

Шокова Екатерина Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОФИЛИРОВАНИЯ  
МНОГОГРАННЫХ ТРУБ БЕЗОПРАВОЧНЫМ ВОЛОЧЕНИЕМ**

Специальность 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара 2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» (СГАУ) на кафедре обработки металлов давлением.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Каргин Владимир Родионович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Костышев Вячеслав Александрович,

кандидат технических наук, доцент  
Чертков Геннадий Вячеславович

Ведущая организация: ОАО «Самарский металлургический завод»

Защита состоится « 17 » октября 2008г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 212.215.03 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» по адресу: 443086 г.Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан « 16 » сентября 2008г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Активное развитие производственной сферы экономики, жесткие требования к экономичности и надежности продукции, а также к эффективности производства требуют применения ресурсосберегающих видов техники и технологии. Для многих отраслей строительной индустрии, машиностроения, приборостроения, радиотехнической промышленности одним из решений является использование труб экономичных видов (теплообменные и радиаторные трубы, волноводы и пр.), что позволяет: увеличить мощность установок, прочность и долговечность конструкций, снизить их металлоемкость, экономить материалы, улучшить внешний вид. Широкая номенклатура и значительный объем потребления профильных труб сделали освоение их производства в России необходимым. В настоящее время основная масса фасонных труб изготавливается в трубоволоочильных цехах, так как операции холодной прокатки и волочения достаточно развиты в отечественной промышленности. В этой связи особенно актуально совершенствование (модернизация) действующего производства: разработка и изготовление оснастки, внедрение новых технологий и методов.

Наиболее распространенные виды фасонных труб — многогранные (квадратные, прямоугольные, шестигранные и др.) трубы высокой точности, получаемые безоправочным волочением за один проход.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью повышения качества многогранных труб путем совершенствования процесса их профилирования без оправки.

Целью работы является совершенствование процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением путем разработки методик расчета технологических параметров и геометрии инструмента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать математическую модель профилирования многогранных труб безоправочным волочением для оценки силовых условий с учетом нелинейного закона упрочнения, анизотропии свойств и сложной геометрии канала волокна.

2. Определить силовые условия в зависимости от физических, технологических и конструктивных параметров профилирования при безоправочном волочении.

3. Разработать методику оценки заполняемости углов волокна и утяжки граней при волочении многогранных труб.

4. Разработать методику расчета на прочность фасонных волокон для определения геометрических параметров инструмента.

5. Разработать методику расчета технологических параметров при одновременном профилировании и кручении.

6. Провести экспериментальные исследования технологических параметров процесса, обеспечивающих высокую точность размеров многогранных труб и проверить адекватность расчета технологических параметров профилирования по математической модели.

Методы исследований. Теоретические исследования базировались на основных положениях и допущениях теории волочения, теории упругости, методе конформных отображений, вычислительной математики.

Экспериментальные исследования проводили в лабораторных условиях с

применением методов математического планирования эксперимента на универсальной испытательной машине ЦДМУ-30.

Автор защищает результаты расчета технологических и конструкционных параметров профилирования многогранных труб безоправочным волочением: методику расчета на прочность фасонной волоки с учетом нормальных нагрузок в канале; методику расчета технологических параметров процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением; методику расчета технологических параметров при одновременном профилировании и кручении при безоправочном волочении винтовых тонкостенных многогранных труб; результаты экспериментальных исследований.

#### Научная новизна.

1. Установлены закономерности изменения силовых условий при профилировании многогранных труб безоправочным волочением с учетом нелинейного закона упрочнения, анизотропии свойств и сложной геометрии канала волоки.

2. Решена задача по определению напряженного состояния фасонной волоки, находящейся под действием нормальных нагрузок в канале.

3. Дана полная запись уравнений напряженно-деформированного состояния при одновременном профилировании и кручении многогранной трубы.

Достоверность результатов исследований подтверждена строгой математической постановкой задач, применением аналитических методов решения задач, современными методами проведения опытов и обработки экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов эксперимента, удовлетворительной сходимостью расчетных, экспериментальных данных и результатов практики, соответствия результатов моделирования технологии изготовления и характеристикам готовых многогранных труб.

#### Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложены режимы получения квадратных труб 10x10x1мм из сплава Д1 высокой точности, повышающие выход годного на 5%.

2. Определены размеры фасонных волок, обеспечивающие их работоспособность.

3. Совмещение операций профилирования и кручения сокращает технологический цикл изготовления винтовых многогранных труб.

4. Усовершенствована калибровка канала фасонной волоки для профилирования прямоугольных труб 32x18x2мм.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Самарского металлургического завода «Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов» (Самара: СГАУ, 2000г.); 11 межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи», (Самара: СГТУ, 2001г.); второй международной научно-технической конференции "Металлофизика, механика материалов и процессов деформирования" (Самара: СГАУ, 2004г.); XIV Туполевские чтения: международная молодежная научная конференция (Казань: КГТУ, 2006г.); IX Королевские чтения: международная молодежная научная конференция (Самара: СГАУ, 2007г.).

Публикации. Материалы, отражающие основное содержание диссертации опубликованы в 11 работах, в том числе в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией - 4.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из основных условных обозначений, введения, пяти глав, списка литературы и приложения. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, включая 74 рисунка, 14 таблиц, библиографию из 114 наименований и приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, научная новизна, практическое значение и основные результаты работы.

В первой главе отмечено, что многогранные трубы изготавливают холодным безоправочным волочением через волокнистый соответствующего профиля из круглой трубы-заготовки.

Важными потребительскими характеристиками многогранной трубы являются радиус закругления углов многогранного профиля и прямолинейность полок, достижение которых обеспечивается выбором размеров исходной заготовки, калибровкой фасонной волокнистой и режимами деформирования.

Проведен анализ работ, посвященных определению силовых условий при профилировании труб безоправочным волочением, выполненных А.И. Дороховым, А.К.Шуруповым, М.А. Фрейбергом, М.З. Ерманком, Ю.Ф. Шевакиным, А.А. Шевченко и др. В исследованиях рассматривался материал труб неупрочняемым, изотропным, не учитывался сложный профиль канала волокнистой.

При профилировании толстостенных труб из труднодеформируемых материалов выход волокон из строя – одна из основных причин нарушения процесса волочения, поэтому разработка методики расчета фасонных волокон, обеспечение их максимальной прочности имеет важное значение. Применявшийся ранее метод расчета волокон на прочность, основанный на использовании формул Ляме, не дает необходимой степени точности.

Большой практический интерес представляет получение волочением винтообразно закрученных многогранных труб. В литературе отсутствуют методики по выбору технологических параметров данного процесса.

Аналитический обзор позволил сформулировать цель и поставить задачи, требующие решения.

Вторая глава посвящена разработке математической модели профилирования многогранных труб из круглой заготовки и реализации ее с использованием компьютерных технологий при следующих допущениях:

- Трубная заготовка принята трансверсально изотропной, механические свойства в поперечном сечении одинаковы, но отличны от свойств в направлении оси волочения.
- При профилировании все поперечные сечения трубы поочередно переходят в пластическое состояние.
- На поверхности контакта трубы и волокнистой действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона.
- Толщина стенки трубы по длине очага деформации не меняется.

Очаг деформирования представлен совокупностью  $M$  кольцевых элементов, форма которых изменяется вдоль оси волочения от круглой до конечной формы

профиля. Форма поперечного сечения каждого кольцевого элемента задается дискретно, конечным числом  $N$  точек разбиения контура  $(x_{ij}, y_{ij})$ . Для расчета геометрии, на входе в очаг деформации задаем значения координат окружности, соответствующей размерам заготовки, а форму профиля на выходе из очага деформации и промежуточную геометрию описываем конечным контуром с учетом того, что он представляет собой многогранник с варьируемым радиусом закругления. На основании этого формируем массивы  $X_{ij} (i=1...N, j=1...M)$ ,  $Y_{ij} (i=1...N, j=1...M)$  (рис.1-3).

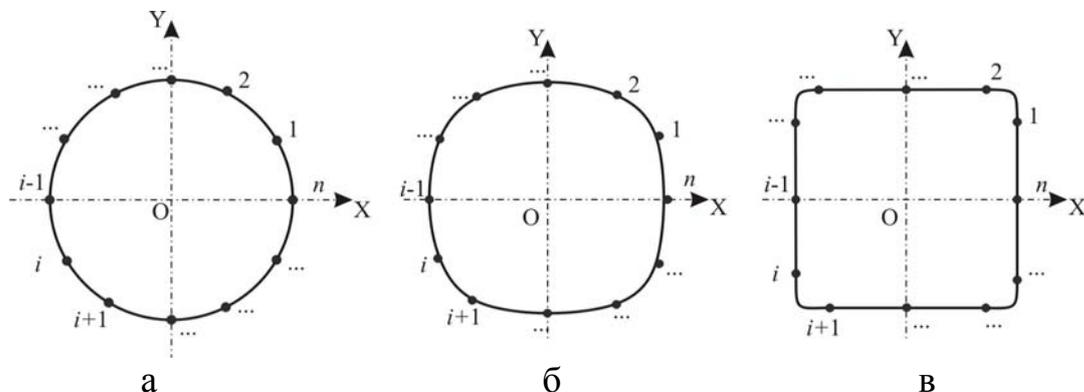


Рис. 1. Схема дискретного задания формы кольцевых элементов: а- исходный круглый контур; б- промежуточный контур; в- конечный квадратный контур.

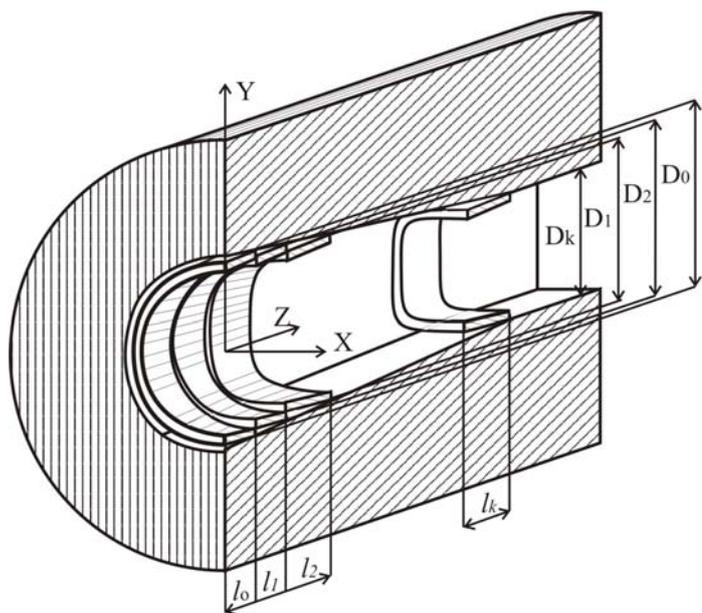


Рис.2. Аппроксимация формы очага деформации

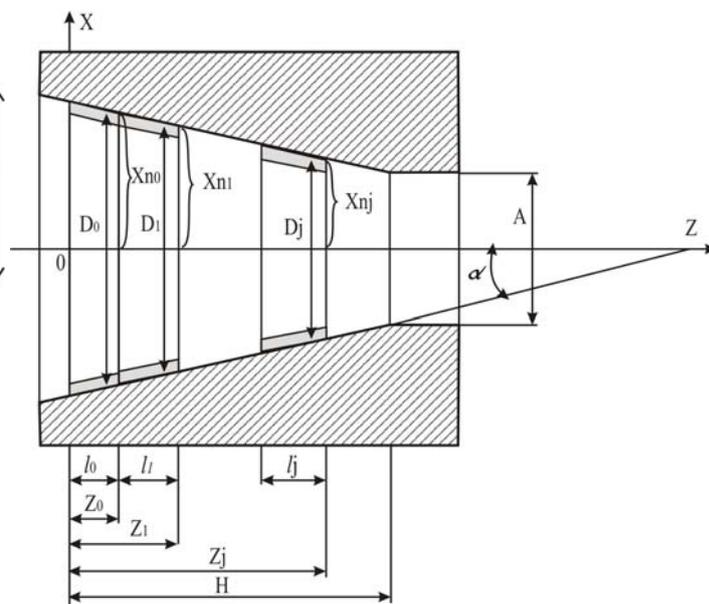


Рис.3. Горизонтальное сечение очага деформации.

Координаты исходного круглого контура:

$$\begin{cases} x_{i0} = \frac{D_0}{2} \cos\left(i \frac{360^\circ}{N}\right) \\ y_{i0} = \frac{D_0}{2} \sin\left(i \frac{360^\circ}{N}\right) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $D_0$  - средний диаметр исходной трубной заготовки;  $N$  - количество точек разбиения;  $i$  - номер точки разбиения.

Координаты промежуточного контура:

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{i0} + q(x_{iM} - x_{i0}) \\ y_{ij} = y_{i0} + q(y_{iM} - y_{i0}) \end{cases} \quad (2)$$

где  $q$  - постоянный для точек разбиения коэффициент пропорциональности

$$q = \frac{x_{Nj} - x_{N0}}{x_{NM} - x_{N0}}.$$

Геометрию продольного канала волокна определяем углом наклона образующей формообразующей зоны  $\alpha$ . Уравнение контуров продольных сечений задается уравнением прямой линии  $x_{ij} = D_0/2 + z_j \operatorname{tg} \alpha$ . Геометрия продольных сечений может быть задана и любой другой функцией  $x = f(z)$ .

Промежуточные сечения, рассчитанные по формулам (2), являются исходными для изготовления электрода-инструмента формообразующей зоны фасонных волокон на станках с ЧПУ.

Удельное усилие профилирования находим по методу баланса работ как сумму трех составляющих, приложенных к заготовке в направлении оси волочения: удельных усилий, затрачиваемых на профилирование кольцевого элемента в плоскости, перпендикулярной оси волочения  $\sigma_{изз}$ , на вытяжку кольцевого элемента  $\sigma_{\lambda}$  и на преодоление сил трения по каналу волокна  $\sigma_{\tau}$ .

$$\sigma_{\Sigma} = \sum_{j=0}^{M-2} (\sigma_{иззj} + \sigma_{\lambda j} + \sigma_{\tau j}).$$

Удельное усилие, расходуемое на изгиб кольцевого элемента:

$$\sigma_{иззj} = \sigma_{иззj-1} + \Delta\sigma_{иззj},$$

где  $\Delta\sigma_{иззj} = \frac{1}{4} \frac{t^2}{F_j} \sigma_{T3j} \sum_{i=1}^N |\Delta\varphi_{ij}|$  - приращение удельного усилия за счет изменения суммарного угла изгиба во всех точках  $i=1, 2, \dots, N$ , описывающих кольцевой элемент при переходе от  $(j-1)$ -ого к  $j$ -ому положению;  $\sigma_{иззj-1}$  - удельное усилие, действующее на  $j$ -й кольцевой элемент в осевом ( $OZ$ ) направлении со стороны предыдущего по ходу волочения  $(j-1)$ -ого элемента;  $\Delta\varphi_{ij}$  - угол формоизменения;  $F_j$  - площадь поперечного сечения элементарной полоски.

Предел текучести для  $j$ -ого кольцевого элемента в направлении оси волочения находится из закона упрочнения металла заготовки в виде степенного ряда

$$\sigma_{T3j} = a_0 + a_1 \ln \lambda_j + a_2 (\ln \lambda_j)^2,$$

где  $\lambda_j$  - коэффициент вытяжки по площади;  $a_0, a_1, a_2$  - коэффициенты аппроксимации диаграммы упрочнения.

Удельное усилие  $\sigma_{\lambda j}$  находим, полагая, что работа вытяжки равна работе растяжения.

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

где  $\Delta\sigma_{\lambda_j} = \sigma_{T3j} \ln \frac{F_{j-1}}{F_j}$  - приращение удельного усилия, затрачиваемого на вытяжку кольцевого элемента;  $(\sigma_{\lambda})_{j-1}$  - удельное усилие, действующее на  $j$ -й кольцевой элемент со стороны  $(j-1)$ -ого в осевом (OZ) направлении за счет вытяжки.

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;  $\Delta\sigma_{\tau_j} = \tau_{kj} \frac{F_{kj}}{\Pi_j t}$  - приращение удельного усилия на  $j$ -ом кольцевом элементе за счет трения;  $\tau_{kj} = \mu P_j$  - касательное напряжение на контактной поверхности;  $\mu$  - коэффициент трения;  $P_j = \frac{\sigma_{\theta_j}}{R_j} t$  - контактное давление, где  $R_j$  - радиус равновеликой по площади круглой трубы в рассматриваемом  $j$ -ом сечении,  $\sigma_{\theta_j}$  - окружное напряжение,  $F_{kj}$  - площадь поверхности касания кольцевого элемента с инструментом,  $\Pi_j$  - периметр поперечного сечения и  $t$  - толщина стенки кольцевого элемента.

Разработаны методики оценки заполняемости углов волокни и утяжки граней при безправочном волочении многогранных труб. Полное заполнение углов волокни происходит при условии, что радиус закругления профилируемой трубы  $r_1$  не превышает радиус закругления канала волокни  $r$ , т.е.  $r_1 \approx r$ .

$$r_1 = \frac{\sigma_B t}{4\sigma_{\theta}(1 - \cos\alpha)} + 0,5t,$$

где  $\sigma_B$  - предел прочности.

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

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

где  $[e]$  - допустимая утяжка граней профиля.

$$e_{oc} = tE\sigma_{T3} \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{(0,5A - r)^2 \left( 4E\sigma_{\theta} \left[ 1 - \cos \left( \pi - 2\arctg \frac{4\sigma_{\theta}(0,5A - r)}{t\sigma_{T3}} \right) \right] - 3\sigma_{T3}^2 \right)^2}{(tE\sigma_{T3})^2}}}{4E\sigma_{\theta} \left[ 1 - \cos \left( \pi - 2\arctg \frac{4\sigma_{\theta}(0,5A - r)}{t\sigma_{T3}} \right) \right] - 3\sigma_{T3}^2}.$$

Математическая модель реализована в виде программы (рис.4) в среде программирования Delphi 7.0 для процесса профилирования многогранных труб безправочным волочением.

Установлены интервалы значений  $N > 80$  и  $M > 60$ , при которых ошибка в определении удельного усилия профилирования составляет не более 1%.

Проведены расчеты удельного усилия профилирования  $\sigma_{\Sigma}$  и его составляющих  $\sigma_{изг}$ ,  $\sigma_{\lambda}$ ,  $\sigma_{\tau}$ . Результаты расчетов на модели показали, что изменение удельного усилия профилирования по длине канала волокни характеризуется зависимостью, близ-

кой к линейной (рис. 5). Основная доля  $\sigma_{\Sigma}$  расходуется на преодоление сил трения на границе «инструмент-заготовка».

Для установления влияния избыточного периметра на процесс профилирования, проведены расчеты на компьютерной модели с исходными данными: заготовки из сплава Д1 диаметром 12,5мм, 12,45мм, 12мм и 11,4мм; готовая труба 10x10x1мм. Результаты расчетов показали прямую зависимость роста усилия волочения от избыточного периметра (рис. 6). Наилучшее заполнение углов квадратной волоки и наименьшая утяжка граней профиля соответствует превышению периметра заготовки  $\Delta\Pi / \Pi \geq 3\%$ .

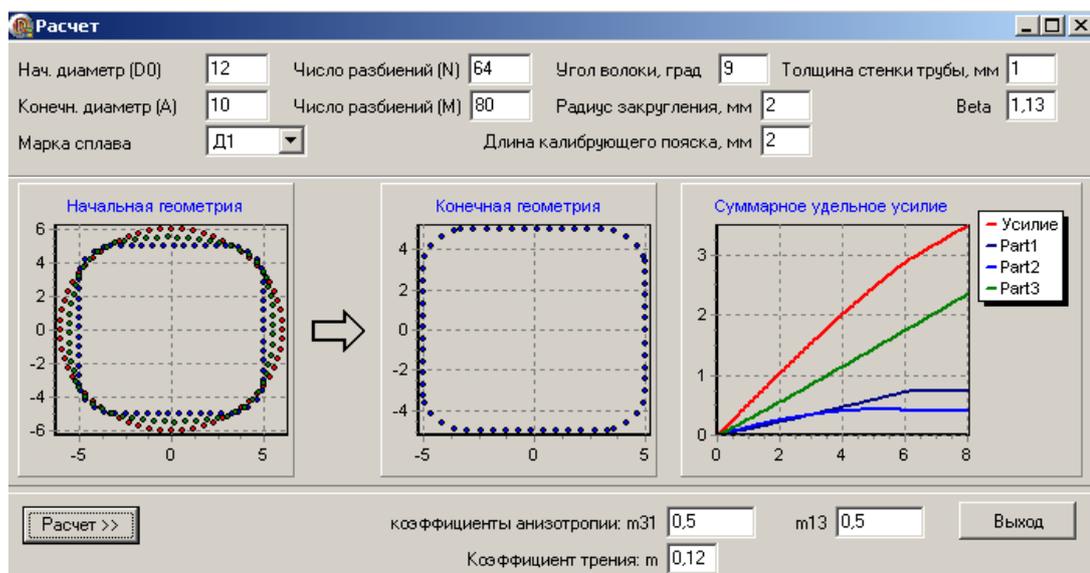


Рис. 4. Окно программы расчета

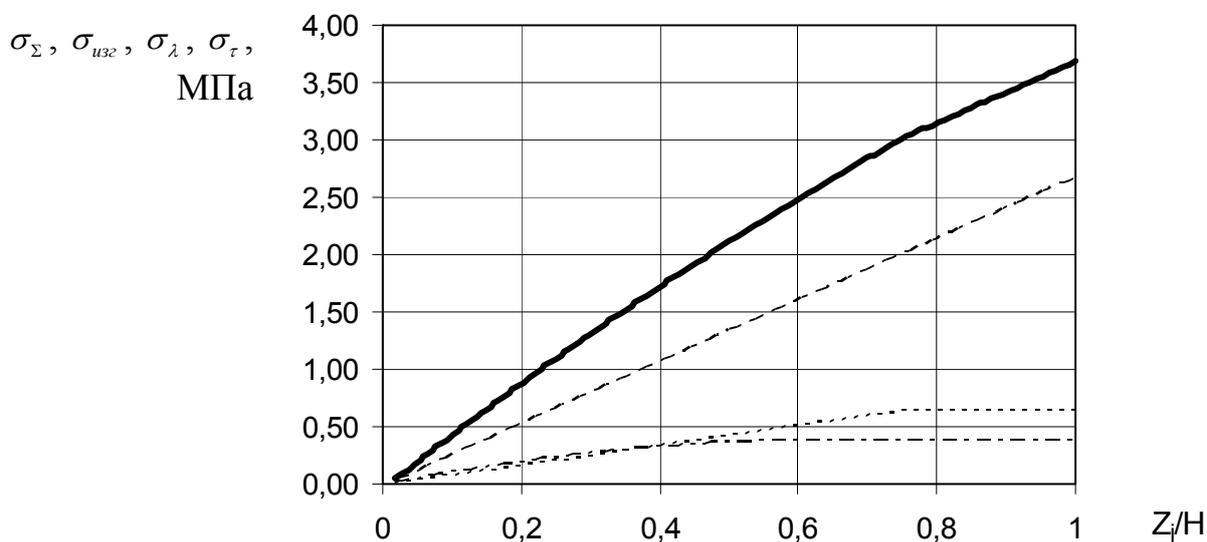


Рис. 5. Изменение составляющих удельного усилия по длине канала волоки:

.....  $\sigma_{изг}$ , - · - · -  $\sigma_{\lambda}$ , - - -  $\sigma_{\tau}$ , —  $\sigma_{\Sigma}$

С увеличением радиуса закругления  $r$  квадратного профиля (рис.7) усилие волочения возрастает. Рост усилия происходит вследствие увеличения составляющей усилия, расходуемого на вытяжку. При этом соответственно, уменьшается усилие, расходуемое на формоизменение. Усилие на преодоление сил трения не меняется. Увеличение радиуса закругления квадратного профиля с 1мм до 3мм ведет к росту усилия волочения на 25%.

Из графика на рис.8 видно, что с ростом угла конусности волокни  $\alpha$  наблюдается снижение усилия волочения.

При увеличении коэффициента анизотропии  $\mu_r$  усилие профилирования несколько снижается (рис. 9).

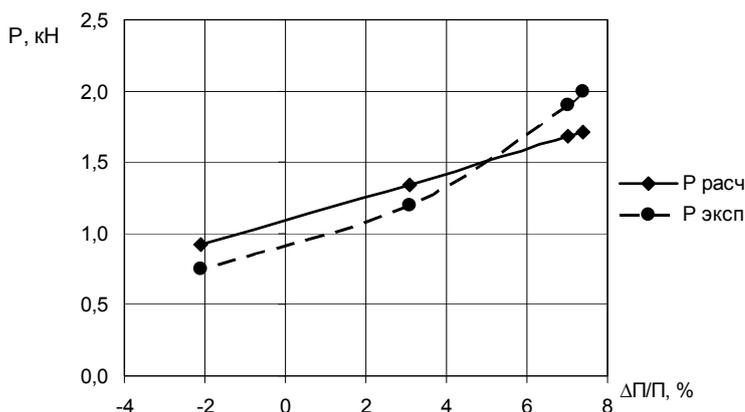


Рис.6. Влияние избыточного периметра  $\Delta П/П$  на усилие профилирования

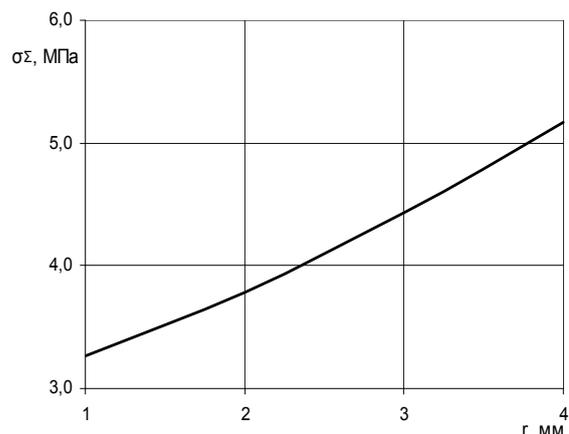


Рис.7. Влияние радиуса закругления поперечного профиля трубы на удельное усилие профилирования

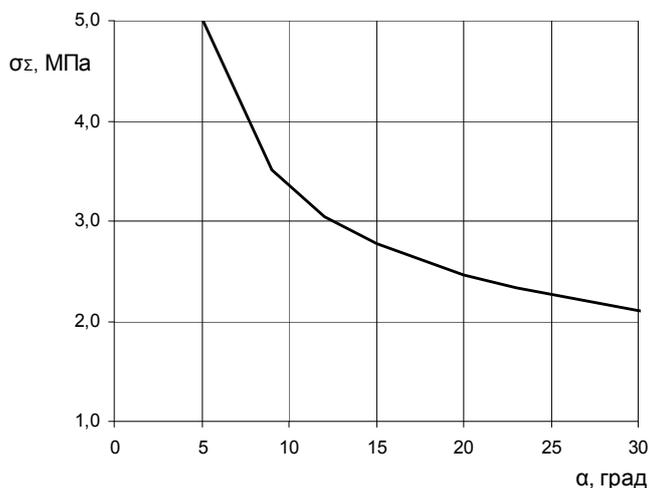


Рис.8. Изменение удельного усилия профилирования в зависимости от величины угла конусности волокни

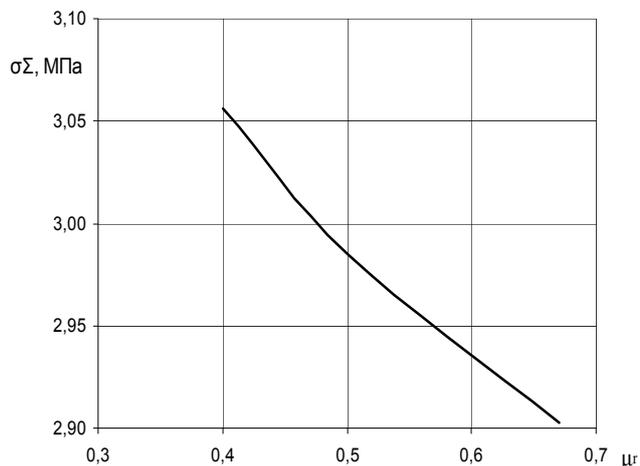


Рис.9. Влияние анизотропии свойств трубной заготовки  $\mu_r$  на удельное усилие профилирования

В третьей главе приведена методика расчета на прочность волок с квадратным, прямоугольным и плоскоовальным отверстием при безоправочном профилировании толстостенных многогранных труб из труднодеформируемых материалов. Методика разработана в предположении равномерности давления в полости канала волокни, что дает возможность использовать основные уравнения теории упругости для плоскодеформированного состояния, функцию напряжений Эри и метод конформных отображений.

Методика расчета на прочность фасонной волокни представлена на примере волокни с квадратным отверстием канала. Функцию, отображающую конформно внешность квадратного контура  $L_1$  на внешность единичного круга (рис.10), задаем приближенно в виде

$$Z = \chi(\lambda) = a \left( \lambda + \frac{b}{\lambda} + \frac{c}{\lambda^3} \right),$$

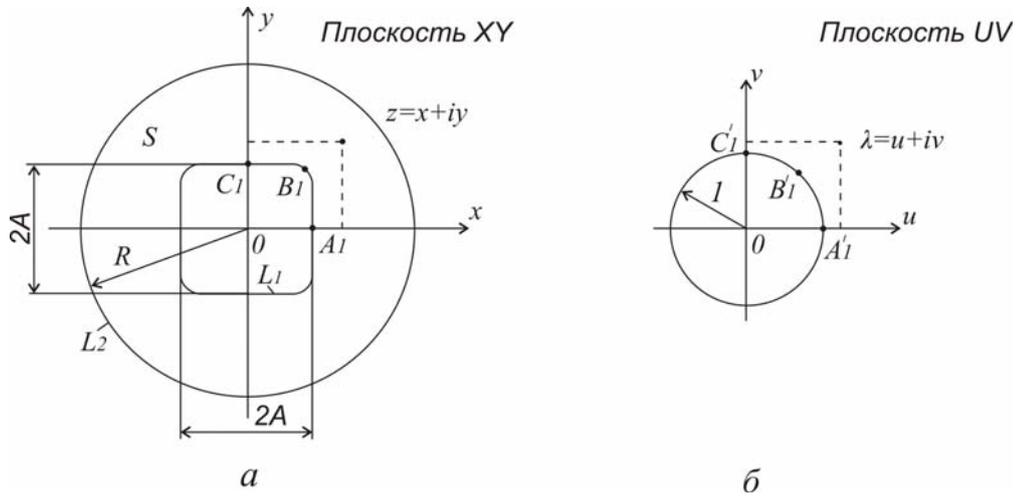


Рис.10. Схема к расчету отображающей функции для квадратного отверстия канала волокна

где  $a, b, c$  – коэффициенты, подлежащие определению из условий достаточно хорошего соответствия контура внутренней полости волокна и отображения единичного круга.

Компоненты напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  в произвольной точке волокна с наружным радиусом  $R$  определяются системой трех уравнений.

$$\begin{cases} \sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} \Phi(Z), \\ \sigma_x - \sigma_y = 2 \operatorname{Re} [\bar{Z} \Phi'(Z) + F(Z)], \\ \tau_{xy} = \operatorname{Im} [\bar{Z} \Phi'(Z) + F(Z)], \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(Z) &= \frac{\varphi'(\lambda)}{\chi'(\lambda)} + \frac{\beta_1}{R} + 3\beta_3 \frac{Z^2}{R^3}; \\ \Phi'(Z) &= \frac{\varphi''(\lambda)\chi'(\lambda) - \varphi'(\lambda)\chi''(\lambda)}{[\chi'(\lambda)]^3} + 6\beta_3 \frac{Z}{R^3}; \\ F(Z) &= \frac{\psi'(\lambda)}{\chi'(\lambda)} - \frac{\alpha_1}{R} - 3\alpha_3 \frac{Z^2}{R^3} - 6\frac{\beta_3}{R}. \end{aligned}$$

В записанных уравнениях  $\operatorname{Re}$  – действительная часть,  $\operatorname{Im}$  – мнимая часть,  $\varphi(Z), \psi(Z)$  – аналитические регулярные функции комплексной переменной  $z = x + iy$  внутри области  $S$ . Эти функции взяты 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  $a_1, a_3, b_1, b_3, \alpha_1, \alpha_3, \beta_1, \beta_3$  находят из следующих выражений:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{1-c} \left\{ ab \left( \frac{ab_1}{R^2} - P \right) + \frac{a^2}{R^2} \left[ 4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] - 3 \frac{a^4}{R^4} \left[ a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] (3b^2 + 2c^2 + b^2c + c + 1) \right\}; \\ a_3 &= ac \left( \frac{ab_1}{R^2} - P \right) - \frac{a^4}{R^4} \left[ a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] (12bc + b^3 + 3b); \end{aligned}$$

$$b_1 = a \left( \frac{ab_1}{R^2} - P \right) - \frac{a^2}{R^2} b \left[ 4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] - 3 \frac{a^4}{R^4} \left[ a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] (b_3 + 2bc + 2bc - 3b) + a_1 b (1 + c) + 3a_3 c;$$

$$b_3 = \frac{a^2}{R^2} c \left[ 4a_1 - 3 \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] - \frac{a^4}{R^4} \left[ a_1 - \frac{a^2}{R^2} (bb_1 + b_3) \right] \left[ 1 + 3(2c + 2bc^2 + b^2) \right] + a_1 (1 + b^2) + 3a_3 b (1 + c) + a_1 c (3c + b);$$

$$\alpha_1 = \frac{aa_1}{R}; \alpha_3 = \frac{a^3}{R^3} (a_1 b + a_3);$$

$$\beta_1 = -\frac{1}{2} \frac{a}{R} b_1; \beta_3 = \frac{aa_1}{R} - \frac{a^3}{R^3} (bb_1 + b_3).$$

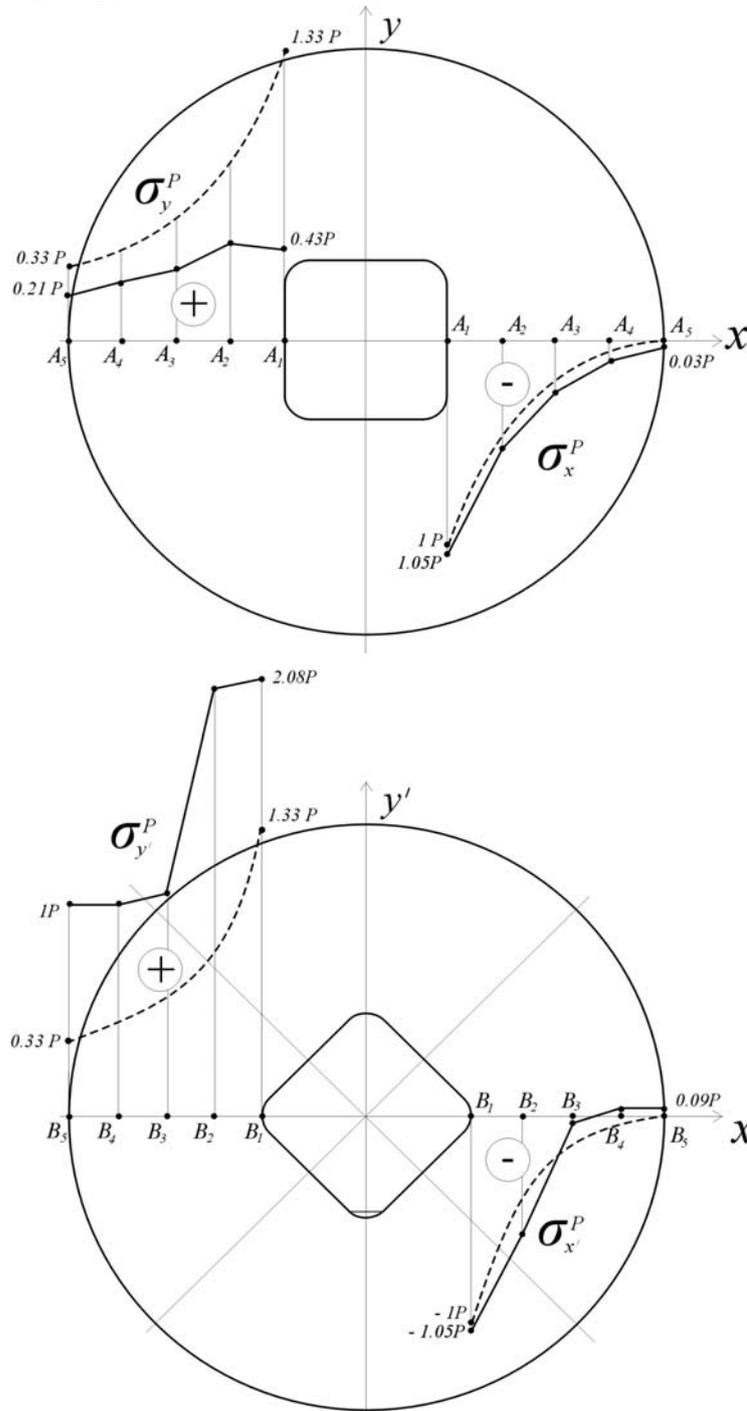


Рис. 11. Эпюры напряжений для круглой ( ——— ) и квадратной ( ——— ) волоки.

Расчет предельного состояния по третьей теории прочности позволяет определить наиболее нагруженные участки фасонной волоки и выбрать ее размеры.

$$\sigma_{экс} = \sigma_y - \sigma_x \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{K_3},$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала волоки,  $K_3$  - коэффициент запаса.

Эпюра напряжений приведена на рис.11. Для сравнения на этом же рисунке показаны результаты расчета напряжений, вычисленных по формулам Ляме для круглой волоки.

$$\sigma_y = \frac{Pr^2}{R^2 - r^2} \left( 1 + \frac{R^2}{\rho^2} \right);$$

$$\sigma_x = \frac{Pr^2}{R^2 - r^2} \left( 1 - \frac{R^2}{\rho^2} \right);$$

где  $r$  – радиус круглого отверстия,  $R$  - радиус тела волоки,  $P$ - контактное давление в канале волоки,  $\rho$  - текущее значение радиуса в полярной системе координат.

Из анализа эпюр распределения напряжений по толщине стенки волоки 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.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований параметров профилирования в одну волоку и в волоку с противонатяжением.

Незаполнение радиусов закругления в углах квадратного профиля  $\Delta r/r$  с увеличением избыточного периметра  $\Delta\Pi/\Pi$  уменьшается и при величине  $\Delta\Pi/\Pi = 7\%$  углы профиля заполняются полностью. Состояние материала (отожженный или нагартованный) не влияет на величину  $\Delta r/r$ . Величина усилия профилирования  $P$  линейно зависит от величины  $\Delta\Pi/\Pi$ . С увеличением  $\Delta\Pi/\Pi$  соответственно возрастает усилие профилирования  $P$ . На рис.12 показано: 1 - усилие профилирования в одну квадратную волоку  $P_2$ ; 2- усилие волочения в круглую волоку  $P_1$ ; 3 – усилие профилирования с противонатяжением  $P$ ; 4 – усилие профилирования с противонатяжением  $P_1 + P_2$ , найденное путем вычисления как сумма  $P_1$  и  $P_2$ .

При исследовании волочения с противонатяжением при постоянном исходном диаметре трубной заготовки обнаружено, что минимальная величина усилия профилирования с противонатяжением соответствует  $\Delta\Pi/\Pi \approx 12\%$ .

Методом математического планирования эксперимента построена линейная трехфакторная модель процесса профилирования, позволяющая определить условия заполнения углов волоки по величине относительного радиуса  $\Delta r/r$ .

$$\Delta r/r = 35 - 20\bar{x}_1 + 25\bar{x}_2 - 10\bar{x}_3,$$

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1 - 6.5}{4.3}, \bar{x}_2 = \frac{x_2 - 0.086}{0.043}, \bar{x}_3 = \frac{x_3 - 230}{30},$$

где  $x_1$  - величина избыточного периметра  $\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{D_3 - D_{np}}{D_{np}} 100\%$ ,  $x_2$  - относительная толщина стенки заготовки  $t/D_{np}$ ,  $x_3$  - предел прочности материала трубы  $\sigma_s$ .

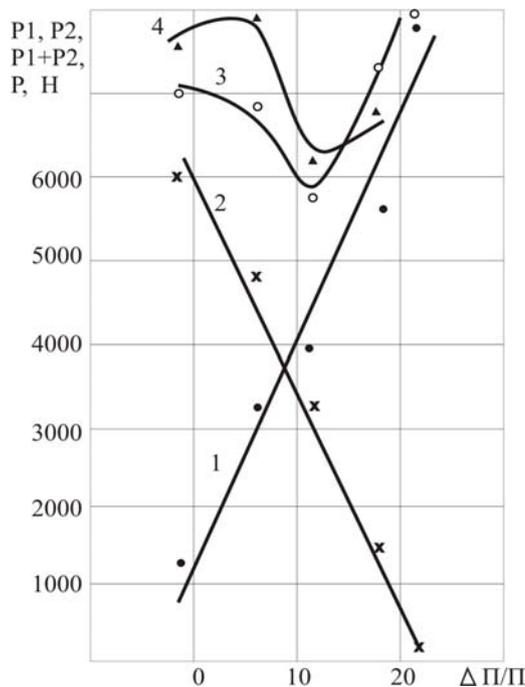


Рис.12. Зависимость силовых параметров профилирования от избыточного периметра.

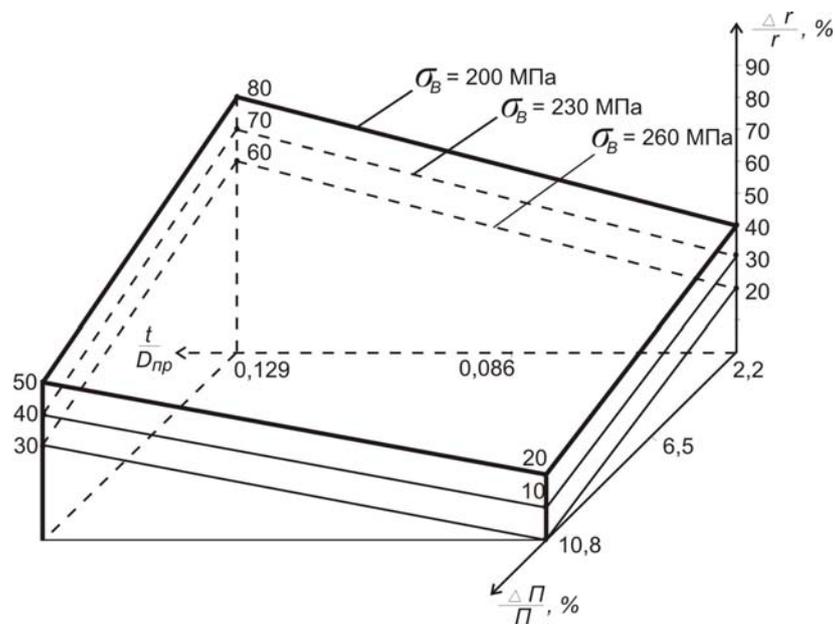


Рис. 13. Влияние параметров заготовки на заполнение углов трубы

Из диаграммы (рис.13) видно, что с ростом величины  $\Delta\Pi/\Pi$  величина  $\Delta r/r$  уменьшается. Наилучшее заполнение углов волокна при профилировании трубы  $10 \times 10 \times 1$  мм из сплава Д1 происходит при  $\Delta\Pi/\Pi = 7\%$ .

Усовершенствована калибровка инструмента для серийной технологии изготовления прямоугольных труб из алюминиевых сплавов размерами  $32 \times 18 \times 2$  мм. С этой целью проведены испытания трех волок с различными углами  $\alpha$ , равными  $13^\circ, 12^\circ, 9^\circ$ . В результате на волоке с  $\alpha = 13^\circ$  наблюдалась утяжка граней трубы, превышающая допуск, на волокнах с  $\alpha = 12^\circ$  и  $9^\circ$  утяжка была в пределах допуска. Исходя из результатов эксперимента и удобства изготовления, была рекомендована для применения в производстве прямоугольных труб волокна с  $\alpha = 12^\circ$ .

Предложенная волока позволяет точно выдерживать геометрию формообразующей зоны канала волокна, снизить трудоемкость доводочных работ, а также исключить утяжку граней и незаполнение углов трубы, повысить выход годного и стойкость волок. Достоинство данной калибровки состоит в изготовлении электрода-инструмента на металлорежущих станках с ЧПУ.

В пятой главе проведен анализ технологических параметров при одновременном профилировании и скручивании безоправочным волочением многогранных труб. Предложена методика по расчету технологических параметров, обеспечивающая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Крутящий момент для многогранных труб можно вычислить с помощью уравнения

$$M_{кр} = M_{кр.мр} \frac{J_k}{(J_k)_{кр.мр}},$$

где  $M_{кр.тр}$  и  $(J_k)_{кр.тр}$  – момент кручения и полярный момент инерции сечения для круглой трубы, имеющей тот же периметр по средней линии, что и поперечное сечение скручиваемой многогранной трубы;  $J_k$  - полярный момент инерции профильной трубы.

Из анализа уравнения следует, что конфигурация контура поперечного сечения фасонных труб заметно влияет на величину крутящего момента. Максимальный крутящий момент имеет место при скручивании круглой трубы. По сравнению с квадратным поперечным сечением при равенстве периметров по средней линии наименьший крутящий момент имеют трубы прямоугольного сечения.

Рассмотренные способы волочения в сочетании с кручением, а также приведенные аналитические зависимости для расчета технологических параметров позволяют получить разнообразные многогранные винтообразно закрученные трубы требуемой геометрии поперечного сечения и угла подъема спирали.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана математическая модель процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением, позволяющая определять силовые условия с учетом нелинейного закона упрочнения, анизотропии свойств материала трубы и сложной геометрии канала волокна. Модель реализована в среде программирования Delphi 7.0.

2. С помощью математической модели установлено количественное влияние физических, технологических и конструктивных факторов на силовые параметры процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением.

3. Разработаны методики оценки заполняемости углов волокна и утяжки граней при безоправочном волочении многогранных труб.

4. Разработана методика расчета на прочность фасонных волокон с учетом нормальных нагрузок в канале, основанная на функции напряжений Эри, методе конформных отображений и третьей теории прочности.

5. Экспериментально построена трехфакторная математическая модель профилирования квадратных труб, что позволяет выбрать технологические параметры, обеспечивающие точность геометрии получаемых труб.

6. Разработана и доведена до инженерного уровня методика расчета технологических параметров при одновременном профилировании и скручивании многогранных труб безоправочным волочением.

7. Экспериментальные исследования процесса профилирования многогранных труб безоправочным волочением показали удовлетворительную сходимость результатов теоретического анализа с экспериментальными данными.

8. Даны рекомендации по совершенствованию технологии профилирования и скручивания при безоправочном волочении и калибровке волочильного инструмента для многогранных труб повышенной точности.

## *Публикации*

в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Каргин, В.Р. Расчет инструмента для волочения квадратных профилей и труб [Текст] / В.Р. Каргин, М.В. Федоров, Е.В. Шокова, И.В. Ефремов / Известия СНТУЦРАН. Т.3. - 2001. - №2. - С.238-240.

2. Каргин, В.Р. Анализ безправочного волочения тонкостенных труб с противонапряжением [Текст] / В.Р. Каргин, Е.В. Шокова, Б.В. Каргин // Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ, 2003. - №1. – С. 82-85.

3. Каргин, В.Р. Расчет параметров волочения с кручением квадратных и прямоугольных труб [Текст] / В.Р. Каргин, Е.В. Шокова // Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ, 2004. - №1. - С.80 – 84.

4. Каргин, В.Р. Расчет толщины стенки трубы при безправочном волочении [Текст] / В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, Е.В. Шокова, // «Заготовительные производства в машиностроении». – 2004. - № 1. – С.44-46.

в других изданиях:

5. 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.

6. Каргин, В.Р. Математическая модель профилирования труб волочением [Текст] / В.Р. Каргин, Е.В. Шокова // Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Самарского металлургического завода «Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов». – Самара, 2000. - С.252-258.

7. Каргин, В.Р. Автоматизация проектирования процесса профилирования труб волочением [Текст] / В.Р. Каргин, Е.В. Шокова // Материалы 11 межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара: СГТУ, 2001. – С.125.

8. Каргин, В.Р. Введение в специальность обработка металлов давлением [Текст] / В.Р. Каргин, Е.В. Шокова / Учебное пособие. –Самара: СГАУ, 2003. – 172с.

9. Шокова, Е.В. О профилировании тонкостенных алюминиевых труб безправочным волочением [Текст] / Е.В. Шокова, В.Р. Каргин / Сб. материалов второй международной научно-технической конференции "Металлофизика, механика материалов и процессов деформирования". – Самара: СГАУ, 2004. – С.44.

10. Шокова Е.В. Калибровка инструмента для волочения прямоугольных труб // XIV Туполевские чтения: международная молодежная научная конференция. Т1. - Казань: КГТУ, 2006. – С.102-103.

11. Шокова Е.В. Профилирование волочением квадратных труб // IX Королевские чтения: международная молодежная научная конференция. – Самара: СГАУ, 2007. - С. 192.