

Министерство образования и науки

Российской Федерации

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

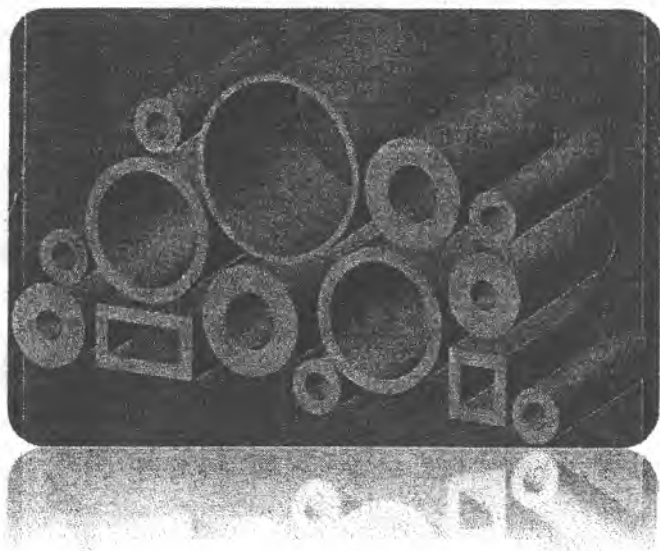
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. Королева"

(национальный исследовательский университет)

Б.В. Каргин, В.Р. Каргин

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ



САМАРА 2013

УДК 621.774.37

ББК 34.748

С71

Специальные

С71 Специальные виды волочения труб. / Б.В. Каргин, В.Р. Каргин.-
Самара: Изд-во МИР, 2013, - 174с.: ил.

ISBN 978-5-98972-092-7

Приведены основные сведения по технологическим особенностям различных способов волочения труб. Изложены результаты теоретических исследований, позволяющих создать адекватные математические модели для расчета параметров технологии волочения труб с кручением, волочения труб в блок волок, волочения составных труб сложных поперечных сечений, профилирования многогранных труб, безправочного волочения с противонапряжением, осевым подпором и внутренним давлением.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами волочения труб разнообразных форм. Может быть полезна студентам вузов соответствующих специальностей.

Ил. 90 Табл. 6. Библиограф. Список 100 назв.

Рецензент: д-р. экон.наук., проф. В.И. Дровяников

УДК 621.774.37

ББК 34.748

ISBN 978-5-98972-092-7

© Б.В. Каргин, В.Р. Каргин 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. БЕЗОПРАВОВОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ.....	7
1.1 Математическая модель.....	7
1.2 Анизотропия механических свойств.....	29
1.3 Конические и радиусные волокна.....	32
1.4 Волочение с внутренним давлением.....	37
1.5 Волочение с противонапряжением.....	39
1.6 Волочение с подпором.....	42
1.7 Волочение в блок волокон.....	44
ГЛАВА 2. ВОЛОЧЕНИЕ ТРУБ С КРУЧЕНИЕМ.....	50
2.1 Способы волочения.....	50
2.2 Волочение труб через вращаемую волоку.....	56
2.3 Винтовые профили и трубы некруглых сечений.....	62
2.4 Трубы с наружным и внутренним винтовым оребрением.....	66
2.5 Энергосиловые условия.....	77
ГЛАВА 3. ВОЛОЧЕНИЕ СОСТАВНЫХ ТРУБ СЛОЖНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ.....	82
3.1 Многоканальные трубы с продольным оребрением.....	82
3.2 Многоканальные трубы со спиральным оребрением.....	96
3.3 Двухкамерные трубы со спиральным турбулизатором.....	107
3.4 Остаточные напряжения в составных трубах.....	112
ГЛАВА 4. ПРОФИЛИРОВАНИЕ МНОГОГРАННЫХ ТРУБ ВОЛОЧЕНИЕМ.....	123
4.1 Математическая модель профилирования.....	123
4.2 Выбор способа волочения квадратных труб.....	149
4.3 Расчет фасонных волокон.....	152
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	157
Приложение.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Уровень трубного производства в значительной степени определяет развитие большинства важнейших отраслей народного хозяйства. Быстро развивающиеся электроэнергетика, электроника, приборостроение, судостроение, атомная и космическая техника требуют соответствующего развития производства труб: повышение эффективности их производства и увеличения выхода годного металла.

Наряду с увеличением объема производства труб непрерывно повышается технический уровень трубного производства - техника и технология, производительность труда и степень использования.

Особо важным является производство холоднотянутых труб самого разнообразного сортамента. Эти трубы применяются во многих специальных областях народного хозяйства в качестве трубопроводов и должны удовлетворять высоким требованиям по точности геометрических размеров, чистоте поверхности и механическим свойствам.

По назначению холоднотянутые трубы условно можно подразделить на теплообменные, водопроводные, газопроводные, воздухопроводные, тормозные, парового отопления и многие другие.

По форме поперечного сечения трубы можно подразделить на круглые, профильные, многогранные, ребристые, биметаллические, составные, многослойные, с неметаллическими покрытиями, многоканальные, комбинированные, спиральные.

По материалам трубы могут быть разделены на углеродистые, легированные, коррозионностойкие сплавы, цветные металлы.

Производство холоднодеформированных труб осуществляется в трубоволоочильных цехах способами холодной прокатки и волочения. Способы волочения являются наиболее эффективными (а зачастую и единственно возможными) для получения труб разнообразных видов. В основе широкого

промышленного внедрения процессов волочения в России заложены технологические и теоретические разработки, в выполнении которых значительный вклад внесли И.Л. Перлин, М.З Ерманок, Г.Я. Гун, Ю.Ф. Шевакин, Л.Е. Альшевский, Г.А. Савин, Ю.С. Старостин, А.К. Шурупов, М.А. Фрейберг и др. В последнее время внедряются новые технологические процессы, применяется новое оборудование, инструмент и новые методы.

Одним из перспективных, но еще недостаточно изученных является волочение в сочетании с кручением, что позволяет расширить сортамент получаемых труб со спиральным оребрением. В этом процессе кручение реализуется через вращение инструмента (волоки, оправки).

При производстве тонкостенных труб в отечественной и зарубежной практике широкое применение нашло безоправочное волочение. При безоправочном волочении тонкостенных труб имеет место изменение толщины стенки, которое тем значительнее, чем больше суммарное уменьшение диаметра трубы при осадке. Поэтому для получения тонкостенных труб с гарантированной толщиной стенки необходимо строго учитывать это изменение.

На ряде предприятий осадку труб волочением проводят с осевым подпором, противонапряжением и в блок волок. Это позволяет увеличить суммарную степень деформации за проход без потери устойчивости поперечного сечения, уменьшить продольную кривизну готовых труб и износ волочильного инструмента, получать тонкостенные трубы с заданной толщиной стенки.

Технология изготовления составных многоканальных труб сложных поперечных сечений заключается в том, что на первом этапе изготавливают трубу с наружным оребрением или внутренними ребрами, на которую насаживают (или вводят внутрь) другую круглую трубу, а затем этот пакет подвергают волочению. При необходимости продольные ребра могут быть выполнены по спирали с требуемым шагом.

При изготовлении труб с внутренним спиральным рифлением рекомендуется технология, основанная на процессах волочения и раздачи на короткой вращающейся оправке со спиральными выступами.

Наиболее экономичный способ производства профильных труб с плоскими и винтовыми гранями – профилирование труб круглого сечения в волочильных станах. Это объясняется малой трудоемкостью, высокой производительностью процесса и тем, что он дает возможность получать трубы с точными размерами по толщине стенки и диаметру и с высококачественной поверхностью.

ГЛАВА 1 БЕЗОПРАВОЧНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

1.1 Математическая модель

К основным выходным параметрам безоправочного волочения тонкостенных труб относят толщину стенки готовой трубы, напряжение протягивания, определяющее предельные возможности процесса, и контактное напряжение, влияющее на стойкость инструмента. Научно обоснованный расчет указанных параметров – сложная и до конца не решенная задача. Как показано в работах [1...9], эту задачу можно решить только на основе комплексного учета всех геометрических, технологических и конструкционных параметров процесса, в том числе анизотропии механических свойств заготовки и реального профиля канала волокна, состоящей, как правило, из конического и калибрующего участков, плавно соединённых между собой радиусным участком.

Для решения поставленной задачи были сделаны следующие допущения: деформация трубы принималась как осесимметричная и безмоментная; напряженное состояние плоское, а меридиональное σ_l и окружное σ_φ – главные напряжения; заготовка считается трансверсально-изотропной, механические свойства в поперечном сечении одинаковы, но отличны от свойств в продольном направлении; упрочнение материала изотропное и определяется в виде полинома; на поверхности контакта трубы с волоком действуют касательные напряжения, определяемые по закону Амантона-Кулона.

Принятые допущения позволяют провести анализ процесса безоправочного волочения тонкостенных труб, учитывая практически все исходные технологические факторы и геометрию канала волокна, за исключением действия изгибающих моментов в трубной заготовке на входе и выходе рабочей зоны волокна.

Система уравнений для определения напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние на коническом участке волокна длиной $l_{кон}$, располагая начало координат в начале очага деформации, рис. 1. Бесконечно-малые приращения компонент деформации определяются по уравнениям логарифмических деформаций Льюдвига, записанных в дифференциальной форме:

$$de_l = \frac{dl}{l}, \quad de_r = \frac{dR}{R}, \quad de_t = \frac{dt}{t}, \quad (1)$$

где l - текущее значение длины рассматриваемого конечного элемента; R - текущее значение радиуса срединного сечения рассматриваемого конечного элемента от оси волочения; t - текущее значение толщины стенки рассматриваемого конечного элемента.

Бесконечно-малые приращения логарифмических деформаций в рассматриваемом конечном элементе при движении в коническом сужающемся канале волокна связаны между собой условием несжимаемости (условием постоянства объема):

$$de_l + de_r + de_t = 0. \quad (2)$$

Интенсивность бесконечно-малых приращений деформаций в направлении оси волочения находится по формуле:

$$de_n = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu^2} (de_r^2 + de_t^2 + 2\mu de_r de_t)} \quad (3)$$

где μ - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела.

Компоненты напряженного состояния в рассматриваемом конечном элементе рассчитываются по известным компонентам деформированного состояния из физических уравнений теории пластичности, связывающих напряжения с бесконечно-малыми приращениями деформаций Леви-Лоде:

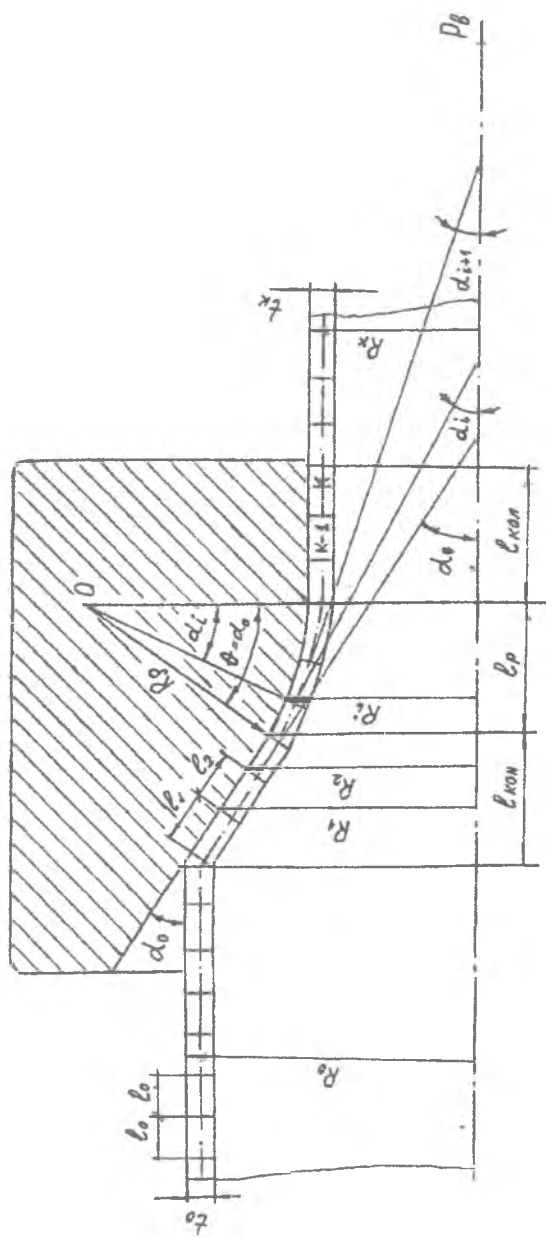


Рис. 1 - Расчетная схема волочения тонкостенной трубы.

$$\frac{\sigma_l - \sigma_\varphi}{\left(\frac{1}{\mu_y} - 1\right) de_l - \left(\frac{1}{\mu_y} - 1\right) de_\varphi} = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_r}{\left(\frac{1}{\mu_y} - 1\right) de_\varphi - de_r} =$$

$$= \frac{\sigma_r - \sigma_l}{de_r - \left(\frac{1}{\mu_y} - 1\right) de_l} = \frac{\mu_y \sigma_\lambda}{1 - \mu_y^2 de_l} \quad (4)$$

Для плоского напряженного состояния $\sigma_r = 0$ и трансверсально - изотропного материала $\mu_y = \mu$, эта зависимость записывается следующими уравнениями для главных напряжений:

$$\sigma_l = \frac{\mu_r}{1 - \mu_r^2} \frac{\sigma_\lambda}{de_\lambda} \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) de_\varphi + \frac{de_r}{\mu_r} \right],$$

$$\sigma_\varphi = \frac{\mu_r}{1 - \mu_r^2} \frac{\sigma_\lambda}{de_\lambda} \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) de_\varphi - de_r \right]. \quad (5)$$

В качестве условия пластичности используется критерий текучести Губера-Мизеса для двухосного напряженного состояния:

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_\varphi^2 - \sigma_l \sigma_\varphi}. \quad (6)$$

Интенсивность напряжений σ_λ вдоль оси волочения находится из закона изотропного упрочнения материала трубной заготовки, в зависимости от текущего коэффициента вытяжки λ за переход при волочении, описанного полиномом второй степени:

$$\sigma_\lambda = a_0 + a_1 \ln \lambda + a_2 (\ln \lambda)^2, \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2 - коэффициенты аппроксимации кривой упрочнения, определяемые методом наименьших квадратов.

Контактное напряжение P определяется из уравнения равновесия всех сил в направлении нормали к меридиану (уравнение Лапласа):

$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_l}{R_x} + \frac{\sigma_\varphi}{R_\varphi}, \quad (8)$$

где R_x - радиус кривизны меридионального сечения, R_φ - радиус сечения трубы конической поверхностью, перпендикулярной дуге меридиана.

На коническом участке обжимного канала волокна

$$R_x = \infty, R_\varphi = \frac{R}{\cos \alpha},$$

$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_\varphi \cos \alpha}{R}, \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение равновесия кольцевого элемента (рис. 2) на коническом участке в направлении касательной к меридиану с учетом изменения толщины стенки:

$$\frac{d}{dR}(\sigma_\varphi R t) + \sigma_\varphi t + \frac{f P R}{\sin \alpha} = 0, \quad (10)$$

где f - коэффициент внешнего трения по нормальному давлению между трубой и волокой, α - угол конусности.

Напряженно-деформированное состояние при волочении трубы через радиусный участок обжимного канала волоки длиной l_p определяется следующим образом.

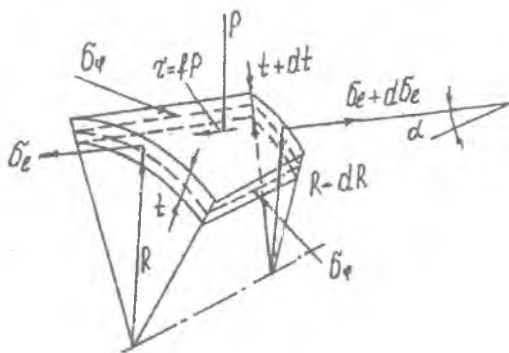


Рис. 2 - Напряженное состояние кольцевого элемента.

Радиусный участок представляется в виде набора узких конических колец с текущим углом рабочего конуса α , и длиной рабочей части, равной текущей длине деформируемого элемента l . Поэтому напряженно-деформированное состояние рассматриваемого кольцевого элемента находится решением приведенной для конического участка системы уравнений с углом конуса:

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{R_k - R}{R_p} + 1 \right), \quad (11)$$

где R_k - конечный наружный радиус трубы, R_p - радиус кривизны радиусного участка канала волокна.

Такой подход при расчете напряженно-деформированного состояния полезен для изучения профиля образующей канала волокна любой сложной формы (радиальной, вогнутой, сигмоидальной и т.п.)

На калибрующем участке канала волокна принимается, что тонкостенная труба деформируется упруго согласно закону Гука. Контактное напряжение на границе волокна в конце радиусного участка при $R = R_k$ равно контактному напряжению в начале калибрующего участка волокна и не изменяется по его длине.

Дифференциальное уравнение равновесия на калибрующем участке канала волокна имеет вид:

$$\frac{d\sigma_l}{dl} = f \frac{P}{l}. \quad (12)$$

Таким образом, получена замкнутая система уравнений для определения напряженно-деформированного состояния при волочении тонкостенных труб. Система уравнений позволяет найти одиннадцать неизвестных параметров: $R, l, t, de_k, e_r, e_\varphi, e_l, \sigma_k, \sigma_\varphi, \sigma_l, P$. Для конического участка обжимной зоны система включает в себя уравнения (2-10), для радиусного участка уравнения (2-11). На калибрующем участке используется уравнение (12).

Учет теплового эффекта.

В процессе холодного волочения тонкостенной трубы происходит превращение работы пластической деформации и работы сил трения в тепло и теплообмен в пределах 86-95%. Это оказывает существенное влияние на ход пластического формообразования, качество труб и стойкость волочильного инструмента [10].

Повышение температуры t кольцевого элемента тонкостенной трубы $(\Delta T)_i$ в процессе волочения складывается из трех частей: I - повышения температуры $(\Delta T_1)_i$ в результате перехода пластической деформации в тепловую; II - повышения температуры $(\Delta T_2)_i$ в результате трения о рабочий канал волокни; III - повышения температуры $(\Delta T_3)_i$, вызываемого трением в калибрующей зоне волокни.

$$(\Delta T)_i = (\Delta T_1)_i + (\Delta T_2)_i + (\Delta T_3)_i.$$

Разработанная методика позволяет получить температурное поле для всего деформируемого объема трубной заготовки при непосредственном использовании в качестве исходных данных численные значения о напряжениях и деформациях каждого кольцевого элемента трубы.

Повышение температуры ΔT_i за счет пластической деформации можно определить по формуле

$$(\Delta T)_i = \frac{\eta}{c\rho} (\sigma_k)_i (de_k)_i,$$

где η - коэффициент, учитывающий долю работы, переходящую в тепло, c - удельная теплоемкость; ρ - плотность.

Формулы для расчета повышения температуры $(\Delta T_2)_i$ и $(\Delta T_3)_i$ для движущегося кольцевого элемента трубы длиной Δl и толщиной t_i можно получить при следующих допущениях:

1. При скоростях, применяемых при волочении, распространением тепла вдоль направления движения элемента оболочки можно пренебречь.

2. За время прохождения кольцевого элемента вдоль канала волокни, тепло, выделяющееся вследствие трения, успевает распространяться в направлении нормали к поверхности контакта на толщину стенки трубы t_i .

При установившемся режиме волочения поток тепла в движущемся кольцевом элементе является стационарным и одномерным. В этом случае

$$q_{TP} = \frac{\lambda}{l} T_{TP}, \quad (13)$$

где T_{TP} - повышение температуры вследствие превращения работы трения в тепло; q_{TP} - количество тепла, выделяющегося в результате трения; λ - коэффициент теплопроводности материала оболочки.

Тепловой поток, возникающий вследствие трения, в движущемся кольцевом элементе со скоростью V

$$q_{TP} = fPV. \quad (14)$$

Из уравнений (13) и (14) следует

$$q_{TP} = \frac{fPV}{\lambda} l. \quad (15)$$

Используя линейность соотношения (13), можно установить зависимость между количеством тепла, выделенного вследствие трения и изменением температуры элемента толщиной стенки трубы l ,

$$\pi (R_i + R_{i-1}) f P_i dl = l_i dT_i c \rho \pi (R_i + R_{i-1}) T_{TP} / 2.$$

Откуда

$$T_{TP} = \frac{2 f P l}{c \rho l}, \quad (16)$$

где l - перемещение элемента по каналу волокна.

Исключая из уравнений (15) и (16) толщину стенки элемента, найдем формулы для расчета $(\Delta T_2)_i$ и $(\Delta T_3)_i$ вдоль линии контакта.

$$(\Delta T_2)_i = f P_i \sqrt{\frac{2V l_i}{\lambda c \rho}}, \quad (17)$$

$$(\Delta T_3)_i = f (P_{max}) \sqrt{\frac{2V_i (l_{max})_i}{\lambda c \rho}}. \quad (18)$$

Температура для каждого i - того пластически деформируемого кольцевого элемента T_i найдется путем суммирования приращений ΔT_i и температуры предыдущего элемента

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T, \quad (19)$$

При входе трубной заготовки в очаг пластической деформации температуру заготовки принимали равной температуре окружающей среды, т.е. $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Предельные деформации.

Безоправочное волочение труб со степенью деформации, близкой к максимально допустимой, способствует сокращению общего числа технологических переходов, что позволяет снизить себестоимость изделий [11].

При волочении тонкостенной трубы в очаге деформации действуют растягивающие продольные напряжения, что может привести к разрушению металла трубы на выходе из волоки. Поэтому логическое продолжение исследования напряженно-деформированного состояния трубы - расчет ресурса пластичности для определения максимально-возможных (не приводящих к разрушению) предельных деформаций и выбора оптимальных технологических параметров волочения.

В соответствии с теорией разрушения [12], предельная степень деформации, которую можно сообщить металлу оболочки при волочении, определится из критерия Колмогорова

$$\int_0^{\tau} \frac{H_1(\tau)}{\Lambda_p \left[\frac{\sigma}{T_1}(\tau) \right]} d\tau < 1,$$

где $H_1(\tau)$ - интенсивность скоростей деформаций сдвига в направлении оси волочения, σ - среднее напряжение деформации до разрушения, T_1 - интенсивность касательных напряжений, Λ_p - степень предельной пластичности.

$$H_1(\tau) = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu_r^2} (\xi_p^2 + \xi_r^2 + 2\mu_r \xi_p \xi_r)}.$$

Для расчета предельных деформаций экспериментальные данные, связывающие Λ_p и σ/T_1 , аппроксимируют различными функциями, например, степенной зависимостью

$$\Lambda_p = a_0 + a_1 \left(\frac{\sigma}{T_1} \right) + \left(\frac{\sigma}{T_1} \right)^2,$$

где a_0, a_1 и a_2 - коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов, T_1 - интенсивность касательных напряжений, в направлении оси волочения.

$$T_1 = \sigma_s / \sqrt{3}.$$

Компоненты скоростей деформаций для i -го кольцевого элемента имеют вид

$$\xi_r = \frac{1}{\Delta\tau} \ln \frac{R_i}{R_0}, \xi_t = \frac{1}{\Delta\tau} \ln \frac{l_i}{l_0}, \xi_l = \frac{1}{\Delta\tau} \ln \frac{l_i}{l_0},$$

где $\Delta\tau$ - интервал времени, соответствующий переходу кольцевого элемента из $i-1$ в i -положение и определяется по выражению

$$\Delta\tau_i = \Delta l / V_i,$$

где V_i - скорость волочения i -того элемента,

$$V_i = R_i V_s / R_0,$$

где V_s - скорость волочения.

Труба при безправочном волочении может сохранить свою круглую форму лишь в том случае, если она достаточно устойчива. Если давление со стороны волоки невелико, то труба после пластической деформации остается круглой, причем уменьшается лишь ее периметр [13,14].

При безправочном волочении тонкостенных труб величина предельной деформации чаще всего ограничивается устойчивостью поперечного сечения трубы в очаге деформации. Для решения этой задачи можно воспользоваться общими положениями об устойчивости тонкой круговой цилиндрической оболочки, нагруженной внешним давлением со стороны волоки, равномерно

распределенным по длине очага деформации, и осевыми растягивающими напряжениями.

В такой постановке задачи А.А. Ильюшиным получено следующее уравнение [15]:

$$i \leq i_{\psi} = \pi \sqrt{\frac{3E_1}{\sigma_{11}} \cdot \frac{4(1-\psi) + 3(1-\psi+k)\overline{\sigma}_e^2}{-\overline{\sigma}_e}} \quad (20)$$

где i_{ψ} - критическая гибкость оболочки;

E_1 - модуль упругости материала оболочки;

σ_{11} - интенсивность напряжений;

ψ - отношение радиусов кривизны оболочки, для оболочки в виде конуса с прямолинейной образующей $\psi = 0$;

k - относительная величина модуля Кармана.

$$k = \frac{4 \frac{d\sigma_e}{de_e}}{\left(E_1 + \sqrt{\frac{d\sigma_e}{de_e}} \right)^2};$$

$\overline{\sigma}_e$ - относительное окружное напряжение,

$$\overline{\sigma}_e = \frac{\sigma_e}{\sigma_s}.$$

Гибкость через характерные размеры оболочки имеет вид

$$i = 3\pi \frac{D}{t}.$$

Из формулы (20) нетрудно найти критическое окружное напряжение, σ_e , при котором происходит потеря устойчивости поперечного сечения трубы.

Алгоритм вычислений полей напряжений и деформаций.

Описанная выше система уравнений сводится к решению уравнений равновесия (10,11) относительно независимой переменной R . При принятых допущениях аналитическое решение данной системы невозможно. Для решения

приведенной системы использовался метод конечных разностей с приближенным интегрированием дифференциального уравнения статического равновесия по методу трапеций [16].

В процессе установившегося волочения исходные кольцевые элементы трубы при протягивании через обжимной канал волокни под действием осевой силы P_i деформируются и занимают положения, определяемые соответственно радиусами $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_k$. Соответствующие длины образующих и толщины стенок кольцевых элементов при $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_k$ принимают значения $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_k$ и $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k$, рис.1.

В конечно-разностном виде система (2-12) для i -го кольцевого элемента имеет вид:

$$\begin{aligned}(\Delta e_\varphi)_i &= \ln \frac{R_i}{R_{i-1}}, \\(\Delta e_r)_i &= \ln \frac{t_i}{t_{i-1}}, \\(\Delta e_t)_i &= \ln \frac{l_i}{l_{i-1}}, \\(\Delta e_\lambda)_i &= \frac{1}{\sqrt{1-\mu_r^2}} \sqrt{(\Delta e_\varphi)_i^2 + (\Delta e_r)_i^2 + 2\mu_r (\Delta e_\varphi)_i (\Delta e_r)_i}, \\(\sigma_\lambda)_i &= a_0 + a_1 \ln \lambda_i + a_2 (\ln \lambda_i)^2, \\\lambda_i &= \frac{(2R_0 - t_0)t_0}{(2R_i - t_i)t_i}, \\(\sigma_r)_i &= -\frac{\mu_r}{1-\mu_r^2} \left(\frac{\sigma_\lambda}{\Delta e_\lambda} \right)_i \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) (\Delta e_\varphi)_i + \frac{(\Delta e_r)_i}{\mu_r} \right], \\(\sigma_\varphi)_i &= -\frac{\mu_r}{1-\mu_r^2} \left(\frac{\sigma_\lambda}{\Delta e_\lambda} \right)_i \left[\left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right) (\Delta e_\varphi)_i - (\Delta e_r)_i \right], \\P_i &= \frac{(\sigma_\varphi)_i t_i \cos \alpha_i}{R_i}.\end{aligned}$$

Дифференциальное уравнение равновесия (10) после приближенного интегрирования по методу трапеций на отрезке $[R_{i-1}, R_i]$ для нагруженной трубы имеет вид:

$$(\sigma, R)_i - (\sigma, R)_{i-1} = \frac{R_i - R_{i-1}}{2} \left[\left(\sigma_{\varphi} l + \frac{fPR}{\sin \alpha} \right)_{i-1} + \left(\sigma_{\varphi} l + \frac{fPR}{\sin \alpha} \right)_i \right], \quad (21)$$

где $\left(\sigma_{\varphi} l + \frac{fPR}{\sin \alpha} \right)_{i-1}$ и $\left(\sigma_{\varphi} l + \frac{fPR}{\sin \alpha} \right)_i$ соответственно основания трапеции, $R_i - R_{i-1}$ - ее высота.

Модуль Кармана

$$k = \frac{4 \frac{(\sigma_h)_i - (\sigma_h)_{i-1}}{(e_h)_i - (e_h)_{i-1}}}{\left[E_i + \sqrt{\frac{(\sigma_h)_i - (\sigma_h)_{i-1}}{(e_h)_i - (e_h)_{i-1}}} \right]^2}$$

Процесс вычисления параметров полей напряжений и деформаций начинается на входном участке для трубы со значений $i=1$. Геометрия первого кольцевого элемента в процессе волочения труб является величиной неопределенной. Для численного решения системы конечных алгебраических уравнений, заданных в неявном виде относительно переменной R , исходя из анализа априорной информации, рассматривается на первой итерации возможное грубое изменение длины кольцевого элемента l_i на отрезке $[l_0 - \Delta l, l_0 + \Delta l]$, где $\Delta l = 0,05l_0$. Корень уравнения (21), определяющий геометрию рассматриваемого элемента лежит внутри этого отрезка.

Другие геометрические параметры деформации кольцевого элемента однозначно определяются по формуле, выражающей постоянство объема выделенного кольца в исходном и деформированном состояниях:

$$l_i = \frac{l_0 R_0}{R_i} \quad (22)$$

и уравнением конической поверхности рабочего канала волокна

$$R_i = R_0 - l_i \sin \alpha.$$

Для приближенного отыскания корня дифференциального уравнения равновесия (21) использовался метод половинного деления отрезка (метод «вилки»). Отрезок $[l_0 - \Delta l, l_0 + \Delta l]$ делился пополам и из полученных отрезков

выбирался тот, на концах которого уравнение (21) имело разные знаки. Метод «вилки» позволяет вычислить искомый корень с любой точностью, если взять достаточно большое число итераций N .

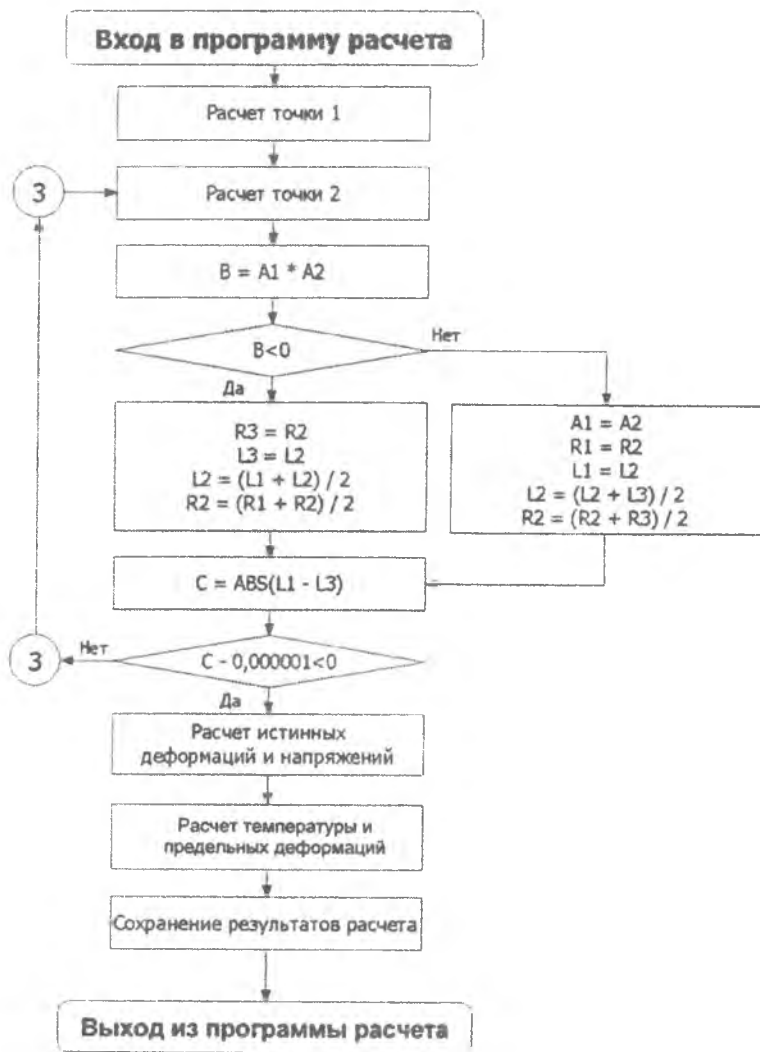


Рис. 3 - Алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния кольцевого элемента.

Этот метод удобен тем, что требуют одностипных вычислительных операций, легко реализуемых на ЭВМ. Корень уравнения (21) определяем с точностью определения переменной l_i :

$$|l_i^{N+1} - l_i| \leq \Delta_1, \quad (23)$$

где $N+1, N$ - номера последовательных приближений, Δ_1 - точность вычислений

$$\Delta_1 = \Delta l \cdot 2^{N+1} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

По найденным значениям геометрических размеров первого кольцевого элемента находили истинные деформации и напряжения, которые в пределах одного элемента являются постоянными величинами, рис. 3. Затем рассматривался следующий кольцевой элемент $k=2$, по отношению, к которому предыдущий элемент является нулевым, а его параметры напряженно-деформированного состояния будут граничными условиями элемента два и т.д.

Конечные деформации в каждом последующем кольцевом элементе находили путем суммирования деформаций, по отношению к последующему элементу, и конечных деформаций предыдущего элемента:

$$\begin{aligned} (e_r)_i &= (e_r)_{i-1} + (\Delta e_r)_i, \\ (e_\varphi)_i &= (e_\varphi)_{i-1} + (\Delta e_\varphi)_i, \\ (e_z)_i &= (e_z)_{i-1} + (\Delta e_z)_i, \\ (\bar{e}_r)_i &= (\bar{e}_r)_{i-1} + (\Delta \bar{e}_r)_i. \end{aligned} \quad (24)$$

При прохождении рассматриваемого кольцевого элемента через радиусный участок обжимного канала волокна вначале находится полуугол рабочего конуса волокна α_1 , по формуле (11). Затем аналогичным образом, как и для конической части, рассматривается напряженно-деформированное состояние элемента. Далее определяется следующий угол конуса волокна α_{i+1} и т.д. Расчет проводится до $R_i \leq R_k$, где R_k - конечный наружный радиус трубы.

После прохождения рассматриваемым элементом радиусного участка обжимного канала волокна фиксировалось значение контактного напряжения на границе труба - волокна, а затем рассматривались напряжения на калибрующем участке. После интегрирования (12) по методу трапеций для i -го элемента:

$$(\sigma_i)_i - (\sigma_i)_{i-1} = \frac{l_i - l_{i-1}}{l_i} f \cdot P. \quad (25)$$

Таким образом, перемещая рассматриваемый кольцевой элемент по образующей канала волокна, находим поля напряжений и деформаций. Этот метод удобен тем, что требует одинаковых вычислительных процедур.

На выходе из канала волокна рассчитывается усилие волочения, действующее на готовую трубу, по формуле:

$$P_s = (\sigma_i)_i \pi (2R_i - t_i) t_i,$$

а также коэффициент запаса прочности

$$K_s = \frac{\sigma_{TK} \pi (2R_i - t_i) t_i}{P_s},$$

где σ_{TK} - предел текучести материала нагартованной трубы на выходе из волокна, t_i - конечная толщина стенки.

Устойчивый процесс волочения, как показано в работе [1], обеспечивается при коэффициенте запаса прочности $K_s \geq 1,1 - 1,2$.

Определение силовых условий позволяет получить необходимые данные для проектирования, а также сравнить различные маршруты волочения путем сопоставления значений усилий волочения.

На входе и выходе из очага деформации в коническом канале имеет место изгиб поперечных сечений трубы на величину угла α . Для определения величины продольного напряжения, затрачиваемого на формоизменение на соответствующих участках, использовали энергетический подход [17].

Мощность, расходуемую на изгиб сечения при входе и выходе из очага деформации, на каждом участке определяли по формуле

$$N_{\text{из}} = N_{\text{срез}} = \iint_{F_{\text{ср}}} \tau v_{\text{ср}} dF_{\text{ср}},$$

Здесь τ - напряжение сдвига, $v_{\text{ср}}$ - скорость среза, $F_{\text{ср}}$ - площадь среза.

Напряжения, затрачиваемые на изгиб сечений, находили из формул

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{N_{\text{из}}}{V_s}, \quad \sigma_{\text{срез}} = \frac{N_{\text{срез}}}{V_s},$$

где V_s - скорость волочения.

Окончательно имеем

$$\sigma_{\epsilon_{\max}} = 0,08 \cdot \operatorname{tg} \alpha \frac{1}{\lambda} \cdot \sigma_{\text{ТН}} \cdot \sigma_{\epsilon_{\max}} = 0,08 \cdot \operatorname{tg} \alpha \frac{1}{\lambda} \cdot \sigma_{\text{ТК}},$$

где $\sigma_{\text{ТН}}$ и $\sigma_{\text{ТК}}$ - пределы текучести металла трубы на входе и выходе из очага деформации.

При радиусном переходе от конуса к калибрующему пояску принимаем $\sigma_{\epsilon_{\max}} = 0$. При отсутствии радиусного перехода $\sigma_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon_1} + \sigma_{\epsilon_{\max}}$.

При входе в очаг деформации на границе упругой и пластической зон для первого элемента без учета противонапряжения

$$\sigma_{\epsilon_{\max}} \cdot \sigma_{\epsilon_{\max}}, \sigma_{\epsilon_{\max}} = P = 0, \epsilon_{\epsilon} = \epsilon, \epsilon = 0.$$

После окончания безправочного волочения труб наблюдается некоторая усадка по диаметру, вызванная внеконтактной деформацией в точке перехода от конуса к калибрующему пояску.

Наружный диаметр трубы после волочения можно найти по формуле, предложенной в работе [18].

$$D_1 = \left[D_s - (2 - R_p - t_k)(1 - \cos \alpha) \left(1 + 1,1 \frac{(\sigma_1)_k}{2E_1} \right) \right],$$

где D_s - диаметр волоки;

R_p - радиус дуги перехода от конуса к калибрующему пояску,

E_1 - модуль упругости материала трубы в направлении оси волочения,

$(\sigma_1)_k$ - напряжение волочения в выходном сечении.

В случае радиальных волок величина усадки значительно уменьшается и находится по формуле

$$D_1 = D_s \left(1 + 1,1 \frac{(\sigma_1)_k}{2E_1} \right)$$

Математическая модель реализована в виде пакета программ автоматизации проектирования процесса безправочного волочения тонкостенных труб в среде программирования Delphi 7.0.

Адекватность модели.

В качестве базового варианта численного эксперимента на компьютере исследовано напряженно-деформированное состояние при безправочном волочении отожженной тонкостенной медной трубы из сплава МЗ со следующими исходными данными:

начальный радиус трубной заготовки.....	$R_0 = 9\text{мм};$
конечный радиус готовой трубы.....	$R_t = 7\text{мм};$
исходная толщина стенки трубы.....	$t_0 = 1,0\text{мм};$
коэффициент вытяжки.....	$\lambda = 1,31;$
угла конусности конического участка волок.....	$\alpha = 0,21\text{рад};$
радиусный переход к калибрующему участку.....	$R_p = 80\text{мм};$
длина калибрующего пояска.....	$l_{\text{кал}} = 8\text{мм};$
коэффициент внешнего трения по волоке.....	$f = 0,12;$
коэффициент анизотропии материала трубы.....	$\mu_r = 0,47;$
предел прочности при растяжении.....	$\sigma_r = 375\text{МПа};$
модуль упругости.....	$E = 132000\text{МПа};$
закон упрочнения материала трубы.....	$(\sigma_r)_i = 75 + 1468 \ln \lambda_i - 1880 (\ln \lambda_i)^2,$

где $\lambda_i = (R_0 - 0,5t_0) / (R_i - 0,5t_i)$.

Для выбора минимального числа кольцевых элементов K , на которые разбивается очаг деформации, проводили исследования результатов расчета на интегральный параметр процесса - усилие безправочного волочения P_r , рис. 4. Из графика видно, что при $K > 15$ «машинная» ошибка при вычислениях на компьютере усилия P_r составляет не более одного процента. Поэтому в последующих расчетах полей напряжений и деформаций начальную длину кольцевого элемента выбирали из условия $K \geq 15$.

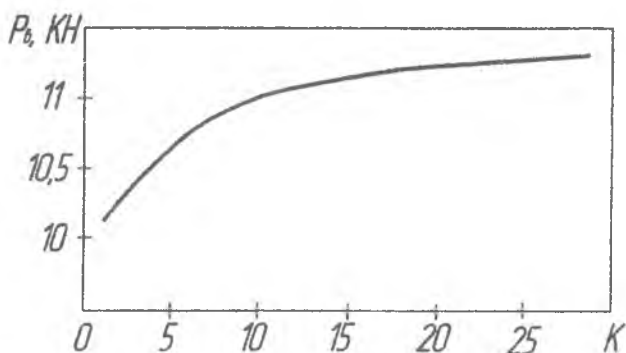


Рис. 4 - Влияние числа кольцевых элементов разбиения на изменение усилия волочения.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные данные напряжения волочения σ_l и деформации по толщине стенки e_r , полученные при волочении труб указанных выше размеров на универсальной испытательной установке ЦДМУ-30. В качестве смазки использовали масло «Индустриальное 20». В экспериментах напряжение волочения замеряли с точностью ± 2 МПа, толщину стенки трубы на выходе из волоки с точностью $\pm 0,01$ мм.

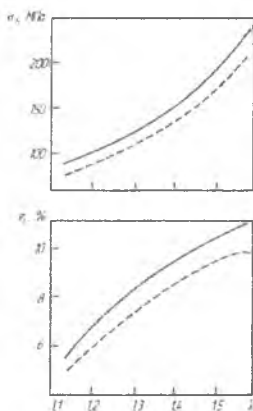


Рис. 5 - Экспериментальная проверка математической модели:

----- эксперимент, - расчет.

Анализ показывает, что экспериментальные и расчетные значения параметров напряженно-деформированного состояния отличаются друг от друга при вытяжке $\lambda = 1,5$ по напряжениям на 13 %, по деформациям на 11 %.

Влияние технологических параметров.

На рис. 6 представлены расчетные данные толщины стенки готовой трубы t_k в зависимости от коэффициента вытяжки, коэффициента анизотропии, коэффициента трения, угла конуса образующей канала волокна, исходной толщины стенки и отношения диаметра заготовки к толщине стенки [19]. Результаты получены на ЭВМ при безоправочном волочении тонкостенной алюминиевой трубы из сплава Д16 со следующими исходными данными: интенсивность напряжений (закон упрочнения) $\sigma_s = 163 + 474 \ln \lambda - 542 (\ln \lambda)^2$; толщина стенки трубы $t_0 = 1,5$ мм; отношение $D_0 / t_0 = 12$; длина калибрующего пояса $l_{\text{кал}} = 8$ мм; коэффициент трения $f = 0,1$; коэффициент вытяжки $\lambda = 1,34$, радиусный переход $R_p = 1$ мм.

Из рис. 6а видно, что для трубы с отношением $\frac{D_0}{t_0} = 12$ имеет место утолщение стенки, причем с увеличением коэффициента вытяжки интенсивность нарастания утолщения стенки уменьшается.

На рис. 6б – 6е приведены графики изменения толщины стенки при коэффициенте вытяжки $\lambda = 1,34$ в зависимости от различных параметров процесса. На рис. 6б приведен график изменения толщины стенки готовой трубы в зависимости от коэффициента анизотропии μ_r . Из графика видно, что чем меньше коэффициент анизотропии, тем больше утолщение. Увеличение μ_r приводит к уменьшению утолщения. Поэтому при одних и тех же условиях волочения, трубы из разных материалов имеют различное утолщение стенки. Из рис. 6в следует, что с увеличением коэффициента трения f между волокой и трубой, утолщение стенки уменьшается. Это связано с тем, что чем больше трение, тем больше усилие волочения, что влечет за собой увеличение

продольной деформации ϵ , а, следовательно, уменьшение деформации утолщения стенки. На рис. 6г показано, что при волочении труб через конические волокна с углами от 6° до 9° , утолщение стенки сначала увеличивается, а затем, при волочении через конические волокна с углами от 9° до 18° - уменьшается. Такой характер изменения утолщения можно связать с аналогичным характером изменения усилия волочения. При углах 8° - 10° усилие волочения минимальное.

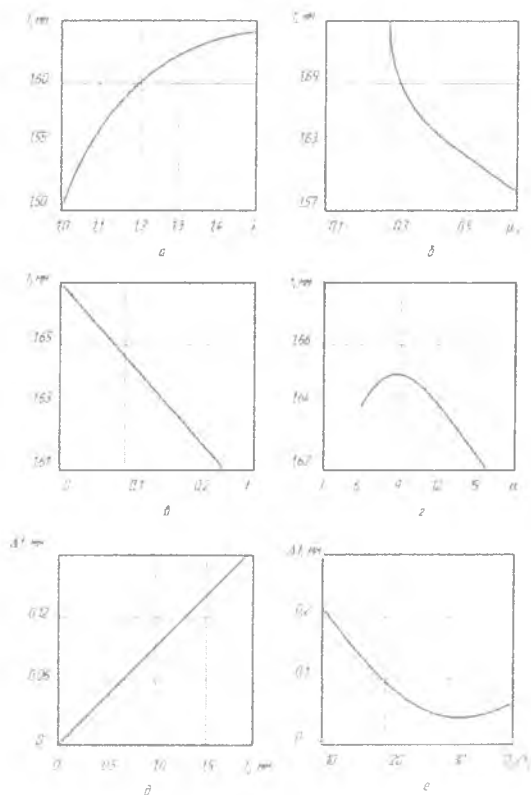


Рис. 6 - Зависимости изменения толщины стенки трубы от коэффициента вытяжки (а), коэффициента анизотропии (б), коэффициента трения (в), угла конуса образующей канала волокна (г), исходной толщины стенки (д) и отношения диаметра заготовки к толщине стенки (е).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что утолщение стенки готовой трубы пропорционально толщине стенки исходной трубы t_0 (рис. 6д), а возрастание величины отношения $\frac{D_1}{t_0}$ уменьшает утолщение стенки (рис. 6е).

Устойчивость осаживаемой волочением трубы в очаг деформации неодинакова по длине канала волокна из-за изменения соотношения D/t по длине этой зоны и окружающих сжимающих напряжений $\sigma_\phi / \sigma_{II}$. Наиболее вероятным местом потери устойчивости является выход из очага деформации, где окружные напряжения достигают максимальных значений, приводящих к образованию складки.

На основании расчетов на ЭВМ получен график допустимых деформаций с учетом устойчивости и рекомендуемых практикой вытяжек для труб из сплава Д16, рис. 7. Как видно из рисунка, величина предельной вытяжки понижается с увеличением диаметра трубы. Это, по-видимому обусловлено увеличением контактной поверхности трения при возрастании диаметра труб.

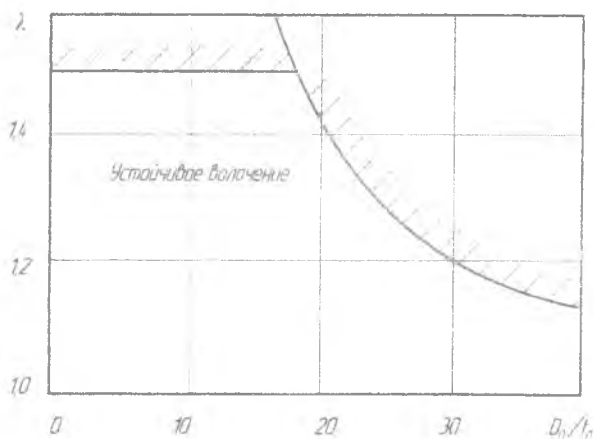


Рис. 7 – Область устойчивости процесса волочения.

Таким образом, предложенная математическая модель учитывает влияние реального профиля канала волокна и дает более полную и достоверную информацию о процессе безправочного волочения тонкостенных

анизотропных труб. Расчеты по разработанному для ЭВМ алгоритму дают возможность быстрого анализа процесса безправочного волочения, в том числе в блок волок различной конфигурации, и выбора наиболее подходящих к данным конкретным условиям параметров процесса и инструмента.

1.2 Анизотропия механических свойств

В расчетах при безправочном волочении тонкостенных труб необходимо знать величину показателей анизотропии механических свойств трубных заготовок.

В трубной заготовке возможны три частных случая трансверсальной изотропии свойств, которые определяются напряжениями по отношению к осям, рис. 8. Примем, что главная ось анизотропии 1 совпадает с осью волочения, а главные оси анизотропии 2 и 3 расположены в плоскости поперечного сечения тонкостенной трубной заготовки. Если симметрия свойств характеризуется семейством касательных плоскостей, то тонкостенная труба имеет цилиндрический вид анизотропии. Этому виду отвечает постоянство механических свойств в окружном и радиальном направлениях.

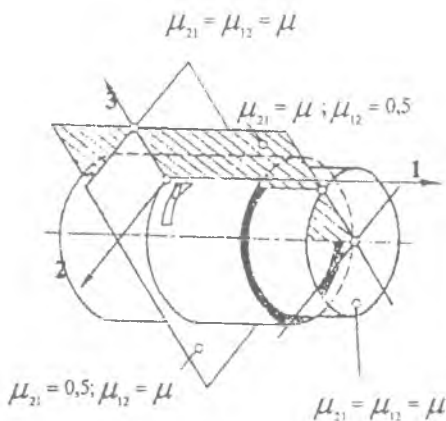


Рис. 8 – Симметрия механических свойств в трубных заготовках.

Трубы, имеющие продольную ($\mu_{31} = \mu; \mu_{12} = 0,5$) или секущую плоскость симметрии ($\mu_{21} = 0,5; \mu_{12} = \mu$) обычно характеризуются постоянством свойств в

этих плоскостях. При волочении тонкостенных труб принят второй случай, когда свойства в плоскости поперечного сечения трубы одинаковы, но отличны от свойств в продольном направлении.

Для определения анизотропии механических свойств тонкостенной трубной заготовки использовали показатели, применяемые при исследовании анизотропии листовых материалов [20]. Образцы для механических испытаний на анизотропию свойств изготавливали из развертки трубы, вырезанных под углами 0° и 90° к оси волочения. Считали, что деформация при правке образцов незначительна и на механические характеристики не оказывает заметного влияния. Для определения показателей анизотропии применяли стандартные испытания плоских образцов на растяжение по ГОСТ 1497-84 и формулу

$$\mu_q = -\frac{e_i}{e_j}$$

Здесь первый индекс показывает направление поперечного сечения испытываемого образца при действии растягивающей силы вдоль второго индекса.

$$\mu_r = \mu_{12} = -\frac{e_1}{e_2},$$

$$e_1 = \ln \frac{b}{b_0}, e_3 = \ln \frac{t}{t_0}, e_2 = e_1 + e_3.$$

Здесь e_1, e_2, e_3 - деформация в направлении ширины, длины и толщины образца соответственно;

b_0, b, t_0, t - осредненные начальные и конечные значения ширины и толщины образца соответственно по трем сечениям испытываемого образца.

Пределы текучести в направлении главных осей анизотропии 2 и 3 σ_{r2} и σ_{r3} находим путем пересчета по известному значению предела текучести в направлении оси анизотропии 1 σ_{r1} по формуле

$$\sigma_{r2} = \sigma_{r3} = \sqrt{\frac{\mu_{12}}{\mu_{21}}} = \sqrt{2\mu} \sigma_{r1}.$$

Коэффициент анизотропии μ в основном оказывает влияние на параметры деформации (рис. 9) [9].

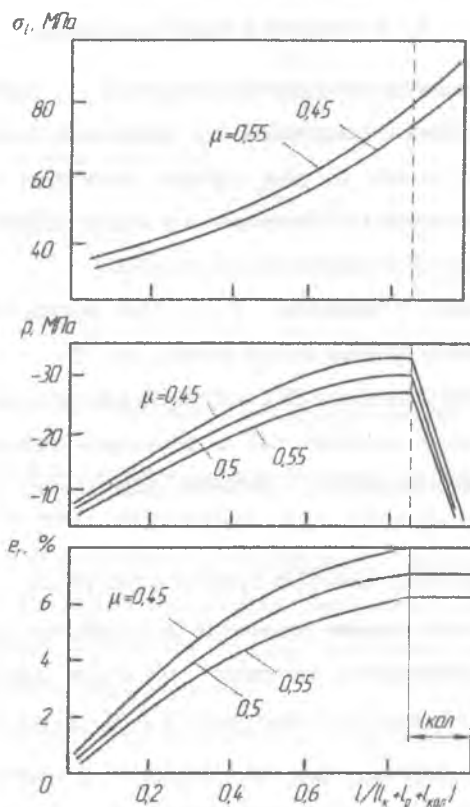


Рис. 9 - Влияние коэффициента анизотропия μ на распределение деформаций по длине канала волокна.

Так, с увеличением μ на 22 % накопленная деформация по толщине стенки ϵ , уменьшается на 30 %, продольные напряжения на 2,7 %, контактные напряжения ρ изменяются в отличие от продольных более интенсивно. Это связано с дополнительным влиянием на величину ρ толщины стенки трубы t . По величине μ , можно судить о склонности материала к преимущественному развитию деформации заготовки. При $\mu < 0,5$ материал склонен к

преимущественной деформации по толщине стенки, деформация в продольном направлении будет затруднена; при $\mu > 0,5$ — наоборот.

1.3 Конические и радиусные волокна

В практике волоочильного производства труб наиболее широко распространены волокна с конической и с радиальной формами продольного профиля рабочего канала. В ряде случаев применяют комбинированный профиль канала, состоящий из конического и калибрующего участков, плавно соединенных между собой радиусным участком [21].

При волочении с вытяжкой $\lambda = 1,34$ исследовались следующие «комбинации рабочего профиля канала волокна, рис. 10:

1. конический профиль CE с полууглом рабочего конуса α ;
2. конический профиль AD с полууглом рабочего конуса α и радиусным переходом DE с рабочим радиусом R_p (комбинированный профиль);
3. радиусный профиль CDE с рабочим радиусом R_p .

Из сопоставления влияния различных форм рабочего профиля канала на напряженно-деформированное состояние по длине рабочей зоны волокна $\xi = \ell(\ell_{\text{кон}} + \ell_p)$, где ℓ - текущая длина (рис. 11 и 12) видно что, конфигурация рабочего канала волокна оказывает заметное влияние на параметры деформированного состояния. При волочении трубы в радиусную волоку из-за увеличенного угла входа трубной заготовки в рабочую зону компоненты деформаций возрастают более интенсивно, чем при волочении тонкостенной трубы в коническую волоку. Особенно это выражено на графике радиальных деформаций ϵ_r . Утолщение стенки трубы происходит в основном при волочении в радиусную волоку в начале очага деформации. При волочении трубы в коническую волоку, толщина стенки нарастает по длине канала монотонно. Более равномерно деформируется труба при волочении в комбинированном канале волокна. Во всех случаях на выходе из волокна толщина стенки трубы оказалась равной 1,65 мм, утолщение составило 0,15 мм.

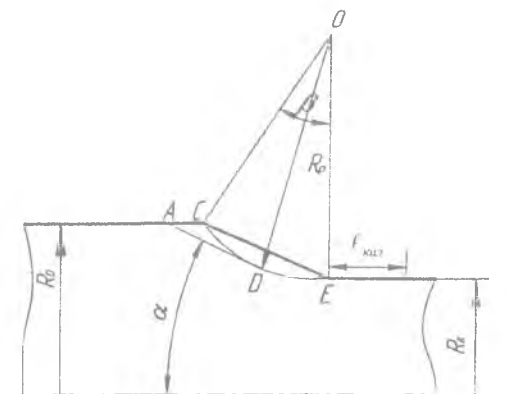


Рис. 10 - Профили рабочего канала волокна.

При конической форме канала волокна величина вытяжки по длине очага деформации постепенно увеличивается при одновременном упрочнении металла трубы, что нельзя считать целесообразным. При радиальной форме в начале очага деформации величина вытяжки наибольшая, по мере перехода к калибрующему пояску металл все больше упрочняется, но в тоже время уменьшается и соответствующая вытяжка.

Контактные давления в канале волокна по длине канала распределены по нелинейному закону. По абсолютной величине контактные давления значительно меньше продольных и окружных напряжений, особенно на выходе из обжимной зоны. При волочении трубы в коническую волоку экстремум давления, в отличие от традиционного представления, описанного в работе [9], наблюдается не на выходе, а около выхода из очага пластической деформации. При волочении в радиусную волоку экстремум смещается в сторону, направленную к входу в очаг деформации. При волочении в волоку с радиусным переходом экстремум находится в середине пластической зоны. В радиальной волоке уровень контактных напряжений на выходе из волокна ниже, чем в коническом канале, что обуславливает плавную разгрузку и повышенную эксплуатационную стойкость этих волок при волочении.

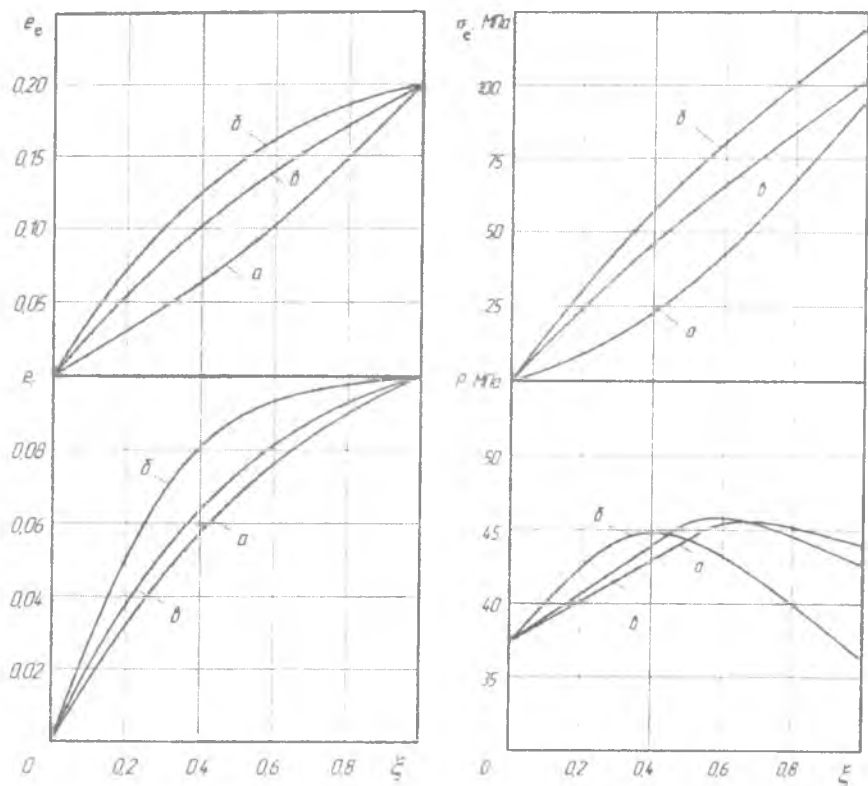
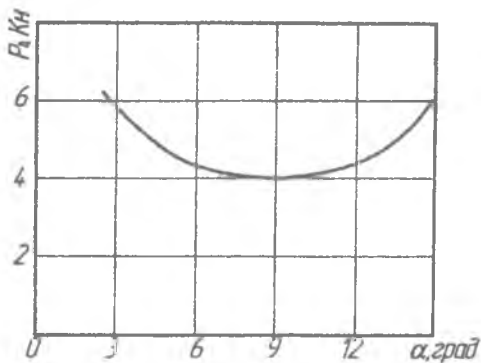
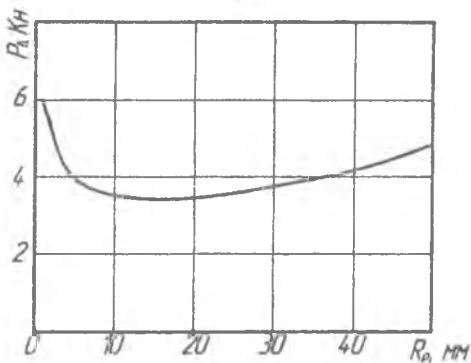


Рис. 11 - Распределение компонент деформаций по длине рабочего канала волоки: а - коническая волока ($\alpha = 0,21$), б - радиусная волока ($R_s = 100$ мм), в - комбинированная волока ($\alpha = 0,21$, $R_s = 30$ мм).

Очевидно, величина контактного давления, возникающая в канале волоки, зависит от природы материала трубной заготовки, условий внешнего трения, определяемых коэффициентом трения f , кривизны рабочей зоны канала, величины обжатий и т.д.



а



б

Рис. 12 - Влияние угла конусности α (а) и радиуса дуги R_p (б) рабочего канала волоки на усилие волочения P_d .

Из анализа кривых, изображенных на рис. 11 следует, что по мере продвижения металла вдоль волочильного канала напряжение волочения σ_t возрастает, достигая своего максимального значения на выходе из волоки. Как и следовало ожидать напряжение волочения выше при волочении тонкостенной трубы в радиусную волоку, чем при волочении в коническую волоку.

Усилие волочения в радиусную волоку при одних и тех же условиях составляет 5316Н, коническую волоку - 4358Н. Это больше усилия волочения в коническую волоку, что связано с увеличением протяженности зоны деформации. Радиусный переход от конического участка к радиусному не приводит к заметному росту усилия волочения, обеспечивает более равномерную деформацию.

В работе [1] в качестве основного требования к аналитическим зависимостям для расчета технологических параметров процесса волочения в конические волоки отмечено, что они должны показывать наличие зоны оптимальных углов канала волоки, где сила волочения минимальна, рис. 12а. Предлагаемая модель удовлетворяет этому требованию и отвечает значениям, наблюдаемым в эксперименте. Для радиальных волок также существует зона оптимальных радиусов канала, рис. 12б.

При конструировании радиусной волоки целесообразно, чтобы длина очага деформации для радиусной волоки была бы равна длине очага деформации конической волоки с учетом α . На выходе радиусной волоки $\alpha_R = 0$, на входе рекомендуется назначать $\alpha_R = 2\alpha$. Тогда средний угол для радиусной волоки равен углу конической волоки.

Длина очага пластической деформации для конической волоки.

$$l_k = \frac{R_0 - R_k}{\alpha}$$

для радиусной волоки

$$l_k = R_p \sin \beta,$$

где

$$\beta = \arccos \left(1 - \frac{R_0 - R_k}{R_p} \right)$$

Из равенства $l_k = l_R$, используя метод последовательных приближений, нетрудно найти значение R_p

$$\frac{R_0 - R_k}{\operatorname{tg} \alpha} = R_p \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{R_0 - R_k}{R_p} \right) \right].$$

Таким образом, оптимальным являются комбинированный профиль, включающий достоинства конической и радиусной волок.

1.4 Волочение с внутренним давлением

В настоящее время разработаны способы волочения труб на жидком сердечнике, когда внутрь трубы под давлением q подается либо вода [22], либо газ, либо вода замораживается [23], рис. 13.

Схема волочения труб с внутренним подпором близка к схемам волочения биметаллических и триметаллических труб и прутков [24,25], многоканальных составных труб [26], волочения труб на деформируемом сердечнике [27].

В такой постановке задачи Г. А. Смирновым-Аляевым в работе [28] дан теоретический анализ волочения, которое рассматривалось как деформация толстостенной трубы под действием внешнего и внутреннего давлений и растягивающей силы (задача Ламе), что приводит к большим погрешностям в расчетах полей напряжений и деформаций.

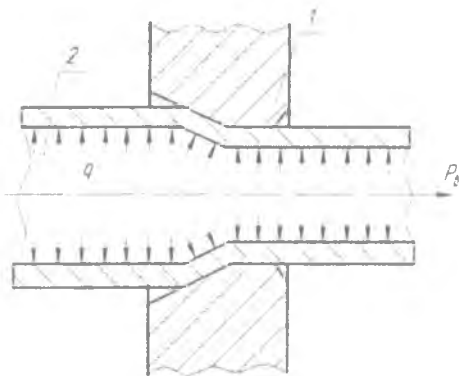


Рис. 13 - Схема волочения тонкостенной трубы с внутренним давлением: 1 - волок; 2 - трубная заготовка.

Для решения поставленной задачи использовали граничные условия на входе в волоку, где напряжения и деформации считали известными и равными:

$$\sigma_\theta = q \frac{R_0}{t_0}; \quad \sigma_r = P = 0;$$

$$e_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E}; \quad e_r = e, = 0,$$

где q – внутреннее давление;

E – модуль упругости материала трубы;

P – контактное давление на стенки волоки.

Уравнения равновесия:

$$\frac{P - q \cos(\beta - \alpha)}{t} = \frac{\sigma_\theta \cos \alpha}{R},$$

$$\frac{d}{dR}(\sigma_r R t) + \sigma_\theta t + \frac{fPR}{\sin \alpha} + qR(\beta - \alpha) = 0.$$

где β - угол наклона образующей внутренней поверхности кольцевого элемента.

На рис. 14 показан характер распределения напряжений (а) и деформаций (б) по длине рабочего канала волоки, полученный на ЭВМ при $\lambda = 1, 2$ [29].

Из сопоставления кривых видно, что внутреннее давление в трубе оказывает заметное влияние на параметры напряженно-деформированного состояния. При увеличении внутреннего давления существенно повышаются как продольное напряжение σ_r , так и контактное давление p на волоке.

При $q = 4$ МПа сила волочения возросла на 34 %, а коэффициент запаса при волочении снизился на 26 %. Экстремум контактного давления при $q = 0$ наблюдается на выходе трубы из канала волоки. При $q = 4$ МПа контактное давление по длине рабочего канала распределено более равномерно, чем при $q = 0$, а экстремум смещается к середине очага пластической деформации.

Под действием внутреннего давления изменяются также размеры трубы: толщина стенки уменьшается, а длина — увеличивается.

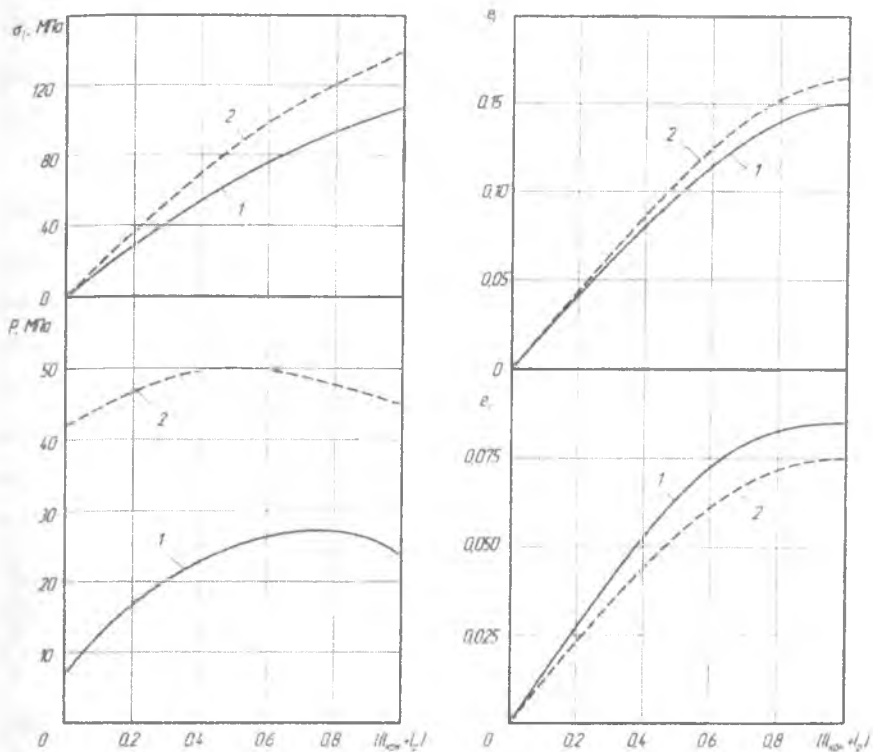


Рис. 14 - Характер распределения параметров напряженного (а) и деформированного (б) состояний по длине рабочего канала волокна: 1, 2 - $q = 0$ и 4 МПа.

1.5 Волочение с противонапряжением

При волочении тонкостенной трубы с противонапряжением, помимо тянущей силы P_s , прилагаемой к переднему заостренному концу трубы в направлении, совпадающем с направлением волочения, прилагается еще дополнительная сила противонапряжения P_{np} со стороны входа в волоку, направление которой противоположно направлению волочения, рис. 15.

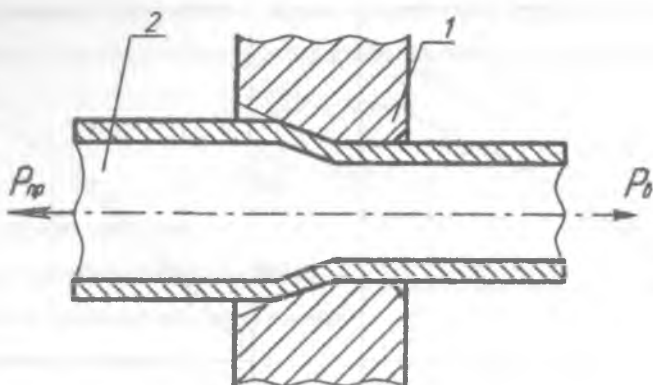


Рис. 15 - Схема волочения трубы с противонапряжением:

1- волока; 2 - трубная заготовка.

При волочении с противонапряжением, благодаря приложению к протягиваемой трубе двух противоположно направленных растягивающих сил, в ней, еще до соприкосновения со стенками канала инструмента, возникают упругие деформации. При определенном соотношении сил $P_{пр}$ и $P_{о}$ напряжение протягиваемого металла перед входом в канал волоки приближается к пределу текучести. Поэтому для осуществления пластической деформации металла в канале волоки необходимо приложить лишь сравнительно небольшое дополнительное давление волоочильного инструмента. Следовательно, при волочении с противонапряжением волоочильный инструмент испытывает меньшее давление со стороны протягиваемого металла, чем при обычном способе волочения и уменьшается выдавливание смазки из зоны деформации. Это приводит к уменьшению коэффициента контактного трения и повышению износостойкости канала волоки. При безправочном волочении противонапряжением может существенно уменьшить утолщение стенки трубы.

На рис. 16 представлены расчетные параметры напряженно-деформированного состояния по длине рабочего канала волоки в зависимости от противонапряжения при волочении алюминиевой трубы из сплава Д16 со следующими данными: диаметр заготовки $D_0 = 18$ мм, исходная толщина

стенки $t_0 = 1,5$ мм, коэффициент вытяжки $\lambda = 1,32$, $\sigma_1 = 163 + 374 \ln \lambda - 542 (\ln \lambda)^2$, угол конусности $\alpha = 0,21$ рад, радиусный переход $R_p = 1$ мм, длина калибрующего участка 8 мм, коэффициент трения $f = 0,1$.

Из сопоставления кривых на рис. 16 видно, что противонапряжение заметно увеличивает значения меридиональных деформаций e_1 . Длина готовой трубы при волочении с противонапряжением получается большей, чем при волочении без противонапряжения. Противонапряжение в начале очага пластической деформации существенно уменьшает утолщение стенки трубы по сравнению с обычным волочением, а затем к выходу из очага деформации способствует утонению стенки трубы. Изменение толщины стенки трубы в зависимости от величины противонапряжения составляет значительную величину - до 15 % от исходной толщины стенки. Регулируя величину противонапряжения на входе в волоку, возможно изменять утолщение стенки трубы и на выходе из волоки получать толщину стенки, равную толщине исходной заготовки.

Из сопоставления кривых на рис. 16 видно, что противонапряжение резко снижает давление металла на стенки волоки, соответственно уменьшает внешнее трение при волочении, и вследствие этого повышается стойкость волоки. При обычном волочении экстремум контактного давления наблюдается на выходе трубы из канала волоки, при противонапряжении $\sigma_{imp} = 100$ МПа экстремум смещается к входу в рабочий канал волоки. Меридиональное напряжение по длине канала волоки возрастает на величину напряжения противонапряжения.

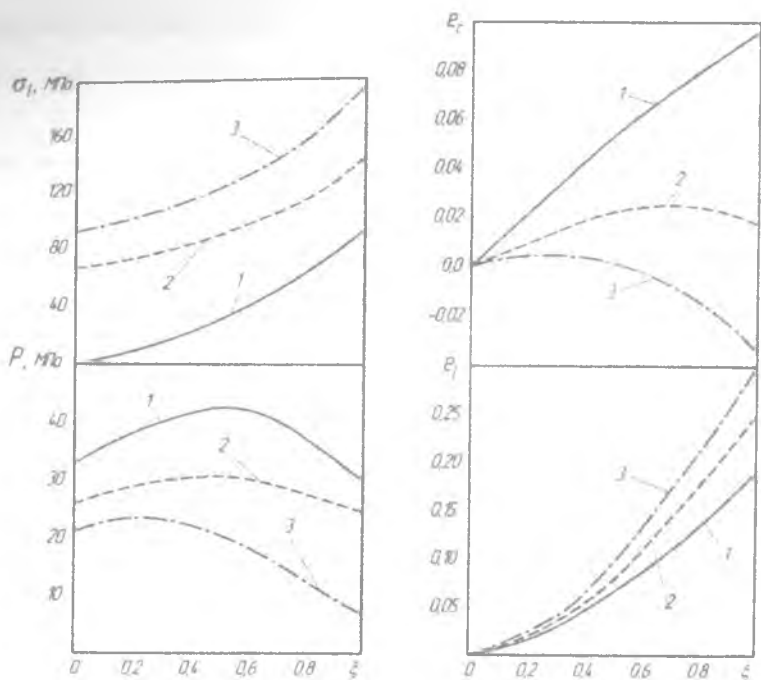


Рисунок 16 – Характер распределения параметров напряженного и деформированного состояния по длине рабочего канала волокна в зависимости от противонапряжения перед входом в волокно:

1) $\sigma_{bp} = 0$, 2) $\sigma_{bp} = 70 \text{ МПа}$, 3) $\sigma_{bp} = 100 \text{ МПа}$.

1.6 Волочение с подпором

При безоправочном волочении трубы с осевым подпором, помимо тянущей силы P , прикладываемой к переднему концу трубы в направлении, совпадающем с направлением волочения, прилагается еще дополнительная сила Q со стороны входа в волоку, направление которой совпадает с направлением волочения, рис. 17. Этот процесс применяется на труболовочильных станах новейшей конструкции [1].

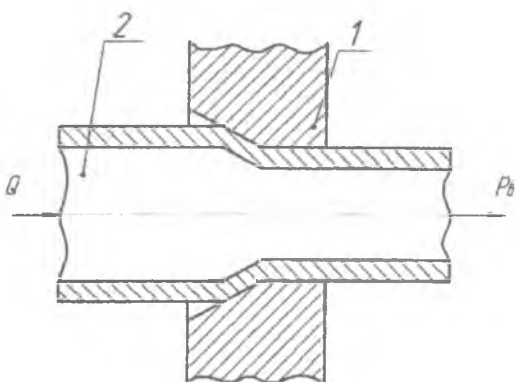


Рис. 17 – Схема волочения трубы с осевым подпором: 1 – волока; 2 – трубная заготовка.

Из анализа графиков на рис. 18 следует, что по мере продвижения металла трубы вдоль волочильного канала длиной $l_{\text{кан}}$ меридиональное напряжение возрастает, достигая своего максимального значения на выходе из канала волоки. Меридиональное напряжение больше при волочении тонкостенной трубы без подпора. Чем больше подпор, тем меньше σ_l при подпоре $q = Q/F_0 = 70$ МПа, осевое напряжение близко к нулю. По этой схеме реализуется процесс осадки трубы вдавливанием в волоку (обжим).

Окружные сжимающие напряжения и контактное давление P распределены по длине канала волоки по нелинейному закону, возрастая по абсолютной величине к выходу из канала волоки. Подпор со стороны входа заготовки в волоку вызывает увеличение σ_φ и P . Чем больше подпор, тем выше рост σ_φ и P . Величина тангенциальных деформаций не зависит от величины подпора. Подпор существенно влияет на величину меридиональных и радиальных деформаций ϵ_l и ϵ_r . Чем больше подпор, тем больше утолщается стенка трубы, а длина полученной трубы меньше, чем при традиционном волочении без осевого подпора.

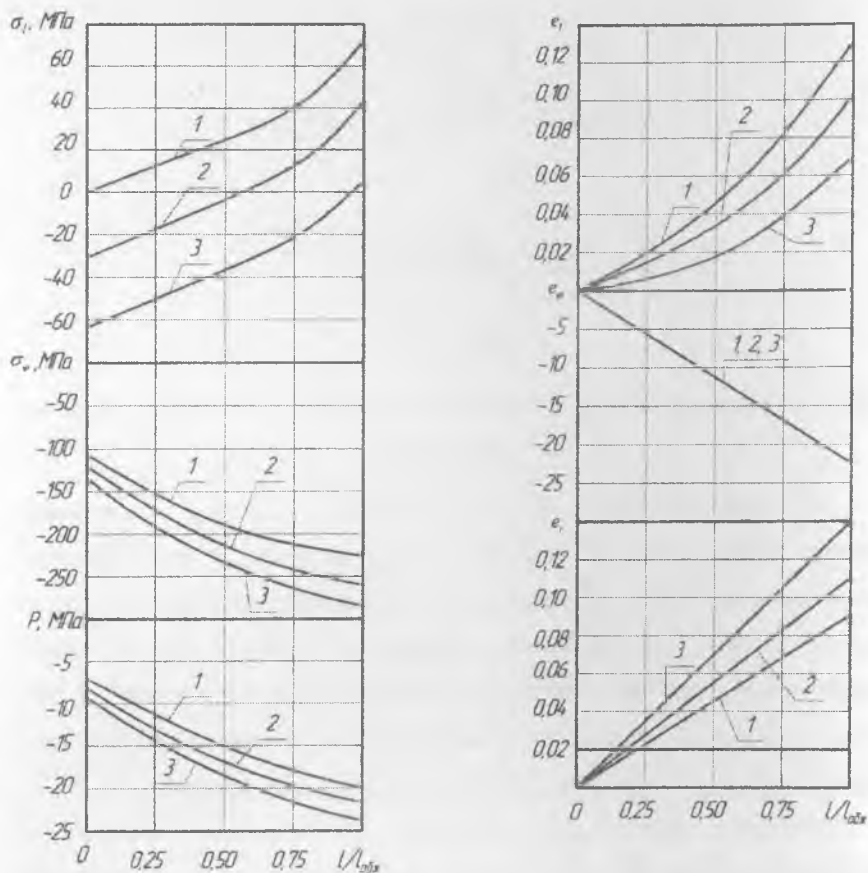


Рис. 18 - Распределение параметров напряженно-деформированного состояния по длине канала волокна: 1- $q = 0$ МПа, 2- $q = -30$ МПа, 3- $q = -70$ МПа,

1.7 Волочение в блок волок

В последнее время в трубной промышленности при безправочном волочении тонкостенных труб все шире начинают применять сдвоенные волокна, рис. 19.

При безправочном волочении труб из алюминия и его сплавов предельные вытяжки за переход весьма значительны и могут достигать 1,5 -

1,6. Однако эти вытяжки зачастую не могут быть реализованы в производственных условиях, так как при этом способе волочения величина вытяжки ограничивается не столько прочностными свойствами металла трубы, сколько качеством внутренней поверхности и устойчивостью поперечного сечения трубы. При безправочном волочении труб с ростом деформации заметно ухудшается внутренняя поверхность, приобретая вид так называемой «апельсиновой корки». При этом образуется определенная чешуйчатость, вызванная тем, что отдельные, по разному ориентированные зерна металла деформируются различно. В связи с этим при безправочном волочении вытяжки за переход не превышают 1,4 - 1,5. Чаще всего при безправочном волочении стараются увеличить дробность деформации путем установки в волокодержателе двух последовательно расположенных волок [7, 12, 18].

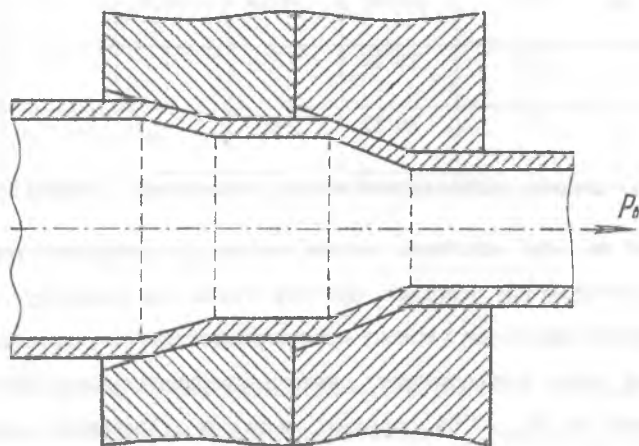


Рис. 19 - Схема безправочного волочения тонкостенных труб в две последовательно расположенные волокна.

Рекомендуемые в технической литературе [23] переходы безправочного волочения труб из алюминиевых сплавов с применением сдвоенных волок, приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Переходы безопрвоочного волочения труб в блок волок

Размеры готовой трубы, мм	Диаметр трубы после прокатки, мм	Диаметры * волок, мм, по переходам				
		I	II	III	IV	V
6x1	18	17/13	12/9	8/7	5,9	-
6x2	18	17/14	13/11	10/9	8/7	5,9
8x1	18	17/13	12/9	7,9	-	-
8x2	18	17/11	13/11	10/9	7,9	-
12x1	18	17/13	11,9	-	-	-
12x2	18	17/15	14/13	11,9	-	-
18x1	24	23/20	17,9	-	-	-
25x1	31	30/27	24,9	-	-	-

* Числитель – диаметр канала первой волоки, знаменатель – второй волоки.

Первая по ходу волочения волока служит для центровки трубы, а во второй осуществляется основное обжатие трубы по диаметру. Надежная центровка трубы при входе в волоку предотвращает изгибы при входе трубы в волоочильный канал и обеспечивает снижение неравномерности деформации, что позволяет на 10 - 15% повысить вытяжки за переход и уменьшить продольную кривизну труб после волочения.

Характерный вид диаграмм при волочении через две волоки представлен на рис. 20 (а), где P_{a1} - усилие волочения в первую волоку в начале волочения и при установившемся процессе волочения; P_{a2} - усилие волочения во вторую волоку при установившемся процессе волочения; P'_{a2} - усилие волочения во вторую волоку в конце процесса волочения.

Из рис. 20 (б) видно, что усилие в первой волоке $P_{\delta 1}$ в течение всего периода волочения остается постоянным и зависит от степени вытяжки трубы λ в этой волоке.

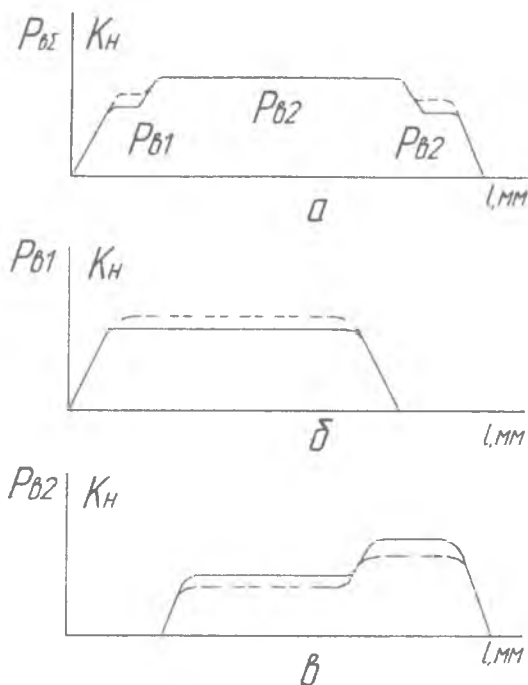


Рис. 20 - Характерный вид индикаторных диаграмм при безправочном волочении тонкостенных труб через две волокна: а - суммарное усилие, б - усилие в первой волоке, в - усилие во второй волоке: $-\lambda = 1,15$; $---\lambda = 1,34$

Из рис. 20 (в) видно, что усилие во второй волоке $P_{\delta 2}$ изменяется по величине в процессе волочения. Во время установившегося процесса волочения одновременно через две волокна усилие уменьшается за счет противонапряжения, а после окончания процесса волочения во входной (первой) волоке оно возрастает на величину

$$\Delta P'_{22} = P'_{22} - P_{22}$$

Тяговое усилие P_{22} и P'_{22} зависит от степени деформаций во входной волоке: чем больше деформация во входной волоке, тем меньше величины P_{22} и P'_{22} .

На рис. 21 приведены результаты моделирования на ЭВМ безоправочного волочения медной тонкостенной трубы $\varnothing 13$ из заготовки $\varnothing 18 \times 1,0$ через блок конических волок $\varnothing 17 - \varnothing 13$, $\varnothing 15 - \varnothing 13$ и $\varnothing 14 - \varnothing 13$. Из рис. 21 видно, что накопленные деформации по толщине стенки трубы e_r и по длине e_l зависят от распределение обжатий по волокам и изменяются по длине рабочих каналов волок. Более равномерное распределение радиальных и продольных деформаций по длине очага пластической деформации имеет место при коэффициенте вытяжки по среднему диаметру $\lambda = 1,21$. Отсюда следует рекомендация по выбору деформаций между волоками. Деформации в каждой волоке целесообразно назначать примерно одинаковыми, то есть $\lambda = \sqrt{\lambda_2}$, где λ_2 - суммарный коэффициент вытяжки при волочении трубы через блок волок за один проход.

Распределение деформаций между волоками, как видно из рис. 21 не влияет на конечные размеры готовой трубы, так как работы сил волочения во всех случаях одинаковы.

Из анализа графиков на рис. 21 следует, что напряжение волочения σ_l на выходе из волок также не зависит от распределения обжатий по волокам. Труба на участке между двумя волоками частично разгружается и находится в состоянии линейного напряженного состояния, что уменьшает вероятность потери устойчивости трубы при обжатии – это позволяет увеличивать обжатие тонкостенной трубы за проход. Противонапряжение, создаваемое первой волокой, увеличивает напряжение волочения во второй волоке.

Давление металла трубы на стенке волоки более равномерно распределено по длине рабочего канала в случае одинаковых деформаций по волокам. Вследствие этого равномерно изнашиваются обе волоки.

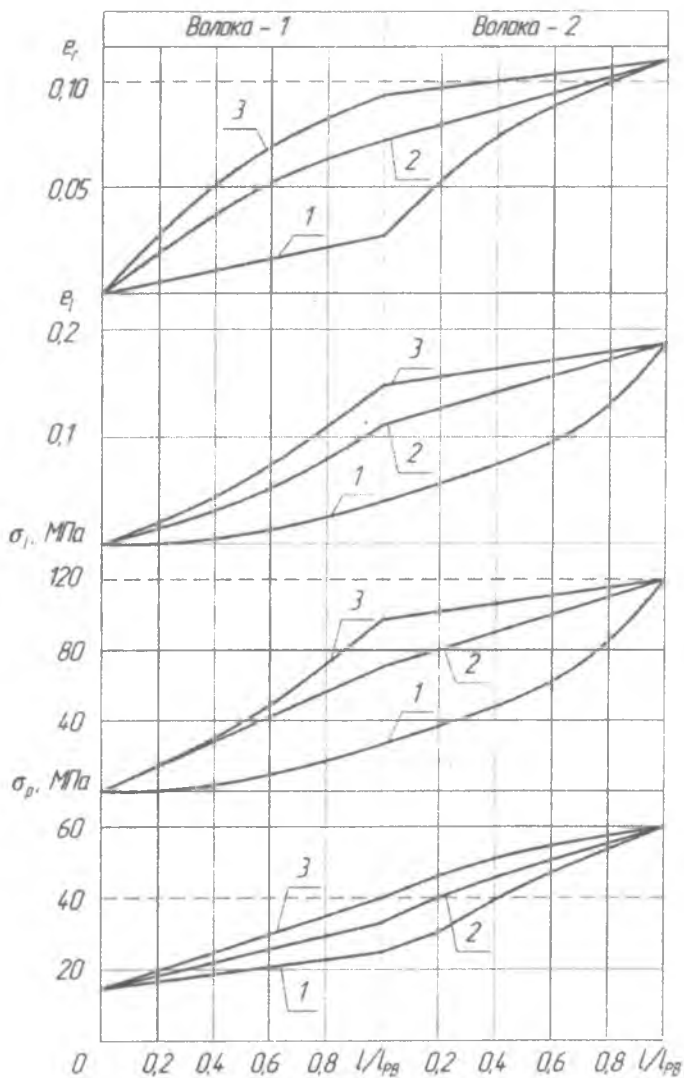


Рис. 21 - Распределение компонентов деформаций и напряжений при значении коэффициентов вытяжки в первой волоке: 1- $\lambda = 1,06$; 2- $\lambda = 1,21$; 3- $\lambda = 1,31$.

ГЛАВА 2 ВОЛОЧЕНИЕ С КРУЧЕНИЕМ

Один из перспективных путей совершенствования процесса волочения - использование системы внешних сил: усилия волочения и крутящего момента в плоскости, перпендикулярной оси волочения. В связи с этим для производства винтовых профилей и труб представляет интерес реализация способов волочения и конструкций технологического инструмента, в которых используется активное действие сил кручения.

Впервые волочение через принудительно вращаемые волокна было применено в 1931 г. Заксом и Линикусом для определения коэффициента трения и работы пластической деформации. В дальнейшем этот процесс был рекомендован А.Л.Тарнавским, В.Ф.Исуповым, Н.З.Днестровским и др. для частичного снижения усилия волочения проволоки, прутков и труб, увеличения обжатия заготовок за один проход. В работах А.И.Дорохова, Э.В.Никулина, Л.С.Шлосберга и др. была обоснована применимость процесса волочения с кручением и для производства винтовых полуфабрикатов.

2.1 Способы волочения

При совмещении волочения с кручением разработаны следующие альтернативные способы производства винтовых профилей и труб.

1. Кручение протягиваемой заготовки либо вращающимся захватом, установленным на тележке волочильного стана, либо принудительным вращением волокна (оправки) с винтовым каналом [33-35].
2. Кручение заготовки со стороны ее входа в волоку, например, под действием окружных усилий, приложенных к заднему концу заготовки [36,37].
3. Кручение заготовки между дистанционно расположенными волокнами, причем, одна из них с винтовым каналом принудительно вращается, а другая, с плоскими гранями на внутренней поверхности канала, остается неподвижной [38].

Для реализации волочения с кручением необходимо чтобы один из концов заготовки не проворачивался и удерживался от вращения. С этой целью со

стороны входа заготовки в волокна либо устанавливают вспомогательную профильную волоку, удерживающую задний конец заготовки от вращения [33,39], либо заготовку перед обжатием профилируют [37] или плюшат роликми [83].

На рис. 22 представлена иллюстрация первого способа волочения с кручением. Трубная заготовка 1 подается в волокна 3 и 4, закрепленные в волокодержателе 2 болтами 5. Волока 3 имеет фасонное сечение и служит для предотвращения проворота заднего конца заготовки относительно оси волочения за время кручения переднего конца. Кручение осуществляется вращающимся захватом 6, установленным на тележке волочильного стана 7. На участке кручения, расположенном между волокой 4 и захватом 6, каждая точка протянутой заготовки перемещается по винтовой линии в осевом направлении со скоростью волочения V_v и тангенциальном направлении со скоростью $V_t = \omega r$, где ω - угловая скорость вращения захвата, r - расстояние от оси волочения до рассматриваемой точки заготовки.

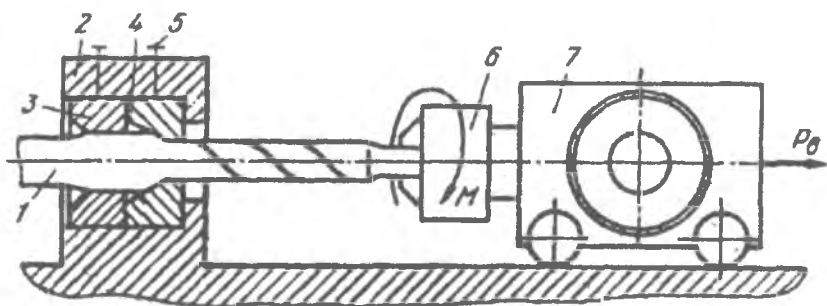


Рис. 22 - Способ волочения с кручением

Заготовка после выхода из очага деформации нагружена кроме усилия волочения P_0 , крутящим моментом M , вращающим заготовку, что предотвращает её искривление.

На рис. 23 представлена иллюстрация устройства для волочения тонкостенных труб с кручением [33,40]. Заготовка 2 пропускается через

разведенные ролики, задается в рабочую волоку 1 и зажимается вращающимся захватом 4 тележки 7. В начале процесса волочения под действием усилия корпус 3 волоки перемещается в направлении движения заготовки до упора в корпус 5 устройства. При этом профилированные ролики 6 сближаются и деформируют заготовку 2. По окончании волочения вся система пружинами возвращается в исходное положение.

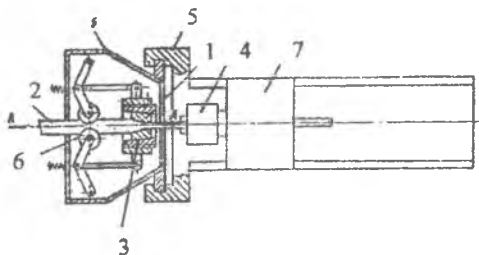


Рис. 23 - Устройство для волочения с кручением труб вращающимся захватом

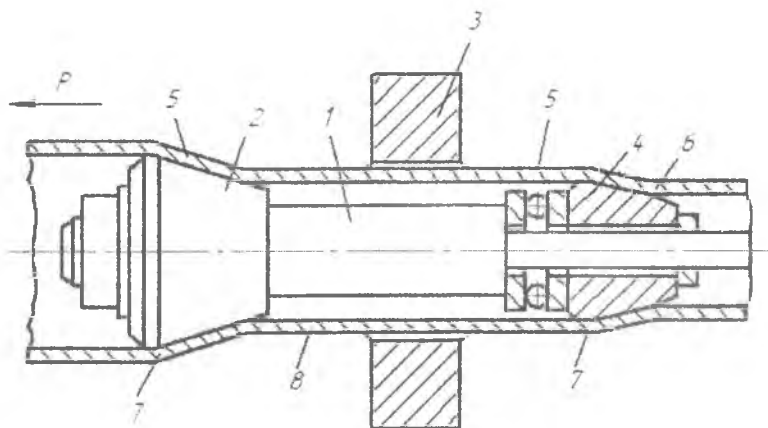


Рис. 24 - Способ волочения труб со скручиванием вращающейся втулкой

Волочение труб со скручиванием на рис.24 предложено осуществлять с помощью раздающих оправок 2 и 4, закрепленных на стержне [41]. Между оправками размещена вращающаяся втулка 3, скручивающая трубу. Оправка 2 жестко закреплена на стержне. Оправка 4 расположена перед втулкой 3 по ходу

волочения и установлена с возможностью свободного вращения и фиксации в осевом направлении.

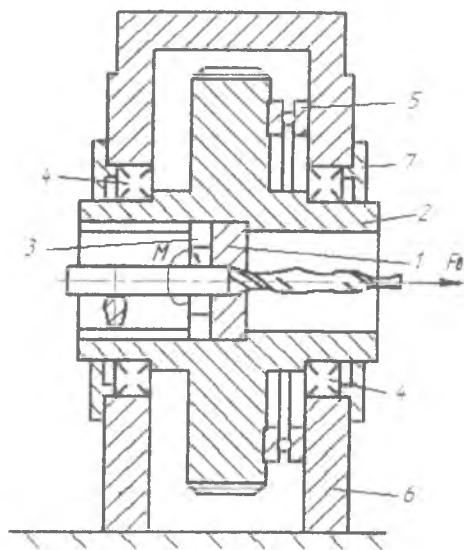


Рис. 25 - Устройство для волочения во вращаемой волоке

На рис. 25 показано устройство для волочения во вращаемую волоку. Волока 1 крепится к зубчатой обойме 2 с помощью гайки 3 и удерживается от проворота. Обойма 2 опирается на подшипники радиальные 4 и опорный 5. Фиксируется обойма 2 в корпусе 6 крышками 7.

Число оборотов волоки (захвата)

$$N = \theta l / (2\pi) \quad (26)$$

где l - длина скручиваемой заготовки.

Угловая скорость вращения волоки (захвата) выбирается так, чтобы

$$\omega = N / \tau, \quad (27)$$

где время, необходимое для волочения одной заготовки,

$$\tau = l / v_B \quad (28)$$

Подставим (26) и (28) в (27), получим

$$\omega = \theta v_B / (2\pi)$$

В способе [42] для предотвращения искривления (правки) длинномерных изделий заготовку одновременно, но с различными скоростями, вращают со стороны входа и выхода ее из очага пластической деформации. Причем скорость вращения заготовки перед очагом деформации превышает скорость ее вращения после очага деформации. Например, заготовку до входа в очаг деформации вращают приводной соединительной головкой и протягивают ее вращающимся захватом, установленным на волочильной тележке стана. Так как скорости закручивания разные, то в очаге деформации имеет место деформация сдвига. Причем по длине очага деформации найдется нейтральное сечение, в котором протягиваемая заготовка не нагружена моментом. Вращением протянутого участка достигается непрерывное изменение его положения в плоскости провисания, что предотвращает искривление готовых изделий.

Для стабилизации процесса волочения и его интенсификации волочильный инструмент целесообразно вращать в сторону, противоположную вращению заготовки [43,44]. В этом случае к волочильному инструменту прикладывают крутящий момент, по абсолютной величине, больше крутящего момента, прикладываемого к заготовке. Заготовка перед входом в очаг деформации нагружена крутящим моментом и металл поступает в пластическую зону в предварительно напряженном состоянии чистого сдвига, что снижает контактное напряжение σ_c , особенно на входе в очаг деформации.

Вращение волокна в противоположную сторону позволяет управлять не только величиной момента, но и напряжением волочения на готовом изделии, тем самым увеличивать резерв прочности протягиваемого изделия. В пластической зоне со стороны входа и выхода из нее возникают касательные напряжения кручения разного знака, что способствует увеличению пластичности металла.

Предложены устройства для кручения заготовки между дистанционно расположенными волоками, причем одна из них с винтовым каналом

принудительно вращается, а другая с плоскими гранями остается неподвижной [33,45].

Закручивание трубной заготовки перед входом в волоку предлагается устройством [47] монтируемым на станине волочильного стана. Перед волокой 1, соосно с ней устанавливают обойму 2 с приводом вращения, на внутренней поверхности которой выполнены винтовые канавки 3 с переменным по длине шагом, увеличивающимся в направлении волочения, что улучшает захват заготовки 4 и обеспечивает режим волочения с подпором и преимущественным действием крутящего момента на протягиваемую заготовку, (рис. 26).

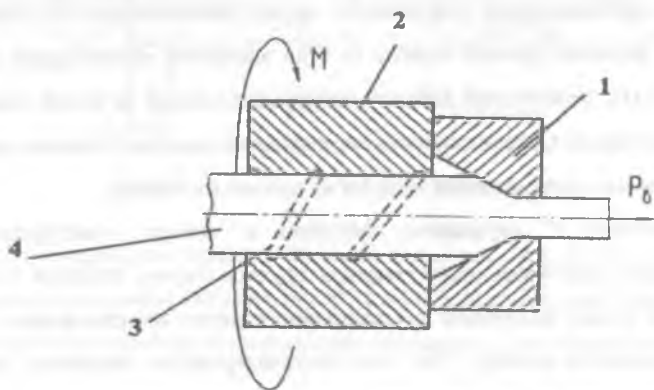


Рис. 26 - Устройство для совмещения волочения с кручением заготовки перед входом в волоку

С целью благоприятного захвата технологической смазки в зону очага деформации, а, следовательно, уменьшения обрывности протягиваемых труб и повышения стойкости волоки предлагается осуществлять предварительное внешнее обкатывание трубы инструментом, формирующим на заготовке винтовую поверхность [48].

Для создания подпирющего усилия со стороны входа заготовки в волоку, снижающего тяговые нагрузки при волочении, перед волокой установлены две обоймы, вращаемые в противоположные стороны. На внутренней поверхности обойм выполнены винтообразные углубления [49].

Закручивание прямошовной сварной заготовки перед волокой до положения сварного шва по винтовой линии с предпочтительным углом подъема $0,5-1^{\circ}$ повышает стойкость волок и улучшает качество поверхности труб за счет уменьшения налипания металла шва на поверхность волоочильного инструмента [46].

В устройстве [50] с целью снижения усилия волочение проводят через две волокни, вращаемые в противоположные стороны, причем оси каналов волок располагают под углом к оси волочения.

Для повышения производительности и улучшения качества труб с гладкими поверхностями деформацию трубы рекомендуется осуществлять в волоке на оправке, причем одному из этих элементов инструмента сообщают вращение [51]. Вращаемый элемент инструмента имеет на своей поверхности винтовые канавки. Осевая скорость перемещения винтовых канавок превышает осевую скорость перемещения металла на выходе из волоки.

Волочение с кручением заложено в основу конструкции стана однократного волочения калибровочных прутков фирмы Stelblock (Гамильтон Канада). В стане волочение осуществляется через вращающуюся вместе с волокодержателем волоку. При этом волокодержатель закреплен на шкиве, который получает вращение от электродвигателя через редуктор.

2.2 Волочение через вращаемую волоку

При безправочном волочении тонкостенных труб через вращаемые волокни [31,32] контактная поверхность волоки перемещается относительно трубной заготовки по винтовой линии со скоростью в точке А $V_{\text{мА}}$ (рис.27), ее составляющие:

$$V_{\text{мА}} = \omega R_A = 2\pi n R_A, V_{\text{мА}} = V_s \frac{F_s}{F_A},$$

где ω - угловая скорость вращения волоки; R_A - расстояние рассматриваемой точки А от оси вращения, совпадающей с осью волочения; n - число оборотов

волокни в минуту; V_v - скорость волочения; $V_{окл}$ - скорость перемещения в направлении вращения; $V_{окл}$ - скорость перемещения в направлении волочения; F_A - площадь поперечного сечения трубы, проходящей через точку А; F_k - площадь поперечного сечения готовой трубы.

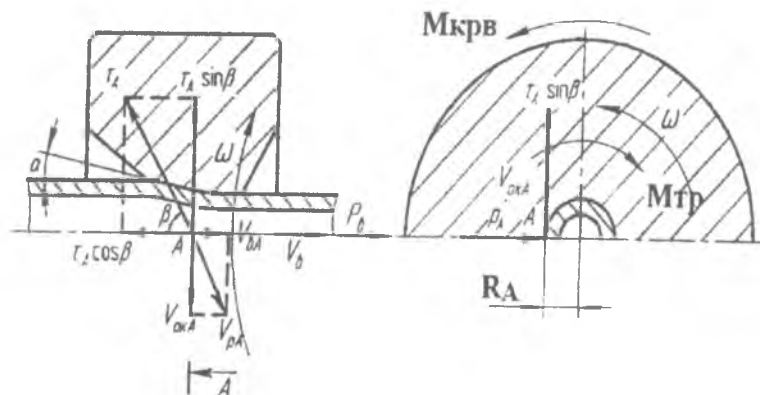


Рисунок 27 - Напряжения трения и скорости движения в канале вращающейся волоки на границе контакта поверхностей инструмент-заготовка
Положение результирующего вектора скорости $V_{окл}$ определяется углом

$$\beta = \arctg \frac{V_{окл}}{V_v}.$$

В направлении, противоположном $V_{окл}$ действует напряжение трения τ_A , проекции которого равны $\tau_A \cos \beta$ и $\tau_A \sin \beta$. Значение τ_A определяется по закону Амонтона-Кулона:

$$\tau_A = f p_A \sin \alpha,$$

где f - коэффициент внешнего трения;

p_A - давление в рабочем канале вращающейся волоки.

При вращении волоки крутящим моментом $M_{крв}$ на контактной поверхности возникает реактивный момент трения $M_{тр}$, который передается трубе в очаге пластической деформации, достигая максимальной своей величины на выходе из канала вращаемой волоки. Таким образом,

протягиваемая тонкостенная труба нагружена помимо усилия волочения P , крутящим моментом, равным моменту трения сил.

Уравнения равновесия в зоне деформации

$$\frac{d}{dR}(\sigma_r R t) + \sigma_r t + \frac{fP \cos \arctg\left(\frac{\omega R F}{V_B F_k}\right) R}{\sin \alpha} = 0, \quad (29)$$

на калибрующем участке

$$\frac{d\sigma_r}{de} = f \frac{P}{t} \cos \arctg\left(\frac{\omega R}{V_B}\right). \quad (30)$$

Крутящий момент от сил трения, прикладываемый к трубной заготовке при вращении волоки

$$M_{тр} = 2\pi R^2 l f P \sin \beta. \quad (31)$$

Результирующее напряжение на протянутом участке готовой трубы по энергетической теории прочности

$$\sigma_m^2 = \sqrt{(\sigma_r)_k^2 + 3\tau_{kp}^2}, \quad (32)$$

где τ_{kp} - касательное напряжение в трубе при закручивании

$$\tau_{kp} = \frac{M_{тр}}{2\pi R_{cp}^2 l_k}. \quad (33)$$

При волочении тонкостенных труб через вращаемые волоки со скоростью протягивания $V_B = 30$ м/мин исследовали три варианта: 1- волока неподвижная; $n = 0$ об/мин; 2- волока вращаемая $n = 570$ об/мин; 3- волока вращаемая $n = 1710$ об/мин.

Характер напряженно-деформированного состояния при безоправочном волочении тонкостенных труб через вращаемые волоки полученный расчетом на ЭВМ по математической модели, описанной в разделе 1.1 с учетом уравнений (29-33), приведен на рис. 28. Из анализа кривых, изображенных на рисунках следует, что по мере продвижения металла трубы вдоль волочильного канала длиной l_{FB} , растягивающее меридиональное напряжение σ_1 возрастает, достигая своего максимального значения на выходе из канала волоки. Как и

следовало ожидать, меридиональное напряжение больше при волочении тонкостенной трубы через неподвижную волоку, чем через вращающуюся волоку. Чем больше скорость вращения волоки при волочении, тем больше разница в величине σ_1 . Окружное сжимающее напряжение σ_ϕ и контактное давление P на границе заготовка - инструмент распределены по длине канала по нелинейному закону, возрастая по абсолютной величине к выходу из канала волоки. Вращение волоки вокруг оси протягивания по отношению к неподвижной волоке вызывает увеличение σ_ϕ и P .

Из анализа графиков, изображенных на рис. 28 следует, что вращение волоки не влияет на величину деформации в окружном направлении ϵ_ϕ . С ростом числа оборотов волоки n стенка трубы незначительно утолщается, что уменьшает длину протянутой трубы.

Интенсивность напряжений и деформаций σ_1 и ϵ_1 нарастают к выходу из очага пластической деформации по линейному закону и не зависят от скорости вращения волоки. Во всех трех вариантах волочения с кручением затрачивается одна и та же работа на формоизменение тонкостенной трубы:

$$A = \iiint_V \sigma_1 \epsilon_1 dV.$$

Результаты расчетов относительного снижения усилия волочения

$$\epsilon = \frac{P_B^{(n=0)} - P_B^{(n)}}{P_B^{(n=0)}} \cdot 100\%$$

по сравнению с неподвижной волокой $P_B^{(n=0)}$ в зависимости от числа оборотов волоки n , показывают, что существенное снижение усилия безоправочного волочения тонкостенных труб через вращаемые волоки имеет место для труб большого диаметра и труб, протягиваемых с небольшими скоростями волочения (рис. 29).

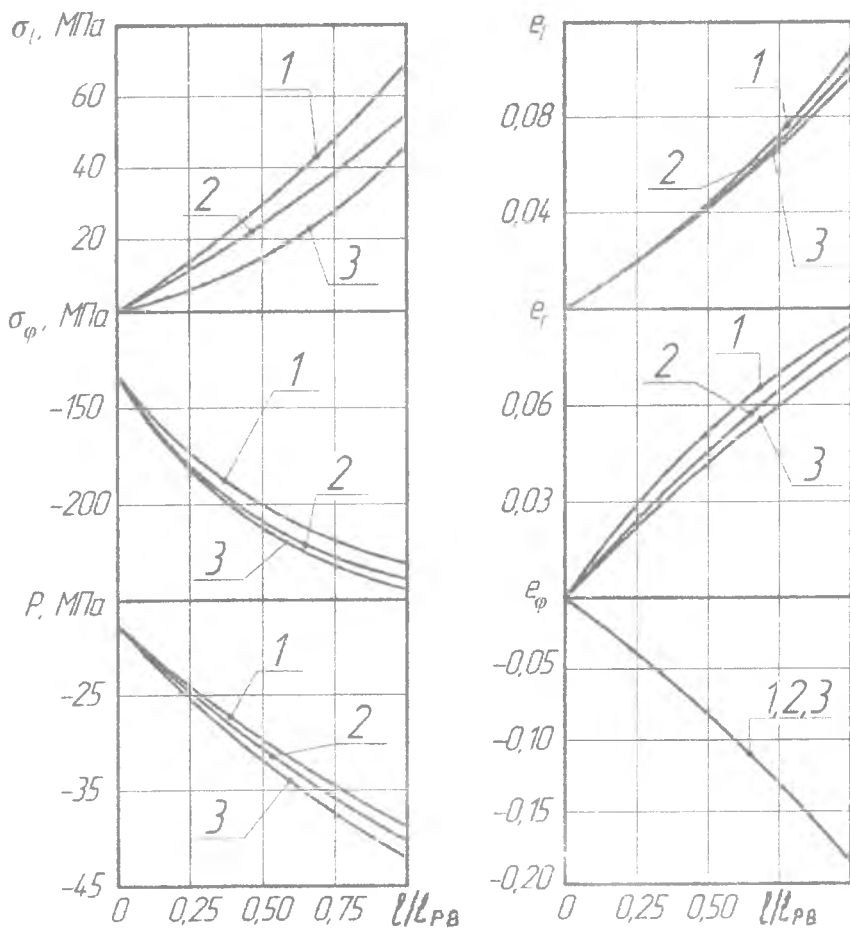


Рис. 28 - Характер напряженного и деформированного состояния по длине рабочего канала вращающейся волоки

1- неподвижная волока; 2- $n = 570$ мин; 3- $n = 1710$ об/мин.

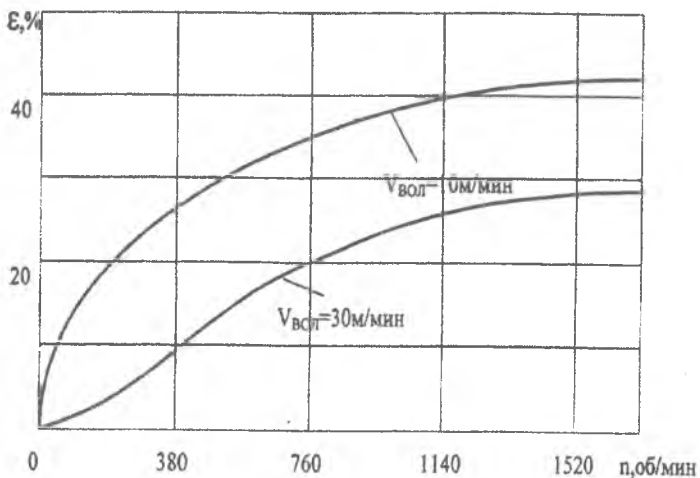


Рис. 29 - Влияние скорости волочения на уменьшение усилия волочения труб
 $D/t=16$

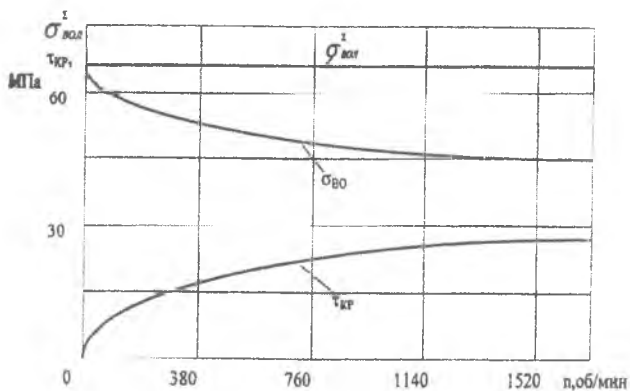


Рис. 30 - Зависимости напряжений на выходе из канал вращаемой волоки от
числа оборотов n

На рис. 30 приведены зависимости напряжений волочения, прикладываемых к протянутой трубе на выходе из канала вращаемой волоки от числа оборотов. Из рисунка видно, что вращение волоки в плоскости перпендикулярной оси волочения приводит к снижению требуемого напряжения волочения. Вместе с тем на протянутом участке в поперечных сечениях появляются касательные напряжения $\tau_{\text{кр}}$ от кручения волоки. Чем быстрее вращается волока, тем больше их величина. Труба на выходе из волоки нагружена не только растягивающей силой $P_{\text{в}}$, но и крутящим моментом. Результирующее напряжение волочения, действующее на трубу, не зависит от скорости вращения волоки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых технологических процессов производства тонкостенных труб безоправочным волочением через вращаемые волоки в плоскости, перпендикулярной оси волочения.

2.3 Винтовые профили и трубы некруглых сечений

Наиболее распространенный способ изготовления винтовых фасонных профилей – это волочение через принудительно вращаемую волоку с винтовым каналом, имеющим постоянный шаг спирали по всей длине рабочей части волоки.

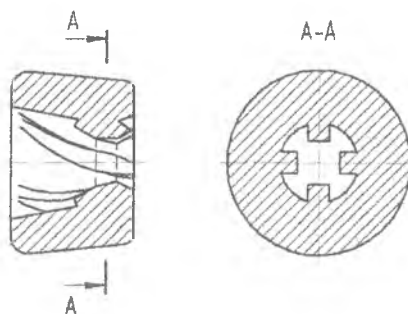


Рис. 31 – Инструмент для волочения винтовых профилей

Для получения винтовых профилей сложной конфигурации поперечного сечения с глубокими пазами предложена волока (рис.31) с винтообразными элементами, выполненными с переменным по длине рабочего канала шагом спирали, изменяющимся обратно пропорционально изменению сечения рабочего канала [54]. Такая форма канала волоки соответствует естественному течению металла при его деформации в рабочей зоне, что повышает стойкость инструмента и увеличивает точность и чистоту поверхности протягиваемых заготовок. Величина шага зависит от среднего коэффициента вытяжки металла в каждом рассматриваемом сечении. Калибрующий участок выполняется с постоянным шагом, равным величине шага спирали готового профиля.

Разработано устройство для волочения через две волоки с винтовыми каналами, вращаемые в противоположные стороны [50], позволяющее получить изделия с перекрещивающимися винтовыми элементами.

В работе [53] предложен способ волочения стальной проволоки, включающий совмещение деформаций волочения и кручения, что позволяет повысить выносливость протянутых изделий.

Кручение профильных заготовок (квадратных, прямоугольных т.п. профилей и труб) может производиться волочением в специальном устройстве (рис. 32) [56], состоящем из двух втулок 3 и 8, которые могут поворачиваться одна относительно другой вокруг общей их оси. Втулки на одном конце имеют гнезда для установки и закрепления профильных волок 1, другой конец их выполнен в виде фланцев с торцевым зубчатым венцом *a*. Втулки смонтированы на радиально-упорных подшипниках в цилиндрическом корпусе 6, который с открытого конца имеет внутреннюю резьбу для гайки 7. Углубление *b* в этой части гайки служит для упора специального ключа. Волоки снаружи по форме выполняют некруглыми, во избежание провертывания в гнездах втулок. Для крепления устройства в люнете волочильного стана используют установочный фланец 5.

Кручение профильных заготовок осуществляется следующим образом. Вывинчиванием гайки 7 втулки 3 и 8 выводят из зацепления, а профильные волокнистые заготовки совмещают своими отверстиями.

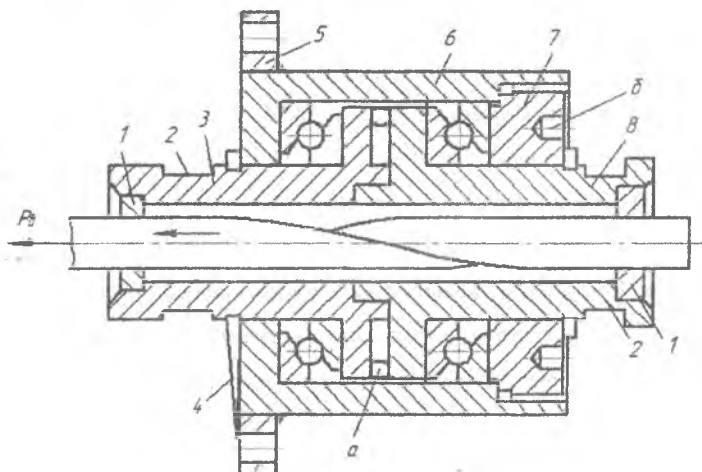


Рис. 32 - Устройство для волочения винтовых профильных труб

В волокнистые заготовки вводят передний конец заготовки настолько, чтобы клещами волочильной тележки можно было захватить выступающую ее часть. Используя лыски 2 и ключ, втулку 3 поворачивают на угол, обеспечивающий заданный угол закрутки. Угол поворота отмеряется при помощи стрелки 4 по лимбу, нанесенному на торцевую сторону фланца 5. Сместив втулки одну относительно другой на необходимый угол, закручивают гайку 7, приводя в зацепление зубчатые венцы втулок. После этого, зацепив тележкой выступающий конец изделия, начинают волочение. В процессе волочения между профильными волокнистыми заготовками происходит непрерывное пластическое кручение заготовки. Поскольку движение выходящего винтового профиля определяется поступательным движением тележки, то втулки 3 и 8 вместе с волокнистыми заготовками совершают вращательное движение.

После окончания волочения одной заготовки гайку 7 опять вывинчивают до выведения втулок из зацепления, втулки совмещают в исходное положение и процесс кручения повторяют со следующей заготовкой.

Данное устройство позволяет скручивать профили как правым, так и левым винтом и применимо для скручивания профильных заготовок сравнительно малых размеров поперечного сечения, так как предварительное кручение проводится в нем вручную.

Распределение касательных напряжений τ при скручивании тонкостенных прямоугольных труб постоянной толщины t с размерами граней a и b имеет вид [57]:

$$\tau = \frac{M}{2abt} \quad (34)$$

Для определения угла упругой раскрутки применяется формула Бредта:

$$\gamma = \frac{M}{2Gt} \frac{a+b}{a^2b^2} \quad (35)$$

Здесь G – модуль сдвига, t – толщина стенки. При $a=b$ формулы (31) и (35) пригодны для расчета скручивания тонкостенных квадратных труб.

Для профильных сечений крутящий момент можно вычислить приближенно с помощью уравнения:

$$M = M_{кр.кр} \frac{J_t}{(J_k)_{кр.кр}} \quad (36)$$

Где $M_{кр.кр}$ и $(J_k)_{кр.кр}$ – момент кручения и момент инерции для круглой тонкостенной трубы, имеющей тот же периметр по средней линии, что и поперечное сечение скручиваемой профильной трубы. Моменты инерции профильной и круглой тонкостенных труб:

$$(J_c)_{кр} = \frac{4F^2t}{S}, \quad (J_t)_{кр.кр} = \frac{\pi d^3t}{4},$$

где F – площадь, ограниченная средней линией сечения профиля;

S – длина средней линии сечения и профильной трубы;

d – средний диаметр круглой трубы.

Момент кручения с учетом деформационного упрочнения:

$$M_{кр.кр} = \frac{6FC(\gamma)^n \tau}{n+3},$$

где C и n – константы упрочнения, определяемые экспериментально по диаграмме $\tau = f(\gamma)$, γ – сдвиговая деформация, $\gamma = 0,5d\theta$.

Уравнение (36) проверяли на основе экспериментальных данных, полученных для прямоугольных труб ($a = 18$ мм, $b = 12$ мм, $t = 1$ мм) из сплава Д16 на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30. Из составления графиков, приведенных на рис.33. следует, что расчетная и экспериментальная диаграммы кручения очень близки друг к другу. Из анализа уравнения (36) следует, что конфигурация контура поперечного сечения профильных труб заметно влияет на величину момента. Максимальный крутящий момент будет иметь место при скручивании круглой трубы. По сравнению с квадратным поперечным сечением при равенстве параметров по средней линии наименьший момент имеют трубы прямоугольного сечения.

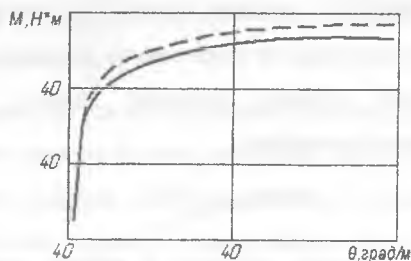


Рис. 33 - Диаграмма кручения: (— расчет, - - - эксперимент)

В работе [58] предложен инструмент, представляющий собой цельную вращающуюся волоку, рабочий канал которой изменяется по винту, позволяющий получать из круглой тонкостенной заготовки витые фасонные трубы.

2.4 Трубы с наружным и внутренним винтовым оребрением

Трубы с наружным и внутренним винтовым оребрением изготавливают чаще всего волочением с кручением трубной заготовки продольными ребрами в принудительно вращаемой волоке или оправке с нагревом или без него в зоне деформации [59, 60]. Крутящий момент передается непосредственно через

ребра трубы. Соответственно в вращаемой волоке (оправке) выполнены пазы, имеющие форму профиля ребер.

Для изготовления тонкостенных труб с наружным винтовым оребрением и большими углами подъема из-за потери поперечной устойчивости сечения волочение с кручением проводят, как правило, на цилиндрических оправках через вращаемую волоку. При этом за счет большого крутящего момента и малой жесткости ребра его геометрия отклоняется от заданной. С целью повышения точности геометрии ребер предложен способ [61], согласно которому передний конец трубы закручивают вокруг продольной оси вращающимся захватом в сторону, противоположную направлению вращения профильной волоки с угловой скоростью, равной углу отклонения ребра в торцевом сечении трубы от заданного положения в единицу времени.

В ряде случаев вместо длинной отправки, вводимой в трубу перед скручиванием во внутреннюю полость трубы целесообразно подавать под давлением воду [62].

В техническом решении [30] в тонкостенную трубу с наружными продольными ребрами 1, вставленную во вращающуюся волоку 4, вводят короткую оправку 2 и закрепляют ее на стержне 3, на расстоянии между отправкой и волокой 10-30 мм по ходу волочения (рис.34). Крутящий момент прикладывают к заготовке со стороны поступления ее в очаг деформации. Тонкостенную трубу 5 с большими углами подъема ребер без потери устойчивости изготавливают протягиванием трубы подвижным зажимом через вращаемую волоку с одновременной раздачей ее на неподвижной оправке.

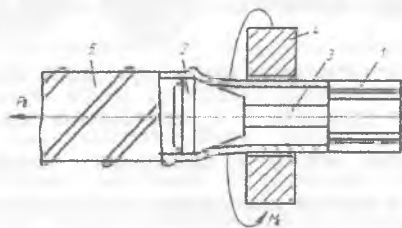


Рис.34 - Инструмент для волочения труб с наружным винтовым оребрением

Волочение с кручением с помощью двух раздающих конических оправок, закрепленных на стержне и размещенной между ними вращающейся волокой, расширяет технологические возможности процесса и позволяет получать тонкостенные трубы с малым шагом спирали винтовых ребер [41].

Для получения труб с наружными винтовыми ребрами переменного угла подъема по длине изделия разработан ряд устройств регулировки угла поворота профильного элемента волоки [63,64].

Кручение трубной заготовки с внутренними продольными ребрами осуществляют при одновременном формоизменении поперечного сечения заготовки с помощью профильной волоки, например, эллиптического сечения, после чего производят осадку трубной заготовки неподвижной круглой волокой, установленной непосредственно за вращаемой эллиптической волокой (рис.35) [37].

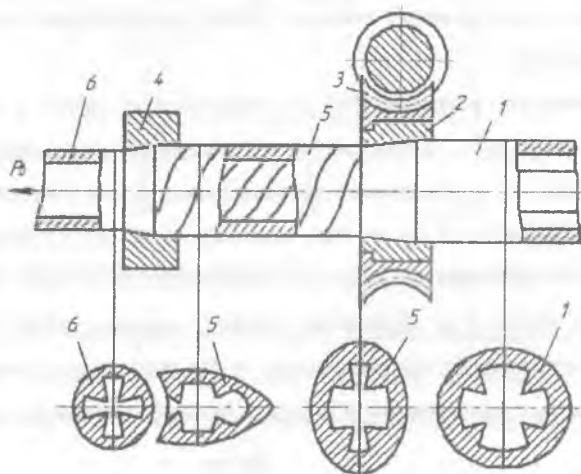


Рис. 35 - Инструмент для волочения труб с внутренним винтовым оребрением

Круглую трубную заготовку 1 с продольными внутренними ребрами задают в эллиптическую волоку 2, вращаемую, например, с помощью червячного колеса 3, и в круглую неподвижно установленную за ней волоку 4. Вращаемая овальная волока 2 формоизменяет круглую трубную заготовку 1 в эллиптическую 5 с одновременным закручиванием ее в спираль. Затем

свернутая в спираль трубная заготовка 5 осаживается в волоке 4, в результате чего полученная готовая труба 6 имеет внутреннюю поверхность с винтовыми ребрами.

Труба с внутренними продольными ребрами закручивается при определенных условиях: если момент сопротивления кручению W_k проволоченной трубы больше момента сопротивления кручению сечения трубы в эллиптической волоке W'_k , то закрутки ребер не происходит. Труба проворачивается в профильной волоке. Для обеспечения закрутки ребер необходимо, чтобы $W'_k > W_k$ или $(\pi/16)nb_0^3(1-\alpha^4) > 0,2D^3(1-d^4/D^4)$, $n = h_c/h_j = b_0/b_j$, $a = h_j/h_0 = b_j/b_0$, где D и d – наружный и внутренний диаметры сечения готовой трубы, h_j и h_0 – соответственно внутренние и внешние размеры эллиптического сечения трубы по большой оси, b_j и b_0 – соответственно внутренние и внешние размеры эллиптического сечения трубы по малой оси.

При решении этого неравенства находят размеры волоки с круглыми отверстиями.

Кручение тонкостенных труб с внутренними продольными ребрами с одновременным обжатием при волочении не позволяет получать трубы с малым шагом спирали при отношении диаметра к толщине $D/t \geq 35$ из за потери заготовкой устойчивости, поперечного сечения при приложении к ней крутящего момента. Для их изготовления предлагается кручение проводить со степенью деформации, равной разности степени деформации кручения, требуемой для скручивания труб на заданный угол закрутки, и допустимой деформации скручивания без обжатия в зависимости от отношения наружного диаметра заготовки к ее толщине [65]. В данном способе трубу пропускают через волоку. Передний конец заготовки захватывают зажимом тележки, которая сообщает ей прямолинейное движение. Одновременно к противоположному концу заготовки с помощью скользящего зажима прикладывают крутящий момент, необходимый для получения заданного угла

закрутки ребер. После того, как скользящий зажим дойдет до волоки, конец заготовки освобождают и протягивают через волоку.

Трубы с внутренним винтовым оребрением можно получать волочением на самоустанавливающейся оправке (рис.36) [66]. На цилиндрическом калибрующем элементе 4 оправки выполнены винтовые пазы 5 с углами подъема 15 – 45°. Она установлена на стержне 1 в виде болта с головкой 2 и гайкой 3 с возможностью вращения относительно установленного на этом стержне с осевым зазором обжимного конического полого элемента 6.

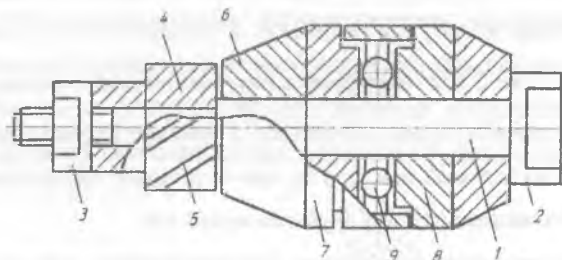


Рис. 36 – Самоустанавливающаяся оправка

Подшипниковый узел, состоящий из направляющих колец 7 и 8 с шариками 9, способствует улучшению деформации трубы и снижению усилия волочения. В процессе волочения трубной круглой заготовки происходит постепенное заполнение винтовых пазов 5 металлом заготовки. В результате образуется зацепление протягиваемой трубы с элементом 4. Продвижение металла трубы вдоль винтовых пазов вызывает его вращение относительно конического элемента 6. При этом роль винта играет цилиндрический элемент 4, а гайки - труба с продавленными винтовыми ребрами на внутренней её поверхности.

Пат.61-60213 Япония, Пат. 60-36325 (Япония), 1985, Пат. 61-266122 Япония. 1986, Пат. 55-41654 Япония. 1980; Пат. 3292408 США. 1966; Пат. 1071456 Англия. 1965; Пат. 3289451 США. 1966; Пат. 330147 Швеция. 1970; Пат. 54-47378 Япония. 1980; Пат. 44-5317 Япония. 1968; Пат. 53-31823 Япония. 1978; Пат. 3267712 США. 1966; Пат. 63-260621 Япония. 1987; Пат. 63-39322 Япония. 1982; Пат. 62-235086 Япония. 1989; Пат. 59-262298 Япония. 1986; Пат. 60-36325 Япония. 1985.

При назначении рациональных технологических режимов волочения с кручением профилей и труб дополнительно: необходимо определить следующие параметры: крутящий момент, количество оборотов вращающейся волоки (захвата) и угол упругой раскрутки после разгрузки.

Крутящий момент для труб с винтовым оребрением можно найти следующим способом. Поперечное сечение ребристой трубы представляет сложную фигуру, образованную сопряжением ребер и гладкой трубы. Из-за сложности контура поперечного сечения задача кручения аналитически не решается. Поэтому трубу с ребрами представим как трубу, состоящую из совокупности отдельных элементов: в виде тонкостенной трубы и ребер, внешних и внутренних, для которых аналитические решения известны. Тогда крутящий момент, необходимый для поворота ребристой трубы на заданный угол, можно представить как сумму моментов, необходимых для поворота гладкой трубы и ребер, т.е.

$$M = M_{тр} + \sum_{i=1}^m M_{рi},$$

где m - количество ребер (внешних, внутренних).

Моменты $M_{тр}$ и $M_{рi}$ определяются из выражений

$$M_{тр} = 6FA\gamma_0^n t / (n+3),$$

$$M_{рi} = 4aA [(b\theta/2)^{n+2} - (c\theta/2)^{n+2}] / [\theta^2 (n+2)],$$

где A и n – константы упрочнения, определяемые из диаграммы кручения; F – площадь поперечного сечения трубы без ребер; t – толщина стенки трубы; a и b – соответственно длина и толщина ребра в форме узкого прямоугольника.

Угол упругой раскрутки после разгрузки $\gamma = M/D$, где D - жесткость ребристой трубы при кручении.

Жесткость ребристой трубы при кручении равна сумме жесткостей отдельных элементов:

$$D = D_{тр} + \sum_{i=1}^m D_{рi},$$

где $D_{тр} = 4F^2tG / S$ - жесткость трубы без ребер, G_{1-2} - модуль сдвига, S - длина срединной линии кольцевого сечения трубы, $D_i = G a_i b_i^3 / 3$ - жесткость ребра (внешнего, внутреннего).

Экспериментами установлено [71], что такой подход для инженерных расчетов вполне приемлем и обеспечивает погрешность расчета $\leq 15\%$.

Для исследований при волочении труб со спиральным рифлением на короткой вращающей оправке использовали тонкостенные трубные заготовки из меди МЗ в отожженном и нагартованном состояниях с размерами $\varnothing 18 \times 1,0$ мм и длиной 300 мм. Внутреннюю поверхность труб предварительно смазывали. В качестве смазки применяли «Вапор Т» с добавлением чешуйчатого графита.

Были изготовлены четыре короткие оправки из инструментальной стали Х12М, имеющие на цилиндрической рабочей поверхности 42-заходную нарезку с углами подъема 0; 10; 20 и 30°. Диаметр описанной окружности спиральных выступов 15 мм. Высота спиральных выступов треугольной формы 0,5 мм. Выступы на профилирующей оправке копировали форму и размеры спиральных рифлений на трубах. Волочение труб проводили через конические волокна с диаметрами 16,8; 16,6; 16,2 и 16,00 мм и углом рабочего конуса 12° на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30.

Конструкция экспериментальной установки для волочения труб с внутренним спиральным рифлением приведена на рис. 37.

При волочении трубная заготовка 4 входит в сужающийся канал волокна 1, где уменьшается ее наружный диаметр. В зоне деформации на свободно-вращаемой относительно своей оси оправке 3, закрепленной на конце стержня 2, металл трубной заготовки под действием радиальных сил постепенно затекает в пазы винтовой нарезки, образуя спиральные рифления внутри трубы. За счет сил сцепления металла трубы с оправкой профилирующая оправка вместе со стержнем начинает вращаться в сторону, противоположную винтовой нарезке на оправке относительно оси волочения, с угловой скоростью

$$\omega = \frac{\theta v}{2\pi}$$

где θ - относительный угол закрутки спиральных рифлений; v_s - скорость волочения.

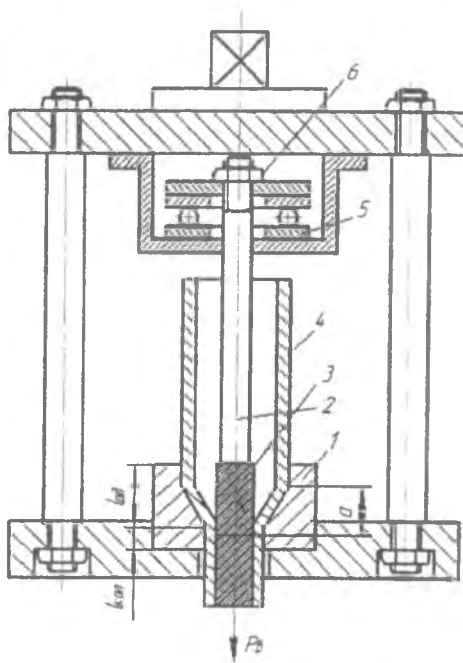


Рис. 37 – Экспериментальная установка для волочения труб с внутренним спиральным рифлением

Труба на выходе из волоки не вращается и выполняет функцию гайки, а профилирующая оправка в результате свободного ее вращения со стержнем в радиально-упорном подшипнике 5 — функцию винта. Положение профилирующей оправки относительно конической волоки описывали безразмерным параметром

$$\eta = a / (l_{ол} + l_{ма})$$

где a - подача профилирующей оправки в сужающийся канал волокна, регулируемая гайкой 6; $l_{од}$ - длина очага деформации для трубы; $l_{кал}$ — длина калибрующего участка.

Изучали влияние угла подъема спиральных выступов на оправке ψ , положения профилирующей оправки в канале волокна η , коэффициента вытяжки λ , дробности деформации, состояния поставки материала трубной заготовки на силу волочения P , и высоту рифлений h_p по толщине стенки трубной заготовки.

Из рис. 38а видно, что чем больше угол подъема спиральных выступов на оправке, тем больше требуется сила волочения труб в нагартованном состоянии. Зависимость носит нелинейный характер. Это обусловлено тем, что для формирования спиральных выступов требуются большие рабочие напряжения, превышающие сопротивление деформации металла трубы. За счет подпора, образующегося на трубной заготовке со стороны спиральных выступов оправки, возникает противодействие, которое с увеличением угла подъема спиральных выступов вызывает значительное повышение силы волочения.

Из рис. 38б видно, что если оправка значительно выступает в зоне калибрующего участка волокна, то сила волочения резко возрастает из-за увеличенной в несколько раз контактной поверхности трения по развитой поверхности оправки. Это может привести к обрыву захваток.

При $\eta = 0.4$ оправка соприкасается с внутренней поверхностью заготовки. Оптимальное положение оправки в канале волокна — когда она выдвинута в калибрующую зону на 2...3 мм. Это обеспечивает устойчивость процесса волочения.

Для снижения силы волочения и заполняемости винтовых канавок на короткой профилирующей оправке металлом трубы трубные заготовки должны быть в отожженном состоянии, а зазор между оправкой и заготовкой - по возможности минимальным.

Другой способ снижения силы волочения и контактных сил трения на вращаемой короткой оправке, а также силы, необходимой для формирования ребер требуемой геометрии между обрабатываемым металлом и инструментом - это использование дробной деформации путем увеличения числа проходов, что приводит к многоцикличности при их изготовлении.

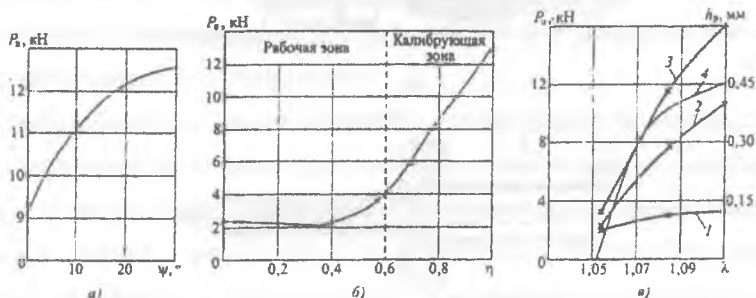


Рис. 38 - Зависимости силы волочения от угла подъема спиральных выступов на оправке (а), положения оправки в канале волоки (б), коэффициента вытяжки и высоты рифлений (в): 1 - волочение без оправки; 2 - волочение с дробной деформацией; 3 - волочение с оправкой внутри трубы; 4 - высота рифлений

Из рис. 38в следует, что с увеличением коэффициента вытяжки возрастают сила волочения и высота рифлений. Оптимальный диапазон коэффициентов вытяжки для рассматриваемых размеров труб $\lambda = 1,09...1,11$. При больших значениях коэффициентов вытяжки возможны обрывы захваток. Зависимость силы волочения от коэффициента вытяжки носит нелинейный характер. При волочении с профилирующей оправкой сила волочения резко возрастает. Она в 4 раза больше силы безоправочного волочения. Резкое возрастание силы при волочении с профилирующей оправкой может привести к обрывам трубы.

Кривая 2 получена при волочении за два прохода. В первом проходе произвели обжатие заготовки до касания с рабочей поверхностью оправки. Во втором проходе при обжатии формировалась внутренняя спиральная поверхность. Кривая 2 отражает изменение силы волочения на втором проходе.

Она на 20 % меньше, чем при волочении за один проход (кривая 3) и обеспечивает устойчивость процесса.

Для существенного снижения силы волочения предложен способ волочения труб с внутренним спиральным рифлением (рис. 39).

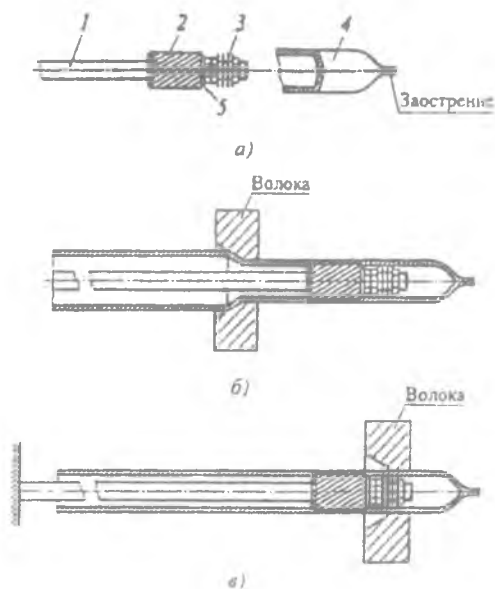


Рис. 39 – Способ волочения труб с внутренним спиральным рифлением:

а – втапливание стержня с оправкой; б – совместное волочение; в – раздача; 1 – стержень; 2 – оправка; 3 – «ерш»; 4 – трубная заготовка; 5 – кольцо

Изготовление труб с внутренним спиральным рифлением предполагается проводить в два прохода волочения. Первый проход волочения - это обжатие трубной заготовки до внедрения выступов спиральной формы оправки на необходимую глубину в стенку трубы.

Профилирующая оправка со стержнем не закреплена на волочильном стане. Вначале оправку со стержнем вставляют в трубную заготовку до упора с заострением (рис. 39а). На конце оправки установлен предварительно обильно смазанный «ерш», что обеспечивает равномерное нанесение смазки на

внутреннюю поверхность трубы при вставлении оправки внутрь. Далее проводится волочение с незакрепленным стержнем. После волочения оправка жестко зафиксирована в трубе (рис. 39б).

Второй проход волочения - это раздача трубы на свободно вращающейся оправке (рис. 39в). Вращение профилирующей оправки на стержне вокруг своей оси обеспечивается фторопластовым кольцом. Стержень закреплен на стане. При вытягивании оправки из трубы она слегка ее раздает и накатывает спиральную поверхность внутри трубы.

Чтобы обеспечить прямолинейность операции раздачи на оправке, трубу пропускают через ту же волоку, используемую в первом переходе волочения. Течение металла между оправкой и волокой обеспечивает заполнение винтовых канавок на оправке. Сила, приложенная к заострению заготовки при раздаче, значительно меньше, чем при волочении на вращающейся короткой оправке. Это обеспечивает устойчивость процесса и формирование спирального рифления внутри трубы заданной геометрии.

Апробация предлагаемой технологии изготовления труб с внутренним спиральным рифлением в производственных условиях показала ее пригодность.

2.5 Энергосиловые условия

Процесс волочения с кручением можно рассматривать как результат одновременного воздействия на протягиваемую заготовку после выхода из волоки тянущего усилия P и крутящего момента M_K .

На рис. 40 представлены схемы волочения с приложением крутящего момента к протягиваемой заготовке [72].

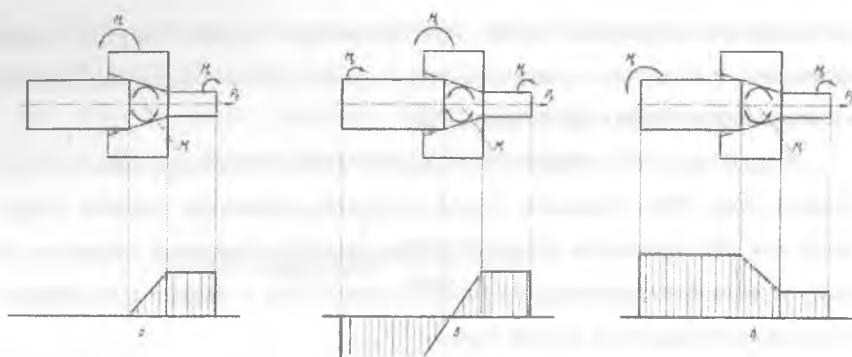


Рис. 40 - Схемы приложения крутящих моментов к протягиваемой заготовке: а - вращающаяся волока с одним реактивным моментом; б - вращающаяся волока с двумя реактивными моментами; в - активный момент приложен перед очагом деформации

При вращении волоки на контактной поверхности инструмент - заготовка возникает момент трения M_T , который уравнивается реактивным моментом M_p (рис. 40а). Из приведенной эпюры моментов видно, что протягиваемая заготовка на участке после выхода из очага деформации нагружена, помимо тягового усилия P_s , крутящим моментом, равным моменту трения. Момент сил трения в этой схеме волочения является активным крутящим моментом, который передается трубной заготовке непосредственно в очаге деформации, достигая максимальной своей величины на выходе из очага деформации.

Согласно схеме на рис. 40б, при вращении волоки момент трения, возникающий на контактной поверхности, уравнивается двумя реактивными моментами M_p и M_p' , один из которых приложен к заготовке перед очагом деформации, а второй - после выхода ее из очага деформации.

При волочении по схеме на рис.40в, крутящий момент M_k приложен к протягиваемой заготовке перед очагом деформации. M_k уравнивается двумя реактивными моментами: моментом трения M_T , возникающим на

контактной поверхности очага деформации, и моментом M_p , приложенным к заготовке на протянутом участке.

Как видно из эпюры моментов, заготовка перед очагом деформации нагружена моментом, имеющим максимальное значение, а на участке после очага деформации значение момента минимально. При $M_k = M_t$, $M_p = 0$, т.е. протягиваемая заготовка после выхода из очага деформации нагружена только усилием волочения P_v , что является положительным фактором при волочении.

На рис.41 показаны эпюры нормальных и касательных напряжений при растяжении, кручении и совместном растяжении и кручении материалов с идеальной пластичностью[74]. Анализ этих эпюр показывает, что при растяжении наибольшие касательные напряжения τ действуют в сечениях, наклоненных под углом 45° к оси круглого изделия, а их величина равна половине нормального напряжения, действующего в поперечном сечении. При кручении же наибольшие касательные напряжения действуют в плоскости поперечного сечения. Наибольшие нормальные напряжения действуют под углом 45° и численно равны упомянутым касательным напряжениям. При растяжении кручением направление главных нормальных и наибольших касательных напряжений изменяются в зависимости от соотношения напряжений растяжения и кручения.

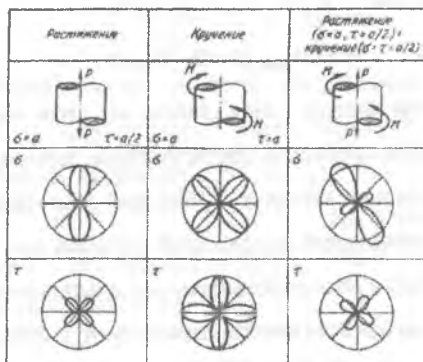


Рис.41. Эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений

Протягиваемая заготовка после выхода из зоны деформации нагружена, помимо усилия волочения, крутящим моментом. Касательные напряжения в поперечном сечении от крутящего момента снижают запас прочности и тем самым ограничивают величину активных сил, прикладываемых к заготовке. Если считать, что под влиянием крутящего момента, распределение нормальных напряжений σ в поперечном сечении заготовки, вызванных силой волочения P_0 , не изменится, то, согласно энергетической теории предельного состояния при одном и том же пределе текучести σ_{s3} протягиваемого материала

$$\sigma^2 + 3\tau_{кр}^2 = \sigma_{s3}^2$$

или в безразмерном виде

$$(\sigma / \sigma_{s3})^2 + (3\tau_{кр}^2 / \sigma_{s3}^2) = 1.$$

Переходя от напряжений к относительным внешним нагрузкам, получим

$$(P_0 / P_{пред})^2 + (M / M_{пред})^2 = 1,$$

где $P_{пред}$ и $M_{пред}$ – предельные величины усилия волочения и крутящего момента соответственно, при которых заготовка переходит в пластическое состояние.

Из последнего следует, что

$$M = M_{пред} \sqrt{1 - (P_0 / P_{пред})^2}.$$

Следовательно, чем больше сила волочения, тем меньший крутящий момент необходим, чтобы перевести протягиваемую заготовку в пластическое состояние. А меньший момент вызывает и меньший угол упругой раскрутки.

Положительная роль касательных напряжений кручения на участке I состоит в том, что металл поступает в очаг деформации уже в напряженном состоянии.

В качестве привода волокна (захвата) используют электродвигатели.

Основными данными для расчета электродвигателя является график крутящих моментов на валу за период полного цикла скручивания в функции угла

поворота φ и времени (рис.42). Необходимый номинальный момент на валу электродвигателя, уточняемый по каталогам, можно найти по формуле:

$$M_{\text{н}} = \kappa, \frac{M_p \tau_p + M_x \tau_x}{\tau_{\text{ц}}},$$

где κ , - коэффициент запаса, учитывающий перегрузку двигателя; M_p и M_x - моменты скручивания и холостого хода соответственно; продолжительность всего цикла скручивания, $\tau_{\text{ц}} = \tau_p + \tau_x$; τ_p и τ_x - время рабочего и холостого хода.

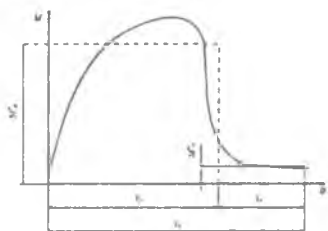


Рис.42 Зависимость крутящего момента M от времени и угла поворота на валу электродвигателя.

Для приближенного расчета M_p и M_x можно использовать графики крутящих моментов, отмеченные штриховой линией в виде прямоугольников (см. рис. 42).

$$M_p = \frac{M_p^*}{I\eta}; \quad M_x = \frac{M_x^*}{I\eta}$$

M_p^* и M_x^* - определенные моменты скручивания и холостого хода соответственно; I - передаточное число между электродвигателем и вращающимся захватом (волокой) $I = n_{\text{дв}}/n_{\text{в}}$, где $n_{\text{дв}}$ - скорость вращения электродвигателя. η - к.п.д. крутильного устройства. Необходимая мощность электродвигателя $N_{\text{ос}} = M\omega/I \eta$. Работа совершаемая приводом крутильного устройства $A = M\theta I$.

ГЛАВА 3 ВОЛОЧЕНИЕ СОСТАВНЫХ ТРУБ СЛОЖНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

3.1 Многоканальные трубы с продольным оребрением

Волочение позволяет получать различные трубы сложных поперечных сечений (многоканальные, внутренне-оребрённые, двухстенные и т.д.) и широкого сортамента с наружным диаметром 12-40 мм и толщиной стенки ребер и оболочки 1-2 мм. При этом наружную и внутреннюю части многоканальных труб изготавливают в виде прессованной оболочки и ребристого сердечника чаще всего из разнородных металлов. Оболочку, надетую с зазором на ребристый сердечник, осаживают методом волочения [26].

Основное требование, предъявляемое к многоканальным трубам - наличие прочной связи ребристого сердечника с оболочкой по длине и периметру трубы. Это обеспечивает герметичность зоны контакта и минимальное термическое сопротивление, а также гарантирует высокие эксплуатационные свойства теплообменных труб. Для разработки оптимальной технологической схемы производства и определения размеров оболочки и ребристого сердечника перед их сочленением необходимо знать закономерности пластического формоизменения ребер сердечника и оболочки.

На рис.43 б-г показана форма поперечных сечений ребер до и после волочения. При осаживании ребер под действием радиальных напряжений деформация протекала только по высоте в направлении наименьшего сопротивления истечению, в направлении оси волочения деформация ребер отсутствовала. У ребер с плоской и заостренной формами вершины происходила локальная пластическая деформация торца, который принимал в сечении форму, близкую к трапеции. Это в конечном итоге привело к увеличению ширины контактной площадки. Для ребер Т-образной формы пластическая деформация начиналась в середине высоты ребра, для ребер трапециевидальной формы - локализовалась в наиболее слабом сечении - около сердцевин сердечника.

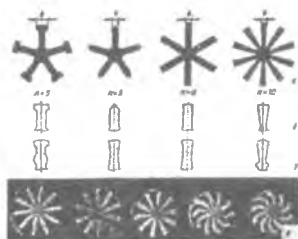


Рис.43 Сечения ребристых сердечников (а) и ребер до волочения (б) и после волочения (в, г)

Поэтому ширина контактной поверхности в исследуемом диапазоне вытяжек для этих ребер оставалась практически неизменной.

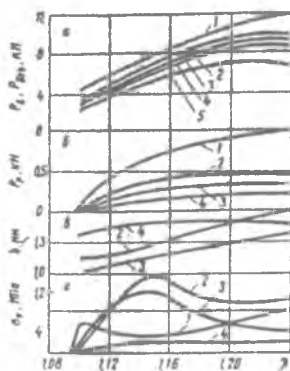


Рис. 44. Зависимость усилия совместного и безоправочного волочения труб с ребристым сердечником (а); усилия деформирования одного ребра (б); изменения ширины ребра в зоне контакта (в); контактного давления (г) от вытяжки: 1- $n=5$, Т-образная вершина; 2- $n=5$, вершина с заострением; 3- $n=6$, плоская вершина; 4- $n=10$, трапецидальная вершина; 5 — усилие волочения без оправки

При вытяжках более 1,18 происходила потеря устойчивости ребер с плоской и заостренной вершинами, что приводило к их изгибу и скрутке по

спирали относительно оси волочения. В результате уменьшалось проходное сечение трубы и ухудшался контакт (см. рис. 43 г).

На рис. 44 представлены зависимости усилий безоправочного и совместного волочения ребристых изделий от вытяжки по трубе. Как и следовало ожидать, с увеличением вытяжки усилие волочения возрастает. Усилие совместного волочения зависит от формы и числа ребер сердечника. Для сравнения построили графики изменения усилий волочения сердечников, приходящихся на одно ребро. Наибольшее усилие волочения относится к ребрам Т-образной формы, наименьшее — к ребрам трапецидальной формы. Это связано с тем, что увеличенная поверхность контакта оболочки с сердечником и малая площадь поперечного сечения ребер около сердцевин приводят в совокупности к уменьшению усилия волочения. Для ребер с плоской и заостренной вершинами усилия волочения занимают промежуточное положение.

На рис. 44 приведены также результаты экспериментальных исследований контактных давлений. Как следует из графиков, с увеличением вытяжки контактные давления сначала возрастали, достигали максимума, а затем убывали. Наибольшее по величине σ_k наблюдалось у сердечников с сечением ребер в виде полосы с заострением и без заострения на вершинах, наименьшее — у сердечников с трапецидальной и Т-образной формами ребер. Уменьшение σ_k было связано с изгибом ребер.

Таким образом, вытяжку при волочении труб с ребристым сердечником необходимо назначать с учетом натяга, обеспечивающего возникновение контактного давления σ_k , вследствие разной величины упругой отдачи сочленяемых элементов. Область оптимальных вытяжек, обеспечивающих наилучшее сцепление, должна находиться в пределах 1,12-1,18. Вершины ребер сердечников рекомендуется изготавливать с заострением. Кроме того, для создания натяга между оболочкой и ребристым сердечником их необходимо так сочленять, чтобы предел текучести металла оболочки был значительно меньше, чем предел текучести металла ребристого сердечника. Зазор между оболочкой

и ребристым сердечником выполняют минимальным, исходя из условия свободной установки ребристого сердечника в оболочку. Это связано с тем, что упрочнение металла оболочки при волочении повышает упругую отдачу, а следовательно, снижает контактное давление.

Рассмотрим моделирование процесса осаживания ребер при волочении путем локальной деформации ребер из сплава АДЗ1 плоским бойком. Силы, действующие на ребра сердечника, вследствие симметрии являлись одинаковыми, а поэтому процесс формоизменения ребристого сердечника изучали путем осаживания только одного ребра, представляющего собой длинную полосу с высотой, значительно большей ее толщины.

При совместном волочении ребристого сердечника и оболочки под воздействием радиальных напряжений вершины ребер деформировались в направлении наименьшего сопротивления истечению, принимая в сечении выпуклую (бочкообразную) форму. Центральные слои подвергались только растягивающим продольным напряжениям, и деформация ребристого сердечника по длине была равна нулю. Это позволило в дальнейшем считать, что в поперечных сечениях ребер имеет место плоская деформация.

Для экспериментального определения кинематики течения использовали методы разъемных образцов и координатных делительных сеток. Образцы размером 90 x 15 мм изготавливали путем прессования и последующей механической обработки в виде двух одинаковых полос. Плоскость разреза обрабатывали до чистоты V6 - V7. Длина образцов составляла 120 мм. В плоскости разреза перед формоизменением при помощи инструментальной плиты и штангенрейсмуса наносили координатную сетку с квадратной ячейкой. База сетки составляла 1,5 мм толщина рисок 0,08-0,12 мм. Все узлы координатной были измерены на инструментальном микроскопе БМИ-1 с точностью $\pm 0,005$ мм, а затем полосы скрепили струбциной. Половинки составных образцов располагали таким образом, чтобы координатная сетка оказалась в средней плоскости образца, вдоль которого производили внедрение по высоте бойка. Ширина бойка была значительно меньше длины ребра.

Осадку производили на установке ЦДМПУ-30 со скоростью 1 мм/с. Для обеспечения скольжения поверхность плоского бойка выполнили шлифованной. Перед каждым опытом бойки смазывали машинным маслом. Так как течение металла являлось неустановившимся, то для достоверного анализа деформированного состояния в любой стадии формоизменения осуществляли только один небольшой шаг деформирования, равный 1 мм. После внедрения образцы разбирали. На поверхности разъема измеряли координаты узлов деформированной сетки. Базой для совмещения исходной и деформированной сетки являлось основание ребра. Поэтажные искажения координатной сетки приведены на рис.45.

Анализ координатной сетки позволил сделать основные выводы относительно течения металла при внедрении бойка в ребро:

1. Визуальный осмотр координатной сетки показал чрезвычайно неравномерное течение металла, зафиксированное значительной неоднородностью ее ячеек. Квадратные элементы координатной сетки приняли форму криволинейных четырехугольников.

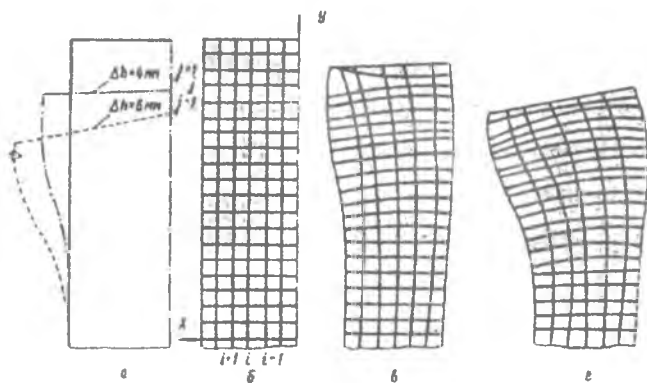


Рис.45 Искажение формы ребра и координатной сетки при внедрении бойка в ребро:

а-форма исходного и деформированного на высоту $\Delta h = 4$ и 6 мм образца; б-исходная координатная сетка в плоскости разъема; в, г-сетка после деформации на 4 и 6 мм соответственно

Объем металла, примыкающего к зоне контакта, имел конусообразную форму, Изменение формы ячеек координатной сетки начиналось на глубине 1,5-2 толщины ребра от линии контакта, причем большее значение относилось к периферийным слоям, наименьшее - к центральным слоям. По мере удаления элемента от оси симметрии ребра угол поворота ячеек увеличивался, что говорило о нарастании сдвиговых деформаций.

2. Горизонтальные линии координатной сетки оказались дугообразными с выпуклостью, направленной в сторону контакта, кроме линии, прилегающей к контактной поверхности. Кривизна этих линий увеличивалась по мере приближения к зоне контакта. Такой характер изменения формы горизонтальных линий указывает на то, что скорость движения в вертикальном направлении элементарных частиц, более удаленных от оси симметрии, была больше скорости частиц, менее удалённых от оси симметрии ребра. С увеличением степени деформации кривизна горизонтальных линий увеличилась.

3. Вертикальные линии координатной сетки изменили свое направление и стали выпуклыми в направлении боковой поверхности, кроме граничной линии, которая приобрела выпукло-вогнутую форму. С увеличением степени деформации кривизна вертикальных линий также увеличилась и линии, прилегающие к боковой поверхности, стали выпукло-вогнутыми. Расстояние между вертикальными линиями увеличивалось от недеформированной зоны к зоне контакта, что свидетельствовало об увеличении скорости материальных частиц в горизонтальном направлении.

4. Визуальное наблюдение за изменением геометрии вершины ребра показало, что выпучивание боковой поверхности по мере осадки росло и при значительной ее величине ребро теряло устойчивость. Появление сложной выпуклости на боковой поверхности ребра объяснилось силами контактного трения (как при осадке); кроме того, по границам внешних зон ребра деформация сдерживалась вследствие сплошности металла. Поэтому

наибольшая выпуклость имела место на некотором расстоянии от поверхности контакта.

Для расчета параметров деформированного состояния использовали метод визиопластичности [77], заключающийся в том, что сначала экспериментальным путем устанавливают векторное поле скоростей и затем на его основании вычисляют показатели деформированного состояния.

Методика определения мгновенной скорости перемещения материальной частицы основана на допущении, что если величина деформации достаточно мала, то прямая линия, соединяющая узлы координационной сетки, дает хорошее приближение к вектору скорости, если время между этапами деформации принять за единицу. Отсюда компонента скорости v_x и v_y для плоской деформации: $(v_x)_{ij} = (X_{ij} - X_{ij}^0) / (t_1 - t_0)$, $(v_y)_{ij} = (Y_{ij} - Y_{ij}^0) / (t_1 - t_0)$, где X_{ij}^0, Y_{ij}^0 - координаты ij - того узла исходной координатной сетки; X_{ij}, Y_{ij} - координаты ij - того узла искаженной координатной сетки; t_1, t_0 — время начала и конца деформации.

Компоненты скоростей деформаций ξ_x, ξ_y, η_{xy} в центральных узлах сетки определяли по известному полю скоростей истечения, используя способ замены частной производной симметричной конечной разностью:

$$(\xi_x)_y = \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{(v_x)_{i+1,j} - (v_x)_{i-1,j}}{2\Delta x};$$

$$(\xi_y)_x = \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{(v_y)_{i,j+1} - (v_y)_{i,j-1}}{2\Delta y};$$

$$(\eta_{xy})_{i,j} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{(v_x)_{i+1,j} - (v_x)_{i-1,j}}{2\Delta y} + \frac{(v_y)_{i,j+1} - (v_y)_{i,j-1}}{2\Delta x};$$

где $\Delta x, \Delta y$ - шаг координатной сетки вдоль осей X и Y соответственно.

В граничных узлах сетки компоненты скоростей деформаций определяли, используя способ замены частной производной несимметричной конечной разностью. Так, ξ_x вычислили по следующей формуле:

$$(\xi_x)_{ij} = [(v_x)_{i+1,j} - (v_x)_{i,j}] / \Delta x$$

Далее определяли интенсивность скоростей деформации сдвига:

$$H_v = \frac{2}{3} \sqrt{3(\xi_x)_{ij}^2 + \frac{3}{4}(\eta_{xy})_{ij}^2}$$

Рассмотренный выше метод был реализован на ЭВМ в виде программы вычисления параметров деформированного состояния. Исходными данными для расчетов служила экспериментальная информация в виде массивов координат узлов координатной сетки до и после осаживания X_j и Y_j . Деформированное состояние находили численным дифференцированием. Точность расчетов на ЭВМ была оценена по условию несжимаемости; она составила 3—11%, что указывает на приемлемость полученных в результате расчетов кинематических параметров деформации ребра. Причём меньшие значения соответствовали центральным узлам сетки, большие - граничным узлам.

На рис.46 приведены характерные графики распределения скоростей истечения v_x и v_y , скоростей деформаций ξ_x и η_{xy}) и интенсивности скоростей деформации сдвига H в различных вертикальных сечениях вершины ребра. Анализ показал, что скорости движения различных объемов вершины ребра были неодинаковыми. Компонента скорости v_x определяла характер искажения вертикальных слоев, показанных на рис. 46. Скорость возрастала от центра симметрии к боковой поверхности, от недеформированной зоны к зоне контакта, где и достигала максимальных значений. Компонента скорости v_y изменялась по одному и тому же закону для всех вертикальных сечений, принимая максимальное значение в зоне контакта ребра с инструментом, а минимальное — в нижней границе очага деформации. Наименьшие значения v_y имели центральные слои, а наибольшие — слои, лежащие на боковой поверхности ребра.

Распределение ξ_x в характерных сечениях подтвердило характер распределения скоростей истечения. Наличие сил трения на контакте привело к

тому, что наибольшие скорости деформации ξ_y имели материальные частицы, расположенные на глубине от контактной поверхности.

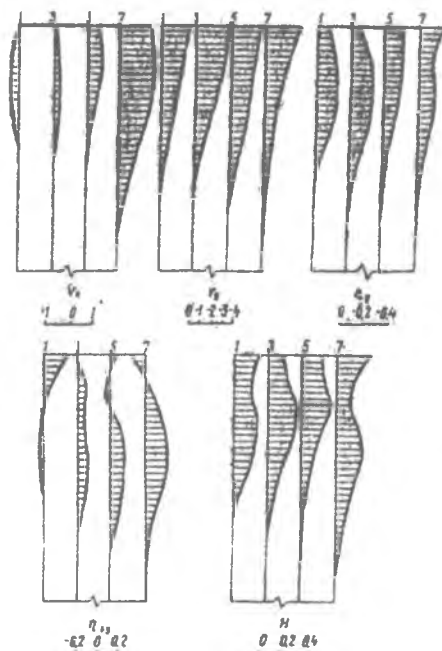


Рис.46 Распределение параметров деформированного состояния в различных сечениях
($i=1, \dots, 7$) вершины ребра

Кривые, характеризующие изменение скорости деформации сдвига \square_{xy} , отражали влияние сил трения и имели четко выраженные максимумы на глубине 6-15 мм от контактной поверхности.

Инвариантная характеристика H отражала характер взаимных нарастающих смещений частиц металла и определяла зоны затрудненной и интенсивной деформации. Интенсивность скоростей деформации сдвига была максимальной в угловых точках и на глубине 6—15 мм от контактной поверхности и затухала при входе в очаг деформации.

Таким образом, рис.46 характеризует сложный характер течения металла при локальном внедрении плоского бойка в ребро, моделирующего осаживание ребра при волочении. Наличие пластического шарнира при асимметрии процесса осаживания привело к изгибу ребра при волочении, что в конечном итоге уменьшило проходное сечение трубы и нарушило плотный контакт.

Результаты моделирования позволяют выбрать предельные обжатия при волочении, при которых происходит потеря устойчивости ребер.

Для аналитического изучения локальной деформации ребер может быть успешно использован метод линий скольжения. Возможные поля линий скольжения представлены на рис.47. При этом граница контакта принята прямой, трение на поверхности контакта отсутствует. Построенное поле показывает наличие жесткой зоны I и зоны пластической деформации, ограниченной криволинейным контуром *OBD*.

С учетом свойств линии скольжения величина давления p , необходимая для формоизменения вершины ребра, равна $p = -2k(1-\gamma)$. Из годографа скоростей (см. рис. 47.) следует, что зона I движется вниз как твердое тело с радиальной скоростью осадки v .

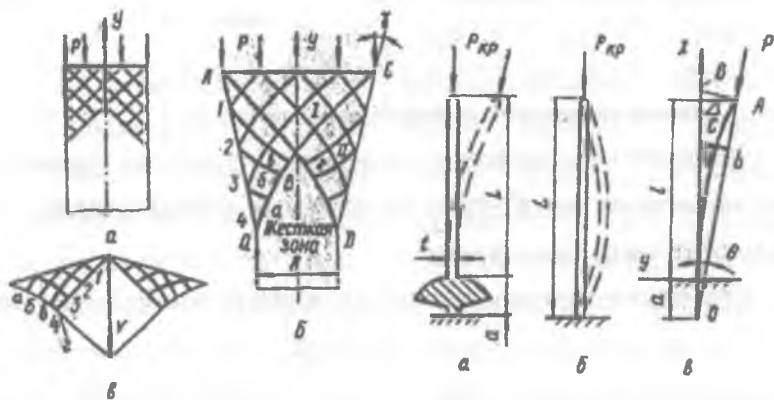


Рис.47 Поле линий скольжения в начальный момент волочения (а), в конечный момент волочения (б), годограф скоростей (в).

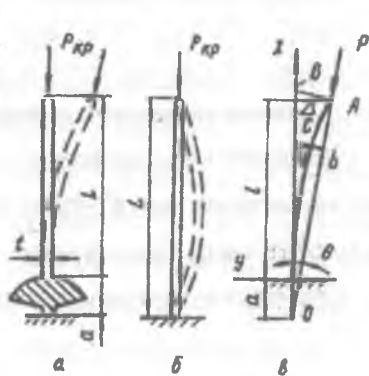


Рис 48 Схемы деформации ребра при потере устойчивости: а- фактическая; классическая; принятая расчетная.

Вдоль линии BC касательная составляющая скорости разрывна, а нормальная составляющая скорости равна $(1/\sqrt{2})v$. Вдоль линии BD касательная составляющая скорости также разрывна, а нормальная составляющая равна нулю.

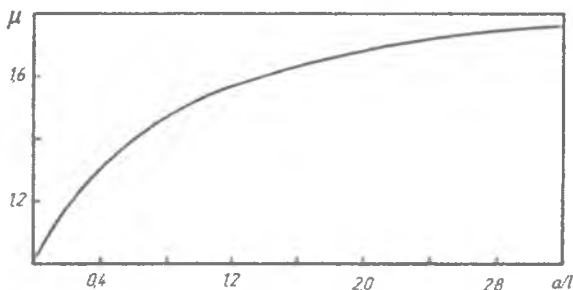


Рис. 49 Зависимость коэффициента μ от параметра a/l

Предельное обжатие при волочении ограничивается потерей устойчивости ребер, при этом сердечник относительно трубы может поворачиваться (рис.48). Ребро при волочении будет в упругой области устойчивым, если выполняется условие,

$$\frac{l}{\ell} \geq \frac{2}{\pi} \sqrt{3 \frac{P_{кр}}{E}}$$

где $P_{кр}$ - критическая нагрузка на ребро единичной длины.

Для расчета $P_{кр}$ рассмотрим схему (рис.48). Уравнение равновесия для этого случая имеет вид $(d^2 y/dx^2) + A^2 y = B(a+x)$, где $A^2 = P/EJ$; $B = P\Delta/EJ$ ($a + \ell$); a - радиус сердцевин, ℓ - высота ребра.

Решение этого уравнения позволяет получить расчетную формулу [93]:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2}{\mu_2} \cdot \frac{\pi^2}{\mu^2},$$

где значение коэффициента μ для различных соотношений a/ℓ можно взять из графика на рис.49 [94].

При $a = 0$ получим классическое решение:

$$P_{кр} = \pi^2 EJ/L^2$$

Сечение трубы, полученной при оптимальной вытяжке, показано на рис.50а.

Двухстенные трубы. Исследование влияния пластических свойств оболочки и ребристого сердечника, вставленного в нее, на изменение контактного давления σ_k и геометрию ребер в зависимости от вытяжки при волочении составных двухстенных труб из сплава АД31 через коническую волоку с полууглом 12° показало, что σ_k возрастает при увеличении предела текучести металла ребристого сердечника (трубы с внешним и внутренним оребрением) и степени обжатия (табл. 2.). Диаметр трубы-оболочки составлял 42 мм, толщина 2 мм, диаметр описанной окружности ребристого сердечника составлял 34 мм, толщина ребер 2 мм. После закалки трубы-сердечники правили на растяжной машине для того, чтобы можно было свободно вставить их в трубы-оболочки с деформацией 1 %.

Таблица 2 Результаты волочения двухстенных труб

Номер вариант а	Элемент, состояние	Результаты волочения при теоретическом внедрении ребра, мм		
		0,25	0,5	0,75
1	Оболочка, гп, сердечник, гп	0,01/1,0	0,015/1,4	0,04/2,1
2	Оболочка, гп, сердечник, зс	0,02/2,7	0,025/3,6	0,075/6,0
3	Оболочка, гп, сердечник, зис	0,06/7,5	0,125/9,8	0,18/16,6

Примечания: В числителе - δ_{ϕ} , мм, в знаменателе - σ_k , МПа. 2. σ_T для оболочки составляет 80 МПа, для сердечников гп, зс и зис 80, 120 и 180 соответственно (гп — горячепрессованное состояние; зс — закаленное и естественно состаренное; зис — закаленное и искусственно состаренное).

Расчет фактического внедрения ребер трубы-сердечника в трубу-оболочку δ_{ϕ} производили по выражению $\delta_{\phi} = D_{c.в} - (D_{\sigma} - 2t_{0,в})$, а расчет диаметра волоки для гарантированного охвата сердечника с учетом утолщения стенки оболочки (0,02 мм на 1 мм обжима) - по формуле $D_{p.в} = D_{c.о} + 2(t_0 + 0,02 \Delta D) - \delta_T$, где δ_T -

теоретическое внедрение; $\delta_T = 0,25; 0,5; 0,75$ мм; t_0 — толщина стенки исходной трубы-оболочки; $t_{0в}$ — толщина стенки трубы-оболочки после волочения; D_0 — наружный диаметр трубы-оболочки после волочения; $D_{cв}$ - диаметр описанной окружности по- внешним ребрам; $D_{св}$ - диаметр описанной окружности сердечника после волочения; ΔD - обжим оболочки по диаметру; $D_{рв}$ — диаметр рабочей волоки.

При сборке волочением двухстенных труб имело место внедрение вершины ребер в оболочку. Чем выше прочность металла сердечника, тем больше глубина внедрения.

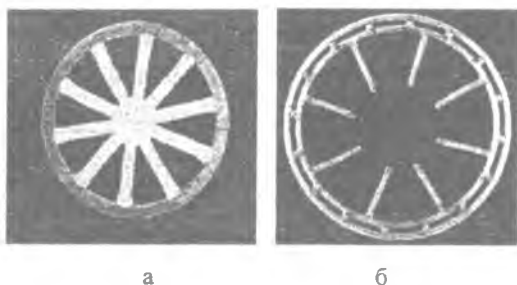


Рис.50 Сечения сборных теплообменных труб, полученных при оптимальных вытяжках при волочении:

а-многоканальная труба; б-двухстенная труба

Причем δ_{ϕ} не соответствовало δ_T . Это происходило потому, что при волочении короткие ребра ($h/b \sim 1,5$) сердечника равномерно осаживались по высоте с частичным внедрением оболочку.

Проведенные исследования позволили изготовить составные двухстенные трубы различных размеров (рис.52б).

Внутреннее - оребренные трубы. Внутреннее - оребренные трубы небольшого диаметра могут быть получены из пресованных заготовок путем безоправочного волочения, рис.51. Литературные данные о данном процессе отсутствуют. Для установления зависимостей изменения геометрии труб от степени вытяжки были проведены эксперименты на образцах из сплава АД31 в естественно состаренном состоянии.



Рис. 51 Внутренне-ребренные трубы после деформации с увеличивающейся вытяжкой безоправочного волочения.

Наружный диаметр заготовок составлял 26,8 мм, толщина стенки 2 мм, шесть ребер имели высоту 8 мм. Волочение осуществляли на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30 со скоростью 75 мм/мин. В качестве смазки использовали “Вапор Т”. Применяли волокнистые материалы с углом 12° . Замеры геометрии сечения труб до и после волочения (на шлифах) проводили на машине УИМ-21. На основании экспериментов построили графики определяющие зависимости этих геометрических параметров от вытяжки (рис.52).

Толщина радиальных ребер внутри трубы до и после волочения при различных вытяжках осталась одной и той же, т.е. практически не деформировались. Толщина стенки трубы и соответственно лучей с увеличением вытяжки возрастала (рис.52). Путем многократного волочения добились того, что ребра сомкнулись в центре трубы, образуя многокамерную трубу. На наружной поверхности трубы после волочения обнаружили продольные полосы крупного зерна вдоль продольных ребер, что было вызвано неравномерным напряженным состоянием по контуру трубы из-за наличия у нее ребер. Качественная подготовка контактных поверхностей оболочки-вставки - одно из основных условий обеспечения эффективности теплообмена. Наличие на контактных поверхностях загрязнений, масляных и жировых пленок, оксидов, пыли и др., появляющихся на исходных заготовках при их подготовке к сочленению, увеличивают термическое сопротивление. В отечественной и зарубежной практике контактные поверхности заготовок перед сочленением подвергают либо механической обработке, либо

химической, либо сочетают оба вида обработки. Химическую обработку выполняют пакетами в ваннах.

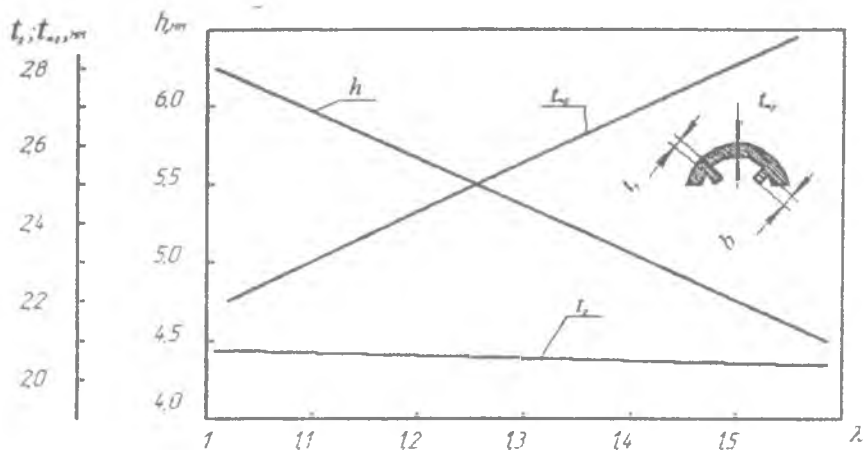


Рис.52 Зависимость геометрических параметров сечения внутренне-орезбренной трубы от вытяжки.

Механическую очистку контактных поверхности предварительно обезжиренных заготовок осуществляют металлическими щетками.

3.2 Многоканальные трубы со спиральным оребрением

Винтовые многоканальные трубы (рис.53) представляют собой конструкцию из однородных и разнородных материалов, осуществляемую посадкой с натягом оболочки на сердечник - вставку. Вставки могут иметь поперечные сечения разной конфигурации в виде спиральной полосы (рис53,в), сердечника с винтовыми ребрами (рис53,г) или трубы с наружным винтовым оребрением (рис53,б). Наружная часть многоканальных труб может быть изготовлена в виде гладкой оболочки(рис53,с,т) или оболочки с внутренними винтовыми ребрами(рис.53,у,ф).

Изготовление винтовых многоканальных труб сложных сечений каким-либо одним из рассмотренных выше способов не представляется возможным.

Для производства таких труб следует использовать комплекс технологических операций: кручение на крутильных станках и прессование для изготовления винтовых заготовок с последующей их сборкой волочением [69].

Технологическая схема изготовления винтовых многоканальных труб волочением состоит из следующих операций: подготовки внутренних вставок, резки в меру; подготовки наружных оболочек заковки захваток, введения вставок внутрь оболочек; совместного волочения внешних и внутренних слоев через круглые волокни в холодном состоянии; контроля качества труб.

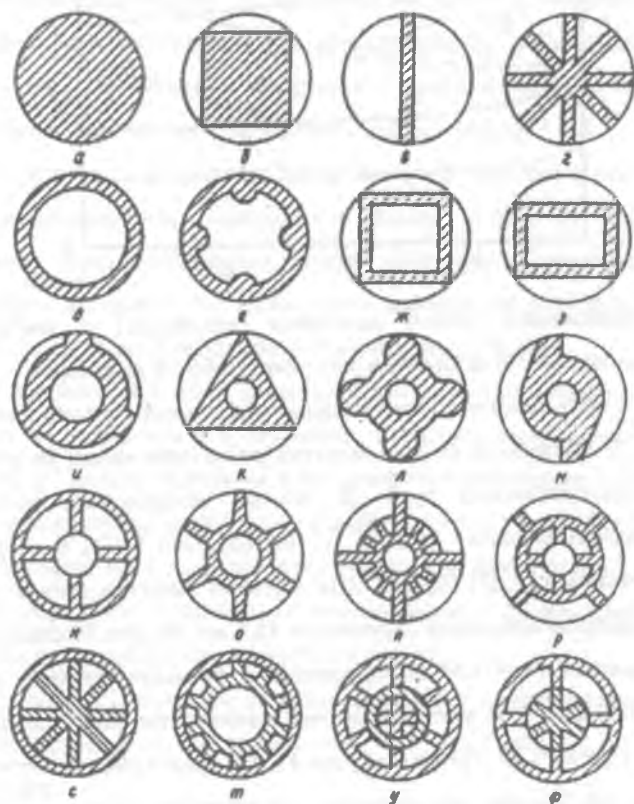


Рис.53 Сортамент поперечных сечений винтовых профилей и труб.

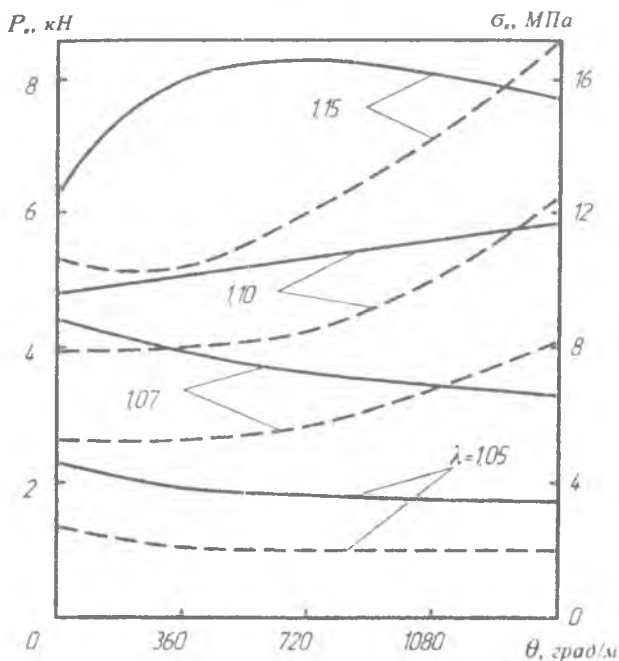


Рис.54 Зависимости усилия волочения (сплошные) и контактного давления (штриховые) от угла закрутки ребер сердечника и вытяжки λ .

На рис.54 приведены экспериментальные зависимости усилия волочения P_n и контактного давления σ_c от угла закрутки ребер сердечника, полученные при сборке многоканальных труб. В опытах использовали заготовки, содержащие медную оболочку $22 \times 1,3$ мм ($\sigma_s = 240$ МПа) и ребристые винтовые сердечники из АД31 ($\sigma_s = 240$ МПа) с углами закрутки, град/м: 0; 360; 720; 1440 и диаметром описанной окружности 18,5 мм. Из рис.54 следует, что при малых обжатиях ($\lambda = 1,05$) по сравнению с прямыми ребрами усилие волочения уменьшается. Это уменьшение тем значительнее, чем больше угол закрутки ребер. При $\lambda = 1,13$ и углах закрутки $\theta \geq 720$ град/м наблюдается изгиб винтовых ребер по высоте, что приводит к снижению усилия волочения. Контактные давления σ_c с увеличением θ возрастают. Прирост тем

интенсивнее, чем больше вытяжка. Герметичность зоны контакта обеспечивается при $\lambda \geq 1,07$ для любых углов закрутки ребер.

Так как упрочнение металла оболочки при сборке повышает упругую отдачу, что в свою очередь снижает натяг, а следовательно, контактное давление σ_k , то зазор между оболочкой и вставкой до волочения должен быть минимальным и обеспечивать свободный ввод вставки в оболочку.

Трудоемкость изготовления винтовых многоканальных труб может быть сокращена исключением технологической операций предварительного закручивания посредством совмещения волочения с закручиванием ребер сердечника непосредственно при сборке силами, действующими в очаге деформации. С этой целью предложено торцевые скосы ребер выполнить несимметричными относительно радиальной оси ребра [67-69].

Сердечник 1 на вершинах ребер которого выполнены несимметричные скосы перед волочением помещают в оболочку 2 (рис.55). При совместном волочении через коническую волоку оболочки и сердечника степень деформации выбирают так, чтобы после деформации получить сердечник, в котором скосы вершин ребер примут симметричную форму.

В процессе волочения изменяется конфигурация ребер сердечника при переходе из положения I в положение II за счет расплющивания скоса на величину $\Delta/2$ силами волочения и его поворота относительно собственной оси на угол φ под действием крутящего момента M , где Δ - высота скоса. На рис.56 угол φ является предельно допустимым, так как фактический угол поворота сечения ребра будет определяться механическими и физическими свойствами материала сердечника обжатием и углом скоса γ_c .

Предельно возможный относительный угол закрутки ребер в процессе волочения определим по выражению: $\theta = \varphi/l_{од}$, где $l_{од}$ - длина очага деформации;

Для конической волоку

$$l_{од} = (R_2 - R_1) / \sin \alpha_0 = \Delta / (2 \sin \alpha_0).$$

Очаг деформации при расплющивании скоса в первом приближении имеет в плане вид треугольника ABC на рис.56.

D – точка приложения равнодействующей всех сил R, действующих в очаге деформации в плоскости, перпендикулярной оси волочения.

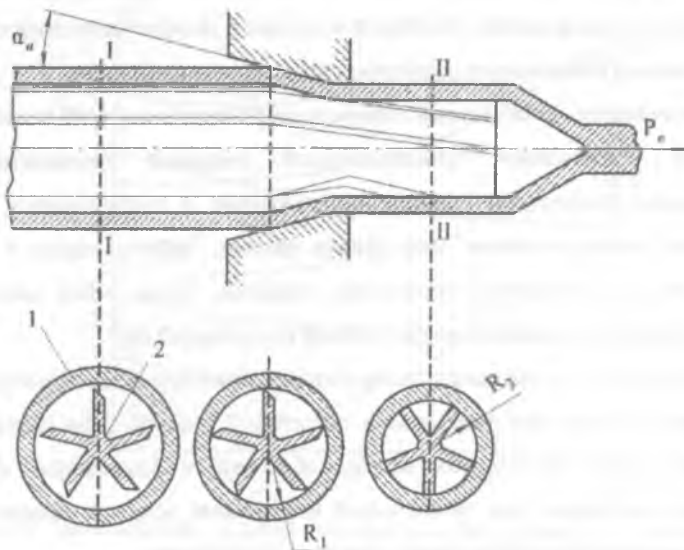


Рис.55 Способ изготовления винтовых многоканальных труб.

Смещение равнодействующей R на величину d относительно радиальной симметрии ребра образует крутящий момент $M=Rd$.

Значение R может быть найдено из уравнения равновесия всех сил на контактной поверхности ребра

$$R = \int_0^b \int_0^{a_n} P \cos \alpha_n dx dz + \int_0^b \int_0^{a_n} r \sin \alpha_n dx dz$$

где P и τ – нормальные и касательные напряжения в окрестности контактной площадки $dx dz$ соответственно: α_n – угол между нормалью к образующей волоки и равнодействующей R.

Принимая $\tau = \mu P$, где μ – коэффициент трения и $P \approx 1,15 \sigma_s$, получим

$$R = 0,575 \sigma_s (\cos \alpha_n + \mu \sin \alpha_n) b l_{0d},$$

откуда

$$M=0,575\sigma_s(\cos\alpha_n+\mu\sin\alpha_n)bl_0\Delta d$$

Из геометрических представлений плечо $d = b/2 - x_D$, где x_D - координата центра тяжести области контакта ABC.

$$x_D = \int_0^b f(x) x dx / \int_0^b f(x) dx.$$

Под действием крутящего момента прямые продольные ребра преобразуются в винтовые ребра, а свободный конец сердечника из поступательного движения переходит в поступательно-вращательное, в сторону выполнения скосов. После волочения получают многоканальную трубу, состоящую из сердечника с винтовыми ребрами и внешней оболочки.

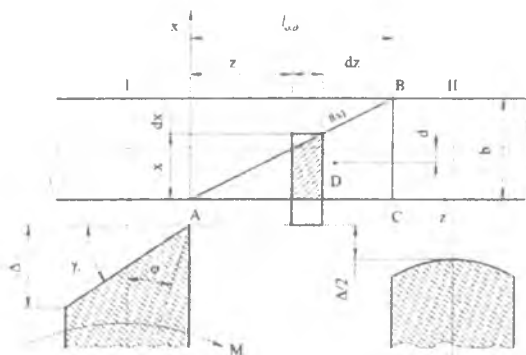


Рис.56 Схема деформации вершины ребра при волочении с кручением.

Ребра сердечника при закручивании в процессе волочения претерпевают определенную деформацию, обусловленную механизмом сборки. Величина угла закрутки зависит главным образом от геометрии вершины ребра, вытяжки по оболочке и состояния поставки материала сердечника. Поэтому представляет известный интерес исследование совместного влияния указанных фактов на угол закрутки, усилие совместного волочениями и величину контактных сборочных напряжений. С этой целью использовали методы планирования эксперимента [78].

Поиск рационального варианта сборки волочением винтовых многоканальных труб проводили по плану дробного факторного эксперимента 2^{3-1} с генерирующим

соотношением $x_3 = x_1 x_2$ и определяющим контрастом $I = x_1 x_2 x_3$. В качестве варьируемых факторов были взяты: угол скоса при вершине ребра $x_1 = \gamma_c$; коэффициент вытяжки для оболочки по диаметру $x_2 = \lambda$; состояние поставки материала ребристого сердечника, характеризуемое пределом текучести $x_3 = \sigma_s$ перед обжатием. Откликами служили усилия совместного волочения P_{Σ} и P_c , приходящиеся на деформацию скручивания ребер, угол закрутки θ , характеризующий поворот сечений, разделённых расстоянием в один метр, одно относительно другого и величина контактного сборочного напряжения σ_k на границе ребро-оболочка. Контактное напряжение рассчитывали через усилие выпрессовки Q сердечника из оболочки. Приняты следующие интервалы варьирования факторов: $x_1 = (30 \div 60)$, $x_2 = 1,12 \div 1,19$, $x_3 = 90 \div 180$ МПа.

Опыты проводили на линейном волочильном стане усилием 30 кН со скоростью 15 м/мин через конические волокна с полууглом $\alpha_s = 12^\circ$, которые перед волочением смазывали маслом Вапор Т. Волочению подвергали заготовки, содержащие оболочку из меди МЗ ($\sigma_s = 240$ МПа) размерами $\varnothing 22 \times 1,3$ мм, закованную под захватку с одного конца. С другого конца в оболочку вставляли прессованный 10-реберный звездообразной формы сердечник из алюминиевого сплава АД31. Вершины ребер имели несимметричные скосы под углами 30° и 60° . Диаметр описанной окружности ребер сердечника составил 17,9 мм. После отжига и закалки с искусственным старением σ_s для сердечника соответственно составляло 90 и 180 МПа. Условия проведения и результаты опытов приведены в табл 3.

Таблица 3. Условия проведения эксперимента и средние значения (по двум заготовкам) откликов

Опыт	γ_c	λ	σ_s , МПа	P_{Σ} , Н	P_c , Н	θ , град/м	σ_k , МПа
№1	60	1,12	180	5700	1500	430	20,2
№2	30	1,12	90	5150	850	320	4,4
№3	60	1,19	90	9900	1200	1040	19,2
№4	30	1,19	180	10750	3450	760	25,3

Угол закрутки ребер определяли после выпрессовки сердечника из оболочки с помощью угломера с точностью $\pm 3^\circ$, усилие волочения по шкалам силоизмерителя ± 50 Н, контактное напряжение ± 1 МПа.

После статистической обработки экспериментальных данных получены адекватные уравнения регрессии

$$P = 7875 + 2450x_2 + 350x_3,$$

$$P_c = 1750 + 400x_1 + 575x_2 + 725x_3,$$

$$\theta = 637,5 - 97,5x_1 + 262,5x_2 - 425x_3,$$

$$\sigma_k = 17,3 - 2,4x_1 + 5,0x_2 + 5,5x_3,$$

где $x_1 = (\bar{x}_1 - 45^\circ)/15^\circ$; $x_2 = (\bar{x}_2 - 1,155)/0,035$; $x_3 = (\bar{x}_3 - 13,0)/45$ – значения факторов.

Анализируя эти уравнения, можно отметить, что усилие совместного волочения при сборке винтовых многоканальных труб, определяется в первую очередь, коэффициентом вытяжки по оболочке и в меньшей степени – состоянием материала ребристого сердечника. Фактор x_1 оказался незначимым. Для безобрывности процесса сборку волочением целесообразно проводить при меньших усилиях. Усилие, необходимое для деформации ребер сердечника наоборот - в первую очередь зависит от состояния материала сердечника, а уже потом от вытяжки по оболочке.

Наиболее эффективно влияет на относительный угол закрутки вытяжка по оболочке. Чем меньше предел текучести материала сердечника и угол γ_c при вершине ребра, тем больше угол закрутки. Контактное давление, характеризующее плотность сцепления слоев, возрастает по мере увеличения коэффициента вытяжки, прочности материала сердечника и уменьшения угла скоса γ_c .

Таким образом, наличие несимметричных скосов на вершинах ребер сердечника приводит к закручиванию ребер непосредственно в процессе волочения, что повышает производительность изготовления винтовых

многоканальных труб. Регулируя форму вершины ребра, состояние поставки материала сердечника и обжатие, можно получить угол закрутки в пределах 0,2 - 0,3 оборота одного сечения относительно другого, отстоящего на 1 м.

Эффективны испарители с многоканальными трубами с оболочкой из меди и внутренним сердечником из алюминиевого сплава, выполненным в виде соприкасающихся торцами и предварительно повернутых относительно друг друга вдоль продольной оси отрезков сердечника с продольными ребрами звездообразного поперечного сечения на угол, равный половине угла между ребрами [79]. В этом случае одновременно действуют эффект оребрения и эффект турбулизации потока.

Изготовление таких труб имеет ряд недостатков: трудность получения точной ориентации отрезков сердечника относительно друг друга при сборке, низкая производительность процесса. Из-за этих недостатков сдерживается их производство.

Разработан новый способ изготовления такой многоканальной трубы [80], который реализуется следующим образом. На сердечнике с продольными ребрами выполнены последовательно по ходу волочения в местах поворота отрезков длиной l кольцевые проточки шириной B , а затем на расстоянии ширины проточки - диаметральные надрезы на глубину не менее высоты ребра до сердцевины рис.57а. Далее сердечник вводят с зазором в оболочку и осуществляют их соединение путем волочения [рис.57б].

В процессе волочения продольные ребра на участке между проточкой и надрезом теряют радиальную устойчивость. Это приводит к возникновению крутящего момента и соответственно повороту отрезков на участке проточки относительно друг друга в окружном направлении на угол так как ребра теряют устойчивость в процессе продольного перемещения, то они приобретают форму спирали. Спираль ребер обеспечивает поворот и турбулизацию теплообменной среды в каналах между отрезками сердечника.

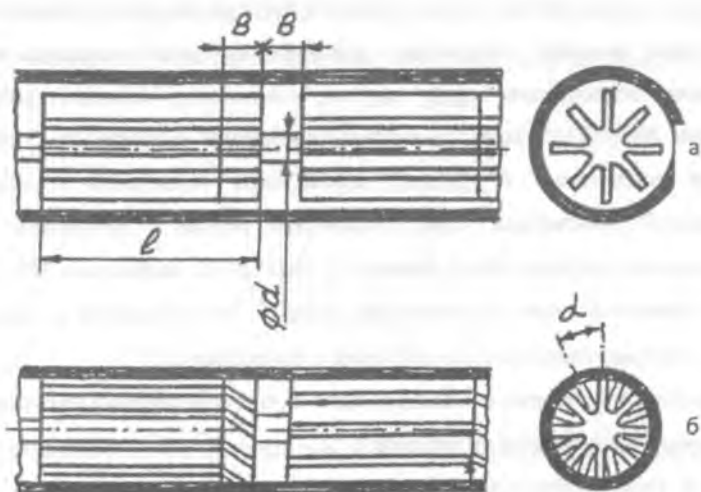


Рис.57 Конструкция заготовки (а) и готовой многоканальной трубы (б)

Жесткая конструкция сердечника исключает нарушение ориентации отрезков внутри оболочки относительно друг друга. Ширину кольцевой проточки рекомендуется брать в пределах длины очага деформации при волочении. Наличие кольцевой проточки на ребрах в процессе эксплуатации позволяет теплообменной среде поступать между смежными каналами внутри трубы и уравнивать условие теплообмена в различных каналах.

Для прогнозирования угла поворота отрезков сердечника относительно друг друга проведен многофакторный эксперимент. Для эксперимента использовали натурные образцы, имитирующие процесс сборки серийно выпускаемых теплообменных труб. В качестве заготовок взяты цилиндрическая оболочка из меди М3 размерами $\varnothing 22 \times 1,3$ мм и сердечник с десятью продольными ребрами из алюминиевого сплава АД31 с размерами сердцевины 465 мм, толщиной ребра 1,2 мм, диаметром описанной окружности вокруг вершин ребер $\varnothing 18,5$ мм. Механические свойства материала сердечника и оболочки соответствовали отожженному состоянию. Сердечник брали длиной 100 мм с одной кольцевой проточкой и диаметральной надрезкой посередине.

Опыты проводили по схеме дробного факторного эксперимента 2^{3-1} [78]. Исследовали влияние следующих факторов на угол поворота отрезков сердечника относительно друг друга: x_1 -величину, обжатия ребра при волочении Δh (0,25-0,75мм), x_2 -ширины кольцевой проточки В (3-6мм), x_3 -диаметра сердцевины d (3-5мм). Соединение сердечника с оболочкой осуществлено волочением через конические волокни с полууглом 12° на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30 со скоростью 150 мм/с. В качестве смазки волокни использовали Вapор Т. Угол поворота α определяли после извлечения сердечника из оболочки с точностью $\pm 1,0^\circ$.

План дробного факторного эксперимента и его осредненные результаты по двум заготовкам приведены в таблице 4.

Таблица 4. План дробного факторного эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0,25	3	5	3
2	0,75	3	3	30
3	0,25	6	3	3
4	0,75	6	5	6

После статической обработки результатов эксперимента было получено адекватное уравнение регрессии, отражающее влияние на угол поворота вышеуказанных факторов

$$\alpha = 11,2 + 6,5x_1 - 5,3x_2 - 6,8x_3,$$

где $x_1 = \frac{\bar{x}_1 - 0,5}{0,25}$; $x_2 = \frac{\bar{x}_2 - 4,5}{1,5}$; $x_3 = \frac{\bar{x}_3 - 4,0}{1,0}$.

Здесь $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ - натуральные значения факторов.

Анализ уравнения показывает, что с повышением обжатия по ребру угол поворота возрастает, а с увеличением ширины проточки В и диаметра сердцевины d - уменьшается. Полученное уравнение позволяет выбрать параметры, обеспечивающие расчетный угол поворота отрезков сердечника

относительно друг друга. Из рис.58 видно, что при $\Delta h = 0,5$ мм; $B = 4,5$ мм; $d = 3$ мм получаем угол поворота, равный половине угла между ребрами, т.е. 18° .

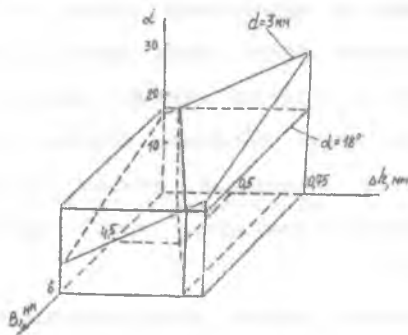


Рис.58 Диаграмма выбора параметров для угла поворота образцов сердечника на 18°

Таким образом, наличие на обращенных друг к другу концах соседних отрезков сердечника кольцевых проточек и круговых надрезов приводит к их повороту относительно собственной оси непосредственно в процессе волочения. Регулируя величиной обжатия при соединении, шириной проточки и диаметром сердцевины можно получить поворот отрезков сердечника в пределах угла между соседними ребрами.

3.3 Двухкамерные трубы со спиральным турбулизатором

При производстве холодильных машин большой производительности значительный эффект дают трубчатые теплообменники, внутри которых расположены турбулизаторы. Винтовая поверхность турбулизаторов сообщает вращательное движение теплообменной среде, которая турбулизует поток жидкости и существенно улучшает теплотехнические характеристики труб.

Типичный трубчатый теплообменник приведен на рис.59. Основным конструктивным элементом теплообменника является турбулизатор в виде длинной тонкой полосы 2, скрученной винтом. Он расположен внутри оболочки 1 и разделяет сечение трубы на две камеры.

Одним из перспективных способов производства двухкамерных труб со спиральным турбулизатором является холодное волочение. В этом случае технологическая схема их изготовления состоит из следующих операций: подготовки спиральных полос (резка листа на полосы, скручивание), подготовки наружных оболочек, заковки захваток, введения с зазором спиральных полос внутрь оболочек, обжатия оболочки до плотного соприкосновения со спиральной полосой. Волочение обеспечивает изготовление сборных двухкамерных труб большой длины с высокой точностью размеров.

При теоретическом анализе упругопластического кручения длинной полосы с размерами a и b на закруточных станках, когда $a \gg b$, можно пренебречь влиянием ее коротких сторон на распределение касательных напряжений. Считаем, что упругая деформация происходит в центральной полосе шириной d , а пластическая деформация - в двух зонах, примыкающих к длинным сторонам a .

Материал в пластической зоне упрочняется по степенному закону $\tau = C\gamma^n$, где γ - сдвиговая деформация, равная $\gamma = x\theta$; x - расстояние от оси кручения до рассматриваемой точки, $0,5 d \leq x \leq 0,5 b$; θ - относительный угол закрутки $\theta = \alpha/l$; α - абсолютный угол поворота вращающегося захвата; l - длина скручиваемой полосы. Между углом подъема винтовой линии на кромке полосы ψ и θ имеется соотношение $\psi = \text{arctg}(\alpha \theta/2)$.

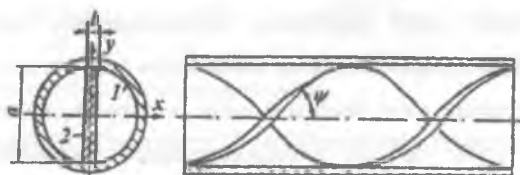


Рис.59 Конструкция двухкамерной трубы

Угол θ можно также выразить через количество оборотов вращающегося захвата $N = 0.5\theta l/\pi$. Для определения коэффициентов C и n необходима

диаграмма сдвига $\tau = f(\gamma)$, которую получали посредством перестройки диаграммы растяжения $\sigma = f(\epsilon)$:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_e}\right) - \lg\left(\frac{\tau_s}{\tau_e}\right)}{\lg\left(\frac{E_s}{E_e}\right) - \lg\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_e}\right)} \quad C = (0,5+0,6) \frac{\sigma_s}{\epsilon_s^n}$$

Упругопластическими границами являются прямые:

$$x = \pm \frac{d}{2} \quad d = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3G\theta}}$$

где G — модуль сдвига. Выражение для полного крутящего момента при упругопластическом кручении:

$$M = \frac{1}{3} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} ad^2 + \frac{4ac[(b\theta/2)^{n+2} - (d\theta/2)^{n+2}]}{\theta^2(n+2)}$$

В условиях неограниченного возрастания θ пластическая зона заполняет все поперечное сечение, а упругая зона вырождается в ось. Если $d = 0$, то получим выражение предельного пластического момента

$$M = \frac{Cab^2(b\theta/2)^n}{n+2}$$

После кручения и освобождения от захватов полоса раскручивается на угол

$$\gamma_p = \frac{1}{Gb^3} \left\{ a^2 \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{12C[(b\theta/2)^{n+2} - (d\theta/2)^{n+2}]}{\theta^2(n+2)} \right\}$$

Чтобы правильно задавать θ , необходимо знать γ_p , так как $\theta = \beta + \gamma_p$, где β — относительный угол остаточной закрутки.

На рис.60 представлены диаграммы кручения и упругой раскрутки, построенные по расчетным формулам 32 и 33 для полосы с размерами $\alpha=17$ мм,

$b = 1,2$ мм из сплава АД31. Из диаграммы видно, что с ростом θ M возрастает по нелинейному закону и быстро приближается к предельному моменту.

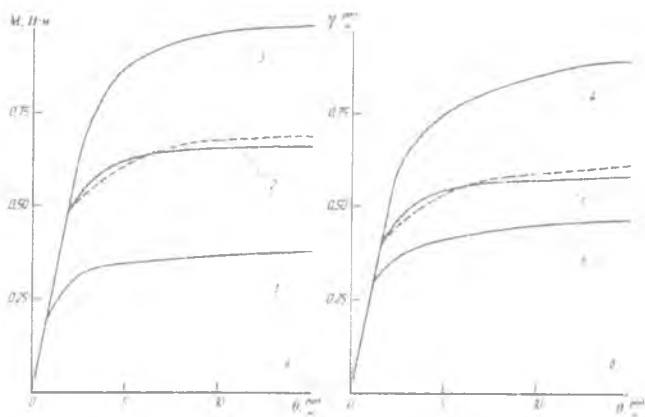


Рис.60 Диаграммы кручения (а) и раскручивания (б) полосы из сплава АД31:
 1-АД31Т1; 2-АД31Т; 3-АД31М; 4 - $b = 0,8$ мм; 5 - $b = 1,2$ мм; 6 - $b = 1,6$ мм;
 — расчет; ---- эксперимент.

При $\theta \geq 7$ рад/м с точностью до 3 % все поперечное сечение полосы переходит в пластическое состояние. Расчетные кривые хорошо согласуются с экспериментальными.

Предельный угол подъема винтовой линии $\psi_{\text{пред}}$ ограничивается либо разрывом на кромке полосы, либо потерей устойчивости поперечного сечения. Относительное удлинение винтовой линии по кромке полосы:

$$\delta \geq \frac{1 - \cos \psi_{\text{пред}}}{\cos \psi_{\text{пред}}} 100.$$

Потеря устойчивости заключается в том, что при критическом значении θ начинается ускоренное нарастание прогиба сечения скручиваемой полосы. При дальнейшем кручении полоса складывается, ее кромки сгибаются в направлении к оси кручения, а скрученная полоса приобретает форму спиральношовной трубы.

Экспериментальные исследования по сборке двухкамерных труб волочением проводили на образцах: отожженной оболочки диаметром 18x0,8

мм из меди МЗ и спиральной полосы из алюминиевого сплава АМг2 толщиной $b = 1,0$ мм, шириной $a = 15,7$ мм с углами подъема 10, 20 и 30°. Волочение осуществляли на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30 в конические волокни. В качестве смазки использовали масло «Индустриальное 30». Исследовали влияние коэффициента вытяжки $\lambda = D_{заг}/D_{от}$ угла подъема спирали полосы ψ на силовые параметры волочения и устойчивость полосы.

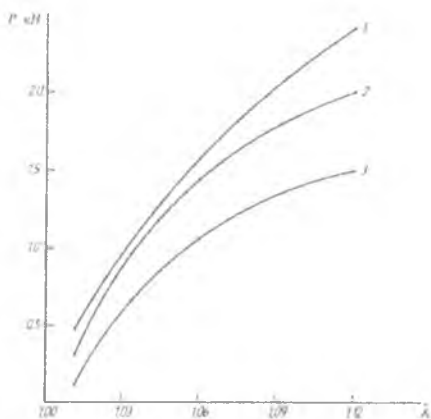


Рис.61 Влияние угла подъема спирали полосы ψ на усилие волочения ψ
град: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10;

Из анализа полученных результатов (рис.61) следует, что с увеличением коэффициента вытяжки и угла подъема винтовой линии усилие сборки волочением возрастает. На потерю устойчивости сечения полосы при волочении оказывают влияние как λ так и ψ . Причем вытяжка влияет более интенсивно. При вытяжках $\lambda \geq 1,12$ для всех углов закрутки обнаружен изгиб сечения полосы. Продольная деформация полос по длине при сборке была незначительна и составляла 0,2-0,3%. В области контакта полосы с оболочкой имело место увеличение ширины контактной площадки на 10-15 % по сравнению с исходной толщиной b . Жесткое соединение контактируемых поверхностей обеспечивается путем механического зацепления микронеровностей и наличием натяга.



Рис.62 Внешний вид двухкамерной трубы

На основе проведенных исследований на закруточных станках были изготовлены полосы, скрученные винтом на углы до $\theta = 30$ рад/м, вырезанные из стальных и алюминиевых листов с размерами $a = 15 \div 50$ мм, $b = 1 \div 3$ мм. Наружная часть трубчатых теплообменников была взята в виде стальной и медной гладких оболочек, а также в виде алюминиевой трубы с 24 невысокими внутренними спиральными ребрами, закрученными в направлении, противоположном направлению закрутки полосы (рис.62). Сборкой волочением получены опытные образцы двухкамерных труб с наружным диаметром 16-55 мм. Полученные трубы обеспечивают компланарное течение теплоносителя и обладают повышенной тепловой эффективностью.

3.4 Выбор способа контроля прочности сцепления в составных трубах.

Критерием качества сборки теплообменных труб является контактное давление на границе ребро-оболочка, величина которого определяется технологическими параметрами процесса волочения. Из работы [70] известно, что для оценки величины контактных давлений чаще всего применяют один из следующих методов: тензометрический метод замера электрического сопротивления контактной зоны, метод освобождения сердечника от оболочки путем сдергивания (выдергивания) либо выдавливания.

Сущность тензометрического метода состоит в том, что оценку величины нормальных контактных давлений производят по значениям остаточной

деформации в теле оболочки после совместного волочения. Электросопротивление имеет аналогию с тепловым сопротивлением, поэтому путем измерения электросопротивления зоны контакта можно оценивать тепловое сопротивление этой зоны.

Однако оба метода требуют для каждого типоразмера ребристой трубы эталон для тарировки показаний измерительного прибора в единицах давления, что значительно усложняет контроль.

Прочность сцепления оболочки и ребристого сердечника можно оценить через усилие сдергивания Q оболочки с ребристого сердечника при осевом разнонаправленном приложении сил отдельно к элементам сборной трубы по формуле: $\sigma_x = Q_{\max} \cos\psi / (bmf)$, где Q_{\max} – максимальное усилие выдавливания, необходимое для преодоления сил трения покоя на границе контакта; b – ширина ребра в зоне контакта; m – число ребер; l – длина вырезаемого образца из готовой трубы; ψ – угол подъема спирали ребер.

Схема определения усилия сдергивания приведена на рис.63 за Q принимается максимальное усилие, необходимое для преодоления сил трения покоя на границе контакта. В связи с этим встает вопрос о выборе длины образца. При вырезке образца из сборной трубы из-за нарушения связей часть напряжений может устраниваться, вследствие чего определенные в образцах контактные напряжения окажутся ниже фактических. Как показали результаты экспериментов [95] проведенных на стальных образцах, величина внутренних напряжений в нарезанных образцах совпадала с таковой в длинных исходных образцах при $l/d > 5$ (l – длина; d – диаметр образца).

Для определения минимальной кратности образца из сборных труб были проведены эксперименты. Волочение образцов осуществляли на установке ЦДМУ-30 через волоку диаметром $20^{-0,1}$ мм. После волочения образцы были нарезаны на длины, кратные d . Выдергивание сердечника (сплав Д1, $\sigma_{0,2}=21,5$ МПа; $\sigma_s=226$ МПа; $\delta=3,3$ %) из медной трубы МЗ ($\sigma_{0,2}=280$ МПа; $\sigma_s=306$ МПа; $\delta=2,1$ %) проводили по схеме (см. рис.67) со скоростью 0,7 мм/с на установке ЦДМУ-30.

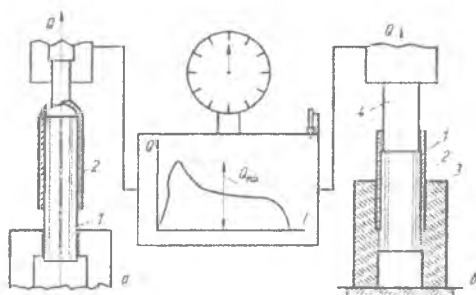


Рис.63 Схемы сдвигания (а) и выдавливания (б):

1 – ребристый сердечник; 2 – оболочка; 3 – втулка; 4 – выталкиватель

Для определения минимальной кратности образца из сборных труб были проведены эксперименты. Волочение образцов осуществляли на установке ЦДМУ-30 через волоку диаметром $20^{0,1}$ мм. После волочения образцы были нарезаны на длины, кратные d . Выдергивание сердечника (сплав Д1, $\sigma_{0,2}=21,5$ МПа; $\sigma_b=226$ МПа; $\delta=3,3$ %) из медной трубы МЗ ($\sigma_{0,2}=280$ МПа; $\sigma_b=306$ МПа; $\delta=2,1$ %) проводили по схеме (см. рис.67) со скоростью 0,7 мм/с на установке ЦДМУ-30.

В таблице 5 приведены результаты эксперимента, характеризующие зависимость контактного давления σ_k от кратности образца l/d :

Таблица 5. Зависимость контактного давления (МПа) от кратности образца.

Номер образца σ_k , МПа при l/d	1	2	3
0,5	7,1	9,3	8,3
1,0	6,9	6,6	11,0
2,0	5,6	5,6	6,1
3,0	7,1	6,2	6,3
4,0	6,3	6,1	6,3
5,0	7,5	7,1	6,7

При доверительном интервале 0,55—0,75 мм имели место выпадения значений при l/d , равном 0,5 и 1,0, что согласуется с теорией краевого эффекта. Таким образом, минимальная кратность образца должна быть не менее 2. Вместе с тем для обеспечения условия сдвигивания оболочки с сердечника и избежание схватывания максимальная длина контактирующих поверхностей также должна быть ограничена. Для определения оптимальной длины образцов были также проведены эксперименты. Сдвигивание производили на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30 со скоростью 10 мм/мин и снятием индикаторной диаграммы усилие — ход плунжера.

Типовые индикаторные диаграммы для различных материалов оболочки и сердечника, вытяжек и геометрических размеров оболочек и ребер имеют один и тот же вид (см. рис.63). Из рассмотрения диаграммы следует, что процесс сдвигивания можно разделить на два этапа: этап 1 - упругое деформирование до равенства сил сдвигивания силам трения Q ; этап 2 - равномерное смещение сердечника с оболочки с начальным усилием Q .

Аналогичная картина характерна для выдавливания.

Из анализа проведенных экспериментов установлено, что схватывание происходило при $l/d \geq 5 \div 6$. Таким образом, длина вырезаемых образцов должна находиться в пределах $2 \leq l/d \leq 5$.

Так как усилие Q и контактное давление σ_k можно определить двумя способами - сдвигиванием или выдавливанием - были проведены опыты для выбора предпочтительного способа.

Волочение образцов осуществляли на машине ЦДМУ-30 через конусную волоку с полууглом наклона образующей 12° . После волочения образцы, нарезали на длины кратные 4. Выдавливание и сдвигивание производили на образцах, состоящих из ребристого сердечника (сплав АД31Т) и медной оболочки (МЗ) со скоростью 4 мм/мин на установке ЦДМУ-30 (рис.65). Результаты опытов, приведённые в таблице 6 показали, что способ испытания на величину контактного давления практически не влияет:

Таблица 6. Результаты испытаний на выдавливание и сдергивание.

Номер образца Q, МПа:	1	2	3	4	5	среднее
при выдавливании:	3,4	4,6	4,6	4,7	4,4	4,3
сдергивании	4,4	3,8	5,0	5,1	4,1	4,5

Поэтому для технологических испытаний целесообразен метод выдавливания как более простой.

Кроме того, было изучено влияние на усилие выдавливания так называемого "концевого" эффекта. Под "концевым" эффектом следует понимать явление уменьшения величины контактного давления σ_k на конце трубы-образца за счет остаточных напряжений, "раскрывающих" свободный конец трубы. Влияние краевого эффекта на величину контактных напряжений Q изучали на образцах, предназначенных для испытаний на выдавливание. Образцы имели с двух сторон различную длину свободных от сердечника участков образца. Исследование, проведенное по методике, описанной выше, показало, что длина свободного участка на величину σ_k не влияет.

Замеры геометрических размеров оболочки и сердечника после выдергивания и сравнение с исходными размерами показало, что незначительно увеличивается наружный диаметр трубы на торце. Это явление можно объяснить следующим образом. Если внутренние контактные напряжения достигают максимума на конце сердечника вследствие сужения оболочки при упругом растяжении, то при выдергивании это будет препятствовать перемещению сердечника по внутренней поверхности трубы. Это вызовет появление изгибающего момента по окружности, который раздает конец трубы. При достаточно большой длине оправки действие "концевого эффекта" сглаживается.

Скорость выдавливания (выдергивания) также оказывает влияние на величину усилия выдавливания (выдергивания). При резком повышении

скорости (например с 2 до 20 мм/с) это усилие несколько снижается, особенно при высоких контактных напряжениях. Рекомендуемые скорости выдавливания - не выше 2-5 мм/с.

При выдавливании на поверхности сердечника наблюдалось чередование темных и светлых полос с шагом 4-12 мм. Это связано с тем, что фактическая (физическая) площадь соприкосновения F_k является функцией сжимающей нагрузки и меняется в широких пределах – от $1/100000$ до $1/10$ — в зависимости от размеров номинальной площади механических свойств и шероховатости контактирующих поверхностей. Вследствие пластической деформации медной оболочки, плотно облегающей ребристый сердечник, можно принять $F_\phi = 1/10 F_k$. Принятое допущение основывается также и на том, что наибольшая высота неровностей при протягивании исходных заготовок колеблется в пределах 2-4 мкм, а напряжение, возникающее от волн, значительно меньше по величине напряжения в зонах фактического контакта, так как шаг волн изменяется от 1 до 10мм[96].

Прочность связи ребристой вставки с оболочкой можно оценить величиной контактного давления q на границе ребро-оболочка, для нахождения которого чаще всего применяют тензометрический метод[81].

Для определения контактных давлений в сборных трубах были проведены эксперименты в лабораторных условиях. Использовали гладкие оболочки из МЗ диаметром 22мм и толщиной стенки $h = 1,5$ мм. В оболочки были свободно вставлены звездообразные сердечники с диаметром описанной окружности 18.5мм из алюминиевого сплава АД31Т1 с числом ребер, равным десяти.

Вытяжка при сборке волочением по оболочке составляла 1.1. 1.15. 1.22. Волочение труб осуществляли на универсальной испытательной установке ЦДМУ-30 через конические волокна с полууглом 12° и диаметрами 20, 19 и 18мм После волочения трубы были нарезаны на длины, кратные трем диаметрам готовой трубы. Внешняя поверхность исследуемых образцов труб тщательно обезжиривалась спиртом. На нее наклеивались электрические

тензодатчики сопротивления КФ5П1-1-100-512 с базой 1мм. Наклейку тензодатчиков проводили клеем «Циокрин». Тензодатчики накладывали на нанесенный слой клея и тщательно прижимали, через 2-3 минуты клей высыхает и тензодатчики являются подготовленными к эксперименту. При этом исключается необходимость сушки клея при повышенных температурах, и в длительной выдержке образцов на воздухе. Все это позволяет избежать снятия (релаксации) напряжений в исследуемом образце, тем самым повысить точность эксперимента. Тензодатчики клеились в следующем порядке: три тензодатчика над ребрами сердечника, три между ними.

Выводы каждого тензодатчика подсоединяли к тензометрической аппаратуре (тензо-мост ВСТ-4, гальванометр, источник тока). Показания гальванометра фиксировали величину электрического тока, проходящего через тензодатчик. Затем оболочку образца аккуратно распиливали в продольном направлении между ребрами. После чего вновь измеряли электрический ток, проходящий через соответствующий тензодатчик. При этом в следствии снятия остаточных напряжений оболочка получала деформацию, фиксируемую посредством изменения сопротивления тензодатчика. Разницу между первым и вторым показанием гальванометра ΔA использовали для определения по тарировочному графику деформации \square . Затем по приведенным ниже формулам просчитывали контактное давление q и окружное напряжение σ_r .

Многоканальную трубу можно представить в виде оболочки, на внутреннюю поверхность которой в дискретных точках действует погонная разгрузка ребер P .

Нормальная сила N и момент M , появляющиеся в оболочке при разгрузке над ребрами после распилки:

$$N = \frac{P}{2tg \frac{\pi}{2}} \quad (37)$$

$$M = PR \left(\frac{n}{2\pi} - \frac{1}{2tg \frac{\pi}{n}} \right),$$

где R - средний радиус оболочки.

Окружное напряжение

$$\sigma_t' = \frac{N}{F} - \frac{My}{J}, \quad (38)$$

где $F = h * l$; $y = 0,5h$. $J = \frac{l * h^3}{12}$

После подстановки (37) в (38) получим

$$\sigma_t' = \frac{P}{2hg} \frac{\pi}{n} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} - 1 \right).$$

Упругая деформация разгрузки

$$\varepsilon_t' = \frac{\sigma_t'}{E} = \frac{P}{2hg} \frac{\pi}{n} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} - 1 \right),$$

Откуда погонная нагрузка

$$P = \frac{2\varepsilon_t' h E \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}}{\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{\pi h} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} - 1}$$

Контактное давление легко найти по формуле Лапласа

$$q' = \frac{h}{R} \sigma_t'.$$

Расчетные формулы для датчиков, расположенных между ребрами при разгрузке имеют аналогичный вид:

$$N = \frac{P}{2 \sin \frac{\pi}{n}};$$

$$M = \frac{PR}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \left(\frac{\pi}{n} \sin \frac{\pi}{n} - 1 \right);$$

$$\sigma_t^{II} = \frac{P}{2hs \sin \frac{\pi}{n}} \left(\frac{6R}{h} - \frac{6Rn}{h\pi} \sin \frac{\pi}{n} - 1 \right).$$

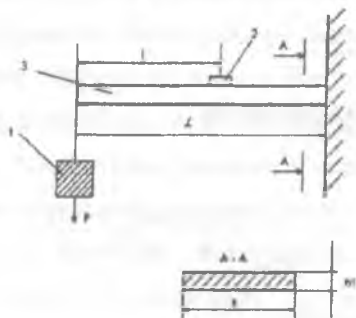


Рис.64 Схема нагружения тарировочного образца

1-нагрузка, 2-тензодатчик, 3-консоль: $v=20\text{мм}$; $h=3\text{мм}$; $L=54\text{мм}$; $Z=80\text{мм}$

На образец приклеивались тензодатчики. Тарировочный образец жестко закрепляли одним концом в зажиме, другой конец оставляли свободным (консоль). Свободный конец консоли нагружали усилиями 0.5кг; 1,5кг; 3.5кг, являвшимися нагрузкой тарировки P . Для каждого усилия нагружения консоли проводили три раза.

Напряжение изгиба в консоли

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6Pl}{bh_1^2},$$

$$\varepsilon = B \cdot P, B = \frac{6l}{bh_1^2 E}$$

С другой стороны относительная деформация

$$\varepsilon = k \cdot \Delta A,$$

$$k = \frac{6lP}{bh_1^2 E \Delta A},$$

k – коэффициент пропорциональности,

ΔA – изменения в показаниях прибора:

$$\Delta A = A_2 - A_1$$

где A_2 и A_1 показания гальванометра до и после деформации, вызванной нагружением тарировочного образца.

По результатам экспериментов построен тарировочный график (рис.65).

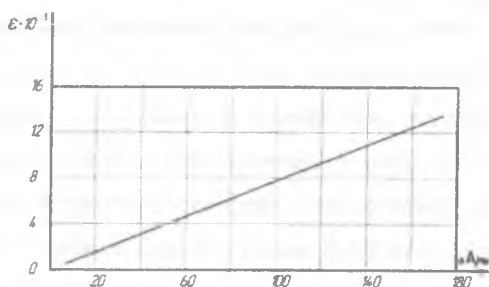


Рис.65 Тарировочный график.

Для построения тарировочного графика проводились эксперименты на стальном образце прямоугольного сечения: $b=20\text{мм}$; $h_1=3\text{мм}$.

Расчет величин контактных давлений над ребрами и между ребрами показали их близкую сходимость. Такое явление вполне допустимо, так как при большом числе ребер тонкостенную оболочку можно принять равномерно нагруженной внутренним q .

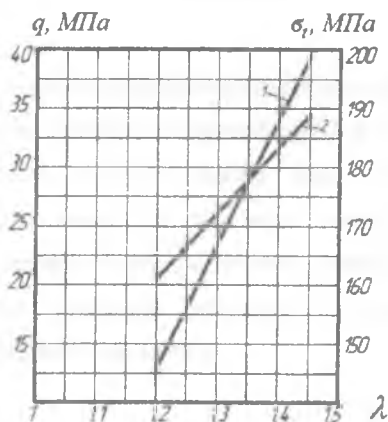


Рис. 66 График зависимости контактного давления и окружного напряжения от вытяжки 1- окружное напряжение σ_1 , 2 - контактное давление q

На рис.66 приведены результаты экспериментальных исследований контактных давлений q и окружных остаточных напряжений σ_r . Как следует из графика, с увеличением вытяжки σ_r и соответственно контактное давление q возрастают.

Одним из самых востребованных способов профилирования труб остается безоправочное волочение [1,84,85]. Еще в 1940г. Емельяненко П.Т., Шевченко А.А. и Борисов С.И. отмечали, что профилированные трубы малой толщиной стенки (1-2,5 мм) целесообразно изготавливать холодным волочением через волокни соответствующего профиля из круглой трубы-заготовки, имеющей периметр и толщину стенки, равные периметру и толщине стенки заданного профиля, рис.67. Длина и площадь поперечного сечения трубы при этом, как правило, почти не изменяются. Наиболее часто таким процессом изготавливают трубы квадратные, прямоугольные, шестигранные.

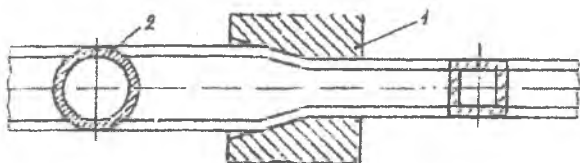


Рис. 67 - Схема профилирования многогранных труб волочением через фасонные волокни 1 из круглой трубы-заготовки 2.

На отечественных трубных заводах этим способом производится значительная часть сортамента из различных сталей и сплавов. Важные преимущества этого способа профилирования - небольшие первоначальные капитальные затраты, недорогой инструмент, простота технологии и эксплуатации, переналадки оборудования.

4.1 Математическая модель профилирования

К основным выходным параметрам профилирования тонкостенных труб безоправочным волочением относят напряжение волочения, определяющее

заполнение формы канала фасонной волоки и контактное напряжение, влияющее на стойкость инструмента. Научно обоснованный расчет указанных параметров - сложная и до конца не решенная задача. Эту задачу можно решить только на основе комплексного учета всех геометрических, технологических и конструкторских свойств заготовки и реального профиля канала волоки, параметров процесса, в том числе анизотропии механических свойств.

Для решения поставленной задачи приняты следующие допущения: круглая трубная заготовка считается тонкостенной, трансверсально-изотропной, механические свойства в поперечном сечении одинаковы, но отличные от свойств в направлении волочения; при профилировании все сечения трубы переходят в пластическое состояние; деформациями изгиба по длине образующей трубы у входов очаг деформации и на выходе из него пренебрегаем, так как в очаге деформации имеет место «Пластический шарнир»; На поверхности контакта трубы и волоки действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона; толщина стенки по длине очага деформации не меняется.

Параметры профилирования находим в конечном числе точек, разделяя круглую трубную заготовку на N узких кольцевых элементов; длиной l_0 (рис.68). По мере продвижения элемента по сужаемому каналу волоки его форма под действием инструмента приближается к форме готовой трубы, объем не изменяется, а границы элементов совпадают с одними и теми же материальными поверхностями заготовки.

Рассмотрим на трубной заготовке кольцевой элемент с диаметром D_0 и длиной l_0 (рис. 68). По мере продвижения кольцевого элемента по сужающемуся каналу волоки его форма под воздействием инструмента постепенно приближается к форме конечного профиля (в данном случае конечный профиль - квадрат) [87].

При наличии превышения периметра $\Delta\Pi$ поперечного сечения исходной трубной заготовки над поперечным сечением конечного профиля площадь

поперечного сечения кольцевого элемента F_j при продвижении по каналу волокна уменьшается, а длина l_j увеличивается, т.е. происходит вытяжка.

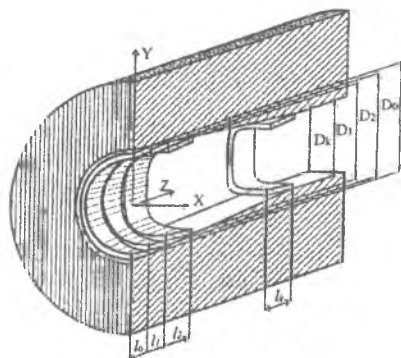


Рис. 68. – Аппроксимация формы очага деформации.

Таким образом, форма очага деформации может быть аппроксимирована совокупностью кольцевых элементов, форма которых вдоль оси волочения изменяется от круглой до конечной формы профиля, а нумерация начинается от края заготовки (рис 69).

На всех этапах деформирования границы элементов совпадают с одними и теми же материальными поверхностями заготовки, объем элементов не изменяется.

Форма поперечного сечения каждого кольцевого элемента задана дискретно, конечным множеством точек разбиения контура (X_{ij}, Y_{ij}) (рис. 69), как контур многоугольника, вписанного для первого кольцевого элемента в окружность. Количество точек разбиения в очаге деформации одинаково для всех кольцевых элементов.

В силу симметрии сечения профильной трубы для сокращения объема, вычислений можно рассматривать только часть сечения профильной трубы. Например, для квадратной трубы можно рассматривать только 1/8 часть сечения.

Координаты точек разбиения исходного круглого контура в плоскости поперечного сечения XOY очага деформации определяются системой:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{D_0}{2} \cos\left(i \frac{360^\circ}{N}\right) \\ y_0 = \frac{D_0}{2} \sin\left(i \frac{360^\circ}{N}\right) \end{cases}, \quad (39)$$

где D_0 - средний диаметр исходной трубной заготовки;

N - количество точек разбиения в поперечном сечении кольцевого элемента;

i - номер точки разбиения.

Координаты точек разбиения (x_{ik}, y_{ik}) на контуре конечного кольцевого элемента, форма которого совпадает с формой поперечного сечения готового профиля, задаются. Номера точек разбиения в характерных местах исходного и в характерных местах конечного контуров (например, на осях симметрии X и Y) должны совпадать (рис. 69). Координаты точек разбиения $i = 1, 2 \dots N$, j -го промежуточного контура находятся по методу усреднения.

$$x_{ij} = \frac{x_{j0} + x_{ik}}{2}; \quad y_{ij} = \frac{y_{j0} + y_{ik}}{2}.$$

Направление нумерации координат вершин выбираем против часовой стрелки. Начало координат можно располагать произвольно. Для определенности условимся, что начало координат совпадает с осью волочения. Построение переходных сечений начинают от заготовки к готовому профилю. Число отрезков разбиения должно быть четным (кратным 8). Сечение последнего кольцевого элемента рассчитывают исходя из размеров и допусков готового профиля.

В любом поперечном сечении очага деформации при волочении любого профиля наиболее просто будут определяться координаты точек касания контура сечения с инструментом (волокой), которые лежат на осях симметрии контура.

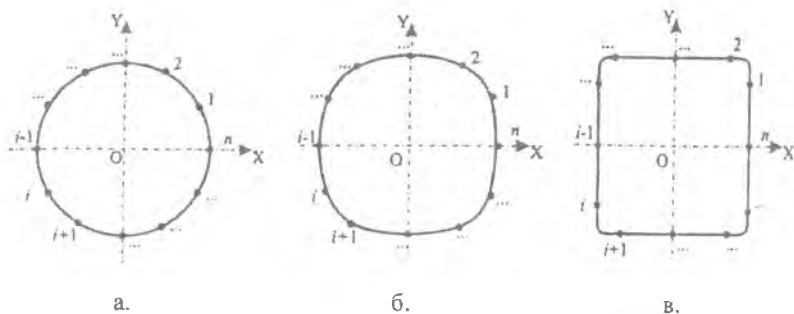


Рис. 69 – Схема дискретного задания формы кольцевых элементов: а – исходный круглый контур; б – промежуточный контур; в – конечный квадратный контур.

Для определения координат остальных $(N-4)$ точек разбиения j -го промежуточного контура, используем систему:

$$\begin{cases} x_j = x_{i0} + q(x_n - x_{i0}) \\ y_j = y_{i0} + q(y_n - y_{i0}) \end{cases} \quad (40)$$

где q – постоянный для точек разбиения коэффициент пропорциональности

$$q = \frac{x_n - x_{m0}}{x_{m0} - x_{i0}}$$

Если геометрия канала волокна в продольных сечениях определяется заданием угла наклона образующей формообразующей зоны в плоскости XOZ или YOZ , то в этом случае имеет место линейная поверхность, и уравнение контуров продольных сечений будет задаваться уравнением прямой линии в сечении $y = z \operatorname{tg} \alpha + b$. Геометрия продольных сечений при данном подходе может быть задана и любой другой функцией $y = f(z)$.

В случае линейной поверхности длина обжимной части канала профильной волокна для квадратной трубы равна

$$H = \frac{D_0 - A}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

где A - сторона поперечного сечения готового квадратного профиля,
 α - полуугол наклона образующей канала волокна к оси волочения.

Переходные сечения, рассчитанные по формулам (40), являются исходными для изготовления электроинструмента формообразующей зоны волок на станках с ЧПУ.

Таким образом, задавшись координатами точек продольного сечения, проходящего, например, через ось X (плоскость XOZ) с помощью уравнения $y=f(z)$ можно определить координаты $(N-1)$ точек любого промежуточного контура поперечного сечения формообразующей зоны. Причем функция $y=f(z)$ и координаты точек входного (x_{i0}, y_{i0}) и выходного (x_{ik}, y_{ik}) контуров однозначно определяют $(N-2)$ точки по формулам (40).

Рассмотрим продольное сечение очага деформации, представленное на рис. 70. Функция $y=f(z)$ – линейная функция. Координаты x_{nj} в каждом j -м сечении определяются как

$$\begin{aligned} x_{n0} &= D_0 / 2, \\ x_{n1} &= D_1 / 2, \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ x_{nw} &= D_j / 2, \end{aligned}$$

где D_0, D_1, \dots, D_j – минимальные охватывающие размеры.

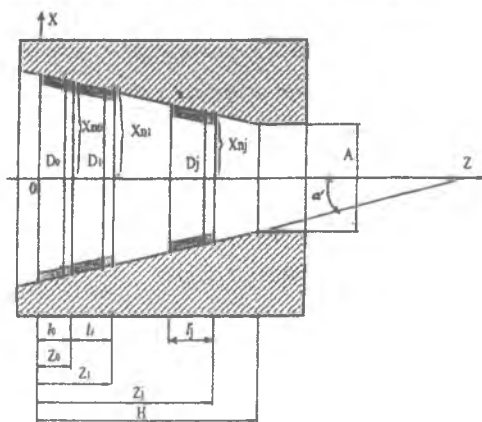


Рис. 70 – Продольное сечение очага деформации.

Координата x_{nj} точки n_j определяется по формуле

$$x_{nj} = D_0 / 2 + z_j \operatorname{tg} \alpha,$$

где D_0 – начальный диаметр,

α – полуугол наклона образующей канала волокна в плоскости (XOZ) (рис. 70).

Для квадратной волокна координата $x_{nk} = D_0 / 2 = A / 2$, где A – сторона поперечного сечения готового квадратного профиля.

С учетом этого

$$q = \frac{2x_{nj} - D_0}{A - D_0}.$$

Силовые параметры процесса профилирования.

Рассмотрим силовые параметры, действующие на выделенный кольцевой элемент по мере его продвижения по каналу волокна.

Усилие профилирования находим как сумму трех составляющих, приложенных к заготовке в направлении оси волочения:

- усилие, затрачиваемое на изгиб кольцевого элемента в плоскости перпендикулярной к оси волочения OZ ;
- усилие, затрачиваемое на вытяжку элемента;
- усилие, затрачиваемое на трение с инструментом.

Усилия находим как удельные, т.е. отнесенные к единице площади поперечного сечения кольцевого элемента, т.е. для j – го кольцевого элемента

$$(\sigma_{\text{проф}})_j = (\sigma_{\text{изг}})_j + (\sigma_\lambda)_j + (\sigma_\tau)_j,$$

где $\sigma_{\text{изг}}$ - напряжение, затрачиваемое на изменение кривизны кольцевого элемента в плоскости, перпендикулярной оси волочения;

σ_λ - напряжение, затрачиваемое на вытяжку кольцевого элемента;

σ_τ - напряжение, затрачиваемое на преодоление сил трения по каналу волокна.

Определим усилие, расходуемое на изгиб кольцевого элемента. При пластическом изгибе элементарной полоски шириной равной единице и длиной da , выделенной в трубной заготовке меридиальными сечениями (рис. 71) при

переходе из положения 1 в положение 2, затрачивается работа пластической деформации, равная произведению силы на путь

$$da = \rho_c d\varphi, P = \sigma_{uz} t \cdot l$$

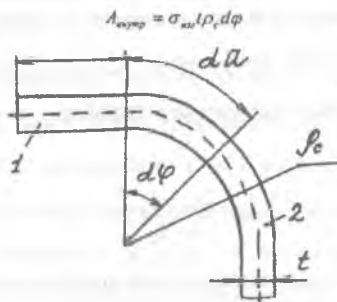


Рис.71 – Изгиб элементарной полоски в канале профильной волоки.

Эта работа равна произведению внешнего изгибающего момента на угол поворота от элементарной полоски на центральный угол изгиба $d\varphi$.

Тогда

$$A_{\text{внеш}} = M_{\text{вн}} d\varphi$$

$$A_{\text{внеш}} = A_{\text{внутр}}$$

или

$$\sigma_{uz} t \rho_c d\varphi = \frac{t^2}{4} \sigma_{T3} d\varphi \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}},$$

где σ_{T3} - предел текучести в направлении оси волочения;

μ_{13}, μ_{31} - коэффициент анизотропии.

Отсюда

$$\sigma_{uz} = \frac{t^2}{4} \sigma_{T3} d\varphi \frac{t}{\rho_c} \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}} \quad (41)$$

Напряжение при распрямлении элементарной полоски при переходе с круглой трубной заготовки на плоскую часть профильной трубы (грань) можно так же выразить формулой (41), т.к. затраты энергии на осуществление одной и

той же деформации одного и того же количества металла не может зависеть от метода осуществления этой деформации [84].

Из уравнения равновесия моментов внешних и внутренних сил следует, что

$$M_{вн} = \int \sigma_{вн} dF,$$

$$M_{вн} = \frac{t^2}{4} \sigma_{T13} \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}},$$

где $\frac{t^2}{4}$ - пластический момент сопротивления изгибу.

Работа, необходимая для изгиба элементарной полоски длиной da из состояния с центральным углом φ_1 , в состоянии с центральным углом φ_2 , определяется разностью работ, т.е.

$$A = M_{вн} \varphi_1 - M_{вн} \varphi_2 = M_{вн} |\varphi_1 - \varphi_2| = M_{вн} |d\varphi|$$

Этим же выражением, очевидно, определяется работа, необходимая для обратного процесса (разгибания) на угол $d\varphi$.

Необходимое усилие волочения, расходуемое на изгиб элементарной полоски единичной ширины, можно найти из равенства работ

$$P_{вн} = M_{вн} |d\varphi|$$

Откуда

$$P_{вн} = M_{вн} |d\varphi| = \frac{1}{4} \sigma_{T13} t^2 \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}} |d\varphi|.$$

Удельное усилие изгиба

$$\sigma_{вн} = \frac{P_{вн}}{F} = \frac{1}{4} \frac{t^2}{F} \sigma_{T13} \sqrt{\frac{\mu_{31}}{\mu_{13}}} |d\varphi|,$$

где $d\varphi$ - угол формоизменения;

F - площадь элементарной полоски.

Для j -го кольцевого элемента:

$$F_j = l \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2};$$

$$\sigma_{изг_j} = \sigma_{изг_{j-1}} + \Delta\sigma_{изг_j},$$

где $\Delta\sigma_{изг_j} = \frac{1}{4} \frac{l^2}{F_j} \sigma_{ТЗ_j} \sqrt{\frac{\mu_{13}}{\mu_{12}}} \sum_{i=0}^{n-1} |\Delta\varphi_i|$ - приращение удельного усилия за счет

изменения суммарного угла изгиба во всех точках $i=0, 1, 2, \dots, N-1$, описывающих кольцевой элемент при переходе от $(j-1)$ -ого к j -ому положению; $\sigma_{изг_{j-1}}$ - удельное усилие, действующее на j -й кольцевой элемент в осевом (OZ) направлении со стороны предыдущего по ходу волочения $(j-1)$ -ого элемента.

Удельное усилие, затрачиваемое на вытяжку σ_{λ_j} по методу баланса работ

$$A_{внеш} = A_{внутр}$$

где $A_{внутр} = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV$ - работа внутренних сил, равная работе вытяжки.

$A_{внеш} = \iint_F (x u_x + y u_y + z u_z) dF$ - работа внешних сил, равная работе части усилия волочения, затрачиваемой на вытяжку.

Полагаем, что работа вытяжки равна работе растяжения, следовательно, интенсивность деформаций линейного расширения

$$\varepsilon_i = \delta_z.$$

Считаем, что приращение удельного усилия вытяжки $\Delta\sigma_{\lambda_j}$, под воздействием которого кольцевой элемент перемещения из $(j-1)$ -ого в j -ое положение постоянно на пути этого перемещения U_{∞} равном длине j -ого элемента l_j .

Принятые допущения позволяют переписать равенства в следующем виде

$$\Delta\sigma_{\lambda_j} l_j F_j = \sigma_{ТЗ_j} V \delta_z$$

С учетом того, что

$$l_j F_j = V; \delta_i = -\ln \frac{F_j}{F_{j-1}};$$

$$\Delta \sigma_{\lambda j} = \sigma_{T3j} \ln \frac{F_{j-1}}{F_j}.$$

Удельное усилие вытяжки определяем следующим образом

$$\sigma_{\lambda j} = \sigma_{\lambda j-1} + \Delta \sigma_{\lambda j},$$

где $\sigma_{\lambda j-1}$ - удельное усилие, действующее на j -й кольцевой элемент со стороны $(j-1)$ -ого в осевом (OZ) направлении за счет вытяжки.

Предел текучести σ_{T3} для J -ого кольцевого элемента находится из закона упрочнения металла трубной заготовки в виде степенного ряда

$$\sigma_{T3} = a_0 + a_1 \ln \lambda_j + a_2 (\ln \lambda_j)^2,$$

где λ_j - коэффициент вытяжки по площади; a_0, a_1, a_2 - коэффициенты аппроксимации диаграммы упрочнения, определяемые из опытов при волочении труб и последующем их испытании на растяжение.

При определении усилия, затрачиваемого на преодоление сил трения, принимаем площадь контакта заготовки с инструментом равную площади всей внешней боковой поверхности очага деформации. Поэтому площадь контакта j -ого кольцевого элемента определяется так:

$$F_k = \Pi_j l_j,$$

где Π_j - периметр поперечного сечения j -ого кольцевого элемента,

l_j - ширина j -ого кольцевого элемента.

Приращение удельного усилия на j -ом кольцевом элементе за счет трения

$$\Delta \sigma_{\tau j} = \frac{\tau_k F_k \cos \alpha}{F_j},$$

где $\tau_k = \mu P_j$ - касательное напряжение на контактной поверхности j -ого кольцевого элемента – закон Кулона-Амонтона;

μ - коэффициент трения.

Контактное давление находим из уравнения Лапласа

$$P_j = \frac{\sigma_{\theta j}}{R_j} t,$$
$$\sigma_{\theta j} = \beta \sigma_{13j} - \sigma_{4j},$$

где R_j - радиус равновеликой по площади круглой трубы в рассматриваемом сечении; $\sigma_{\theta j}$ - окружное напряжение; β - коэффициент Лоде.

Удельное усилие, затрачиваемое на преодоление сил трения для j - ого элемента равно

$$\sigma_{\tau j} = \sigma_{\tau j-1} + \Delta \sigma_{\tau j},$$

где $\sigma_{\tau j-1}$ - удельное усилие, действующее на j - й кольцевой элемент со стороны $(j - 1)$ - ого за счет трения.

Оценка заполняемости углов волоки и утяжки граней профиля.

Полное заполнение угла канала фасонной волоки происходит при условии, что расчетный радиус закругления профилируемой трубы r_1 не превышает радиус закругления канала волоки r , т.е. $r_1 \approx r$.

$$r_1 = R_p + 0,5t,$$

где R_p - радиус срединной поверхности заготовки (рис.72).

Рассмотрим гибку окружными сжимающими напряжениями. Внутренний момент сопротивления изгибу заготовки единичной длины [97].

$$M_{\text{внутр}} = \frac{r^2}{4} \sigma_{\theta}.$$

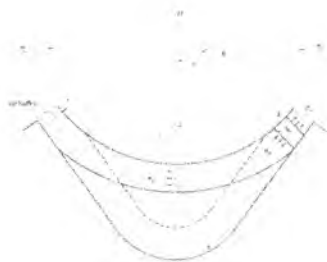


Рис. 72 – Схема гибки трубной заготовки в зоне угла фасонной волоки

Внешний момент, затрачиваемый на изгиб заготовки единичной длины относительно срединной поверхности (рис. 73).

$$M_{\text{вн}} = \sigma_{\theta} F K m = \sigma_{\theta} t K m,$$

где σ_{θ} - окружное напряжение, одинаковое по всему периметру кольцевого элемента;

F - площадь элемента заготовки единичной длины;

$K m$ - отрезок, равный плечу момента

$$K m = R_p (1 - \cos \alpha).$$

Тогда

$$M_{\text{вн}} = \sigma_{\theta} \cdot t \cdot R_p (1 - \cos \alpha).$$

Приравнивая моменты внешних и внутренних сил, получим

$$\sigma_{\theta} \cdot t \cdot R_p (1 - \cos \alpha) = \frac{t^2}{4} \sigma_{\theta}.$$

Отсюда величина радиуса гибки трубной заготовки

$$R_p = \frac{\sigma_{\theta} t}{4 \sigma_{\theta} (1 - \cos \alpha)}.$$

При профилировании многогранных труб может иметь место утяжка граней профиля, характеризуемая величиной e_{α} (рис.73).

$$e_{\alpha} = p_{\alpha} (1 - \cos \alpha'_{\alpha}) = p_{\alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{0,5A - r}{F_{\alpha}} \right)^2} \right),$$

где p_{α} - радиус срединной поверхности полки профиля после разгрузки;

α'_{oc} - угол изгиба после разгрузки.

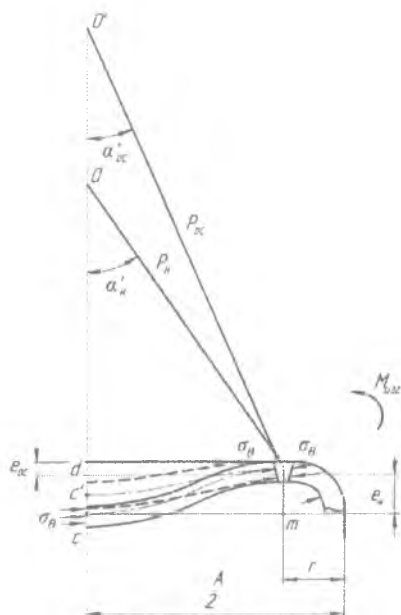


Рис. 73 – Схема деформации полок заготовки

Согласно теореме о разгрузке Ильюшина А.А. [15].

$$\frac{1}{\rho_{oc}} = \frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho_{разр}}, \quad (42)$$

где ρ_n - начальный радиус изгиба кривизны средней поверхности профиля;

$\frac{1}{\rho_{разр}}$ - изменение кривизны профиля в результате разгрузки после выхода трубы

из волоки. Здесь $\rho_{разр}$ - фиктивный радиус изгиба, возникающий от действия фиктивного изгибающего момента, по величине равного моменту внешних сил.

Начальный радиус изгиба срединной поверхности профиля

$$\rho_n = \frac{e_x}{1 - \cos \alpha'_n}, \quad (43)$$

где α'_n - угол изгиба до разгрузки, из треугольника с O_k

$$\alpha_n' = \pi - 2 * \arctg\left(\frac{0.5A-r}{e_n}\right);$$

e_n - прогиб полки до разгрузки;

Величину e_n найдём из условия равенства моментов внешних сил и внутренних сил для элемента полки единичной длины в точке k (рис.72).

Внешний момент при пластическом изгибе определяется зависимостью

$$M_{\text{вн}} = \sigma_{\theta} t^* e_n. \quad (44)$$

Внутренний момент сопротивления изгибу заготовки

$$M_{\text{внутр}} = \frac{t^2}{4} \sigma_{T3}.$$

Приравнявая моменты внешних и внутренних сил, получим

$$e_n = \frac{t \sigma_{T3}}{4 \sigma_{\theta}}. \quad (45)$$

Вследствие того, что разгрузка заготовки возникает от действия фиктивного изгибающего момента, равного по величине моменту внешних сил (44), изменение кривизны

$$\frac{1}{\rho_{\text{раз}}} = \frac{M_{\text{вн}}}{EJ},$$

где E – модуль упругости;

J – момент энергии элемента полки единичной длины

$$J = \frac{t^3}{12}.$$

Тогда

$$\frac{1}{\rho_{\text{раз}}} = \frac{3 \sigma_{j3}}{Et}. \quad (46)$$

Подставив найденные выражения (43), (45) и (46) в формулу (42), получим

$$\rho_{oc} = \frac{tE\sigma_{T3}}{4E\sigma_{\theta} \left[1 - \cos \left(\pi - 2 \arctg \frac{4\sigma_{\theta}(0.5A-r)}{t\sigma_{T3}} \right) \right] - 3\sigma_{T3}^2} \quad (47)$$

Подставляя в формулу (42) найденное значение (47), получим

$$e_{oc} = tE\sigma_{T3} \sqrt{\frac{(0.5A-r)^2 \left(4E\sigma_{\theta} \left[1 - \cos \left(\pi - 2 \arctg \frac{4\sigma_{\theta}(0.5A-r)}{t\sigma_{T3}} \right) \right] - 3\sigma_{T3}^2 \right)^2}{(tE\sigma_{T3})^2}}{4E\sigma_{\theta} \left[1 - \cos \left(\pi - 2 \arctg \frac{4\sigma_{\theta}(0.5A-r)}{t\sigma_{T3}} \right) \right] - 3\sigma_{T3}^2}}$$

Величина утяжки граней после разгрузки e_{oc} должна удовлетворять условию

$$e_{oc} \leq e,$$

где e – допустимая утяжка граней.

Алгоритм расчёта параметров профилирования.

На основе полученных зависимостей по определению нормальных и касательных сил, действующих на поверхности инструмента и затраченных на вытяжку, изгиб и преодоление сил трения, учёта сложной геометрии профиля, разработан алгоритм расчёта силовых характеристик течения. Алгоритм предназначен для отыскания параметров технологического процесса волочения квадратной трубы и влияния среды на режимы процесса волочения. Алгоритм составлен в Delphi2006 для WindowsXP и применён для определения суммарных сил, действующих на поверхности инструмента, и на этой основе – его геометрических параметров (приложение).

Исходные данные для расчёта включают:

- технологические и конструктивные параметры рассматриваемых участков деформации (размеры заготовки и готовой трубы, толщина стенки трубы, угол конусности волокна, радиус профиля трубы, коэффициент контактного трения);

- механические характеристики деформируемого (протягиваемого) материала (предел текучести и величина анизотропии материала трубы);

Исходные данные вводят непосредственно в программу. Результатом расчёта являются величины полного удельного усилия профилирования и его составляющих, диаграмма изменения усилия по длине очага деформации, графики промежуточной геометрии очага деформации и сводные данные промежуточных величин.

На первом этапе строят геометрическую модель очага деформации. Для этого задают размеры волокна (предусмотрены итерации по расчёту со сменой размеров канала волокна, радиуса закругления поперечного квадратного профиля волокна и угла конусности). Разбивают очаг деформации вдоль оси OZ на кольцевые элементы $j=1 \dots M$, затем каждый из них в плоскости XOY разбивают на элементы $i=1 \dots N$.

Задание начальных условий

Принимают:

$$\sigma_{\nu\nu} = 0, \sigma_{\lambda j} = 0, \sigma_{rj} = 0.$$

Вычисляют:

$$H = \frac{D_0 - A}{2l g \alpha}; l_0 = H / M; F_0 = \pi D_0 t; V_0 = \pi D_0 l_0;$$

$$x_{i0} = \frac{D_0}{2} \cos\left(i \frac{360^\circ}{N}\right); y_{i0} = \frac{D_0}{2} \sin\left(i \frac{360^\circ}{N}\right); i = 0, 1, 2, \dots, N-1; \Delta D = 0.01 D_0$$

Формируют массивы – упорядоченные множества точек разбиения – на входе в очаг деформации и выходе из него:

$$x_{i0}(N) = \{x_{i0}, x_{20}, x_{30}, \dots, x_{n0}, x_{(n+1)0}, x_{(n+2)0}\}; y_{i0}(N) = \{y_{i0}, y_{20}, y_{30}, \dots, y_{n0}, y_{(n+1)0}, y_{(n+2)0}\}.$$

$$\varphi_i(N) = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_{n-1}\}$$

$$x_{ik}(N) = \{x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}, \dots, x_{nk}, x_{(n+1)k}, x_{(n+2)k}\}; y_{ik}(N) = \{y_{1k}, y_{2k}, y_{3k}, \dots, y_{nk}, y_{(n+1)k}, y_{(n+2)k}\}.$$

$$x_{(n+1)0} = x_{10}, x_{(n+2)0} = x_{20}, x_{(n+1)k} = x_{1k}, x_{(n+2)k} = x_{2k}, y_{(n+1)0} = y_{10}, y_{(n+2)0} = x_{20},$$

$$y_{(n+1)k} = y_{1k}, y_{(n+2)k} = y_{2k}.$$

Дискретное представление поперечного сечения даёт возможность рассчитывать геометрические характеристики профиля с помощью простых циклических вычислений.

Осуществляют вычисление координат точек разбиения промежуточного j-ого контура:

$$\begin{cases} x_j = x_{j0} + q(x_k - x_{j0}) \\ y_j = y_{j0} + q(y_k - y_{j0}) \end{cases},$$

где коэффициент q вычисляют по выражениям:

$$q = \frac{2x_{yj} - D_0}{A - D_0}; \quad x_{yj} = \frac{D_0}{2} + z_j g \alpha.$$

Блоки с 9 по 14 осуществляют вычисление периметра J-ого контура:

$$P_j = \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_{(i+1)j} - x_{ij})^2 + (y_{(i+1)j} - y_{ij})^2}.$$

Блоки с 15 по 20 решают итерационное уравнение с заданной степенью точности

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq |z_j^{n+1} - z_j^n|; \\ z_j^{n+1} &= z_j + \frac{V}{f(z_j^n)}, \end{aligned}$$

где z_j – координата j-ого кольцевого элемента;

$f(z_j) = F$ – площадь поперечного сечения j-ого кольцевого элемента;

$n+1, n$ – номера шагов итераций.

Блоки с 21 по 32 вычисляют приращение суммарного угла формоизменения ΔS_j -ого кольцевого элемента

$$\Delta S_j = \sum_{i=0}^{n-1} |\Delta \varphi_{ij}|.$$

Угол формоизменения $\Delta \varphi_{ij}$ в i-ой точке j-ого сечения определяют как угол между отрезками лучей, соединяющих эту точку с точками (i+1) и (i-1).

$$\Delta \varphi_{ij} = \varphi_{ij} - \varphi_{i,j-1}$$

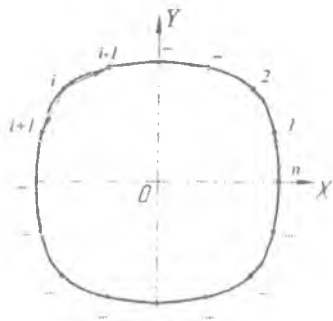


Рис. 74 – Схема к определению угла формоизменения.

По соображениям удобства будем искать угол $\varphi_{(i+1)}$ вместо φ_y .

Угол φ_y (рис. 74) определяется из выражения скалярного произведения через координаты векторов, проходящих через точку разбиения (x_{i+1}, y_{i+1})

$$\varphi_y = \arccos \frac{(x_{i+1} - x_y)(x_y - x_{i-1}) + (y_{i+1} - y_y)(y_y - y_{i-1})}{\sqrt{[(x_{i+1} - x_y)^2 + (y_{i+1} - y_y)^2][(x_y - x_{i-1})^2 + (y_y - y_{i-1})^2]}}$$

На этом этапе определяется допустимый диаметр трубы для использования в качестве заготовки, ограничивая предельное превышение периметра заготовки по отношению к периметру готовой трубы 10%. Окончательно выбираем заготовку согласно сортаменту.

На втором этапе рассчитываем удельное усилие профилирования. При расчётах процесса безправочного волочения за один переход применяли методику, изложенную в главе 1. Упрочнение материала заготовки в зависимости от степени деформации учитывали с применением аппроксимирующей степенной функции. Введённые альтернативы учитывают величину трения, коэффициент Лоде, толщину стенки трубы, свойства материала заготовки.

На третьем этапе строим график изменения суммарного усилия профилирования по длине очага деформации и графическое изображение начального, конечного и промежуточного контуров канала волокна на этом пути, получаем данные расчёта промежуточных величин.

На основе расчётов определяются необходимые технологические, конструкционные и механические параметры для выполнения операции профилирования волочением квадратной трубы при заданных условиях.

Блоки с 33 по 39 вычисляют величину удельного усилия профилирования трубы и выводят на печать параметры, при которых определялась величина этого усилия.

Блоки с 40 по 44 варьируют параметры, которые определяют величину удельного усилия профилирования и тем самым задают в программе вычисления таблицы значений этого усилия.

Задание контура поперечного сечения круглой заготовки для расчёта на ЭВМ профилирования может быть приближённым с аппроксимацией криволинейных участков контура ломаными линиями. Погрешность аппроксимации, не превышающая допуски на размеры поперечного сечения, считается в данном случае допустимой.

Использование ЭВМ позволяет проводить расчёт процесса профилирования волочением с учётом всех основных факторов, влияющих на процесс: размеров заготовки, формы канала инструмента, упрочнения материала, анизотропии свойств и т.д.

Компьютерный анализ силовых условий профилирования квадратных труб.

Анализ математической модели процесса профилирования труб безоправочным волочением проводили по входным параметрам с последующими исследованиями их влияния. Принятый алгоритм расчёта позволяет рассматривать по всей длине волочительного канала как полное усилие профилирования, так и его составляющие. Это преимущество даёт возможность проследить за влиянием каждого из них на параметры процесса по ходу волочения.

С целью получения единой сравнительной базы, определены основные исходные данные (табл. 7), которые использовали в экспериментальных исследованиях. Результаты расчёта приведены в виде графиков.

Таблица 7 – Исходные данные

Наименование величины	Условное обозначение	Значение
Марка сплава заготовки	Д1, Д16, АД31, АМГ6	Д1
Диаметр заготовки, мм	D_0	12
Размер готового квадратного профиля, мм	A	10
Толщина стенки заготовки, мм	t	0,5-2,5
Максимальный угол наклона образующей канала волокна, град	α	5-28
Радиус закругления внешних углов готового квадратного профиля, мм	r	0,5-2,5
Напряжение текучести, МПа	$\sigma_{0,2}$	123
Коэффициент внешнего трения	μ	0,06-0,2
Коэффициенты анизотропии заготовки	μ_{13}, μ_{31}	0,4-0,67
Коэффициент Лорде	β	1,13
Количество точек разбиения по контуру поперечного сечения трубы	N	64
Количество точек разбиения вдоль очага деформации	M	80

Исходные данные табл.7 вводят в окно программы (рис. 75). Итоговые результаты расчёта отображают на экране, промежуточные расчёты – в виде таблиц в редакторе Excel.

Начальную, промежуточную и конечную геометрию поперечного сечения строили по выбранному количеству точек разбиения контура N. Для выбора оптимальных значений сделаны расчеты влияния числа элементов N и M на изменение профилирования с шагом 10 единиц.

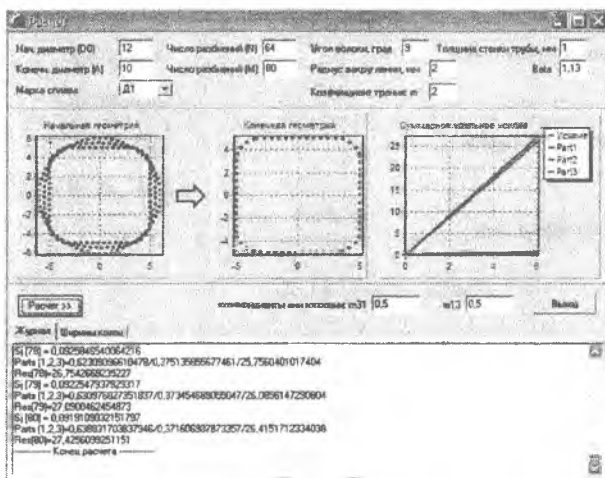


Рис. 75 – Окно программы расчёта

Из графиков на рис 76 видно, что на отрезке N[1,30], M[1,30] полное усилие профилирования существенно зависит от числа точек разбиения. С увеличением числа N>30 точек разбиения по контуру поперечного сечения трубы с увеличением количества M>30 принятых для расчёта кольцевых элементов по длине трубы, происходит стабилизация результатов вычислений полного удельного усилия профилирования. Таким образом, в последующих расчётах на ЭВМ выбраны интервалы значений N>80 и M>60, при которых ошибка в расчётах усилия профилирования составляет не более 1%.

По полученным массивам координат кольцевых элементов в поперечном и продольном направлении (x_{ij} , y_{ij}), построена геометрическая модель трубы в процессе профилирования (рис. 77), которая является исходной для изготовления электроинструмента формообразующей зоны волок на станках с ЧПУ.

В выбранном диапазоне числа кольцевых элементов проведены расчёты удельного усилия профилирования по составляющим на вытяжку, на формоизменение и на трение, а также рассчитано суммарное усилие волочения. Расчёты на компьютере показали, что изменение суммарного усилия по длине канала волокна характеризуется зависимостью, близкой к прямой (рис. 78).

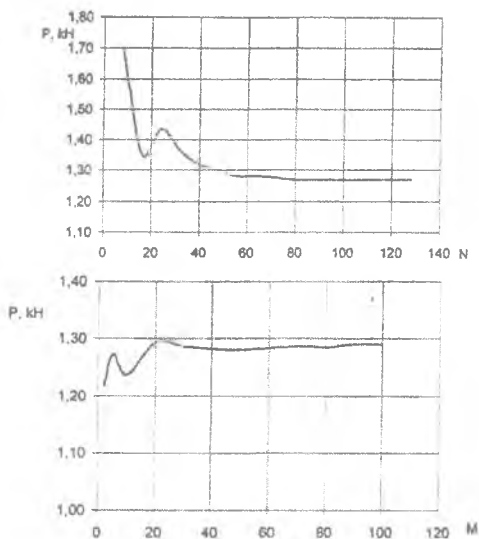


Рис.76 – Влияние числа кольцевых элементов по контуру поперечного сечения N и длине трубы M на изменение усилия профилирования.

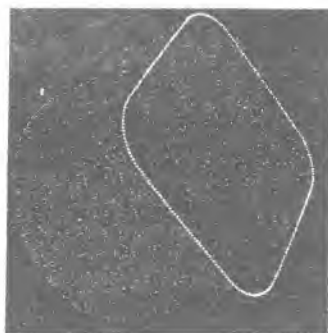


Рис.77 – Модель трубы в процессе формообразования в канале волокна.

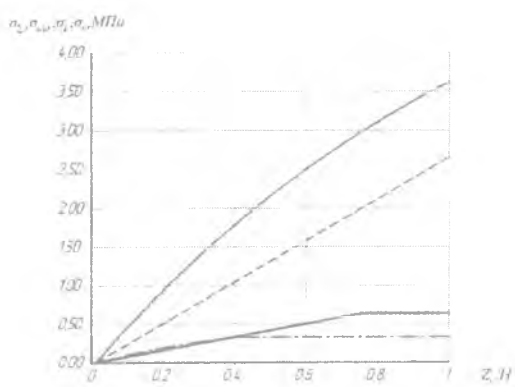
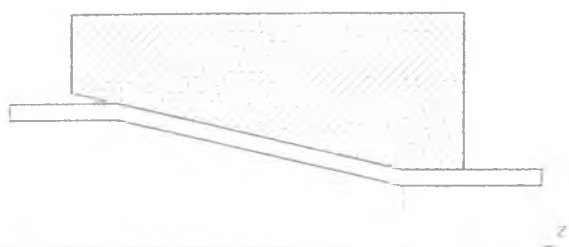


Рис. 78 – Изменение составляющих удельного усилия профилирования по длине канала волокни.

..... $\sigma_{из}$, - - - - σ_4 , - · - · σ_1 , — σ_2 , — — — σ_5

На графике на рис.78 видно, что основная доля усилия профилирования затрачивается на преодоление сил контактного трения на границе инструмент-заготовка». Это объясняется тем, что при движении вдоль канала волокни, происходит вытяжка кольцевого элемента – уменьшение поперечного сечения и увеличение длины. Таким образом, увеличивается площадь поверхности контакта кольцевого элемента и инструмента, что приводит к росту сил трения и ухудшению условий смазки. В связи с чем, рост сил трения происходит более интенсивно по сравнению с другими составляющими усилия.

Величина избыточного периметра $\Delta\Pi/\Pi$ является одним из наиболее существенных факторов, влияющих на силовые условия процесса и качество готовой трубы. Варьирование данным параметром позволяет в широких пределах изменять предельные возможности процесса. Ограничением нижних значений $\Delta\Pi/\Pi$ является качественное заполнение радиусов в поперечном сечении канала профильной волоки. Верхним ограничением значений $\Delta\Pi/\Pi$ является выполнение условий вытяжки, при которых отсутствует обрыв трубы (прочностные ограничения) и полки профиля не деформируются (отсутствие брака по геометрическим параметрам). На практике выбор величины избыточного периметра $\Delta\Pi/\Pi$ определяет величину вытяжки при профилировании и осуществляется изменением начального диаметра трубной заготовки D_0 .

Для установления влияния избыточного периметра на процесс профилирования, проведены расчеты на компьютерной модели с исходными данными: заготовки из сплава Д1 диаметром 12,5 мм, 12,45 мм, 12 мм и 11,4 мм; готовая труба 10x10x1 мм.

Результаты расчетов показали прямую зависимость роста усилия волочения от избыточного периметра (рис.79). Сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными показало адекватность разработанной математической модели. Расхождение составляет менее 10%.

С увеличением толщины стенки трубы t усилие волочения возрастает. При исследовании профилирования с разной геометрией калибрующей части волоки, было обнаружено влияние радиуса закругления волоки на усилие волочения (рис.80). Установлено, что с увеличением закругления R квадратного профиля, усилие волочения возрастает. Рост усилия происходит вследствие увеличения поверхности контакта круглой трубы-заготовки с каналом волоки. При этом, соответственно, уменьшается усилие, расходуемое на формоизменение радиусного участка.

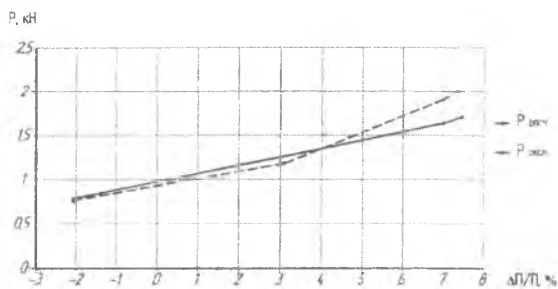


Рис. 79 – Влияние избыточного периметра $\Delta П/П$ на усилие профилирования

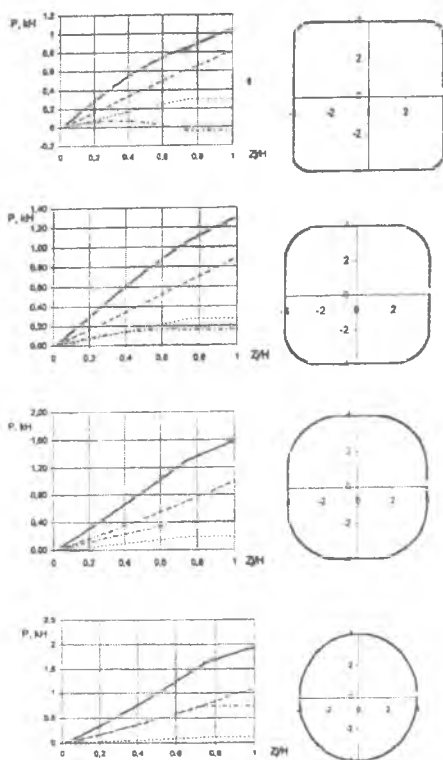


Рис. 80 – Влияние формы профиля на усилия волочения.

$$\cdots \sigma_{исп}, \quad - \cdot - \sigma_{\lambda}, \quad - - - \sigma_{\tau}, \quad \text{—} \sigma_{исп}$$

4.2 Выбор способа волочения квадратных труб

При изготовлении квадратных труб широко используется метод безправочного волочения из-за сравнительной простоты технологии и небольших капиталовложений при изготовлении волочильного инструмента [84]. Правильность выбора технологии профилирования круглой заготовки в квадратную трубу зависит от показателей качества профильной трубы по геометрическим размерам, что связано с выбором способа волочения и размеров заготовки.

При профилировании квадратных труб за один переход возможны два способа: волочение через фасонную волоку без противонатяжения и с противонатяжением. При волочении с противонатяжением профилирование совмещается с обжатием в круглой волоке. При втором способе сокращается одна технологическая операция, повышается устойчивость граней трубы, улучшается заполнение закруглений канала волоки.

Обычно при выборе размеров заготовки исходят из условия, при котором периметр ее поперечного сечения равен или больше периметра поперечного сечения получаемой квадратной трубы. Литературные данные по выбору избыточного периметра носят противоречивый характер. В одних работах периметр исходной заготовки на 2-4% больше периметра готовой квадратной трубы [84,85]. Чем тоньше стенка заготовки, прочнее материал трубы, тем чувствительнее труба к профилированию. Выбор размеров заготовки с комплексным учетом всех перечисленных выше факторов при волочении с противонатяжением отсутствует. В связи с этим проведены исследования по плану дробного факторного эксперимента 2^{3-1} с генерирующим соотношением $X_3=X_1X_2$ и определяющим контрастом $I=X_1X_2X_3$. В качестве исследуемых факторов были взяты: X_1 – превышение периметра $\Delta\Pi\Pi$ исходной круглой заготовки над периметром получаемой квадратной трубы; X_2 – относительная толщина стенки заготовки $t/D_{пр}$; X_3 – предел прочности σ_b материала заготовки. Здесь Π - периметр сечения квадратной трубы.

$$\Pi = 4(A - 2r) + 2\pi r;$$

где A – ширина полки, r – радиус скругления.

Диаметр приведенной трубной заготовки $D_{пр} = \Pi/\pi$, превышение периметра:

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{D_{сам} - D_{пр}}{D_{пр}} 100\%.$$

Приняты следующие интервалы варьирования факторов:

$$X_1 = 2,2; 10,8\%, X_2 = 0,043; 0,129, X_3 = 200; 260 \text{ МПа.}$$

Качество изготовления квадратной трубы оценивали по величине относительного радиуса скругления:

$$\frac{r_1 - r}{r} 100\%,$$

где r_1 и r – радиусы скругления в углах поперечного сечения на готовой трубе и калибрующем участке канала матрицы.

Профилирование квадратных труб размерами 10x10x1 мм с радиусами скругления $r=2$ мм выполняли через круглую и квадратную волокнистые с углом конусности 9° . В качестве смазки использовали «Вапор Т», профилирование проводили в лабораторных условиях на универсальной машине ZDMY-30. В качестве образцов взяты круглые заготовки из алюминиевого сплава Д1 с наружным диаметром 14 мм и толщиной стенок 0,5 мм и 1,5 мм. Чтобы задать разные значения превышения периметра и противонапряжения использовали круглые волокнистые диаметром 11,9 мм и 12,9 мм. Условия проведения эксперимента приведены в табл.8.

Таблица 8. Сводные результаты эксперимента.

№ опыта	$\Delta\Pi/\Pi, \%$	$t/D_{пр}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\Delta r/r, \%$
1	2,2	0,043	260	20
2	10,8	0,043	200	0
3	2,2	0,129	200	90
4	10,8	0,129	260	30

Число повторных опытов было взято равным трем. Порядок проведения опытов был определен о таблице случайных чисел и имел следующую очередность 2, 4, 3, 1. Геометрические параметры заготовки и трубы измеряли с помощью радиусометра и штангенциркуля с точностью 0,05 мм. В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены адекватные уравнения регрессии в виде

$$\frac{\Delta r}{r} = 35 - 20\bar{X}_1 + 25\bar{X}_2 - 10\bar{X}_3,$$

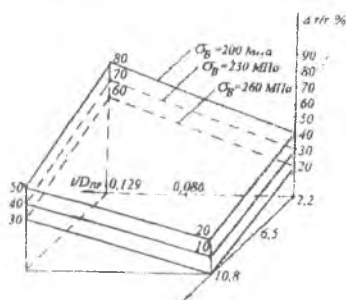


Рис. 81 – Влияние параметров заготовки на заполнение углов трубы.

$$\text{где } \bar{X}_1 = \frac{X_1 - 6,5}{4,3}; \bar{X}_2 = \frac{X_2 - 0,086}{0,043}; \bar{X}_3 = \frac{X_3 - 230}{30}.$$

Графическая иллюстрация приведена на рис. 81. Анализируя диаграмму, можно отметить, что с ростом превышения периметра и прочности материала величина $\Delta r/r$ уменьшается. Чем толще заготовка, тем хуже заполнение угла квадрата. Наиболее эффективно влияют на геометрические параметры труб $\Delta\Pi/\Pi$ и t/D_{np} . Качественная труба по геометрическим размерам получена при $\Delta\Pi^*/\Pi = 10,8\%$, $t/D_{np} = 0,043$ и $\sigma = 200\text{МПа}$.

При исследовании волочения квадратных труб с размерами 10x10x1 мм и $r = 2$ мм из сплава Д1 одновременно через круглую ($\emptyset 14,00\text{мм}$, $\emptyset 13,65\text{мм}$, $\emptyset 13,00\text{мм}$, $\emptyset 12,35\text{мм}$, $\emptyset 11,45\text{мм}$) и квадратную волокни при постоянном исходном диаметре заготовки $\emptyset 14\text{мм}$, толщиной стенки $t = 1\text{мм}$ и $\sigma_B = 260\text{МПа}$

было обнаружено наличие минимума на кривой зависимости $P_{\text{вол}} = f(\Delta\Pi/\Pi)$, рис.82. Этот минимум усилия профилирования соответствует $\Delta\Pi/\Pi \cong 12\%$. При $\Delta\Pi/\Pi < 12\%$ усилие увеличивается за счет роста энергозатрат на обжатие трубной заготовки перед формоизменением в квадратной волоке.

При $\Delta\Pi/\Pi > 12\%$ усилие возрастает за счет роста энергозатрат на профилирование в квадратной волоке.

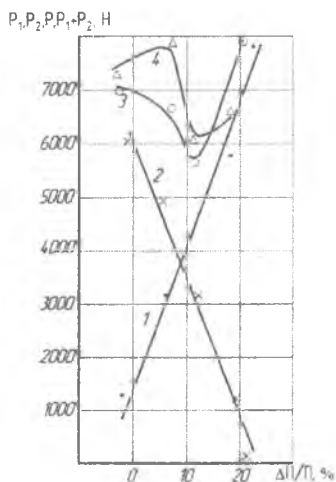


Рис. 82. Зависимость силовых параметров профилирования от избыточного периметра.

4.3 Расчёт фасонных волок

Волоки являются важнейшим инструментом, формообразующим наружную поверхность профилей и труб. Выход волок из строя – одна из основных причин нарушения процесса волочения, поэтому разработка методики расчёта волок, обеспечение их максимальной прочности имеет важное значение. Применявшийся ранее метод расчёта фасонных волок на прочность, основанный на использовании формулы Ляме, не даёт необходимой степени точности [1].

При расчёте поля напряжений в волоке давление от деформируемого металла в полости квадратного отверстия по длине и по сечению принимаем постоянным, рис. 83.

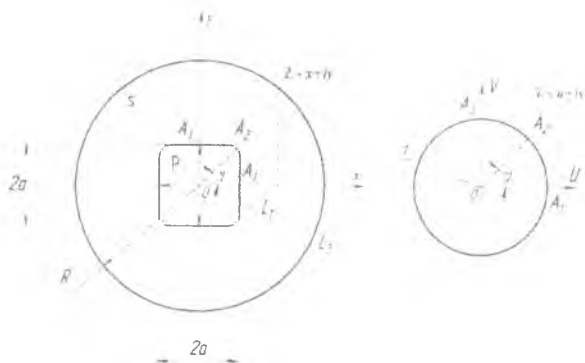


Рис.83. – Схема к расчёту напряженного состояния волоки.

Это даёт возможность использовать методы конформных отображений и теории упругости плосконапряжённых тел [98]. Согласно методу Д.И.Шермана [99], поставленная задача для двухсвязной области S , являющейся поперечным сечением фасонной волоки, может быть сведена к задаче для односвязной области. Такой подход использован при расчёте на прочность контейнеров для плоских слитков [100].

Отобразим внешность квадратного контура L_1 на внешность единичного круга (рис.89). Функцию, задающую это контурное отображение, составим в общем виде.

$$Z = \chi(\lambda) = a \left(\lambda + \frac{b}{\lambda} + \frac{c}{\lambda^2} \right),$$

где a, b, c – коэффициенты, подлежащие определению из условий достаточно хорошего соответствия контура внешней полости волоки и отображения единичного круга. Этого можно добиться соответствующим подбором трёх совпадающих точек A_1, A_2, A_3 и A_1', A_2', A_3' .

Компоненты тензора напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} в произвольной точке фасонной волоки с наружным радиусом R определяются системой трёх уравнений [100]

$$\begin{aligned}\sigma_x + \sigma_y &= 4 \operatorname{Re} \Phi(Z); \\ -\sigma_x + \sigma_y &= 2 \operatorname{Re} [\bar{Z} \Phi'(Z) + F(Z)]; \\ \tau_{xy} &= \operatorname{Im} [\bar{Z} \Phi'(Z) + F(Z)];\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}\Phi(Z) &= \frac{\varphi'(\lambda)}{\chi'(\lambda)} + \frac{\beta_1}{R} + 3\beta_3 \frac{Z^2}{R^3}; \\ \Phi'(Z) &= \frac{\varphi''(\lambda)\chi'(\lambda) - \varphi'(\lambda)\chi''(\lambda)}{[\chi'(\lambda)]^2} + 6\beta_3 \frac{Z}{R^3}; \\ F(Z) &= \frac{\psi'(\lambda)}{\chi'(\lambda)} - \frac{\alpha_1}{R} - 3\alpha_3 \frac{Z^3}{R^3} - 6\frac{\beta_3}{R}.\end{aligned}$$

В записанных уравнениях Re – действительная часть, Im – мнимая часть, $\varphi(Z)$, $\psi(Z)$ – аналитические регулярные функции комплексной переменной $Z=x+iy$ внутри области S . Эти функции целесообразно взять в виде ряда

$$\begin{aligned}\varphi(\lambda) &= \frac{a_1}{\lambda} + \frac{a_3}{\lambda^3}, \\ \psi(\lambda) &= \frac{b_1}{\lambda} + \frac{b_3}{\lambda^3}.\end{aligned}$$

Коэффициенты a_1 , a_3 , b_1 , b_3 , α_1 , α_3 , β_1 , β_3 находятся из следующих выражений:

$$a_1 = \frac{1}{1-c} \left\{ \begin{aligned} & ab \left(\frac{ab_1}{R^2} - p \right) + \\ & + \frac{a^2}{R^2} \left[4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] - \\ & - 3 \frac{a^4}{R^4} \left[a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] * \\ & * (3b^2 + 2c^2 + b^2c + c + 1) \end{aligned} \right\};$$

$$a_1 = ac \left(\frac{ab_1}{R^2} - P \right) - \frac{a^4}{R^4} \left[a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_1) \right] (12bc + b^3 + 3b);$$

$$b_1 = a \left(\frac{ab_1}{R^2} - P \right) - \frac{a^2}{R^2} b \left[4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_1) \right] -$$

$$- 3 \frac{a^4}{R^4} \left[a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_1) \right] (b_1 + 2bc + 2bc - 3b) +$$

$$+ a_1 b(1+c) + 3a_1 c;$$

$$\alpha_1 = \frac{aa_1}{R};$$

$$\alpha_3 = \frac{a^3}{R^3} (a_1 b + a_1);$$

$$\beta_1 = -\frac{1}{2} \frac{a}{R} b_1;$$

$$\beta_3 = \frac{aa_1}{R} - \frac{a^3}{R^3} (bb_1 + b_1);$$

$$b_3 = \frac{a^2}{R^2} c \left[4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_1) \right] - \frac{a^4}{R^4} \left[a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_1) \right] \left[1 + 3(2c + 2bc^2 + b^2) \right] +$$

$$+ a_1(1 + b^3) + 3a_1 b(1 + c) + a_1 c(3c + b).$$

Расчёт предельного состояния по третьей теории прочности позволяет определить наиболее нагруженные участки фасонной волоки и выбрать её размеры:

$$\sigma_{\max} = \sigma_y - \sigma_z \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{K_3},$$

где σ_T – предел текучести материала волоки;

K_3 – коэффициент запаса, $K_3=1,5$,

В качестве примера рассмотрим расчёт напряжённого состояния фасонной волоки с наружным радиусом $R=30$ мм, используемой для калибровки волочением квадратного прутка размером 20×20 мм и закруглёнными углами радиусом 2 мм. Отображающая функция имеет вид

$$z = \chi(\lambda) = 12 \left(\lambda - \frac{0.167}{\lambda^3} \right)$$

Эпюра напряжений приведена на рис.84. Для сравнения на этом же рисунке показаны результаты расчёта напряжений, вычисленных по формуле Ляме.

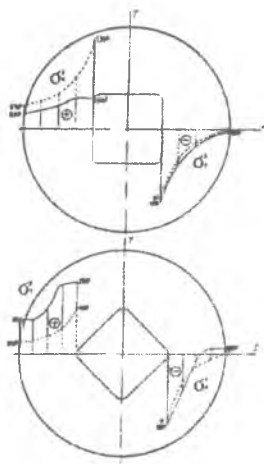


Рис.84 Поле напряжений.

_____ квадратное отверстие; - - - - - круглое отверстие

$$\sigma_y = \frac{Pr^2}{R^2 - r^2} \left(1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right); \quad \sigma_x = \frac{Pr^2}{R^2 - r^2} \left(1 - \frac{R^2}{\rho^2} \right);$$

где r -радиус кривизны круглого отверстия, равного по площади квадратному отверстию.

Из анализа эпюр распределения напряжений по толщине стенки волокна в наиболее характерных сечениях видно, что форма отверстия существенно изменяет характер напряжений в радиальном и окружном направлениях. Наиболее опасная с точки зрения разрушения концентрация напряжений имеет место вблизи углов квадратного контура.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлин, И.Л. Теория волочения [Текст] / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448с.
2. Геоджаев, В.Ю. Волочение тонкостенных анизотропных труб сквозь коническую матрицу [Текст] / В.Ю. Геоджаев // Прикладная механика. -1968.- Т4. - № 2.с.79 – 83.
3. Цой, Д.Н. Волочение тонкостенной трубы через тонкостенную матрицу [Текст] / Д.Н. Цой// Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1987. – №4. С 182 – 184.
4. Ерманок М.З. Исследование безправочного волочения труб из алюминиевых сплавов[Текст] / М.З. Ерманок //Цветные металлы. – 1958. - №5. с. 70 – 77.
5. Ерманок, М.З. Применение безправочного волочения труб при производстве труб [Текст] /М.З. Ерманок - М.: Цветметинформация, 1965 – 101 с.
6. Савин, Р.А. Волочение труб [Текст] / Р.А. Савин – М.: Металлургия, 1983 – 336 с.
7. Малинин, Н.Н. Волочение труб через конические матрицы [Текст] / Н.Н. Малинин // АН СССР Сер. Механика. – 1965 - №11. с. 139 – 142.
8. Баранов, Г.Л. Анализ напряжённого состояния при безправочном волочении труб [Текст] / Г.Л. Баранов // Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1983 - №12 с. 59-63.
9. Каргин, В.Р. Волочение тонкостенных анизотропных труб [Текст] / В.Р. Каргин, Ю.С. Горшков // Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1992. - №5. с. 49 – 52.
10. Паршаков, Е.И. Определение температуры контактной поверхности инструмента при волочении труб [Текст] / Е.И. Паршаков, Е.И. Каршин // Обработка металлов давлением – Свердловск УПИ, 1973. с. 102 – 107.

11. Тропотов, А.В. Особенности исчерпания запаса пластичности при безправочном волочении труб [Текст] / А.В. Тропотов, А.А. Богатов, А.А. Леонтьев // Изв. Вузов. Чёрная металлургия. – 1983. №4. – с. 56 – 59.
12. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металла давлением. [Текст] / В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
13. Купеченко, В.Р. Определение допустимых обжатий по диаметру при безправочном волочении труб [Текст] / В.Р. Купеченко, Е.В. Кондратьев, И.А. Соловьёва, А.А. Писовский // Металлургия и коксохимия – Киев, 1987. – №94. с. 95 – 98.
14. Борисов, С.И. Допускаемые величины обжатий при безправочном волочении труб малых размеров с учётом устойчивости формы трубы в очаге деформации [Текст] / С.И. Борисов, М.М. Бернштейн. // Бюллетень научно – технической информации ВНИТИ – М.: Металлургиздат. 1958. - №4. с. 71 – 76.
15. Ильюшин, А.А. Пластичность [Текст] / А.А. Ильюшин – М.: Гостехиздат, 1948 – 286 с.
16. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов – М.: Наука, 1975. – 631 с.
17. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение 1977. – 427 с.
18. Шевакин, Ю.Ф. Определение диаметра трубы при безправочном волочении с учётом внеконтактной и упругой деформации [Текст] / Ю.Ф. Шевакин, А.А. Чернявский, А.Б. Ламин // Сталь. – 1965. - №1. с. 41 - 48.
19. Каргин, Б.В. Расчёт утолщения стенки трубы при безправочном волочении [Текст] / Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, Е.В. Шокова // Заготовительные производства в машиностроении – 2004. - №1. с. 44 – 46.
20. Арышенский, Ю.М. Получение рациональной анизотропии в листах [Текст] / Ю.М. Арышенский – М.: Металлургия, 1987. – 141 с.
21. Гречников, Ф.В. Напряжённо – деформированное состояние при безправочном волочении тонкостенных труб через коническую и радиальную

- волоки [Текст] / Ф.В. Гречников, Б.В. Каргин, В.Р. Каргин // Заготовительные производства в машиностроении – 2004. - №8 с. 28 – 31.
22. А. с 217345 СССР МКИ 7в 16120 Способ производства труб со спиральными рёбрами [Текст] / Э.В. Никулин // Открытия. Изобретения – 1968. - №6. с. 31.
23. А.с 190855 СССР МКИ 7в 16/01 Способ изготовления ребристых труб [Текст] / А.И. Бадин // Открытия. Изобретения -1967. - №3. с. 16.
24. Маковский, В.А. Основы теории и практики производства биметаллических прутков [Текст] / В.А. Маковский, Л.С. Ельман –М.: Металлургия, 1971. – 192 с.
25. Биметаллические материалы [Текст] / М.И. Чепурко, В.Я. Остренко, Л.Я. Глузкин и др. – Киев: Судостроение, 1984. – 272 с.
26. Старостин, Ю.С. Ребристые трубы из алюминиевых сплавов [Текст] / Ю.С. Старостин, М.Ф. Головинов, В.Р. Каргин – М.: Металлургия, 1983. – 134 с.
27. Матвеев, Ю.М. Волочение труб на деформируемом сердечнике [Текст] / Ю.М. Матвеев, А.Н. Батист – Челябинск: Южно – Уральские книги. Изд – во, 1967. -127 с.
28. Смирнов – Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] / Г.А. Смирнов – Аляев – М.: Машгиз, 1949. – 247 с.
29. Каргин, Б.В. Расчёт волочения труб с внутренним давлением [Текст] / Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, М.В. Фёдоров // Кузнечно – штамповочное производство. – 2002. - №9. с. 82 – 85.
30. Каргин, Б.В. Анализ безправочного волочения тонкостенных труб с противонапряжением [Текст] / Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, Е.В. Шокова // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического университета. – 2003. -№1. – с. 82-85.
31. Каргин, В.Р. Напряжённо – деформированное состояние при безправочном волочении тонкостенных труб через вращаемые волокна [Текст]

/ В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, Т.С. Пастушенко // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2009. -№2. – 42 – 46.

32. Каргин, В.Р. Компьютерное моделирование безопроравочного волочения тонкостенных труб через вращаемую волоку [Текст] / В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко, Я.А. Ерисов // Известия Самарского научного центра. – 2009. – Т11. - №3. с. 225 – 230.

33. А.с 645719 СССР МКИ В21С 3/00 Устройство для волочения с кручением круглых профилей [Текст] / Зазимко В.А., Бабасов М.В., Савин Г.А. и др. // Открытия. Изобретения. – 1979. №17. с. 26.

34. А.с. 605658 СССР. МКИ В21С 3/06 Регулируемая волока для волочения труб с винтовыми профильными рёбрами [Текст] / Шилиев А.А., Крон И.А., Бахрих С.Г. и др. // Открытия. Изобретения. – 1978. №17. с. 25.

35. Дорохов, А.И. Упругая деформация при скручивание ребристых труб на заданный шаг спирали [Текст] / А.И. Дорохов, Э.В. Никулин // Производство труб – М.: Металлургия. 1969. – вып.22. с. 85 – 89.

36. А.с. 262067 СССР. МКИ В21С 1/22 // Способ волочения труб со скручиванием. [Текст] / Дорохов, А.И., Шлосберг Л.М., Головатый А.Б. // Открытия. Изобретения. – 1973. №34. с. 210.

37. А.с. 386539 СССР. МКИ В21С 37/24 // Способ изготовления труб круглого сечения со спиральными рёбрами [Текст] / Старостин Ю.С., Плохов В.И., Ерохов В.К. и др. // Открытия. Изобретения. – 1982. №48. с. 36.

38. А.с. 372002 СССР. МКИ В21С 3/14 // Устройство для волочения круглых профилей с кручением. [Текст] / Аркулис Г.Э., Матвеев Ю.М., Батист А.И. и др. // Открытия. Изобретения. – 1973. №12. с. 32.

39. А.с. 425427 СССР. МКИ В21С 1/00 // Способ волочения труб, прутков и других профилей. [Текст] / Зазимко В.А., Савин Г.А., Бабасов В.М. // Открытия. Изобретения. – 1976 №45. с. 214.

40. А.с 663462 СССР. МКИ В21С 3/44 // Устройство для волочения круглых профилей с кручением [Текст] / В.Н. Морозенко., А.В. Сосненко., В.К. Ефанов, ю.А. Ивасенко, И.В. Добров // Открытия. Изобретения. – 1979.№19. с. 30.

41. А.с. 1310057 СССР. МКИ В21С 1/22 // Способ волочения труб со скручиванием [Текст] / Сидоренко В.К., Сидоренко И.Ю., Усенко А.П. // Открытия. Изобретения. – 1987. №18. с. 12.
42. А.с. 435027 СССР. МКИ В21С 1/24 // Способ волочения профильных труб [Текст] / Ю.Ф. Шевакин, Н.Н. Касаткин, Л.П. Селезнёв и др. // Открытия. Изобретения. – 1974. №24. с. 35.
43. А.с. 539629 СССР МКИ В21С 1/00 // Способ волочения круглых профилей. [Текст] / А.А. Шевченко, Г.А. Сизоненко, М.Б. Рогов, Ю.Л. Семененко. // Открытия. Изобретения. – 1977. №47. с. 22.
44. А.с. 539630 СССР. МКИ В21С 1/00 // Способ волочения труб, прутков и других профилей. [Текст] / Шевченко А.А., Сизоненко Г.А., Рогов М.Б. и др. // Открытия. Изобретения. – 1977. №47. с. 22.
45. А.с. 863047 СССР МКИ В21С 3/14 // Устройство для волочения круглых профилей с кручением. [Текст] / В.Н. Морозенко, И.В. Добров, Ю.Б. Смалов и др. // Открытия. Изобретения. – 1981. №34. с. 28.
46. А.с. 856603 СССР МКИ В21С 1/00 // Способ изготовления труб. [Текст] / Кунин Я.Б., А.А. Богатов, В.М. Власов, и др. // Открытия. Изобретения. – 1981. №31. с. 12.
47. А.с. 644576 СССР МКИ В21С 1/00 // Устройство для волочения [Текст] / А.Н. Шаповал // Открытия. Изобретения. – 1979. №4. с. 39.
48. А.с. 521037 СССР МКИ В21С 1/00 // Способ волочения труб. [Текст] / А.Н. Корякин, З.Ф. Бабурин, В.Н. Казаченок // Открытия. Изобретения. – 1976. №26. с. 23.
49. А.с. 281388 СССР МКИ В21С 1/00 // Устройство для волочения. [Текст] / В.В. Девятов, Е.М. Девятова // Открытия. Изобретения. – 1970. №29. с. 32.
50. А.с. 730401 СССР МКИ В21С 1/00 // Способ волочения металлических изделий с кручением. [Текст] / В.Н. Шаповал, А.Н. Шаповал, // Открытия. Изобретения. – 1980. №16. с. 22.

51. А.с. 1388132 СССР МКИ В21С 1/24 // Способ изготовления труб. [Текст] / Ю.Н. Шадрин, Р.З. Акчурин, А.А. Богатов и др. // Открытия. Изобретения. – 1962. №14
52. А.с. Польша, МКИ В21С 3/12 Вращающаяся волока. [Текст] / PrajsnarTadeusz, GodynAdam, ZglobickiEdward, KuzLeslawm, SzulicWojciech, HatalakTadeusz, StarekJiri, PetruzelkaJiri, StanekBretislav, 1980.
53. А.с. 430915 СССР МКИ В21С 1/00 // Способ волочения стальной проволоки. [Текст] / Г.Э. Аркулис, Н.В. Соколов, Л.А. Красильников и др. // Открытия. Изобретения. – 1974. №24. с. 29.
54. А.с. 481341 СССР МКИ В21С 3/12 // Способ изготовления фасонных винтовых профилей. [Текст] / Петров А.И., Абдульманов Ф.З., // Открытия. Изобретения. – 1975. №31. с. 25.
55. А.с. 445492 СССР МКИ В21С 37/04 // Волока для волочения винтовых профилей. [Текст] / Абдульманов Ф.З., Махнев И.Ф., Зорин Н.Н. и др. // Открытия. Изобретения. – 1974. №37. с. 26.
56. А.с. 130481 СССР НКИ 7с5 // Устройство для скручивания некруглых профилей волочением. [Текст] / Колмогоров В.Л., Моисеев Г.П., Шахнаев Ю.Н. // Открытия. Изобретения. – 1960. №15. с. 18.
57. Тимошенко, С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости. [Текст] / С.П. Тимошенко – Киев. Наукова думка. 1975. с. 563.
58. А.с. 406598 СССР МКИ В21С 37/20 //Инструмент для профилирования витых труб из тонкостенной цилиндрической заготовки. [Текст] / А.И. Дорохов, Л.Н. Шлосберг, Ю.А. Мироненко и др. // Открытия. Изобретения. – 1973. №46. с. 23.
59. Каргин, В.Р. Волочение винтовых труб. [Текст] / В.Р. Каргин // Цветные металлы. – 1989. №2. с. 102 – 105.
60. Дорохов, А.И. Прокатка тонкостенных труб с внутренними рёбрами на стане ХТПР. [Текст] / А.И. Дорохов, А.П. Усенко //Производство бесшовных труб – М.: Металлургия. – 1975. №3. с.79 – 82.

61. А.с. 354694 СССР МКИ В21С 3/24 // Способ изготовления винтовых рёбер. [Текст] / Дорохов А.И., Шлосберг А.М., Крон И.А. и др. //Открытия. Изобретения. – 1977. №1. с. 252.
62. А.с. 217345 СССР МКИ В21С 16/20 // Способ производства труб со спиральными рёбрами. [Текст] / Никулин Н.В. //Открытия. Изобретения. – 1976. №16. с. 25.
63. А.с. 605658 СССР МКИ В21С 3/06 // Регулируемая волока для волочения труб с винтовыми продольными рёбрами. [Текст] / А.А. Шиляев, И.А. Крон, С.Г. Бахрис и др. // Открытия. Изобретения. – 1978. №17. с. 25.
64. А.с. 488638 СССР. МКИ В21С 3/06 // Регулируемая волока [Текст] / Дорохов А.И., Шлосберг Л.М., Ребрин В.И. и др. //Открытия. Изобретения. – 1975. №39. с.26.
65. А.с. 484915 СССР МКИ В21С 37/20 // Способ скручивания тонкостенных труб с ребрами [Текст] / Орро П.И., Никулин Э.В., Головатый А.Б. и др. // Открытия. Изобретения. – 1975. №46. с. 29.
66. А.с. 1528593 СССР МКИ В21С 3/16 // Самоустанавливающаяся отправка для волочения труб. [Текст] / Бояркин В.И., Антимонов А.М., Попов В.М. и др. // Открытия. Изобретения. – 1989. №46. с.29.
67. Каргин, В.Р. Исследование процесса волочения винтовых многоканальных труб с винтообразными ребрами. [Текст] // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства. – Тула: ТулПИ, 1989. с.84 – 92.
68. А.с. 737057 СССР МКИ В21С 37/20 // Заготовка для изготовления теплообменных труб [Текст]/ Старостин Ю.С., Чертков Г.В., Каргин В.Р. и др. // Открытия. Изобретения. – 1980. №20. с. 39.
69. Каргин, В.Р. Изготовление винтовых многоканальных труб методом волочения [Текст] / В.Р. Каргин // Вестник машиностроения. 1989. №5. с. 50-52.
70. Каргин, В.Р. Новая технология изготовления винтовых многоканальных труб [Текст] / В.Р. Каргин, Ю.С.Горшков, Ю.А. Вольных и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. №11. с. 36 – 38.

71. Старостин, Ю.С. Методика расчёта технологических параметров при изготовлении труб со спиральными ребрами [Текст] / Ю.С. Старостин, В.Р. Каргин, Г.В. Чертков // Вопросы пластического формоизменения при производстве летательных аппаратов и двигателей – Самара: Самарский авиационный институт. -1979. с. 39 - 41.
72. Шевченко, А.А. Об особенностях процесса волочения с вращением контактных поверхностей инструмент – заготовки. [Текст] / А.А. Шевченко, Г.А. Сизоненко, М.Б. Рогов // Производство труб. Теория и практика трубного производства – М.: Металлургия. 1971. вып.26. с. 84 – 90.
73. Шевченко, А.А. Влияние крутящего момента на текстуру и структуру металла при волочении труб [Текст] / А.А. Шевченко //Производство бесшовных труб – М.: Металлургия. 1972. -№1. с.126 – 132.
74. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов [Текст] / Я.Б. Фридман – М.: Машиностроение, том 1. – 1974. с. 472
75. Каргин, В.Р.Процессы получения винтовых профилей и труб [Текст] / В.Р. Каргин – М.: Металлургия. – 1994. с.96.
76. Теплообменные аппараты холодильных установок [Текст] / Г.Н. Данилова, С.И. Богданов, О.П. Иванов и др. – Л.: Машиностроение, - 1986. – 330 с.
77. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов давлением [Текст] / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши – М.: Машиностроение. – 1968. – 504 с.
78. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]/Ю.П.Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В. Грановский – М.:Наука-1976-278с.
79. Каргин, В.Р. Способ изготовления многоканальных труб с продольным и спиральным оребрением. [Текст]/В.Р.Каргин, Ю.С.Горшков, Ю.А.Вольных. Химическое и нефтяное машиностроение, №2, 1993, с 30-31.

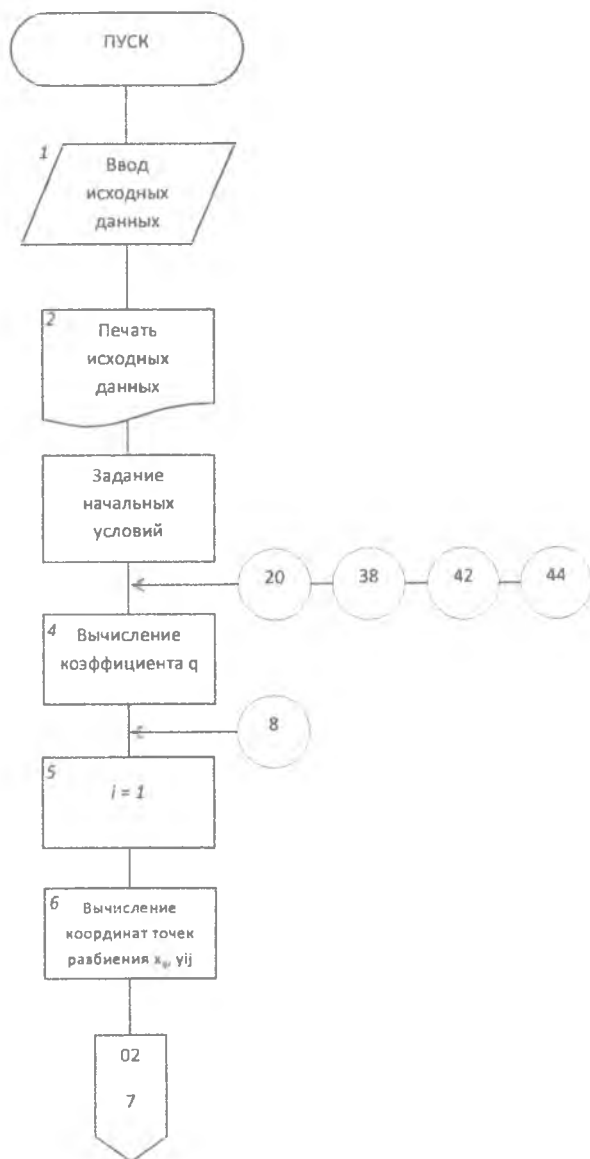
80. А.С. 1810146 СССР МКИ В21С 1/00 Способ изготовления многоканальной трубы [Текст]/Каргин В.Р. Открытия Изобретения, 1993, №15, с.363
81. Каргин, В.Р. Определение тензометрическим методом остаточных напряжений в конструкциях сборных теплообменных труб [Текст]/В.Р.Каргин, М.Ф.Федоров, В.С.Феоктистов. Известия Самарского научного центра.-1999-№2. С. 307-309.
82. Каргин, В.Р. Сборка двухкамерных труб со спиральным турбулизатором методом волочения. [Текст]/В.Р.Каргин. Цветные металлы, 1995, №10, с. 53-55.
83. Каргин, В.Р. Расчёт параметров волочения с кручением квадратных и прямоугольных труб. [Текст]/В.Р.Каргин, Е.В.Шокова. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2004, №1, с. 80-84.
84. Шурупов, А.К. Производство труб экономичных профилей [Текст]/А.К.Шурупов, М.А.Фрейберг. Свердловск: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии. 1963, с. 296.
85. Данченко, В.Н. Производство профильных труб. [Текст]/В.Н.Данченко, В.В.Сергеев, Э.В. Никулин. М: Интернет Инжиниринг, 2003, с. 224.
86. Гречников, Ф.В. Выбор способа волочения и размеров заготовки для изготовления квадратных труб [Текст]/ Ф.В.Гречников, В.Р.Каргин, В.И.Дровяников, Е.В.Шокова//Сборник научных трудов «Рыночная экономика: состояние, проблемы, перспективы». – Самара: МИР, 1998, с.439-444.
87. Каргин, В.Р. Математическая модель профилирования труб волочением [Текст]/В.Р.Каргин, Е.В.Шокова// Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 40-летию Самарского металлургического завода «Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов». –Самара, 2000, с.252-258.

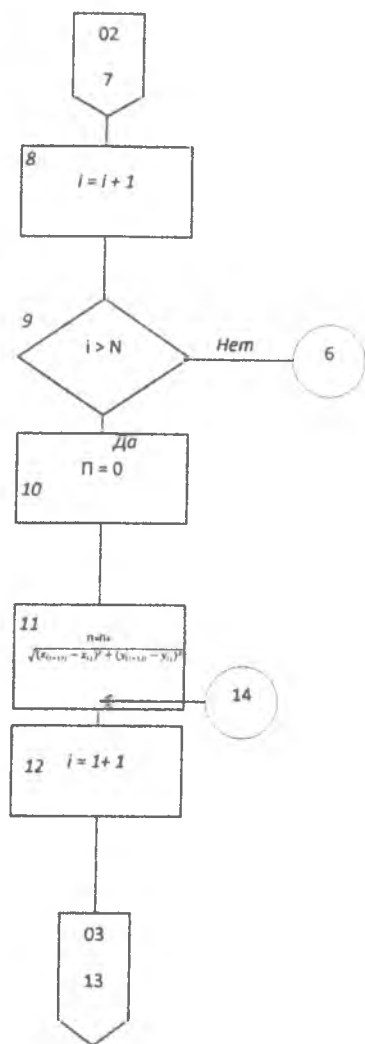
88. Каргин, В.Р. Расчёт инструмента для волочения квадратных профилей и труб [Текст]/В.Р.Каргин, М.Ф.Федоров, Е.В.Шокова, И.В.Ефремов/Известия СНТЦ РАН.Т.3. -2001. -№2. С,238-240.
89. Пастушенко, Т.С. Кручение в процессах волочения труб. [Текст]/Т.С.Пастушенко, Б.В.Каргин//Современные наукоёмкие технологии, 2008, №6, с. 18-24.
90. Каргин, В.Р.Компьютерное моделирование безоправочного волочения тонкостенных труб [Текст]/В.Р.Каргин, Б.В.Каргин, Т.С.Пастушенко, Я.А.Ерисов//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2009, №1, с. 72-79.
91. Каргин, Б.В. Исследование волочения труб с внутренним спиральным рифлением на короткой вращающейся оправке. [Текст]/Б.В.Каргин, В.Р.Каргин, Т.С.Пастушенко//Заготовительные производства в машиностроении, 2009, №2, с.30-32.
92. А.с.354694 СССР МКИ В21С 1/24. Способ изготовления винтовых ребер. [Текст]/А.И.Дорохов, Л.М.Шлосберг, И.А.Крон, и д.р.// Открытия изобретения, 1997, №1, с. 252.
93. Старостин, Ю.С.Пластическое деформирование металлов. [Текст]/Ю.С.Старостин, В.Н.Зорихин, В.И.Плохов—Фрунзе:изд. Фрунзенского политехнического института, 1976, с.51-56.
94. Расчёт на прочность в машиностроении. [Текст]/-М: Машиностроение, 1959, с. 974.
95. Крагельский, И.В. Трение и износ. [Текст]/И.В.Крагельский. – М:Машиностроение, 1968, с.480.
96. Михин, Н.М. Внешнее трение твёрдых тел. [Текст]/Н.М.Михин – М: Наука, 1977, с.122.
97. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки. [Текст]/Е.А.Попов– М:Машиностроение, 1977, с.278.
98. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основы задач математической упругости. [Текст]/Н.И.Мухелишвили–М:Наука, 1966, с.739.

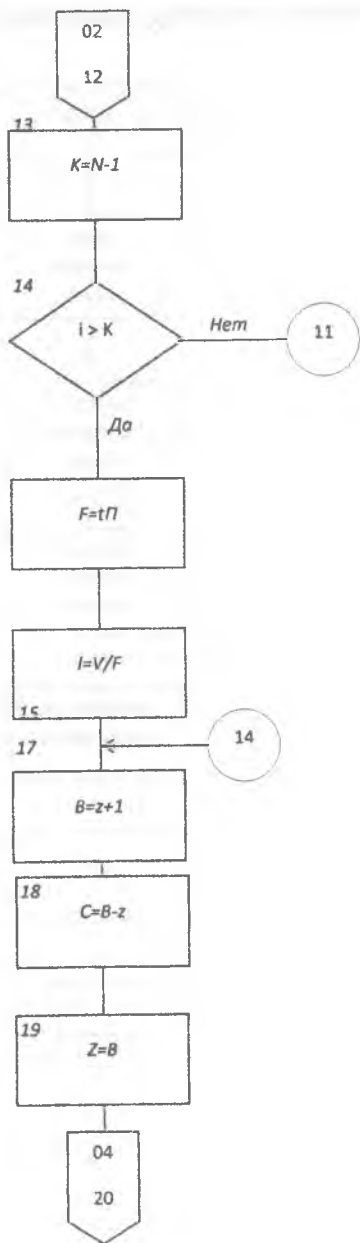
99. Шерман, Д.Н. О напряжениях в весовой полуплоскости, ослабленной двумя круговыми отверстиями. [Текст]/Д.И.Шерман//Прикладная математика и механика, 1951, вып.3, с.79-83..
100. Перлин, П.И. Контейнеры для плоских слитков. [Текст]/П.И.Перлин, Л.Ф.Толченова//Труды ВНИИМетмаш, 1960, №1.

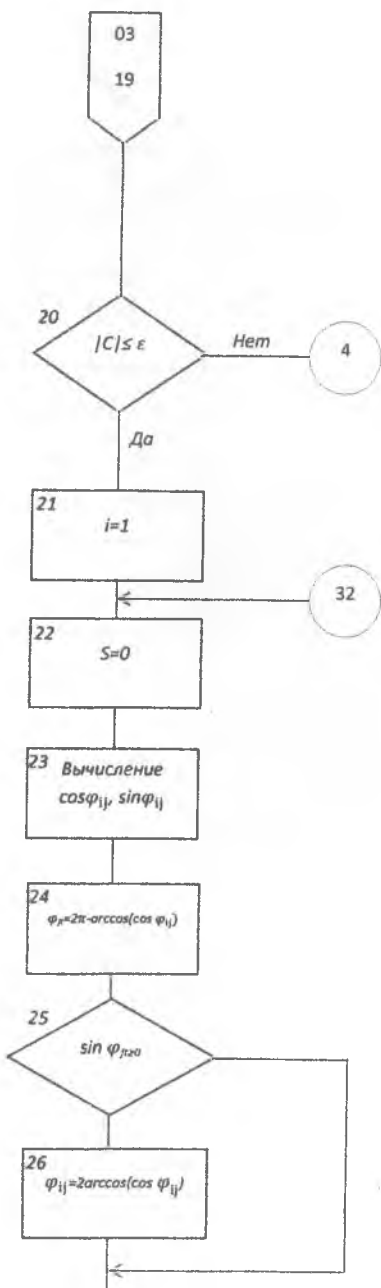
ПРИЛОЖЕНИЕ

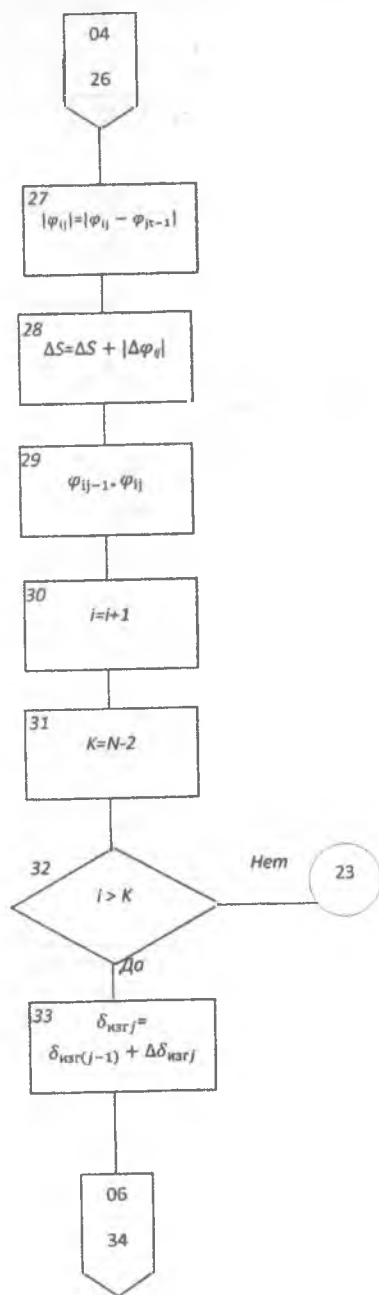
Блок-схема программы профилирования многогранных труб волочением.

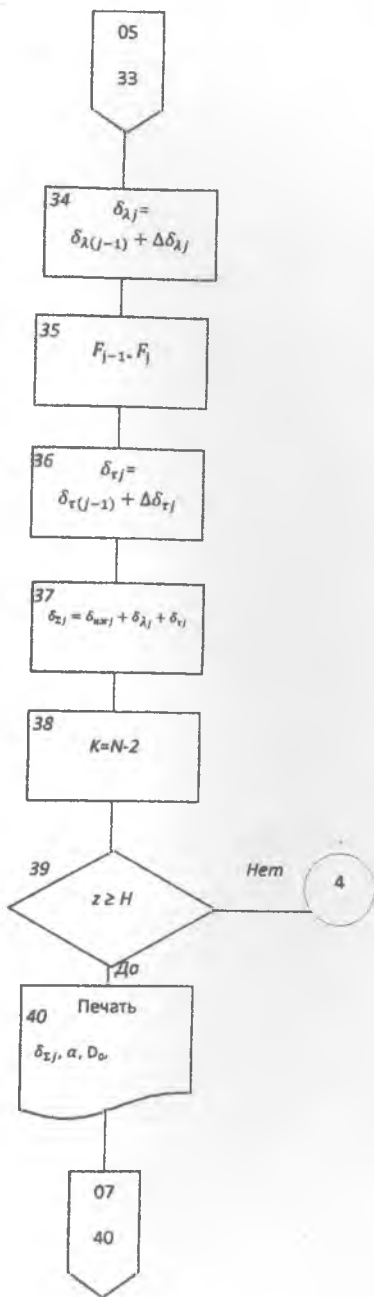


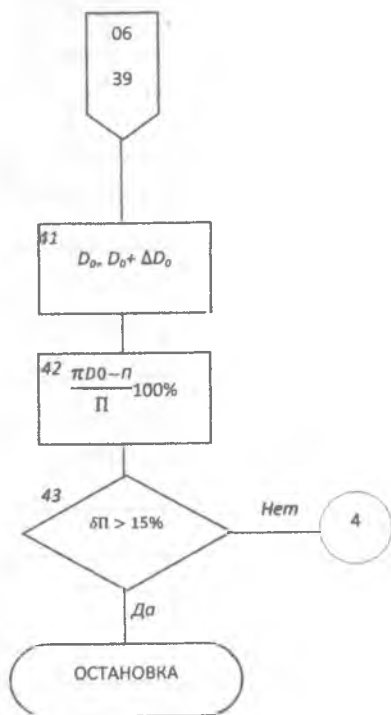












Научное издание

Борис Владимирович Каргин
Владимир Родионович Каргин

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ

Монография

Редактор В.Р. Каргин
Верстка Б.В.Каргин

Подписано в печать 18.11.2013, Формат А5 уменьшенный.

Бумага офсетная. Печать ризография.

Усл. печ. л. 10,87

Тираж 250 экз., заказ 1118.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.