

О ВОЗМОЖНОСТИ ГИБКИ ТРУБ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2004 В. К. Моисеев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Теоретически и экспериментально показана возможность осуществления технологического процесса гибки труб эластичным инструментом. Получены зависимости, определяющие границы применимости процесса.

Трубопроводные системы машин и механизмов в большом количестве содержат трубы, изогнутые в различных плоскостях на различные углы и радиусы. Такие трубы отличаются большим разнообразием диаметров, толщин и материалов.

Для гибки труб применяются, как правило, оборудование и инструмент, содержащие жесткие ролики либо гибочные оправки. Большое количество труб сложной нетиповой конфигурации в мелкосерийном производстве изгибают вручную с помощью жесткого инструмента.

В заготовительно-штамповочном производстве на авиационных и ракетно-космических предприятиях, для которых характерным является мелкосерийность и частая сменяемость продукции, широко распространена штамповка эластичными средами – резиной и полиуретаном. Эластичным инструмен-

том производится вырезка, формовка и гибка деталей в основном из тонколистовых материалов. Известно также применение эластичного инструмента для формоизменяющих и разделительных операций на трубчатых заготовках и гибки пресованных профилей. О гибке труб с помощью резины или полиуретана в технической литературе сведений не обнаружено. В связи с этим представляется целесообразным проанализировать принципиальную возможность применения эластичного инструмента для такого технологического процесса.

Гибку труб эластичным инструментом можно осуществлять по двум схемам:

- прокаткой между двух валков, один из которых является жестким, а другой – эластичным либо имеет эластичное покрытие (рис. 1);

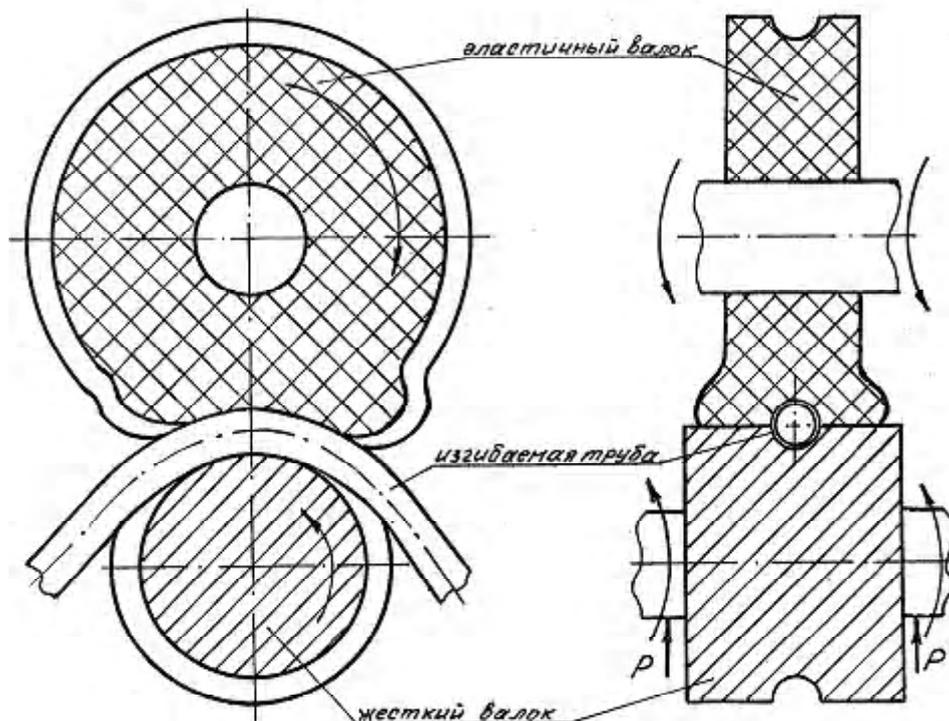


Рис. 1. Схема гибки-прокатки между эластичным и жестким валками

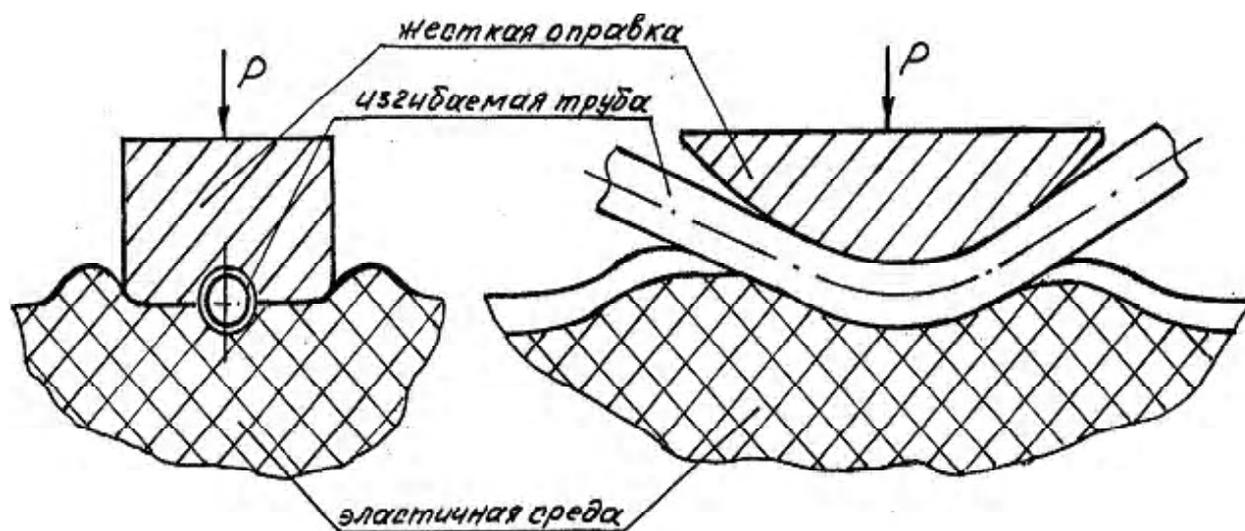


Рис. 2. Схема гибки вдавливанием трубы жестким инструментом в эластичное полупространство

- вдавливанием трубы жестким инструментом в эластичное полупространство (рис. 2).

В обоих случаях труба находится под воздействием некоторой распределенной нагрузки, которая может привести к продольному изгибу, что и требуется от технологического процесса, но она может также вместе с изгибом привести либо к смятию трубы (потере устойчивости), либо к пластическому обжиму трубы (уменьшению диаметра и увеличению толщины стенки). Как потеря устойчивости, так и обжим – явления нежелательные, поскольку они искажают внешний вид и размеры, изменяют пропускную способность трубопроводной системы и несущие способности трубы. Следовательно, нагрузка, действующая со стороны эластичного инструмента, должна обеспечивать изгиб тру-

бы, но не быть разрушительно большой для эластичного материала и не приводить к потере ее устойчивости и ее пластическому обжиму.

Для анализа возможности такого деформирования идеализируем схему нагружения трубы. Изгибаемую трубу будем считать балкой, лежащей на одной опоре и нагруженной распределенной по длине нагрузкой (рис. 3). Примем линейным изменение нагрузки вдоль оси трубы. Реально создать такую нагрузку не представляется возможным, так как эпюра нагружения будет меняться во времени, однако в начальной стадии гибки в первом приближении такое допущение можно считать приемлемым.

В поперечном сечении нагрузка на балку со стороны эластичной среды будет также распределенной по некоторому закону, изме-

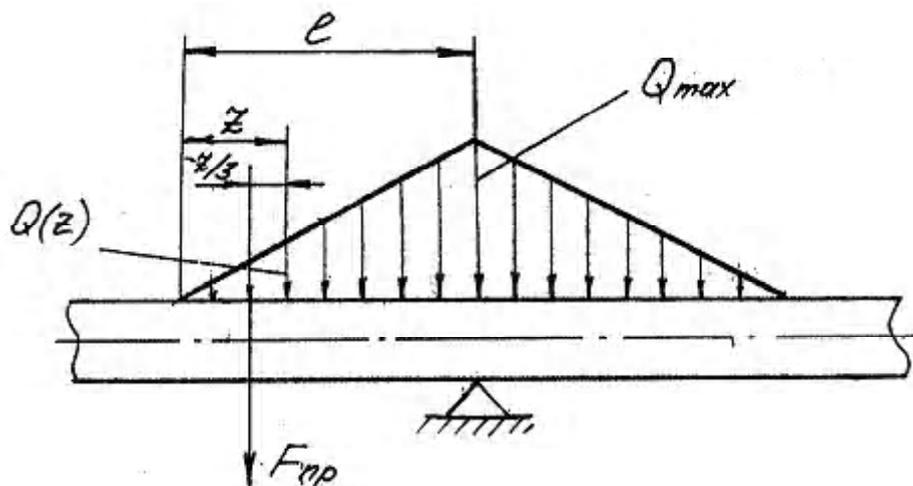


Рис. 3. Идеализированная схема нагружения трубы

няющемуся во времени. В первом приближении представляется допустимым считать эту нагрузку равномерно распределенной и направленной по нормали к поверхности трубы (рис. 4).

Распределенная по длине нагрузка Q и равномерная нагрузка q связаны соотношением

$$Q = \int_0^\pi q \sin \gamma R d\gamma = 2qR = qD, \quad (1)$$

где γ - текущий угол; R - наружный радиус трубы; D - наружный диаметр трубы.

Условием изгиба балки от действия распределенной нагрузки Q является известная зависимость [1]

$$|\sigma|_{\text{наиб}} = \frac{|M|_{\text{наиб}}}{W} \geq \sigma_T, \quad (2)$$

где $|\sigma|_{\text{наиб}}$ - наибольшие напряжения; $|M|_{\text{наиб}}$ - наибольший изгибающий момент; W - момент сопротивления поперечного сечения; σ_T - предел текучести материала трубы-балки.

Для трубчатого сечения

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) = \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4),$$

где d - внутренний диаметр трубы; $\alpha = \frac{d}{D}$.

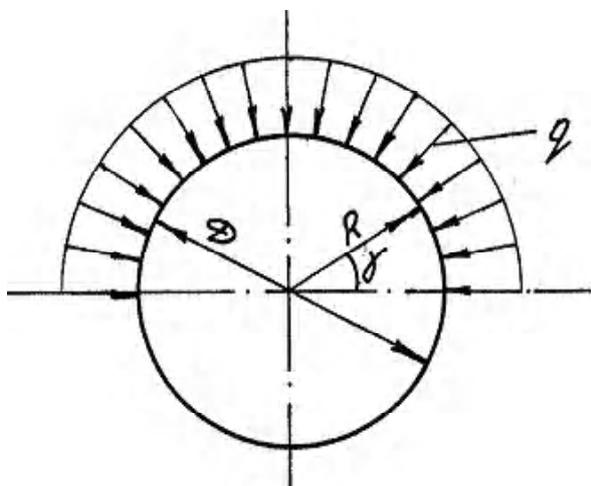


Рис. 4. Распределение нагрузки со стороны эластичного инструмента в поперечном сечении трубы

Наибольший изгибающий момент по известным решениям будет наблюдаться в опорном сечении и составит

$$|M|_{\text{наиб}} = \frac{1}{6} Q_{\text{max}} l^2,$$

где Q_{max} - максимальное значение распределенной по длине нагрузки; l - длина нагруженного участка трубы.

Таким образом, условие изгиба (2) примет вид

$$\frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4) \leq \frac{1}{6} \frac{Q_{\text{max}} l^2}{\sigma_T}.$$

Отсюда с учетом зависимости (1) после преобразований можно получить, что изгиб начнется при давлении $q_{\text{из}}$ в опорном сечении

$$q_{\text{из}} = \frac{3}{16} \pi (1 - \alpha^4) \left(\frac{D}{l}\right)^2 \sigma_T. \quad (3)$$

Для цилиндрической оболочки, находящейся под действием внешнего давления, критическое давление, превышение которого приводит к потере устойчивости, определяется по различным формулам [2, 3] в зависимости от относительной длины L нагруженного участка. В случае, когда эта длина многократно превышает радиус оболочки R (длинный участок)

$$q_{\text{кр}}^{\text{дл}} = 0,275 \frac{ES^3}{R^3}, \quad (4)$$

в противном случае (короткий участок)

$$q_{\text{кр}}^{\text{кор}} = 0,92E \frac{S}{L} \cdot \frac{S}{R} \sqrt{\frac{S}{R}}, \quad (5)$$

где S - толщина стенки оболочки; E - модуль упругости материала оболочки.

Формулы (4) и (5) имеют смысл в том случае, когда окружные напряжения $\sigma_{\text{окр}}$ не превышают предела текучести σ_T . Окружные

напряжения определяются из уравнения равновесия Лапласа для оболочки одинарной кривизны [4]

$$\sigma_{окр} = q \frac{R}{S}.$$

Таким образом, пластический обжим трубы будет наблюдаться при следующей равномерной нагрузке:

$$q_{об} = \sigma_T \frac{S}{R}. \quad (6)$$

Схемы, приведенные на рис. 1 и 2, подразумевают незамкнутый (открытый) объем эластомера. При штамповке эластичными средами в незамкнутых объемах давление эластичной среды $q_{из}$ не должно превышать предельного значения $q_{кр}$:

$$q_{из} < q_{кр}, \quad (7)$$

которое, как показывает практика листовой штамповки, составляет 10...15 МПа для резины и 20...25 МПа для полиуретана. В противном случае инструмент претерпевает чрезмерные деформации, приводящие к его быстрому разрушению.

Оценка возможности гибки трубы эластичным инструментом сводится к анализу зависимостей (3 – 6) с учетом ограничения (7). При этом необходимо выяснить, будут ли гнуться трубы наиболее распространенных типоразмеров, не теряя устойчивости в поперечном сечении и не деформируясь пластически в окружном направлении от действия нагрузки, не превышающей предельную для заданного эластомера, т. е. могут ли одновременно выполняться четыре неравенства:

$$\begin{cases} q_{из} < q_{кр}^{дл.} \\ q_{из} < q_{кр}^{кор.} \\ q_{из} < q_{об} \\ q_{из} < q_{пр} \end{cases} \quad (8)$$

Для получения конкретных результатов преобразуем неравенства (8) к более удобному виду.

Из первого неравенства с учетом выражений (3) и (4) следует

$$\frac{q_{из}}{q_{кр}^{дл.}} = \frac{3\pi(1-\alpha^4)D^2\sigma_T R^3}{16l^2 \cdot 0,275 \cdot E \cdot S^3} < 1.$$

Приняв за R радиус срединной поверхности и решив полученное неравенство относительно l/D , можно получить

$$\frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,0335 \cdot (1-\alpha^4) \sigma_T (D+d)^3}{ES^3}}. \quad (9)$$

Из второго неравенства

$$\frac{q_{из}}{q_{кр}^{кор.}} = \frac{3\pi(1-\alpha^4)D^2\sigma_T LR\sqrt{R}}{16l^2 \cdot 0,92 \cdot E \cdot S^2 \sqrt{S}} < 1,$$

откуда

$$\frac{l}{D} > \frac{0,16 \cdot (1-\alpha^4) \sigma_T (D+d)^{3/2} D}{ES^{5/2}}. \quad (10)$$

Из третьего неравенства

$$\frac{q_{из}}{q_{об}} = \frac{3\pi(1-\alpha^4)D^2\sigma_T R}{16l^2 \sigma_T S^3} < 1,$$

откуда

$$\frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,147 \cdot (1-\alpha^4) (D+d)}{S}}. \quad (11)$$

Из четвертого неравенства

$$\frac{q_{из}}{q_{пр}} = \frac{3\pi(1-\alpha^4)D^2\sigma_T}{16l^2 q_{пр}} < 1,$$

откуда

$$\frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,64 \cdot (1-\alpha^4) \sigma_T}{q_{пр}}}. \quad (12)$$

Таким образом, изгиб труб эластичной средой возможен в тех случаях, когда длина участка трубы, нагруженного давлением эластичного инструмента, диаметр и толщина стенки, а также механические свойства материала трубы подчиняются условиям (9-12), т. е. системе неравенств

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,0335 \cdot (1 - \alpha^4) \sigma_T (D + d)^3}{ES^3}}; \\ \frac{l}{D} > \frac{0,16 \cdot (1 - \alpha^4) \sigma_T (D + d)^{1,5} D}{ES^{2,5}}; \\ \frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,147 \cdot (1 - \alpha^4) (D + d)}{S}}; \\ \frac{l}{D} > \sqrt{\frac{0,64 \cdot (1 - \alpha^4) \sigma_T}{q_{np}}} \end{array} \right.$$

На рис. 5 и рис. 6 в качестве примера представлены результаты расчетов по полученной системе неравенств. Расчеты произведены для труб с толщиной стенки 1 мм из наиболее распространенных в авиаракетостроении материалов: алюминиевого сплава АМгЗМ ($\sigma_T = 120$ МПа, $E = 69000$ МПа) и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ($\sigma_T = 300$ МПа, $E = 190000$ МПа). Графики, соответствующие неравенствам (9 - 12), определяют зоны соотношений размеров нагруженного участка и диаметра труб, для которых возможен изгиб инструментом, выполненным из резины или полиуретана. На рисунках эти зоны заштрихованы.

Из приведенных графиков следует, что для сплава АМгЗМ (рис. 5) ограничения применимости изгиба эластичной средой определяются для труб диаметром более 27 мм потерей устойчивости, а именно условием (9), которое учитывает нагружение на длине трубы, многократно превышающей ее радиус. Ограничение, вносимое условием (12), т. е. предельно допустимым для эластичной среды давлением, сказывается для резины (график 4) на трубах диаметром менее 16 мм и для полиуретана (график 5) на трубах диаметром менее 11 мм. Для труб диаметром от 11 мм при полиуретановой оснастке или от 16 мм при резиновой оснастке и до 27 мм ограничения обуславливаются возникающим в соответствии с условием (11) обжимом, т. е. изменением проходного сечения трубы. Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т (рис. 6) ограничение по причине обжима не играет роли, поскольку зона допустимых соотношений l и D ограничивается только графиками 1, 4 и 5. Следовательно, с одной стороны, она

ограничивается потерей устойчивости по условию (9) для труб диаметром более 32 мм при применении резины и более 27 мм при применении полиуретана, а с другой стороны, - предельно допустимым давлением по условию (2) для труб диаметром, соответственно, менее 32 мм (оснастка из резины) и менее 27 мм (оснастка из полиуретана).

Следует отметить, что при использовании эластичного инструмента с небольшими длинами l требуется большое давление эластичной среды, а при больших l увеличиваются габариты технологической оснастки и, соответственно, ее стоимость, особенно для гибки прокаткой между валками. В связи с этим зона допустимых соотношений l и D на рис. 5 и 6 ограничена сверху дополнительными ориентировочными условиями для гибки прокаткой и для гибки вдавливанием.

Таким образом, изгиб труб вдавливанием можно проводить при диаметрах не более 68 мм для сплава АМгЗМ и не более 72 мм для сплава 12Х18Н10Т. Изгиб прокаткой – при диаметрах не более 43 мм для АМгЗМ и 46 мм для 12Х18Н10Т. При этом соотношение размеров l и D должно отвечать соответствующим заштрихованным зонам, показанным на рис. 5 и 6.

На рис. 7 и 8 представлены экспериментальная технологическая оснастка для гибки труб и образцы, изогнутые прокаткой и вдавливанием.

Для экспериментального изгиба использовались трубы диаметром 10 мм при толщине стенки 1 мм из материалов АМгЗМ и 12Х18Н10Т, в качестве оборудования применялись токарный станок и гидравлический пресс. Эластичный инструмент был изготовлен из полиуретана марки СКУ-7Л твердостью 80 единиц по Шору А.

Таким образом, показана возможность осуществления технологического процесса гибки труб эластичным инструментом. Этот техпроцесс применим в определенном диапазоне соотношений геометрических размеров труб, зависящем от механических свойств материала труб. При увеличении диаметра труб и уменьшении толщины стенки и длины нагруженного участка возможна потеря устойчивости, предотвращение которой требует дополнительных мероприятий, напри-

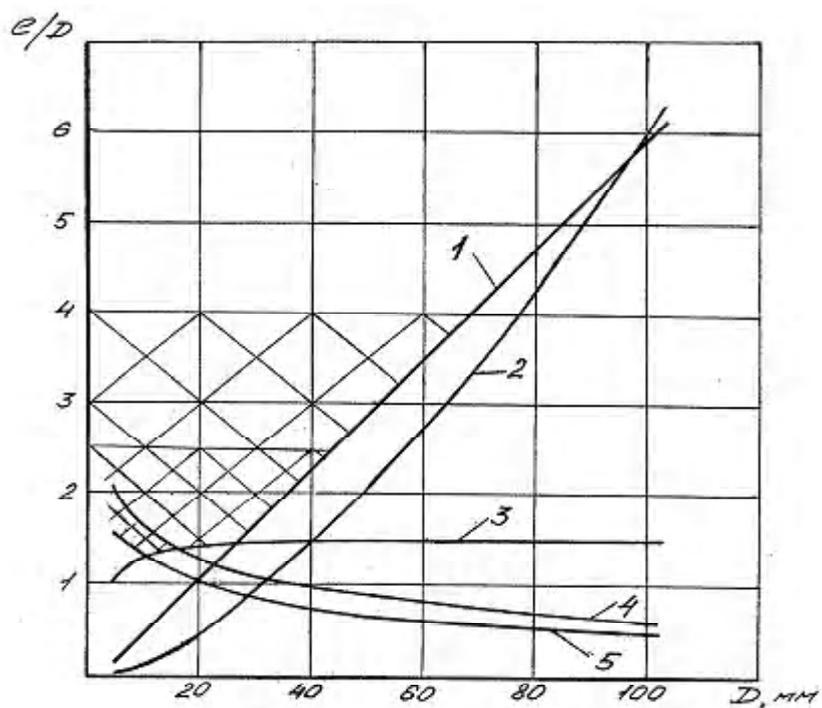


Рис. 5. Зона соотношений размеров l и D для изгиба труб из АМг3М:
1 – граница зоны по условию (9); 2 – граница зоны по условию (10); 3 – граница зоны по условию (11);
4 – граница зоны по условию (12) для резины; 5 – граница зоны по условию (12) для полиуретана

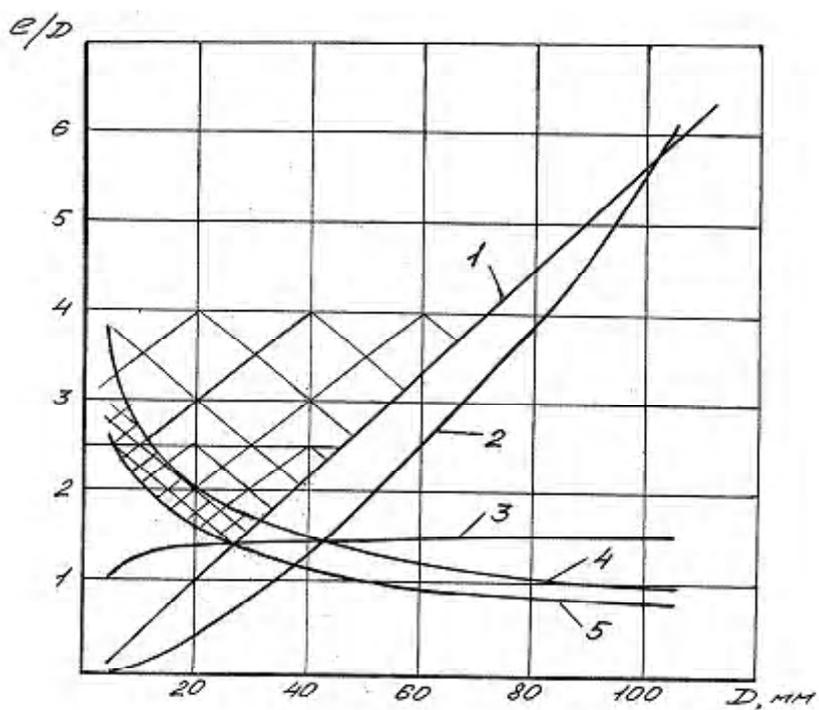


Рис. 6. Зона соотношений размеров l и D для изгиба труб из 12Х18Н10Т:
1 – граница зоны по условию (9); 2 – граница зоны по условию (10); 3 – граница зоны по условию (11);
4 – граница зоны по условию (12) для резины; 5 – граница зоны по условию (12) для полиуретана

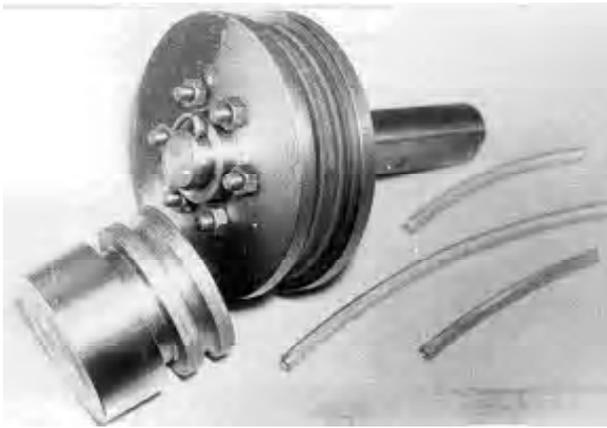


Рис. 7. Экспериментальная оснастка для гибки и образцы труб, изогнутых прокаткой



Рис. 8. Образцы изогнутых труб, полученные вдавливанием

мер, заполнения полости трубы специальным наполнителем. Увеличение диаметра и толщины стенки и уменьшение длины нагруженного участка вызовет увеличение необходимого давления эластичной среды, что, как следствие, потребует увеличения технологического усилия оборудования и конструктивного усложнения оснастки для предотвращения чрезмерного деформирования эластичного инструмента.

Увеличение длины нагруженного участка увеличит габариты оснастки и, соответственно, ее стоимость.

Автор выражает признательность доценту Самарского государственного аэрокос-

мического университета И. С. Ахмедьянову за обсуждение статьи.

Список литературы

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М: Машиностроение, 1968. – 400 с.
2. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. М.: Госфизматиздат, 1963. – 879 с.
3. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1991. – 335 с.
4. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев К. К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении, том II. М.: Машгиз, 1958. – 974 с.

POSSIBILITY OF PIPE BENDING BY ELASTIC INSTRUMENTS

© 2004 V. K. Moiseev

Samara State Aerospace University

The possibility to realize the technological process of pipe bending by elastic instruments is shown both theoretically and experimentally. The functions determining the limitations of using the process are obtained.