

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСИЛИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ПРИ ГИБКЕ ТРУБ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

В. В. Тимофеев, И. В. Трифанов✉

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация*

Изогнутые трубы малого сечения прямоугольного профиля (3,6×1,8 – 11×5,5 мм) широко применяются в антенно-фидерных устройствах космических аппаратов. К ним предъявляют требования обеспечения точности размеров в зоне гибки не более ±0,05 мм, для этого необходим выбор методов технологических режимов. Объектом исследования является заготовка трубы малого сечения из меди М4, которую необходимо согнуть для получения угла изгиба 90°. Цель исследования – разработка методов расчета, необходимых для осуществления технологического процесса гибки труб малого сечения, с обоснованием усилий для гибки. В работе проанализированы способы гибки прямоугольных труб. Выбран наиболее рациональный метод – гибка с использованием жесткой оправки. На основе выбранного метода гибки была составлена расчетная модель. Разработаны методика, алгоритм расчета и проведен анализ результатов расчета. В результате теоретических исследований, с помощью расчетов, выявлена степенная взаимосвязь усилия гибки от радиуса изгиба – чем больше радиус изгиба, тем меньше усилий требуется приложить для гибки. Расчет может быть использован для определения размеров гибочной оснастки и усилия гибки трубы малого сечения, позволяет подобрать наиболее оптимальный режим технологического процесса.

Ключевые слова: труба малого сечения, волновод, усилие гибки, пластическая деформация, предел текучести.

Введение

Трубы прямоугольного профиля малого сечения широко применяются в различных видах приборостроения, в сфере беспроводной передачи энергии, а также могут быть использованы для изготовления волноводных линий антенно-фидерных устройств космических аппаратов и для создания систем космической связи.

Актуальность темы подтверждает факт, что она отражается в литературе, посвященной средствам связи и беспроводной передачи энергии [1; 2].

Основные требования, предъявляемые к прямоугольным трубам малого сечения, их характеристики и свойства описаны в пособии [3] и ГОСТе [4].

К прямоугольным трубам предъявляют высокие требования к точности изготовления – порядка ±0,05 мм [5]. Часто применяются изгибы и повороты прямоугольных труб малого сечения 3,6×1,8 – 11×5,5, при изготовлении которых

необходим выбор сложных технологических решений при гибке прямоугольных каналов. Объектом исследования является заготовка трубы малого сечения из меди М4, которую необходимо согнуть для получения угла изгиба 90°.

Целью данного исследования является разработка методов расчета, параметров технологического процесса гибки (усилия гибки, напряжения, деформация трубчатой заготовки) прямоугольных труб малого сечения. Расчет проводился для труб разных сечений (3,6×1,8; 5,2×2,6; 7,2×3,4; 11×5,5), с различными радиусами изгиба ($r_r = 5-30$ мм), указанных в табл. 1 и 2.

Для расчета использовалась программа Microsoft Excel как наиболее доступная, распространенная, легко осваиваемая и применяемая в различных отраслях программа.

1. Выбор метода гибки прямоугольных каналов

Существуют два основных вида изогнутых волноводов:

- с плавным (радиусным) переходом;

✉ vt-ak@yandex.ru

• с уголковым переходом [6]. Для гибки с радиусным переходом часто используют метод гибки с оправкой или методом насечек [6].

Существуют современные патенты по модернизации данных методов [7; 8]. Метод, описанный в [7], является аналогом других методов гибки с использованием наполнителя. Сущность метода заключается в использовании наполнителя, состоящего из тонких пластин, помещаемого внутрь канала изгибаемого волновода. Для установки пластин выполняют сквозное отверстие, удаляют части боковых стенок и проводят ряд других технологических операций, необходимых для установки наполнителя. После установки пластин заготовку гнут в трубогибочном устройстве. Далее извлекают наполнитель. Недостатками метода являются: дополнительные технологические подготовительные операции по установке и извлечению наполнителя из заготовки.

Метод, описанный в [8], является модификацией метода насечек, описанного в книге [6]. Сущность метода заключается в нанесении параллельных поперечных насечек с внешней и внутренней стороны заготовки для формирования канавок и ребер. В результате нанесения насечек образуются поперечные канавки и ребра 2, продольное ребро 3. Расстояние между ребрами, их ширина и глубина канавок подбираются в зависимости от угла и радиуса гибки. После гибки проводят механическую обработку внешней поверхности заготовки.

Недостаток метода заключается в том, что он применим только для обработки труб прямоугольного сечения размерами от $11 \times 5,5$ до 248×124 мм, т. е. для труб сечением меньше $11 \times 5,5$ мм данный метод не подходит.

2. Гибка с применением жестких оправок [6]

При гибке трубы канал изменяет свои размеры, поэтому одним из наиболее надежных, точных и технологически целесообразных методов гибки является гибка с применением жестких оправок [6].

Гибка и калибровка при данном методе осуществляется в следующем порядке (рис. 1) [6]: заготовка 1 размещается на гибочном шаблоне 6, скругленном соответственно радиусу гибки, и закрепляется прижимом 2 с помощью болта. Изгиб трубы осуществляется рычагом 5. Жесткая оправка 4 не подвергается изгибу, а перемещается в процессе гибки вместе с подвижным фиксатором 3. Точность внешних размеров обеспечивает подвижный фиксатор 3, который имеет канавку, соответствующую внешним размерам прямоугольной трубы малого сечения. Внутри канала точность обеспечивает жесткая калибрующая оправка 4, формирующая канал при изгибе. Контур оправки должен точно соответствовать изгибной секции трубы малого сечения. Оправка и подвижный прижим рассчитываются по схеме на рис. 2.

Метод гибки с использованием жесткой оправки был положен в основу разработки методики расчета. Рассчитывались: геометрические размеры оправки, применяемой при гибке прямоугольных труб малого сечения в плоскостях H и E , степень деформации, напряжения, усилия для гибки трубчатой заготовки.

Примеры плавных (радиусных) изгибов труб прямоугольного профиля малого сечения в плоскостях H и E представлены на рис. 3.

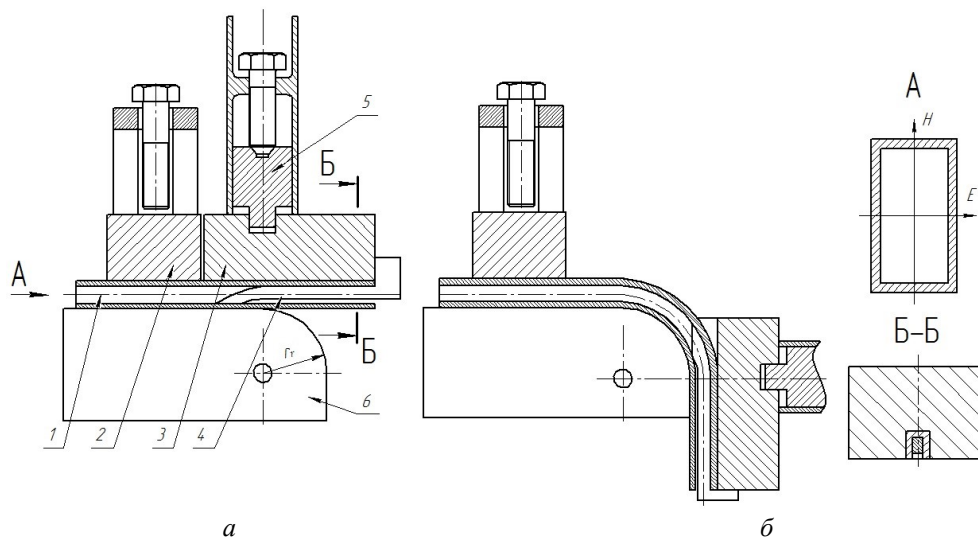


Рис. 1. Схема гибки трубы малого сечения с одновременной калибровкой внутреннего сечения: *а* – положение частей приспособления, заготовки и оправки в начальный момент гибки, *б* – положение частей приспособления, заготовки и оправки после гибки; 1 – заготовка, 2 – прижим, 3 – подвижный фиксатор, 4 – калибрующая прямолинейная оправка, 5 – рычаг, 6 – гибочный шаблон

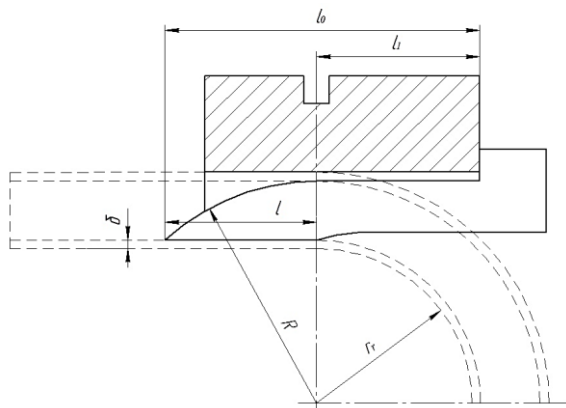


Рис. 2. Схема расчета прижима и калибрующей оправки

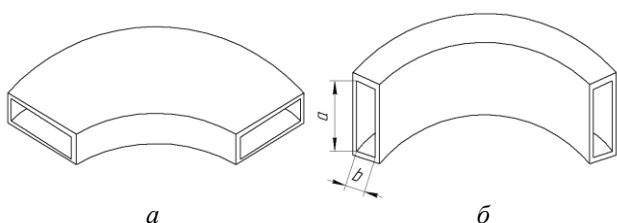


Рис. 3. Плавные (радиусные) изгибы труб прямоугольного профиля малого сечения: а – в плоскости H; б – в плоскости E

При гибке в плоскости H и E [6]:

– радиус изгиба «активной» части калибрующей оправки по наружной стенке [6] в плоскости H:

$$R = r_r + \delta + a; \quad (1)$$

– радиус изгиба «активной» части калибрующей оправки по наружной стенке [6] в плоскости E:

$$R = r_r + \delta + b, \quad (2)$$

где δ – толщина стенки трубы малого сечения; r_r – радиус гибки (шаблона) по внутренней стенке трубы малого сечения; a, b – высота и ширина канала трубы малого сечения.

Чтобы найти длину «активной» части калибрующей оправки при гибке в плоскости H используется формула [6]:

$$l = \sqrt{2 \cdot a \cdot (r_r + \delta) + a^2}. \quad (3)$$

При гибке в плоскости E расчет «активной» части калибрующей оправки может быть найден по формуле [6]:

$$l = \sqrt{2 \cdot b \cdot (r_r + \delta) + b^2}, \quad (4)$$

где a, b – высота и ширина канала волновода.

Результаты расчета представлены в табл. 1 и 2.

Длина оправки l_0 находится по формуле [6]:

$$l_0 = l + l_1, \quad (5)$$

где $l_1 \geq L$; L – длина изгибаемого участка волновода; l_1 – длина «активной» части подвижного прижима.

Жесткая калибрующая оправка позволяет применять данный метод при изготовлении изогнутых прямоугольных труб малого сечения, имеющих сечения от $3,6 \times 1,8$ до $11 \times 5,5$ мм. В табл. 1 и 2 даны расчетные значения размеров R и l оправок для гибки на 90° .

Таблица 1

Расчетные параметры оправки при гибке в плоскости H

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		10		15		20		25		30	
		R	l	R	l	R	l	R	l	R	l
3,6×1,8	0,9	14,5	9,562	19,5	11,29	24,5	12,78	29,5	14,12	34,5	15,34
5,2×2,6	0,9	16,1	11,85	21,1	13,87	26,1	15,63	31,1	17,22	36,1	18,67
7,2×3,4	0,9	18,1	14,45	23,1	16,76	28,1	18,78	33,1	20,61	38,1	22,29
11×5,5	0,9	21,9	18,99	26,9	21,7	31,9	24,1	36,9	26,28	41,9	28,3

Таблица 2

Расчетные параметры оправки при гибке в плоскости E

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		5		10		15		20		30	
		R	l	R	l	R	l	R	l	R	l
3,6×1,8	0,9	7,7	4,948	12,7	6,518	17,7	7,777	22,7	8,859	32,7	10,7
5,2×2,6	0,9	8,5	6,119	13,5	7,965	18,5	9,457	23,5	10,74	33,5	12,94
7,2×3,4	0,9	9,3	7,189	14,3	9,256	19,3	10,94	24,3	12,4	34,3	14,89
11×5,5	0,9	11,4	9,754	16,4	12,25	21,4	14,32	26,4	16,13	36,4	19,24

3. Методика расчета

Вычисления проводились в программе Microsoft Excel как наиболее доступной, распространенной и универсальной расчетной программы. Microsoft Excel использовался в связи с удобством работы с большими массивами данных в форме матриц. Данная задача требует расчета для разных вариантов сечений. В расчете используется линейный алгоритм, который не требует применения логических операторов. Перечисленные факторы являются причиной выбора данной программы. Алгоритм расчета представлен на рис. 4.

помощью можно построить: схему нагружения, эпюру поперечных сил Q и эпюру изгибающего момента M (рис. 5) [9].

Изгибаемый участок заготовки можно представить как рычаг (рис. 5), на одном конце которого приложено изгибающее усилие P . Рычагом является длина подвижного коробчатого фиксатора, поэтому длина рычага на каждом изгибаемом участке заготовки остается неизменной. При определении усилий не учитывалась сила трения, т. к. она может сильно варьироваться в зависимости от условий смазки. При хороших условиях смазки сила трения может быть пренебрежительно мала и не оказывать значительного влияния на технологический процесс гибки. Поэтому формула для определения изгибающего усилия имеет вид:

$$P = \frac{M}{l_1}, \quad (6)$$

где l_1 – длина изгибаемой части заготовки и силового рычага прижима; M – изгибающий момент.

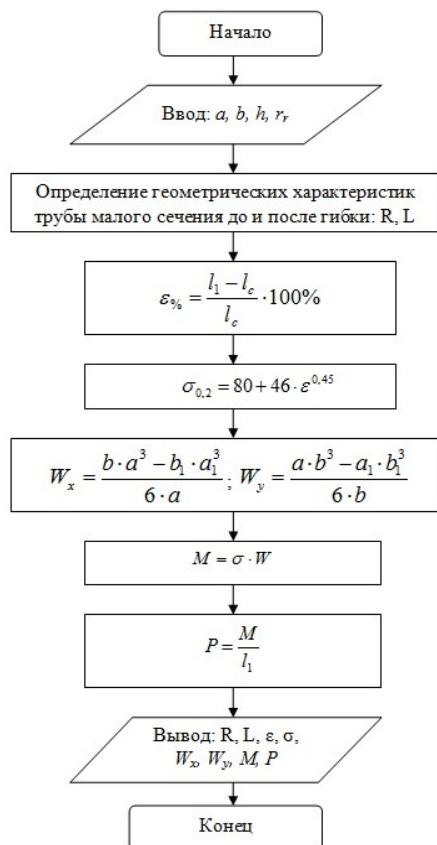


Рис. 4. Алгоритм расчета параметров технологического процесса гибки труб малого сечения

4. Порядок определения усилий, созданных оборудованием

При осуществлении технологического процесса требуется нарушить условия прочности и преодолеть предел текучести. В данном случае – согнуть балку.

Нахождение параметров технологического процесса является обратной задачей определения условий прочности и требует условий, при которых усилие, создающее изгибающий момент, может превзойти предел текучести.

Для определения усилий гибки необходимо знать модель крепежа заготовки (рис. 3 и 4). С ее

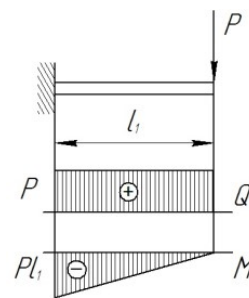


Рис. 5. Схема нагружения

При осуществлении технологического процесса гибки происходит пластическая деформация. Под воздействием изгибающего усилия превышает предел текучести материала и происходит нарушение условий прочности [9]:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_{\max}|}{W} \leq [\sigma]. \quad (7)$$

Из (7) получается (8) для нахождения изгибающего момента. Поскольку усилие P является неизвестной искомой величиной, то изгибающий момент следует находить по формуле:

$$M = \sigma \cdot W. \quad (8)$$

Результаты расчетов изгибающих моментов M и изгибающих усилий P для различных вариантов сечений и радиусов гибки представлены в табл. 11 и 12.

5. Изменение пределов текучести

В ходе гибки трубы происходит изменение предела текучести меди в зависимости от дефор-

маций. Для учета изменения предела текучести меди марки М4 была использована формула [10]:

$$\sigma_{0,2} = 80 + 46 \cdot \varepsilon^{0,45} \text{ МПа}, \quad (9)$$

где ε – степень деформации. Результаты расчета $\sigma_{0,2}$ представлен в табл. 8 и 9.

Предполагая, что срединный слой останется изначальной длины, его можно считать изначальной длиной заготовки. Внешний слой удлиняется, а внутренний слой сжимается. Предполагая, что изменение удлинения и сокращение материала одинаковы, то изменения геометрических характеристик можно определять по формуле [11]:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{l_1 - l_c}{l_c} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где l_c – начальная длина изгибаемой части заготовки, определяемая по среднему радиусу изделия (табл. 4 и 5), является длиной изгибаемого участка волновода до начала гибки; l_1 – конечная длина дуги, определяемая по внешнему радиусу изделия (табл. 6 и 7), является результатом удлинения внешней стенки заготовки в результате гибки. Результат вычисления деформации ε представлен в табл. 8 и 9.

Длина изгибаемого участка волновода до начала гибки определяется по формуле:

$$l_c = R_c \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{180}, \quad (11)$$

где R_c – средний радиус изделия, α – угол изгиба изделия.

6. Моменты сопротивлений сечений

Моменты сопротивлений сечений для прямоугольного сечения (рис. 6) определяются по формулам [9]:

$$W_x = \frac{b_1 \cdot a_1^3 - b \cdot a^3}{6 \cdot a_1}, \quad (12)$$

$$W_y = \frac{a_1 \cdot b_1^3 - a \cdot b^3}{6 \cdot b_1}. \quad (13)$$

W_x следует учитывать при гибке в плоскости H (табл. 3). W_y следует учитывать при гибке в плоскости E (табл. 2).

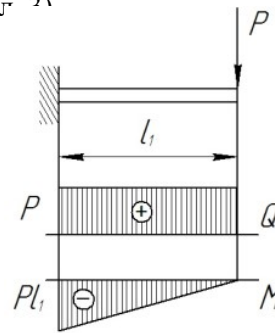


Рис. 6. Схема прямоугольного сечения, используемая для определения моментов сопротивлений сечений W_x и W_y

Таблица 3

Моменты сопротивления сечения W_x, W_y в плоскостях H и E , мм³

	W_x	W_y
3,6×1,8	14,904	10,692
5,2×2,6	27,22903	19,12473
7,2×3,4	46,6992	31,48985
11×5,5	104,0197	71,90166

Как видно по табл. 8 деформации ε и напряжения в плоскости H меняются для сечения 3,6×1,8: $\varepsilon = 17,53...7,627\%$ и $\sigma = 246,9...194,8 \text{ Н/мм}^2$, а для сечения 11×5,5: $\varepsilon = 28,07...14,95\%$ и $\sigma = 286,3...235,4 \text{ Н/мм}^2$. Промежуточные сечения имеют промежуточные значения ε и σ . Аналогично по табл. 9 деформации ε и напряжения в плоскости E меняются для сечения 3,6×1,8: $\varepsilon = 20,93...5,357\%$ и $\sigma = 260,8...177,9 \text{ Н/мм}^2$, а для сечения 11×5,5: $\varepsilon = 29,67...9,786\%$ и $\sigma = 291,5...208,4 \text{ Н/мм}^2$. Промежуточные сечения имеют промежуточные значения ε и σ .

Исходя из табл. 8 и 9 можно сделать вывод: с увеличением радиуса гибки уменьшаются деформации ε и напряжения σ .

Таблица 4

Длина дуги по среднему радиусу изгибаемой части заготовки в плоскости H , мм

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		10		15		20		25		30	
		R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c
3,6×1,8	0,9	12,7	19,95	17,7	27,8	22,7	35,66	27,7	43,51	32,7	51,37
5,2×2,6	0,9	13,5	21,21	18,5	29,06	23,5	36,91	28,5	44,77	33,5	52,62
7,2×3,4	0,9	14,5	22,78	19,5	30,63	24,5	38,48	29,5	46,34	34,5	54,19
11×5,5	0,9	16,4	25,76	21,4	33,62	26,4	41,47	31,4	49,32	36,4	57,18

Таблица 5

Длина дуги по среднему радиусу изгибаемой части заготовки в плоскости E , мм

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		5		10		15		20		30	
		R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c	R_c	l_c
3,6×1,8	0,9	6,8	10,68	11,8	18,54	16,8	26,39	21,8	34,24	31,8	49,95
5,2×2,6	0,9	7,2	11,31	12,2	19,16	17,2	27,02	22,2	34,87	32,2	50,58
7,2×3,4	0,9	7,6	11,94	12,6	19,79	17,6	27,65	22,6	35,5	32,6	51,21
11×5,5	0,9	8,65	13,59	13,65	21,44	18,65	29,3	23,65	37,15	33,65	52,86

114

Таблица 6

Длина дуги по внешнему радиусу изгибаемой части заготовки в плоскости H , мм

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		10		15		20		25		30	
		$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1
3,6×1,8	0,9	15,4	24,19	20,4	32,04	25,4	39,9	30,4	47,75	35,4	55,61
5,2×2,6	0,9	17	26,7	22	34,56	27	42,41	32	50,27	37	58,12
7,2×3,4	0,9	19	29,85	24	37,7	29	45,55	34	53,41	39	61,26
11×5,5	0,9	22,8	35,81	27,8	43,67	32,8	51,52	37,8	59,38	42,8	67,23

Таблица 7

Длина дуги по внешнему радиусу изгибаемой части заготовки в плоскости E , мм

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		5		10		15		20		30	
		$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1	$R_{вн}$	l_1
3,6×1,8	0,9	8,6	13,51	13,6	21,36	18,6	29,22	23,6	37,07	33,6	52,78
5,2×2,6	0,9	9,4	14,77	14,4	22,62	19,4	30,47	24,4	38,33	34,4	54,04
7,2×3,4	0,9	10,2	16,02	15,2	23,88	20,2	31,73	25,2	39,58	35,2	55,29
11×5,5	0,9	12,3	19,32	17,3	27,17	22,3	35,03	27,3	42,88	37,3	58,59

Таблица 8

Деформации ϵ (%) и изменения пределов текучести σ (Н/мм²) в плоскости H

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		10		15		20		25		30	
		ϵ	σ	ϵ	σ	ϵ	σ	ϵ	σ	ϵ	σ
3,6×1,8	0,9	8,6	13,51	13,6	21,36	18,6	29,22	23,6	37,07	33,6	52,78
5,2×2,6	0,9	9,4	14,77	14,4	22,62	19,4	30,47	24,4	38,33	34,4	54,04
7,2×3,4	0,9	10,2	16,02	15,2	23,88	20,2	31,73	25,2	39,58	35,2	55,29
11×5,5	0,9	12,3	19,32	17,3	27,17	22,3	35,03	27,3	42,88	37,3	58,59

Таблица 9

Деформации ε (%) и изменения пределов текучести σ (Н/мм²) в плоскости E

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		5		10		15		20		30	
		ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ
3,6×1,8	0,9	20,93	260,8	13,24	227,1	9,677	207,7	7,627	194,8	5,357	177,9
5,2×2,6	0,9	23,4	270,1	15,28	236,9	11,34	217,2	9,016	203,7	6,395	186
7,2×3,4	0,9	25,49	277,5	17,11	245,1	12,87	225,2	10,32	211,5	7,386	193,1
11×5,5	0,9	29,67	291,5	21,1	261,4	16,37	241,8	13,37	227,7	9,786	208,4

115

Таблица 10

Изгибающий момент M (Н·мм) и усилие P (Н) в плоскости H

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		10		15		20		25		30	
		M	P	M	P	M	P	M	P	M	P
3,6×1,8	0,9	3680	152,1	3384	105,6	3178	79,66	3024	63,33	2903	52,2
5,2×2,6	0,9	7064	264,5	6529	188,9	6146	144,9	5854	116,5	5621	96,72
7,2×3,4	0,9	12660	424,2	11770	312,2	11114	244	10604	198,6	10193	166,4
11×5,5	0,9	29779	831,5	27948	640	26540	515,1	25413	428	24484	364,2

Таблица 11

Изгибающий момент M (Н·мм) и усилие P (Н) в плоскости E

Сечение, мм	Толщина стенки, мм	Радиус гибки, мм									
		5		10		15		20		30	
		M	P	M	P	M	P	M	P	M	P
3,6×1,8	0,9	2788	206,4	2428	113,6	2221	76,03	2082	56,18	1902	36,04
5,2×2,6	0,9	5165	349,8	4530	200,3	4154	136,3	3897	101,7	3558	65,84
7,2×3,4	0,9	8739	545,5	7717	323,2	7093	223,5	6660	168,2	6081	110
11×5,5	0,9	20960	1085	18796	691,7	17388	496,4	16375	381,9	14983	255,7

По табл. 10 можно проанализировать изгибающий момент M и усилие P в плоскости H для сечения 3,6×1,8: $M = 3680...2903$ Н·мм и $P = 152,1...52,2$ Н, а для сечения 11×5,5: $M = 29779...24484$ Н·мм и $P = 831,5...364,2$ Н. В промежуточных сечениях имеют промежуточные результаты вычислений M и P . Аналогично по табл. 11 видно, что изгибающий момент M и усилие P в плоскости E меняются, для сечения 3,6×1,8: $M = 2788...1902$ Н·мм и $P = 206,4...36,04$ Н, а для сечения 11×5,5: $M = 20960...14983$ Н·мм

и $P = 1085...255,7$ Н. Промежуточные сечения имеют промежуточные значения M и P . Исходя из табл. 10 и 11 можно сделать вывод: с увеличением радиуса гибки уменьшается изгибающий момент M и усилие P , также эти значения возрастают с увеличением размера сечений.

С помощью табл. 10 и 11 составлены графики (рис. 7 и 8), на которых показана взаимосвязь усилия гибки с радиусом гибки. Проведена аппроксимация степенными линиями трендов с высокой степенью сходимости.

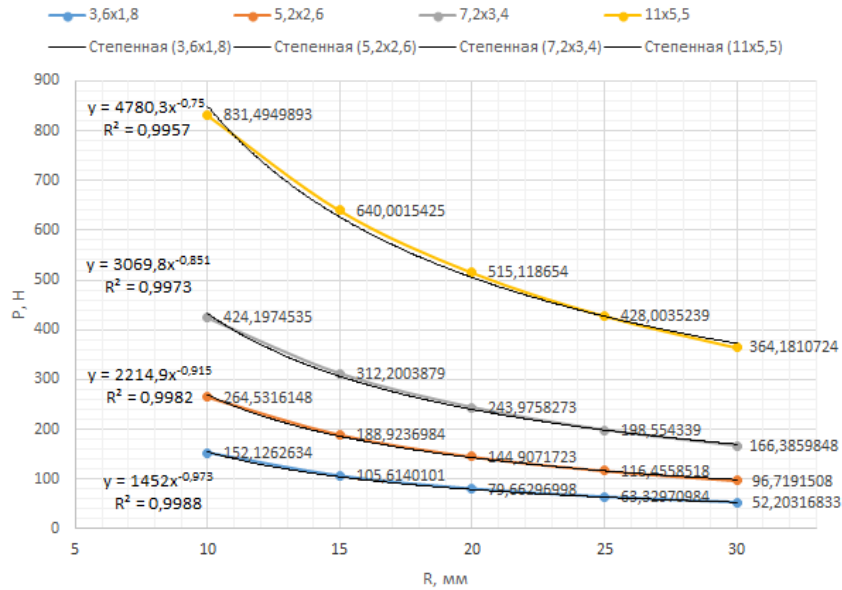


Рис. 7. Зависимость усилия от радиуса гибки в плоскости *H*

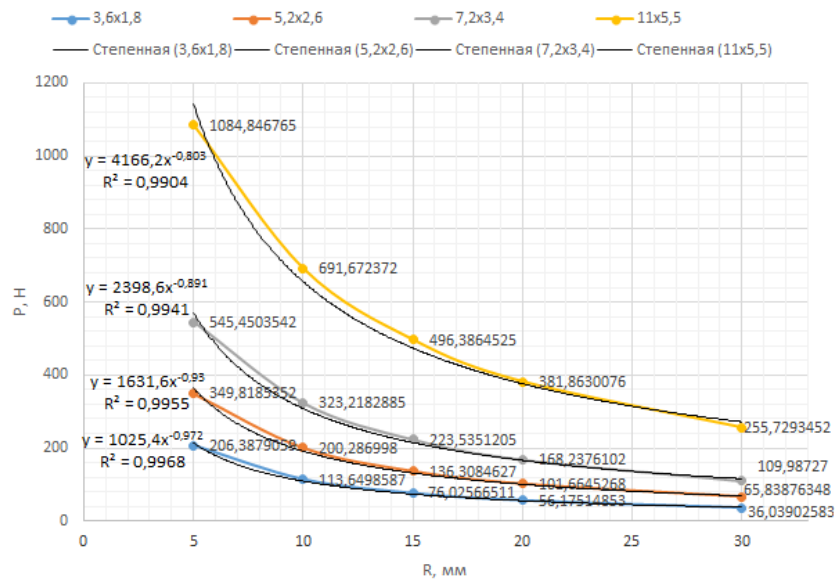


Рис. 8. Зависимость усилия от радиуса гибки в плоскости *E*

Заключение

Проведен анализ способов гибки профилированных труб малого сечения. Обоснован наиболее рациональный метод гибки на основе жестких оправок, с учетом которого разработан метод расчета. Разработаны алгоритм, программа, методика расчета технологических параметров процесса гибки труб малого сечения прямоугольного профиля и проведен анализ результатов расчета. Вычислены усилия гибки на основе расчетов момента, изменения предела текучести, деформаций.

Согласно расчетам и графикам (рис. 7 и 8) усилие имеет степенную зависимость от радиуса гибки: чем больше радиус гибки, тем меньше усилий требуется приложить для гибки, также усилие гибки возрастает в зависимости от разме-

ров сечения. Данный результат можно объяснить принципом рычага – чем длиннее рычаг, тем меньше усилие. Установленную закономерность можно проследить по значениям l_c в табл. 4 и 5, и l_1 в табл. 6 и 7. Вторым фактором объясним моменты сопротивлений сечений (табл. 3), которые повлияли на изгибающий момент, также серьезное влияние оказало увеличение соотношений длин дуг (l_c , l_1) по внешним и средним радиусам заготовки (табл. 4–7).

Данный расчет может использоваться в предварительном проектировании для определения размеров гибочной оснастки и усилия, необходимого для осуществления технологического процесса гибки трубы малого сечения, что позволяет подобрать наиболее оптимальный режим технологического процесса: усилие изгиба, деформа-

ции, изменение пределов текучести, позволяющих качественно изготовить изгиб трубы [12].

Медь при деформации пропорционально увеличивает предел прочности согласно графикам [10]. По ним видно, что предел текучести меди не превысит предел прочности, график показан до достижения деформации ϵ примерно 32 %. В расчете режимов максимум деформации ϵ достигает 29,67 %.

В условиях, близких к идеальным, при возможности точного задания усилия и обеспечения минимального трения оснастки о заготовку, данный расчет можно использовать в реальных условиях на производстве. С учетом возможного несовершенства оборудования, для уменьшения брака на производстве, имеет смысл провести расчет пределов прочности меди и усилий, при которых произойдет разрушение заготовки.

Список литературы

- [1] Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd., 2012. 768 p.
- [2] Novel Waveguide Technologies and Its Future System Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/57893> (дата обращения: 16.11.2021).
- [3] Малков Н. А., Пудовкин А. П. Устройства сверхвысоких частот: учеб. пособие. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 92 с.
- [4] ГОСТ 20900–2014. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2015. 17 с.
- [5] Гринштейн Л. С., Новиков Ю. И. Получение малогабаритных волноводных изгибов повышенной точности для аппаратуры сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн // Вопросы радиоэлектроники. 1962. Вып. 9. С. 3–9.
- [6] Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства: учеб. пособие для вузов. М. : Высш. школа, 1974. 304 с.
- [7] Агашкин С. В., Ивановский В. И., Ушаков А. Р., Михнев М. М. Способ изготовления тонкостенных волноводов прямоугольного сечения. Пат. № 2663921 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 23.
- [8] Тушинов П. А., Каримов Я. Ш., Бородина Е. А., Венценосцев Д. Л., Казаков А. В., Голубев А. В., Невокшенов А. В., Токмаков Д. И., Михайлова М. Л., Клепнев А. С., Михейкин Е. В. Способ изготовления волновода прямоугольного сечения. Пат. № 2669267 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 28.
- [9] Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев : Наукова думка, 1988. 736 с.
- [10] Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник. М. : Металлургия, 1973. 224 с.
- [11] Логинов Ю. Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 136 с.
- [12] Трифанов И. В., Трифанов В. И., Евтушенко В. В. Технологическое обеспечение качества при изготовлении линий передач антенно-фидерных устройств: монография. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2006. 242 с.

METHOD FOR CALCULATING THE FORCES REQUIRED WHEN BENDING PIPES OF SMALL CROSS-SECTION WITH A RECTANGULAR PROFILE

V. V. Timofeev, I. V. Trifanov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Curved pipes of small cross-section rectangular profile (3,6×1,8 – 11×5,5 mm) are widely used in antenna-feeder devices of spacecraft. They are required to ensure dimensional accuracy, in the bending zone no more than ±0,05 mm, for this a choice of methods of technological modes is necessary. The object of the study is a small-section pipe billet made of copper M4, which must be bent to obtain a bending angle of 90°. The purpose of the study is to develop calculation

methods necessary for the implementation of the technological process of bending small-section pipes, with justification of bending efforts. The paper analyzes the methods of bending rectangular pipes. The most rational method was chosen, bending using a rigid mandrel. Based on the selected bending method, a calculation model was compiled. The methodology and calculation algorithm have been developed and the analysis of the calculation results has been carried out. As a result of theoretical studies, with the help of calculations, the degree relationship of the effort of bending from the bending radius was revealed, the bending forces from the bending radius – the larger the bending radius, the less effort is required for bending. The calculation can be used to determine the size of the bending equipment and the bending force of the pipe of small cross-section, allows you to choose the most optimal mode of the technological process.

Keywords: small section pipe, waveguide, bending force, plastic deformation, yield strength.

References

- [1] Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. Space Antenna Handbook. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd., 2012, 768 p.
- [2] Novel Waveguide Technologies and Its Future System Applications. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/57893> (accessed 16.11.2021).
- [3] Malkov N. A., Pudovkin A. P. *Ustrojstva sverhvysokih chastot* [Ultrahigh frequency devices]. Tambov, Izd-vo Tamb. gos. tehn. un-ta, 2008, 92 p. (In Russian)
- [4] GOST 20900–2014. *Truby volnovodnye mednye i latunnye pryamougol'nye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 20900–2014. Waveguide copper and brass rectangular pipes. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 17 p. (In Russian)
- [5] Grinshtejn L. S., Novikov Yu. I. *Poluchenie malogabaritnykh volnovodnykh izgibov povyshennoj tochnosti dlya apparatury santimetrovogo i millimetrovogo diapazonov voln* [Obtaining small-sized waveguide bends of increased accuracy for equipment of centimeter and millimetre wave ranges]. *Voprosy radioelektroniki*, 1962, issue 9, pp. 3–9. (In Russian)
- [6] Bushminskiy I. P. *Izgotovlenie elementov konstruksiy SVCh. Volnovody i volnovodnye ustrojstva* [Manufacturing of microwave structural elements. Waveguides and waveguide devices]. Moscow, Vyssh. shkola, 1974, 304 p. (In Russian)
- [7] Agashkin S. V., Ivanovskiy V. I., Ushakov A. R., Mikhnev M. M. *Sposob izgotovleniya tonkostennykh volnovodov pryamougol'nogo secheniya* [Method of manufacturing thin-walled rectangular waveguides]. Patent RU 2663921, 2017, bulletin no. 23.
- [8] Tushnov P. A., Karimov Ya. Sh., Borodina E. A., Ventsenostsev D. L., Kazakov A. V., Golubev A. V., Nevokshenov A. V., Tokmakov D. I., Mikhailova M. L., Klepnev A. S., Mikheykin E. V. *Sposob izgotovleniya volnovoda pryamougol'nogo secheniya* [Method of manufacturing thin-walled rectangular waveguides]. Patent RU 2669267, 2018, bulletin no. 28.
- [9] Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Material Strength Handbook]. Kiev, Naukova dumka, 1988, 736 p. (In Russian)
- [10] Tretyakov A. V., Zyuzin V. I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem*. [Mechanical properties of metals and alloys during pressure treatment]. Moscow, Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russian)
- [11] Loginov Yu. N. *Med' i deformiruemye mednye splavy* [Copper and Wrought Copper Alloys]. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU-UPI, 2006, 136 p. (In Russian)
- [12] Trifanov I. V., Trifanov V. I., Evtushenko V. V. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva pri izgotovlenii liniy peredach antenno-fidernykh ustroystv* [Technological quality assurance in the manufacture of transmission lines of antenna-feeder devices]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University, 2006, 242 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Тимофеев Владислав Владиславович – аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва с отличием в 2020 году. Область научных интересов: повышение качества изделий машиностроения.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического регулирования и метрологии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил завод-втуз – филиал КПИ с отличием в 1975 году. Область научных интересов: повышение качества изделий машиностроения.

ORCID: 0000-0002-2419-4802