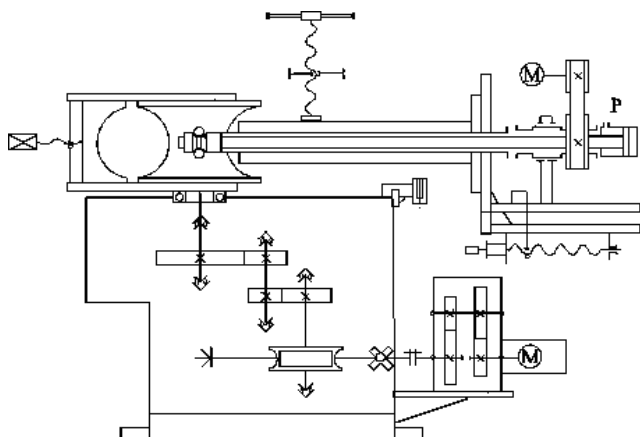
Таблица

Основные характеристики станков	СХГТ-1	СХГТ-2 (на базе ТР-6)	СХГТ-3 (на базе ИВ-3428)	СХГТ-4 (на базе ИВ-3430)	СХГТ-5	СХГТ-6
	С раскатыванием					С обкатыванием
1. Параметры трубы:						
– наибольший наружный диаметр;	36	57	114	159	219	219
– наименьший наружный диаметр;	22	28	42	57	108	–
– толщина стенки;	2	3–4	2,5–6	2,5–8	5–10	5–10
– наибольшая длина заготовки	400	1000	1700	2000	2500	6000
2. Радиус гиба	(1,5–2,5)D					(3–5)D
3. Наибольший угол гиба	180	180	180	180	90	90
4. Мощность электродвигателя, кВт:						
– главного привода;	1	3	2,2	2,2	14	14
– привода инструмента	–	1	2,2	4,8	10	10
5. Охлаждение инструмента	–	Водяное				
6. Габариты станка, мм						
длина	900	3500	2600	3000	4500	6000
высота	300	1200	1400	1400	2300	2000
ширина	600	1200	1200	1300	1300	1200

Выполнена модернизация токарного станка мод. ТР-6, позволившая осуществлять качествен-

ную гибку труб диаметрами 20–50 мм. Разработано и внедрено в производство несколько оригиналь-

ных установок для гибки труб диаметрами 15–30 мм, 40–100 мм, 100–200 мм (рис. 16). Для гибки труб с внутренним покрытием, в частности полиэтиленовым, спроектирована опытно-



промышленная установка для гибки труб диаметром до 200 мм с воздействием на изгибаемую трубу вращающегося обкатника (рис. 17, 18).



Рис. 15. Модернизированный трубогиб модели ИВ-3430 для гибки труб диаметром 50–150 мм

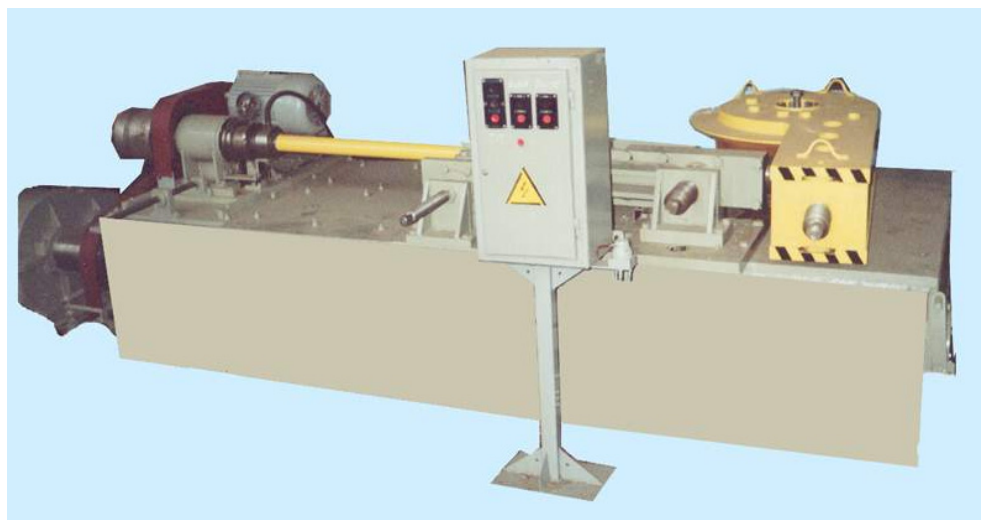


Рис. 16. Станок для гибки труб \varnothing 100–200 мм

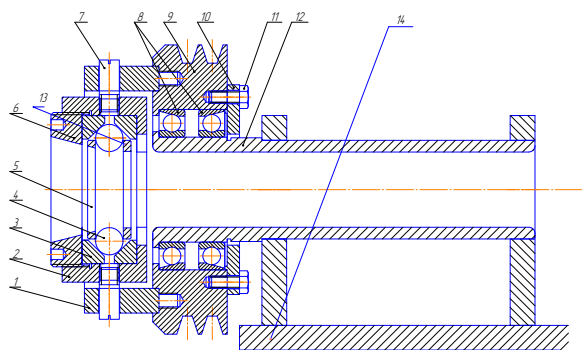


Рис. 17. Схема устройства обкатной головки

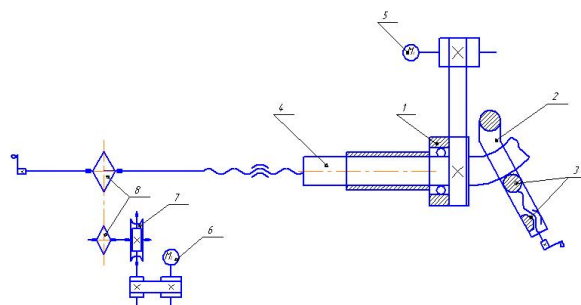


Рис. 18. Кинематическая схема станка для гибки труб с обкатыванием

Все оборудование прошло производственные испытания и внедрено в производство. Так станки, работающие по методу гибки с раскатыванием, в период с 1993 по 2009 гг. внедрены более чем 20 предприятий России и ближнего зарубежья

(«Усть-Катавский вагоностроительный завод» г. Усть-Катав, 1999 г.; РСП «Уралсантахэнерго» г. Уфа, 2000 г.; «Челябэнерго» г. Златоуст, 2004 г.; «Прокатмонтаж» г. Магнитогорск, 1996 г.; ООО «Полигран» г. Махачкала, 1997 г.; АО «Ашинский

металлургический завод» г. Аша, 2001 г.; ООО «Трилогия Плюс» г. Челябинск, 2004 г. и др.). Этими предприятиями налажен массовый выпуск отводов гнутых и других изделий, получаемых холодной гибкой с раскатыванием изгибаемой трубы, как для собственных нужд, так и для реализации на сторону (рис. 19). Совместно с ООО «Саранинский завод» налажен серийный выпуск станков для холодной гибки с раскатыванием тонкостенных труб диаметрами 40–100 мм и 50–150 мм. На этом же

предприятии изготовлен станок для гибки труб с обкатыванием, на котором производится массовый выпуск отводов диаметром 200 мм с внутренним полиэтиленовым покрытием.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс подготовки инженеров по специальностям 151001 «Технология машиностроения» и 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств». 150201 «Машины и технологии обработки металлов давлением».

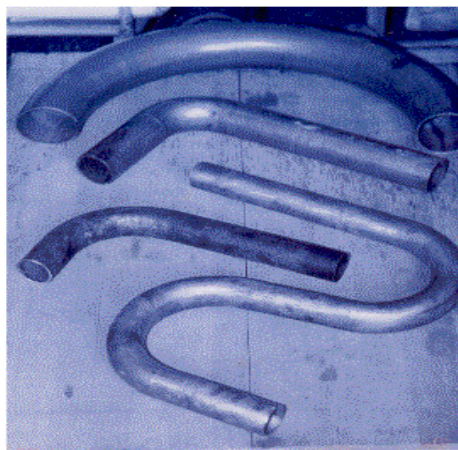


Рис. 19. Изделия, получаемые холодной гибкой с раскатыванием-обкатыванием

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – 169 с.
2. Новая технология холодной гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 6. – С. 68–69.
3. Козлов, А.В. Оценка натягов и усилий при гибке труб с раскатыванием / А.В. Козлов, Я.М. Хилькевич // Вестник ЮУрГУ. – 2004. – № 5 (34). – С. 125–131.
4. Козлов, А.В. Опыт гибки тонкостенных труб в холодном состоянии / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов, Я.М. Хилькевич // Технология машиностроения. – 2008. – № 10 – С. 21–22.
5. Козлов, А.В. Изучение влияния холодной гибки труб с раскатыванием на структуру и свойства металла / А.В. Козлов, И.В. Чуманов, А.В. Бобылев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 33–35.

6. Козлов, А.В. Напряженное состояние в трубе при ее гибке с раскатыванием n парами близко расположенных деформирующих элементов / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов, Я.М. Хилькевич // Вестник машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 67–70.

7. Козлов, А.В. Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов // Известия ТулГУ. Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением». – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – Вып. 4. – С. 28–33.

8. Козлов, А.В. Механизмы снижения усилий гибки труб при их раскатывании с большими натягами / А.В. Козлов, В.Г. Шеркунов, Я.М. Хилькевич // Вестник МТГУ им. Г.И. Носова. – 2009. – № 4. – С. 36–39.

9. Козлов, А.В. Разработка оборудования для холодной гибки труб с раскатыванием / А.В. Козлов // Вестник МТГУ им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 34–36.