

05.03.01  
Б728

На правах рукописи

Бобылев Андрей Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ  
ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТРУБУ ВРАЩАЮЩИМСЯ РАСКАТНИКОМ

Специальность 05.03.01 – “Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки”

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2002

Диссертация выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Лакирев Сергей Григорьевич.

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент

Козлов Александр Васильевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Мазеин Петр Германович;

кандидат технических наук, доцент

Гельфонд Михаил Леонидович.

Ведущее предприятие – ФГУП «Производственное объединение

Златоустовский машиностроительный завод».

Защита состоится « 26 » декабря 2002 г., в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « 25 » ноября 2002г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

 Евдо́ки́мов В.В.

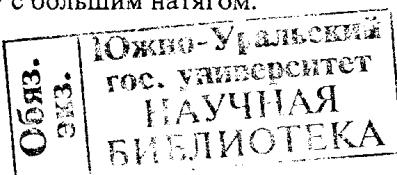
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Для рациональной компоновки трубопроводов 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 труб диаметром более 40...50 мм в холодном состоянии практически невозможна, поскольку она сопровождается такими нежелательными для последующей эксплуатации явлениями как сплющивание попечерного сечения, образование гофр и изломов на внутренней частигиба, что обусловлено значительными усилиями изгиба, поэтому не удается получить радиусы гиба менее 3,5...4,5 диаметра трубы. Гибка труб диаметром выше 50 мм на такие радиусы гиба в основном осуществляется путем проталкивания нагретой трубы через рогообразный сердечник-дорн либо с применением узко-зонального нагрева ТВЧ. Первое требует дорогостоящего технологического оборудования и осуществляется, как правило, на специализированных заводах. Второе характеризуется низкой производительностью.

Таким образом, на сегодняшний день основными средствами снижения усилий гибки является нагрев, что требует больших энергозатрат. Поэтому исследование холодной гибки является актуальным и позволяет значительно усовершенствовать процесс гибки труб в холодном состоянии.

Данная работа выполнена в соответствии с Федеральной межвузовской программой «Конверсия – 97. Технологии двойного назначения».

**Цель работы.** Повышение эффективности процесса холодной гибки труб и улучшение качества изделий за счет воздействия на трубу в зоне гибки врашающимся раскатником, заведенным в трубу с большим натягом.



## **Научная новизна работы**

1. Выявлен механизм достижения предела текучести стенок трубы за счет создания сложнонапряженного состояния стенок трубы ее раскатыванием с большими натягами при значительном снижении усилий гибки.
2. Обоснована целесообразность применения при гибке с раскатыванием малого количества деформирующих элементов (ДЭ). Установлено их критериальное количество – 3 или 4, которое следует применять в раскатном инструменте, для устранения раздачи трубы по диаметру и обеспечения наиболее эффективного снижения усилий гибки. Показано так же, что применение 4-элементного раскатника требует на 15...20% больших усилий гибки по сравнению с 3-элементным раскатником, но снижает овальность в 4...6 раз.
3. Определен диапазон рабочих натягов, позволяющих достигать сложнонапряженного состояния стенок трубы и обеспечивать высокое качество формы поперечного сечения криволинейных участков трубопроводов.
4. Установлено, что в диапазоне рабочих натягов существует зона рациональных натягов, при которых усилия гибки минимальны.
5. Выявлено, что скорость подачи трубы влияет как на усилия гибки, так и на качество изделий, в частности снижение подачи с 160 до 40 мм/мин уменьшает усилия гибки на 20...25% и снижает овальность в 1,5...2 раза.

## **Практическая ценность работы**

1. Разработаны рекомендации по назначению главных технологических параметров гибки: натяга, скорости подачи трубы, количества ДЭ в раскатнике и величины вылета раскатника относительно центра гибочного ролика.
2. Разработано оборудование для гибки горячекатанных и шовных труб диаметром 57...114 мм из сталей обыкновенного качества. Испытания показали, что гибка труб с раскатыванием обеспечивает требуемое качество изделий.
3. Предложены рациональные маршруты изготовления различных изделий методом гибки труб с раскатыванием, которые могут быть приняты за основу при технологической подготовке производства.

4. Разработана инженерная методика построения технологического процесса холодной гибки труб, раскатываемых с большими натягами.

5. Оборудование для гибки с раскатыванием внедлено на 5 предприятиях и в учебный процесс подготовки инженеров по специальности 120100.

#### **На защиту выносятся:**

1. Виброреологический механизм достижения предела текучести стенок трубы, обеспечивающий снижение усилий гибки в 2...2,5 раза.

2. Механизм создания предельно упругого и предельно пластического сложнонапряженного состояния стенок трубы. Расчет натягов, необходимых для достижения этих состояний. Обоснование применения малого количества ДЭ в раскатнике при гибке труб с раскатыванием.

3. Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния натяга, скорости подачи трубы и количества ДЭ в раскатнике на усилия гибки и овальность поперечного сечения получаемых изделий.

4. Инженерная методика построения технологического процесса холодной гибки труб, раскатываемых с большими натягами.

**Реализация результатов работы.** По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложены новая технология, оснастка и инструмент для гибки труб в холодном состоянии, которые испытаны в производственных условиях и внедрены в АО «Ашинский металлургический завод», ОАО «Усть-Катавмежрайгаз», РСП «Уралсантехэнерго» г.Уфа, МУ «Городское коммунальное хозяйство» г. Златоуст, ООО «ГросКом» г. Златоуст, и ФУГП «Усть-Катавский вагоностроительный завод».

Внедрение обеспечило (по сравнению с холодной гибкой труб с помещением внутри них цилиндрических дornов):

- расширение технических возможностей холодной гибки труб;
- расширение диапазона труб изгибаемых в холодном состоянии с  $\varnothing 20\ldots 40$  мм до  $\varnothing 50\ldots 150$  мм;
- уменьшение радиуса гиба с  $(3,5\ldots 4)D_{\text{трубы}}$  до  $(1,5\ldots 2)D_{\text{трубы}}$ ;
- снижение разностенности гнутых труб на 15...20%;

- снижение брака изделий по гофрообразованию на 40...50%;
- повышение точности поперечного сечения изделий на 20...30%;
- снижение энергоемкости производства в 2...3 раза.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международной выставке «Дни Челябинской области в Москве», посвященной 850-летию г. Москвы, 1997 г.; на 4-й Международной конференции «Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов» г. Барнаул, 1997 г.; на Международной выставке «Трубы. Лента. Продукция», г. Челябинск, 1997 г.; на II Международной научно-технической конференции «Проблемы пластичности в технологии» г. Орел, 1998 г.; на I и II Международных специализированных выставках-конференциях «Машиностроение. Прогрессивные технологии» г. Челябинск, 1997–98 гг.; на Международной научно-практической конференции «Технология, инновация, качество» г. Казань, 1999 г.; на международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» г. Тюмень, 2000 г.; на научно-технических конференциях ЮУрГУ в 1994–2002 гг.

**Публикации по теме диссертационной работы.** Основное содержание диссертации отражено в 17 печатных работах автора.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов основного текста, общих выводов и списка литературы.

**Объем работы.** 147 страниц машинописного текста, в том числе 112 рисунков на 64 страницах, 7 таблиц. В списке использованной литературы содержится 112 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Состояние вопроса, задачи исследования**

Вопросы повышения эффективности процессов гибки труб рассматривались в работах исследователей Гальперина А.И., Мосина Ф.В., Мошнина Е.Н., Султана-Заде С.М., Горбунова М.Н., Дмитриева Б.С., Гребенкина В.Г., Долле-

жаля Н.А., Долгова В.К., Михлина И.И. и др. В них отмечалось, что способ гибки трубы определяет процесс пластического течения металла и процесс деформации трубы, поэтому правильным выбором того или иного способа можно не только достигнуть требуемой производительности, но и создать условия, обеспечивающие заданную точность формы трубы в продольном и поперечном сечении, разностенность, радиус гиба, минимальный расход материала, рациональные условия монтажа трубопровода и его эксплуатации в целом.

Анализ технической и патентной литературы позволил выявить основные способы гибки труб и установить их достоинства и недостатки по силовым, энергетическим и точностным показателям.

1. Гибка труб чистым изгибающим моментом без дополнительных воздействий. К его недостаткам относятся: необходимость обеспечения весьма значительных усилий и мощности; невозможность обеспечить радиус гиба менее  $4D_{\text{трубы}}$ ; образование гофр, так как потеря устойчивости сжимаемых волокон труб происходит раньше, чем достигается пластичное состояние материала. Таким образом, гибка достаточно тонкостенных труб, возможна только при наличии дорнов, оправок или иного заполнителя полости трубы, которые ограничивают высоту образующихся гофр.

2. Гибка с общим нагревом изгибающей трубы. При нагреве до  $760\ldots920^{\circ}\text{C}$  в 2–3 раза снижаются  $\sigma_t$  и  $\sigma_b$ , что снижает усилия гибки и обеспечивает возможность получения криволинейных отводов с радиусом гиба  $(2,5\ldots3,5)D_{\text{трубы}}$ . В то же время необходимость нагрева резко удорожает производство и требует, как правило, специализированного оборудования.

3. При гибке труб с узкозональным нагревом ТВЧ соседние холодные участки трубы не дают нагретому участку сплющиваться, что значительно уменьшает риск появления гофр, высокая температура в зоне нагрева ( $900\ldots1100^{\circ}\text{C}$ ) позволяет снижать усилия гибки в 5…7 раз. Но для гибки труб  $\varnothing 50\ldots100$  мм требуются два генератора с мощностью по 100 кВт каждый.

4. Гибка трубы при действии внутреннего гидростатического давления. Усилия гибки и гидростатическое давление создают сложнонапряженное состоя-

ние в стенах трубы, которое описывается при помощи диаграммы plasticности Треска Сен-Венана (рис. 1). Когда окружные растягивающие напряжения  $\sigma_2$  достигают величины  $\sigma_t$ , продольные  $\sigma_1$ , создающие изгибающий момент, могут быть сколь угодно малы, а состояние материала трубы будет удовлетворять условию текучести.

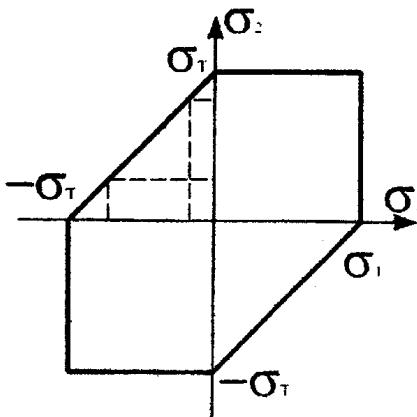


Рис. 1. Шестиугольник Треска Сен-Венана

Однако при давлении, приближающемся к величине  $2h\sigma_t/D_{\text{трубы}}$  (где  $h$  – толщина стенки трубы), когда трубу можно изогнуть сколь угодно малым изгибающим моментом, появляется опасность взрывного разрушения трубы при гибке. Вследствие этого реально удается снизить изгибающий момент только в 2 раза, не удается получить крутозагнутые отводы, не исключается образование гофр и искажение профиля поперечного сечения. Существует и ряд технологических трудностей.

5. Гибка проталкиванием трубы через рогообразный донн с увеличивающимся диаметром. Окружные напряжения сразу достигают  $\sigma_t$  без опасности взрывного разрыва трубы. Теоретически изгибающий момент может быть сколь угодно мал. Однако при этом потребуется увеличить исходный диаметр трубы на 40...50%. Такие деформации трубы без нагрева обеспечить невозможно. Все это сильно усложняет конструкцию оборудования и технологию. Такая гибка осуществляется, как правило, на специализированных предприятиях.

Таким образом, можно сделать вывод, что главными недостатками приведенных способов гибки труб являются либо большие усилия гибки и, как следствие, плохое качество изделий, либо большие энергозатраты. Однако хорошо видно, что потенциальные возможности снижения усилия гибки за счет создания сложнонапряженного состояния материала трубы превосходят возможные снижения усилия гибки за счет нагрева трубы. К этой группе относится гибка труб, раскатываемых в процессе гибки с большими натягами. Она устраниет большинство вышеперечисленных недостатков.

Сущность технологии гибки труб с раскатыванием заключается в следующем. При вращении  $\omega_2$  раскатника (рис. 2 а), заведенного в трубу с достаточно большим натягом, в каждой точке кольцевой зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб (рис. 2 б), при котором изгибающие напряжения кратковременно достигают предела текучести  $\sigma_T$ . В результате, при приложении относительно небольшого изгибающего усилия  $\omega_1$  происходит гибка в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания.

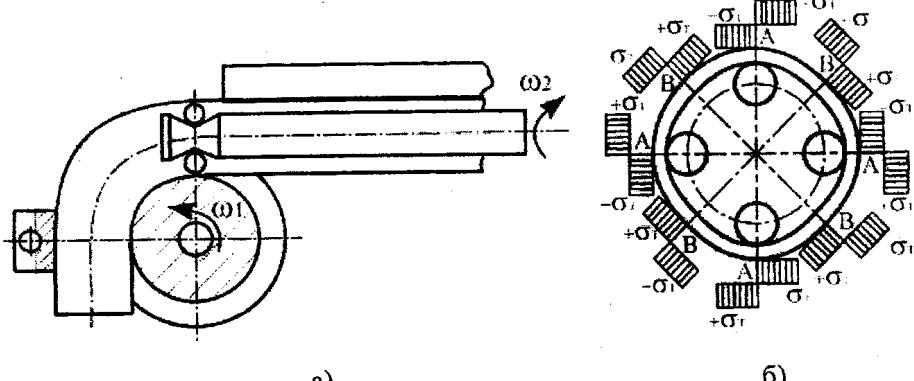


Рис 2. Гибка труб раскатываемых с большими натягами

Однако применение данного способа ограничено тем, что неизвестны режимы гибки, к которым в первую очередь относятся натяг, скорость подачи трубы и количество ДЭ в раскатнике, отсутствие инженерной методики проектирования операций гибки.

Исходя из цели настоящей работы необходимо решить следующие задачи.

1. Теоретически обосновать метод гибки труб с раскатыванием и определить условия, обеспечивающие существенное снижение усилий гибки.
2. Экспериментально проверить теоретически выявленные закономерности.
3. Определить влияние основных технологических факторов на качество изделий и разработать на этой основе инженерную методику построения технологического процесса холодной гибки труб с раскатыванием.
4. Внедрить результаты исследований в производство и учебный процесс.

## **2. Теоретическая оценка возможностей метода гибки труб с раскатыванием**

Раскатывание отверстий с целью повышения точности и снижения шероховатости хорошо известно. При этом применяют очень малый натяг ( $0,005\ldots0,15$  мм) и большое число деформирующих элементов, чтобы снизить деформации деталей и увеличить скорость подачи. При гибке с раскатыванием пластичность должна быть достигнута по всей толщине стенки, что требует значительно больших натягов. С увеличением натяга растягивающие усилия возрастают, а распределения нормальных напряжений в сечениях А и В становятся резко асимметричными (рис. 3), что приводит к быстрой раздаче детали по диаметру. Снизить растягивающие усилия при гибке с раскатыванием возможно только за счет уменьшения числа ДЭ в раскатнике.

Действительно, если число деформирующих элементов невелико, то растягивающие усилия малы и распределения нормальных напряжений в сечениях А и В практически симметричны (рис. 3 б). При этом на каждую точку сечения трубы синхронно частоте вращения инструмента действуют растягивающие и сжимающие нормальные напряжения, но хотя они и достигают предела текучести, тонкостенная втулка в окружном направлении почти не растягивается и не

сжимается. И в этом состоянии пластичность материала периодически достигается в каждой точке раскатываемого сечения, и сколько угодно малые напряжения в продольном направлении приводят к изгибу трубы. При использовании в раскатке 3–4 ДЭ, может возникать не более 6–8 пластических шарниров, которые локализованы в узких областях, в то время как остальная часть материала трубы находится практически не в напряженном состоянии.

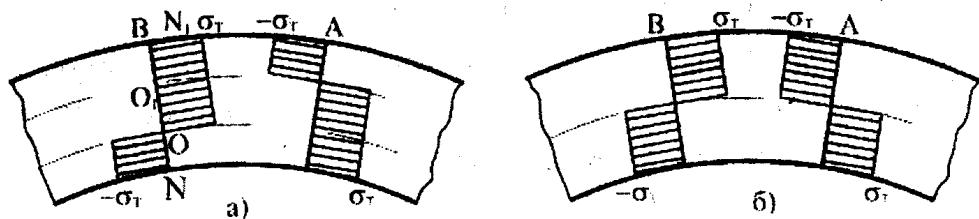


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в сечениях трубы:  
а – гибка с большим количеством деформирующих элементов;  
б – гибка с малым количеством деформирующих элементов

При образовании пластических шарниров, ширина упругой зоны в точках В и А (см. рис. 2) равна нулю. Но момент изгиба  $M(\phi)$  в поперечном сечении с изменением текущего угла  $\phi$  изменяется по зависимости близкой к квадратичной (рис. 4), поэтому ширина упругой зоны от углового положения точки – практически линейная функция:

$$M(\phi) \approx \frac{h^2 \sigma_T}{4} \left[ 1 - \frac{(\phi - \alpha)^2}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right] \approx \frac{h^2 \sigma_T}{4} \left[ 1 - \frac{2(\phi - \alpha)^2}{\alpha^2} \right],$$

где  $h$  – толщина стенки трубы;  $\sigma_T$  – предел текучести материала трубы;  $\alpha$  – угол между деформирующими элементами в раскатнике.

Тогда из рис. 4 очевидно, что около 0,4 площади поперечного сечения (площадь заштрихованных участков) при достаточно малой скорости подачи трубы по сравнению со скоростью вращения раскатника вообще не оказывает сопротивления продольным усилиям. Однако и это еще не все, так как и в не-заштрихованной упругой зоне существуют значительные внутренние напряжения поперечного направления, и в соответствии с диаграммой Треска Сен-

Венана лишь половина площади упругой зоны оказывает полное сопротивление продольным усилиям. Оставшаяся часть ( $0,2 \dots 0,3$  общей площади поперечного сечения) оказывает сопротивление в среднем на 50%. Иначе говоря, раскатываемому с минимально необходимым натягом сечению трубы с толщиной стенки  $h$  по сопротивлению изгибу трубы эквивалентно не раскатываемое сечение со средней толщиной стенки

$$h' = h - 0,4 h - (0,4 \dots 0,6)h / 4 \approx (0,45 \dots 0,5) h.$$

Таким образом, при минимальном натяге момент, потребный для гибки труб, снижается в 2 раза. При значительном увеличении натяга можно обеспечить еще большее снижение момента гибки.

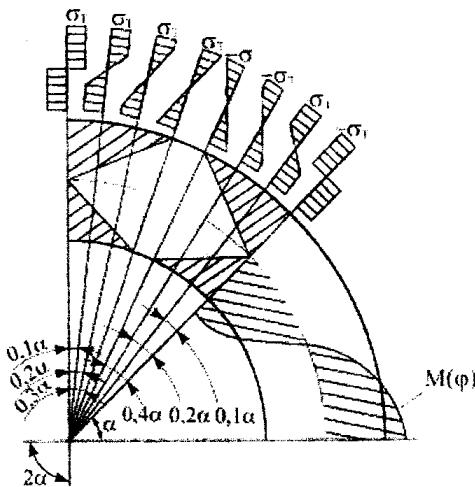


Рис. 4. Схема распределения нормальных напряжений в сечении стенки трубы от воздействия изгибающих моментов

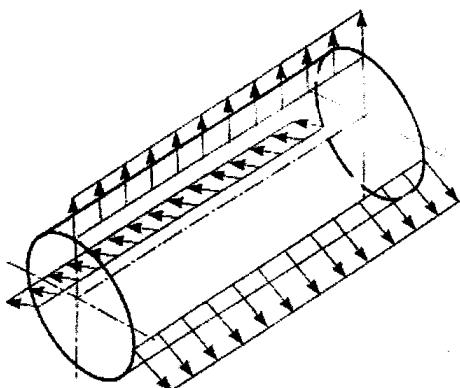


Рис. 5. Выбранная схема нагружения оболочки

Для оценки натягов используем схему нагружения оболочки силами, распределенными по бесконечным прямым (рис. 5), совпадающими с образующими цилиндрической оболочки. При использовании модели твердого тела деформирующих элементов и без учета упрочнения деформируемого материала такая расчетная схема дает оценку максимальных деформаций и натягов с точностью до 4%, тем более точную, чем больше длина контакта или продольный радиус ДЭ.

В поперечном сечении трубы при создании натяга на участке дуги АВ (см. рис. 3 б) возникнут нормальные, перерезывающие силы и изгибающие моменты. Величины деформаций от действия нормальных растягивающих сил  $\omega_N$  и изгибающих моментов  $\omega_M$  будут соответственно:

$$\omega_N = \frac{PR}{4Eh \sin^2 \frac{\pi}{n}} \left( \frac{\pi}{n} + \frac{\sin 2\pi}{2} \right), \quad \omega_M = \frac{PR^3}{EJ} \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \left( \frac{\pi}{2n} + \frac{\sin \frac{2\pi}{n}}{4} - \frac{2h}{\pi} \sin^2 \frac{\pi}{n} \right),$$

где Р – сила, прикладываемая на деформирующий элемент; R – радиус трубы; E – модуль упругости материала; h – толщина стенки трубы; n – число деформирующих элементов в раскатнике; J – момент инерции кольца.

Следовательно, натяг для таких деформаций кольца

$$N = 2(\omega_N + \omega_M).$$

Кольцо под воздействием такого натяга будет находиться в чисто упругом напряженном состоянии.

При дальнейшем увеличении натяга кольцо окажется в упругопластическом состоянии вплоть до разрушения кольца. Оценим величину деформаций и натяга, при котором произойдет это разрушение:

$$\delta_N = \frac{TR}{Eh} \left( \frac{\pi}{n} + \frac{\sin \frac{2\pi}{n}}{2} \right); \quad \delta_M = \frac{2R^3 T}{EI} \left[ a_1 a_2 \frac{\pi}{n} + (a_1 + a_2) \sin \frac{\pi}{n} + \frac{\pi}{2n} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{n} \right],$$

где  $T = \frac{P}{2 \sin \frac{\pi}{n}}$  – растягивающая сила;

$$a_1 = \frac{T}{2\sigma_r R} - \cos \frac{\pi}{n}; \quad a_2 = \frac{T}{4\sigma_r R} - \frac{\sigma_r h^2}{4RT} - \cos \frac{\pi}{n}.$$

Из геометрических соображений предельный натяг для упругопластического напряженного состояния

$$H = \frac{\delta_0}{\sin \frac{\pi}{n}} = \frac{\delta_M + \delta_N}{\sin \frac{\pi}{n}}.$$

Таким образом, диапазон натягов находится в пределах от N до H.

Установлено, что при малом числе ДЭ и минимальном натяге, растягивающие силы не достигают и 20% от величины, необходимой для необратимого растяжения периметра сечения трубы. Однако растяжение периметра все равно происходит, поскольку существует механизм вибрационного характера, который при пластическом знакопеременном изгибе приводит к неограниченному удлинению сколь угодно малыми растягивающими силами. При этом увеличение диаметра за один оборот раскатника составит

$$\Delta D_{\text{общ}} = \frac{9,6n h \sigma_m}{\alpha \cdot E (1 - \frac{\alpha^2}{18})}.$$

То есть следует назначать натяг

$$H = N + \omega \Delta D_{\text{общ}},$$

где  $\omega$  – количество оборотов раскатника, приходящееся на одно сечение трубы.

Тогда диапазон натягов можно определить из графика на рис. 6.

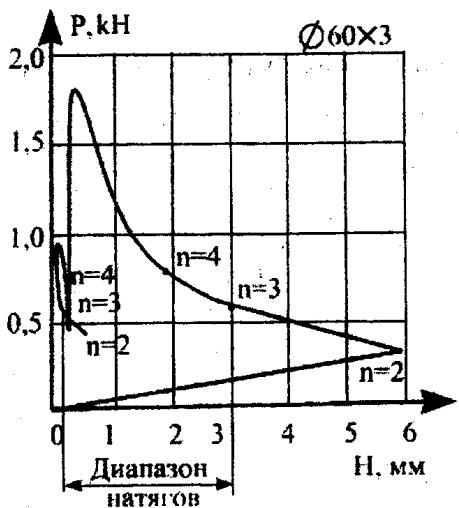


Рис. 6. Диапазон рабочих натягов для трубы Ø60x3

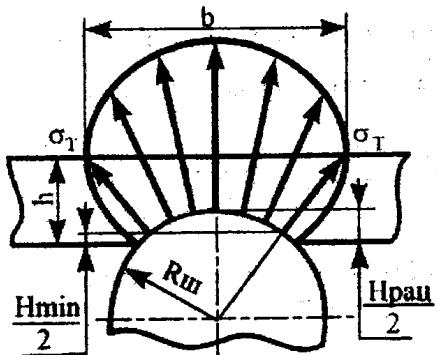


Рис. 7. Схема определения ширины зоны пластичности

Ширина зоны пластичности при использовании таких натягов в соответствии со схемой на рис. 7

$$b = 2 \cdot (R_{\text{ш}} + h - H_{\text{пласт}}/2) \cdot \operatorname{tg}(\arccos((R_{\text{ш}} - H_{\text{пласт}}/2 + H_{\text{мин}}/2)/R_{\text{ш}})),$$

где  $R_w$  – радиус кривизны ДЭ;  $H_{рац}$  – рациональный натяг, находящийся в пределах от  $N$  до  $H$ .

Таким образом, подача трубы на оборот раскатника не должна превышать величины  $b$ , что с учетом падения натяга от раздачи диаметра трубы при частоте вращения раскатника 500 об./мин. позволяет определить область допустимых подач (заштрихованная зона на рис. 8).

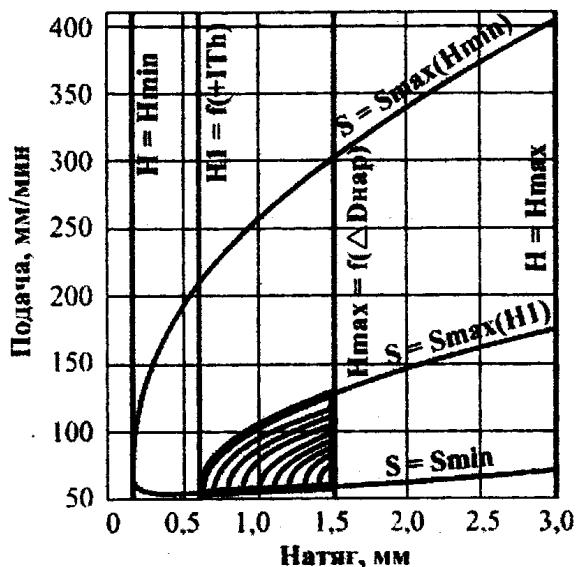


Рис. 8. Область допустимых подач

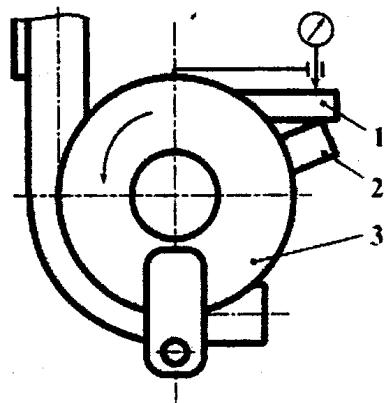


Рис. 9. Динамометр

### 3. Экспериментальная проверка выявленных закономерностей

Для проверки теоретически предсказанных закономерностей, а именно – использования в раскатнике 3 или 4 ДЭ, снижение усилий гибки минимум в 2 раза при назначении натягов из рабочего диапазона и снижение искажения профиля поперечного сечения гнутых труб, была проведена серия натурных экспериментов.

Эксперименты проводились на модернизированном для гибки с раскатыванием серийном трубогибе мод. ИВ-3428 для гибки труб диаметром 50...100 мм. Модернизация заключалась в установке на серийный трубогиб

вместо дорна раскатника с приводом его вращения и регулируемого привода вращения гибочного ролика.

#### Условия проведения эксперимента.

Заготовки: трубы из стали 20, наружный диаметр 60 мм, толщина стенки 4 мм.

Режимы гибки: частота вращения изгибающего ролика 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 об./мин, частота вращения раскатника 500 об./мин.

Раскатной инструмент – шариковый регулируемый по диаметру раскатник с числом шариков 3 и 4. Величина натяга регулировалась и составляла 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм. Гибку проводили на радиус равный  $2D_{\text{трубы}}$ , с получением криволинейных деталей трубопроводов с углом разворота торцев  $90^\circ$ . Образование гофр не наблюдалось.

Критериями оценки проведенных экспериментов служили:

- 1) величина изгибающего момента  $M_{\text{изг}}$ ;
- 2) овальность поперечного сечения изогнутых труб.

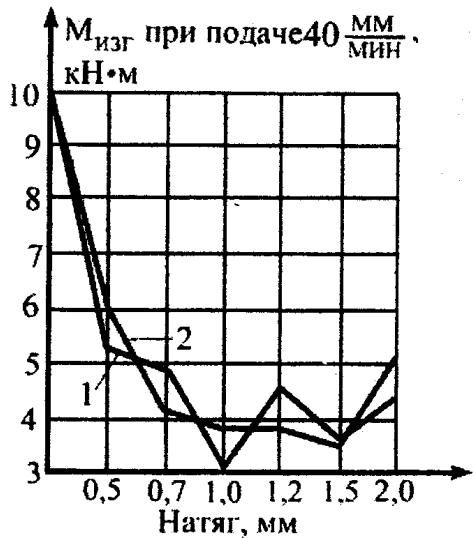
Оценка величины  $M_{\text{изг}}$  осуществлялась при помощи динамометра (рис. 9), основой которого является упругая балка 1, передающая изгибающие усилия от планшайбы станка 2 к ролику-шаблону 3. По величине ее изгиба определяли величину изгибающего момента. Результаты измерения изгибающего момента и параметры труб представлены на графиках (рис. 10).

В проведенном эксперименте (рис. 10 а) при гибке трубы без раскатывания ( $H = 0$ ) изгибающий момент соответствовал 10 240 Н·м. При использовании нового метода изгибающий момент снижается в 2,5...3,5 раза (рис. 10 а, б).

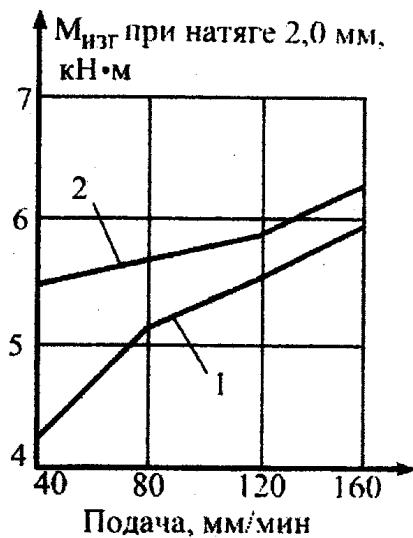
Из графика (см. рис. 10 б) видна тенденция увеличения изгибающего момента с увеличением подачи. Таким образом, при гибке труб следует выбирать минимальную подачу, которая обеспечивает заданную производительность. Эту рекомендацию подтверждает график (рис. 10 г), на нем хорошо видна тенденция к снижению погрешностей формы с уменьшением подачи.

Из графиков (см. рис. 10 а, б) видно, что изгибающий момент, как правило, больше при использовании 4-шариковой раскатки, но одновременно с этим,

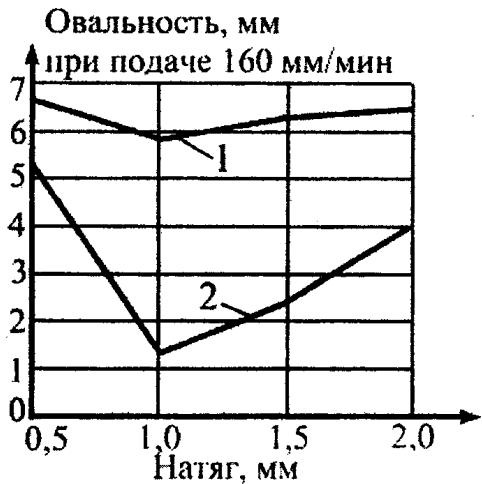
она дает лучшее качество поперечного сечения трубы (рис. 10 в, г). Таким образом, с точки зрения снижения усилий гибки следует использовать раскатник с



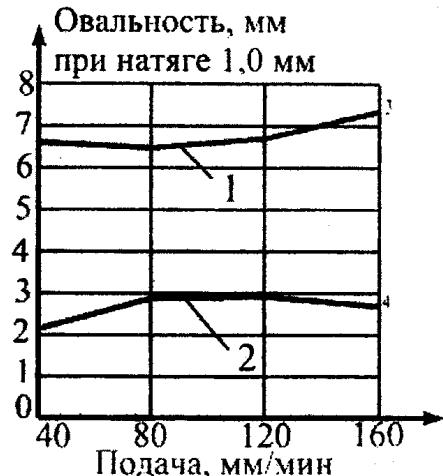
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Результаты экспериментов:  
1 – графики для трехшарикового раскатника;  
2 – графики для четырехшарикового раскатника

тремя шариками; для повышения точности формы изгибающей трубы следует применять раскатник с четырьмя шариками.

Аналогичные эксперименты были проведены с заготовками труб диаметрами: 57, 60, 76, 89, 102 и 108 мм с толщинами стенок от 2 до 8 мм, изготовленные из сталей обычновенного качества: Ст.3, Ст.5, Ст.20. Гибку производили на различные радиусы гиба:  $1,5D_{tr.}$ ,  $2D_{tr.}$ ,  $2,5D_{tr.}$ ,  $3D_{tr.}$ . Для каждого диаметра трубы и радиуса гиба был использован свой ролик-шаблон. В результате были определены рациональные технологические параметры для гибки труб различных диаметров, радиусов гиба и толщин стенок.

#### **4. Инженерная методика построения технологического процесса гибки труб, раскатываемых с большими натягами.**

В основу методики построения технологического процесса гибки труб, раскатываемых с большими натягами положены результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей гибки труб с раскатыванием, а также опыт холодной гибки с помещением внутри трубы цилиндрического дорна.

Применение раскатывания с большими натягами при гибке труб создает ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса гибки. В частности, необходимо задавать ряд новых технологических параметров гибки: натяг, скорость подачи трубы, число ДЭ в раскатнике, величину вылета раскатки, которые сильно влияют на силовые и точностные характеристики процесса гибки. Для выбора этих параметров разработана таблица их рациональных величин. Кроме того, необходимо производить оценку утонения наружной стенки трубы и величины минимально допустимого натяга согласно выбранным технологическим параметрам.

В процессе гибки при отклонении технологических параметров от рациональных величин могут возникнуть погрешности. Их можно избежать, производя подналадку станка согласно разработанной таблице с набором возможных дефектов, причинами появления и рекомендациями по их устранению. Поэтому

предлагается следующая схема построения технологического процесса гибки труб с большими натягами (рис. 11).

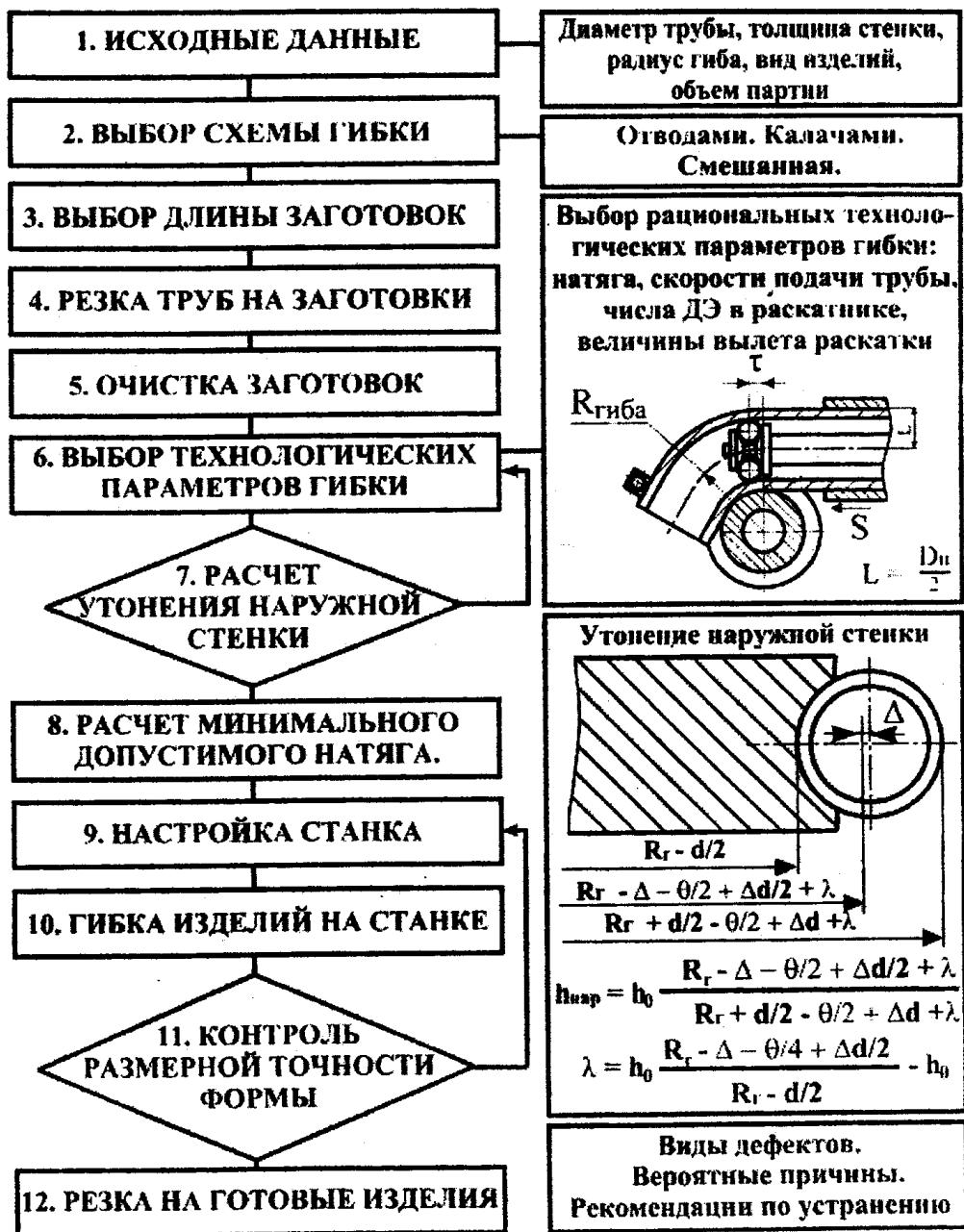


Рис. 11. Инженерная методика построения технологического процесса холодной гибки труб с раскатыванием

Технология и оборудование для холодной гибки трубы с раскатыванием внедрены на 5 предприятиях и в учебный процесс подготовки инженеров по специальности 120100.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выявлен механизм достижения предела текучести стенок трубы за счет создания сложнонапряженного состояния стенок трубы ее раскатыванием с большими натягами, что значительно снижает усилия гибки.
2. Теоретически установлено и экспериментально доказано снижение изгибающих усилий в 2...4 раза при воздействии на изгибаемую трубу вращающегося раскатника.
3. Теоретически установлен и экспериментально подтвержден диапазон натягов для образования сложнонапряженного состояния стенок трубы при гибке труб с раскатыванием.
4. Экспериментально установлены технологические параметры гибки, влияющие на усилия гибки и качество изделий, а именно:
  - установлено, что в диапазоне рабочих натягов существует зона рациональных натягов, при которых усилия гибки минимальны;
  - снижение подачи с 160 до 40 мм/мин уменьшает усилия гибки на 20...25% и уменьшает овальность в 1,5...2 раза;
  - использование раскатников с малым количеством ДЭ позволяет обеспечить наилучшие условия для создания сложнонапряженного состояния стенок трубы: применение 4-элементного раскатника требует на 15...20% больших усилий гибки по сравнению с 3-элементным раскатником, но снижает овальность в 4...6 раз.
5. Разработана инженерная методика построения технологического процесса холодной гибки труб, раскатываемых с большими натягами. Даны рекомендации по выбору оптимальных величин технологических параметров гибки. Установлены погрешности и дефекты, возникающие при гибке с раскатыванием, и указаны пути их устранения.

6. Проведена модернизация серийного оборудования для гибки труб (станки модели ИВ-3428 и ИВ-3430). В результате расширен диапазон диаметров изгибаемых труб (у станка мод. ИВ-3428 с  $\varnothing$ 50 мм до  $\varnothing$ 108 мм, у станка мод. ИВ-3430 с  $\varnothing$ 100 мм до  $\varnothing$ 159 мм) и уменьшен радиус гиба с (3,5...4) $D_{\text{трубы}}$  до (1,5...2) $D_{\text{трубы}}$ .

7. Результаты исследований внедрены в производство и учебный процесс.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Козлов А.В., Бобылев А.В. Гибка труб, раскатываемых с большими натягами: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999.
2. Новая технология холодной гибки труб. С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 6.
3. Чуманов И.В., Козлов А.В., Бобылев А.В. Изучение влияния холодной гибки труб с раскатыванием на структуру и свойства металла // Известия вузов. – 1999. – № 6.
4. Эффект снижения усилия при гибке труб, раскатываемых с большими натягами, и механизм его проявления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // В сб.: Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. – Челябинск: ЧГТУ, 1995.
5. Экспериментальные исследования условий гибки труб с раскатыванием / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // В сб.: Прогрессивные технологии в машиностроении. – Челябинск: ЧГТУ, 1996.
6. Технология и оборудование для гибки труб с раскатыванием. С.Г. Лакирев, Ю.Г. Миков, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // В сб.: Тематический сборник научных трудов ЗФ ЧГТУ. – Челябинск: ЧГТУ, 1996.

7. Особенности холодной гибки труб диаметра 100...200 мм / С.Г. Лакирев, Ю.Г. Миков, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // В сб.: Прогрессивные технологии в машиностроении. – Челябинск: ЧГТУ, 1997.

8. Козлов А.В., Чиненов С.Г., Бобылев А.В. Оборудование для холодной гибки труб с раскатыванием // Информ. листок № 77-99. – Челябинск: ЦНТИ, 1999.

9. Хилькевич Я.М., Козлов А.В., Бобылев А.В. Теоретическая оценка погрешностей формы при формообразовании отверстий мерными инструментами // Труды XV Российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций. – Миасс: Миасский научно-учебный центр, 1996.

10. Особенности гибки мелкоразмерных труб из нержавеющих сталей / А.В. Козлов, Ю.Г. Миков, С.Г. Чиненов, А.В. Бобылев // Труды XVI Российской школы по проблемам проектирования неоднородных конструкций. – Миасс: Миасский научно-учебный центр, 1997.

11. Козлов А.В., Бобылев А.В. Опыт использования результатов НИР в курсе “Технологические процессы машиностроительного производства (ТПМП)”: Тезисы докладов научно-методической конференции. – Челябинск: Издательство ЧГТУ, 1997.

12. Высокоэффективная технология и оборудование холодной гибки труб / С.Г. Лакирев, А.В. Козлов, И.П. Дерябин, А.В. Бобылев // Сборник докладов четвертой Международной конференции “Измерения, контроль и автоматизация производственных процессов”. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997.–Т.2.

13. Силовые параметры различных методов гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, А.В. Бобылев // Сборник тезисов докладов II Международной специализированной выставки-конференции “Машиностроение-97. Прогрессивные технологии”. – Челябинск: ЧГТУ, 1997.

14. Козлов А.В., Бобылев А.В. Особенности технологической подготовки производства криволинейных участков трубопровода гибкой с раскатыванием // В сб.: Автоматизация и информатизация в машиностроении. – Тула: ТулГУ, 2000

15. Козлов А.В., Бобылев А.В. Оценка деформаций и усилий при гибке труб с раскатыванием // В сб.: Новые материалы и технологии в машиностроении. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000.
16. Козлов А.В., Бобылев А.В. Разработка технологического процесса холодной гибки труб с раскатыванием // Междунар. конф." Снежинск и наука": Тезисы докладов. – Снежинск: СФТИ, 2000.
17. Козлов А.В., Бобылев А.В. Расчет рабочих натягов при гибке труб с раскатыванием // В сб.: Совершенствование научноемких технологий и конструкций. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.



Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ИД № 00200 от 28.09.99 Подписано в печать 18.11.2002. Формат

60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ. л 1,16 Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз. Заказ 304.

---

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.