

13. *Нараев В.Н.* // Там же. 2004. Т. 30, № 5. С. 499.
14. *Кочедыков В.А., Закирьянова И.Д.* // Сб. науч. тр. XI Росс. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Екатеринбург — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. Т. 3. С. 196.
15. *Ахметов Н.С.* Общая и неорганическая химия. М.: Высш. шк., 1981.
16. *Ионова Р.В., Вохмин В.Г., Спицын В.И.* Закономерности изменения свойств лантаноидов и актиноидов. М.: Наука, 1990.

УДК 621.778.073

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОВОЛОЧИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ МНОГОГРАННЫХ ТРУБ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ НА НЕПОДВИЖНОЙ ОПРАВКЕ

© 2013 г. В.А.Спиридонов, Е.А. Митюшов

Уральский федеральный университет (УрФУ)  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Представлен способ математического моделирования трубоволоочильного инструмента для волочения многогранных труб из цветных металлов и сплавов с использованием векторно-матричного аппарата, который может быть применен для аналитического описания объемного очага деформации. Рассмотрены волокна с различной геометрией обжимной зоны. В результате моделирования очага деформации, возникающего в процессе получения профильных многогранных труб методом оправочного волочения с использованием всех видов рассмотренных волокон, установлено, что наилучший результат с наименьшими радиусами скругления достигается у волокон с пирамидальным входом в обжимную зону.

**Ключевые слова:** трубоволоочильный инструмент, многогранные трубы, моделирование поверхности.

A method of mathematical simulation of tube-drawing tool for draw of many-sided tubes made of non-ferrous metals and alloys with the use of the vector-matrix tools, which can be applied for analytical description of the volume deformation region, is given. Reducing dies with various geometry of the squeezing zone are considered. As a result of the simulation of the deformation region arising in the course of producing section-shaped many-sided tubes by the mandrel drawing method with the use of all types of considered reducing dies, it is found that the best result with the least spherical radiuses is reached with reducing dies with the pyramidal input into the squeezing zone.

**Key words:** tube-drawing tool, many-sided tubes, surface simulation.

В настоящее время на заводах цветной металлургии производство профильных труб из цветных металлов может быть осуществлено как безоправочным волочением, так и волочением на оправке. Однако до сих пор в литературе практически нет обобщенных методик расчета основных технологических параметров процесса профилирования труб, в том числе волочением. Для каждого конкретного профиля экспериментально выбирают калибровку

технологического инструмента и размеры исходной заготовки. При волочении многогранных труб возникает объемный очаг деформации, который достаточно сложно описать традиционными аналитическими математическими моделями [1, 2].

Цель работы — математическое моделирование трубоволоочильного инструмента для волочения многогранных труб из цветных металлов и сплавов с использованием векторно-матричного аппарата.

**Спиридонов В.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургических и роторных машин УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). Тел.: (343) 375-44-19. E-mail: va\_spir@mail.ru.

**Митюшов Е.А.** – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической механики УрФУ. Тел.: (343) 375-47-55. E-mail: mityushov-e@mail.ru.

Простейшей моделью течения металла при производстве труб является теория слабokonических течений, разработанная Г.Я. Гуном [3]. Она хорошо зарекомендовала себя при анализе напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при изготовлении труб методом волочения, а также при оценке энергосиловых параметров процесса трубного производства. Применение же этой теории для описания профилирования многогранных труб методом волочения связано с дополнительными трудностями, поскольку деформация металла в этом случае происходит не осесимметрично. В очаге деформации, рассмотренном в данном процессе, имеет место осевая симметрия  $n$ -го порядка ( $n$  — количество граней трубы), так как процесс профилирования насчитывает  $n$  плоскостей симметрии. При моделировании такого процесса необходимо использовать объемную схему очага деформации.

Одним из путей оптимизации процесса изготовления профилированных труб с одновременной возможностью выполнить естественное обобщение теории Г.Я. Гуна является применение инструмента, при моделировании которого используется линейчатая поверхность, заданная кинематическим способом. Кинематический способ задания линейчатой поверхности осуществляется движением прямолинейной образующей, пересекающей две произвольные направляющие линии, и в зависимости от вида линий и некоторых дополнительных условий эти поверхности являются либо цилиндрами, либо коноидами. Этот способ может быть реализован, в частности, и для получения простейших поверхностей (пирамидальных, конических и иных), использующихся при проектировании трубоволочного инструмента.

Если даны две произвольные одинаково параметризованные направляющие линии:

$$\vec{r}_1(u) = \begin{pmatrix} x_1(u) \\ y_1(u) \\ z_1(u) \end{pmatrix} \text{ и } \vec{r}_2(u) = \begin{pmatrix} x_2(u) \\ y_2(u) \\ z_2(u) \end{pmatrix},$$

то векторное уравнение линейчатой поверхности, построенной на этих линиях, согласно работе [4], можно записать следующим образом (рис. 1):

$$\vec{R}(v, u) = v\vec{r}_1(u) + (1-v)\vec{r}_2(u), \quad (1)$$

где  $0 \leq v \leq 1$ ,  $u_1 \leq u \leq u_2$ .

При волочении многогранных труб постоянного сечения с контролируемыми внутренними размерами выходное сечение канала волокна соответствует

профилю готового изделия. Сама конфигурация обжимной части волокна может быть выполнена в различных вариантах.

Рассмотрим волоку, вход в которую представляет собой усеченную пирамиду с основанием в виде правильного многоугольника (рис. 2).

Используя полярную систему координат, поверхность одного элемента пирамидальной волокна, ог-

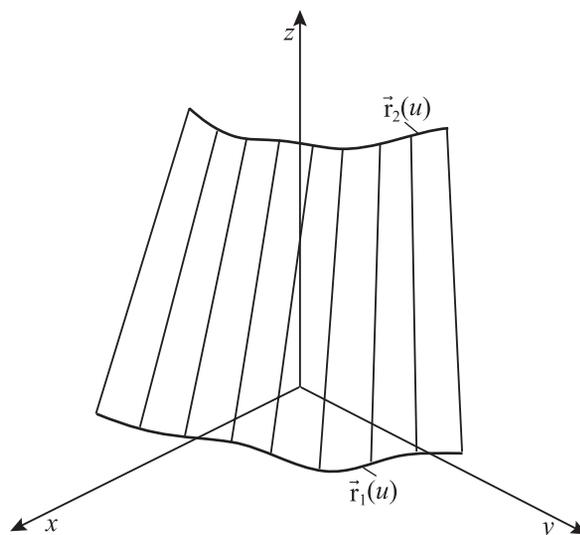


Рис. 1. Линейчатая поверхность, построенная на двух произвольных направляющих линиях

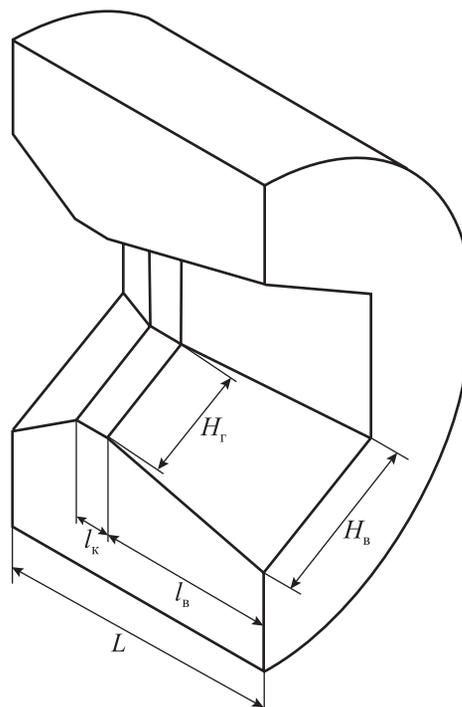


Рис. 2. Волока с входом в обжимную зону в виде усеченной пирамиды

раниченного плоскостью входа в волоку с одной стороны и плоскостью перехода к калибрующему пояску на расстоянии  $l_B$ , описываем уравнением

$$\vec{R}_1(v, \varphi) = v \begin{pmatrix} H_\Gamma \\ H_\Gamma \operatorname{tg} \varphi \\ l_K \end{pmatrix} + (1-v) \begin{pmatrix} H_B \\ H_B \operatorname{tg} \varphi \\ l_K + l_B \end{pmatrix},$$

где  $0 \leq v \leq 1$ ,  $(-\pi/n) \leq \varphi \leq (\pi/n)$ ,  $H_\Gamma$  — ширина грани калибрующего пояска волоки,  $H_B$  — ширина грани на входе в волоку,  $l_K$  — длина калибрующего участка волоки,  $l_B$  — длина обжимного участка волоки.

Остальные элементы многогранной волоки (для любой конфигурации обжимной части) определяются линейным преобразованием поворота вокруг осевой линии:

$$\vec{R}_{i+1}(v, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos \frac{2\pi i}{n} & -\sin \frac{2\pi i}{n} & 0 \\ \sin \frac{2\pi i}{n} & \cos \frac{2\pi i}{n} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \vec{R}_1(v, \varphi), \dots; i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (2)$$

где  $\vec{R}_1(v, \varphi)$  — уравнение, описывающее первую грань волоки;  $n$  — число ее граней.

Рассмотрим другой вариант обжимного участка волоки. В этом случае вход в волоку представляет собой усеченный конус, в который внедряется

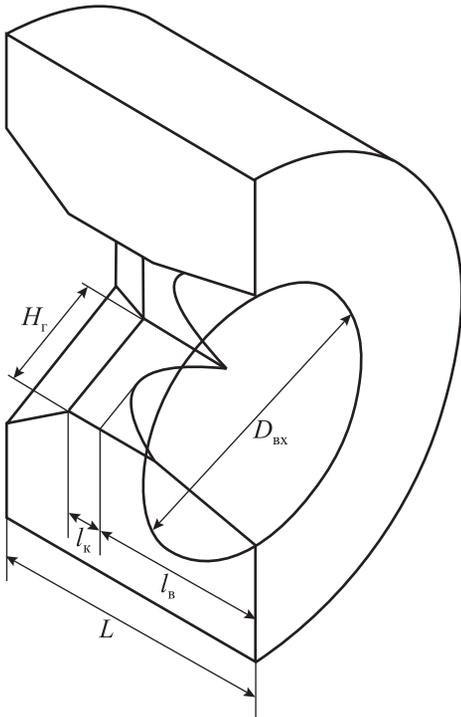


Рис. 3. Волока с коническим входом в обжимную зону

многогранный калибрующий участок (рис. 3). Тогда одну часть поверхности волоки можно описать гранью калибрующего участка и соответствующим ему участком поверхности конуса.

Поверхность, описывающая одну грань калибрующего участка, можно выразить следующим образом:

$$\vec{R}_{\text{калибр}}(v, \varphi) = v \vec{r}_1(\varphi) + (1-v) \vec{r}_2(\varphi),$$

а поверхность, описывающую одну часть конического обжимного участка волоки, — уравнением

$$\vec{R}_{\text{обжим}}(v, \varphi) = v \vec{r}_2(\varphi) + (1-v) \vec{r}_3(\varphi),$$

где  $0 \leq v \leq 1$ ;  $(-\pi/n) \leq \varphi \leq (\pi/n)$ ;  $n$  — количество граней волоки;  $\vec{r}_1(\varphi)$  — радиус-вектор, описывающий сечение калибрующей грани волоки;  $\vec{r}_2(\varphi)$  — радиус-вектор, описывающий пересечение конической и калибрующей частей волоки;  $\vec{r}_3(\varphi)$  — радиус-вектор, описывающий сечение конической части волоки на входе в очаг деформации (рис. 4).

Соответственно, выражения для радиус-векторов примут следующий вид:

$$\vec{r}_1(\varphi) = \begin{pmatrix} H_\Gamma \\ H_\Gamma \operatorname{tg} \varphi \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\vec{r}_2(\varphi) = \begin{pmatrix} H_\Gamma \\ H_\Gamma \operatorname{tg} \varphi \\ l_K + l_B + \frac{2H_\Gamma - D_{\text{вх}} \cos \varphi}{2 \operatorname{tg} \alpha} \end{pmatrix},$$

$$\vec{r}_3(\varphi) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} D_{\text{вх}} \cos \varphi \\ \frac{1}{2} D_{\text{вх}} \sin \varphi \\ l_K + l_B \end{pmatrix},$$

где  $H_\Gamma$  — ширина грани калибрующего участка волоки,  $D_{\text{вх}}$  — диаметр волоки на входе,  $l_K$  — длина калибрующего участка волоки,  $l_B$  — длина волоки от входа до калибрующего участка,  $\alpha$  — угол конусности волоки.

Остальные элементы волоки с коническим входом определяются линейным преобразованием поворота вокруг осевой линии (2).

Рассмотрим еще один вид волок, для построения которых был применен специальный класс

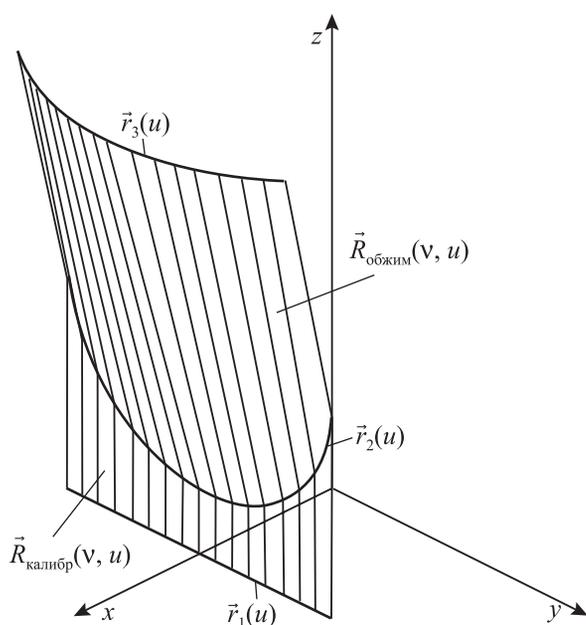


Рис. 4. Поверхности, описывающие одну грань волокна с коническим обжимным участком

линейчатых поверхностей — регулярные коноиды [5]. Как известно, коноидом называется линейчатая поверхность, которая образуется движением прямой образующей, во всех своих положениях сохраняющей параллельность некоторой заданной плоскости (плоскости параллелизма) и пересекающей две направляющие, одна из которых кривая, а другая прямая линия. Прямолinéйные образующие регулярного коноида пересекают такие же направляющие, но условие параллелизма заменяется условием равномерного распределения точек пересечения образующей во всех ее положениях с криволинейной направляющей.

Использование коноидальных волокон для волочения профилей из цветных металлов и сплавов позволяет согласовать геометрию инструмента (волокна) с траекториями движения частиц металла, так как моделирование коноидальной поверхности волокна при этом выполняется из условия совпадения этих траекторий с прямолинейной образующей поверхности во всех ее положениях (рис. 5).

Рассмотрим моделирование коноидальной волокна для изготовления многогранной трубы. Переход обжимного участка на калибрующий участок моделируется правильным многогранником с числом сторон  $n$ , вписанным в окружность радиусом  $R$ . Тогда первая криволинейная грань коноидальной поверхности волокна, ограниченная двумя параллель-

ными плоскостями, отстоящими на расстоянии  $l_B$  друг от друга, задается уравнением

$$\vec{R}_k(v, \varphi) = v \begin{pmatrix} H_\Gamma \\ H_\Gamma \operatorname{tg} \varphi \\ l_k \end{pmatrix} + (1-v) \begin{pmatrix} \frac{1}{2} D_{\text{вх}} \cos \varphi \\ \frac{1}{2} D_{\text{вх}} \sin \varphi \\ l_k + l_B \end{pmatrix},$$

где  $0 \leq v \leq 1$ ,  $(-\pi/n) \leq \varphi \leq (\pi/n)$ ,  $H_\Gamma$  — ширина грани калибрующего участка волокна,  $D_{\text{вх}}$  — диаметр волокна на входе,  $l_k$  — длина калибрующего участка волокна,  $l_B$  — длина волокна от входа до калибрующего участка.

Остальные элементы коноидальной поверхности волокна определяются рассмотренным выше линейным преобразованием поворота вокруг осевой линии (2).

При волочении многогранных труб на оправке одна грань ее поверхности описывается уравнением

$$\vec{R}_{\text{опр}}(v, \varphi) = v \begin{pmatrix} h_{\text{опр}} \\ h_{\text{опр}} \operatorname{tg} \varphi \\ 0 \end{pmatrix} + (1-v) \begin{pmatrix} h_{\text{опр}} \\ h_{\text{опр}} \operatorname{tg} \varphi \\ l_{\text{опр}} \end{pmatrix},$$

где  $0 \leq v \leq 1$ ,  $(-\pi/n) \leq \varphi \leq (\pi/n)$ ,  $h_{\text{опр}}$  — ширина грани оправки,  $l_{\text{опр}}$  — длина оправки (рис. 6).

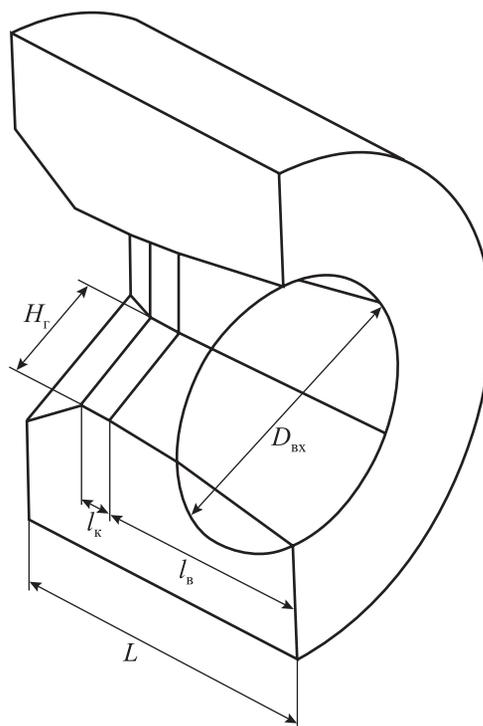


Рис. 5. Коноидальная волокна

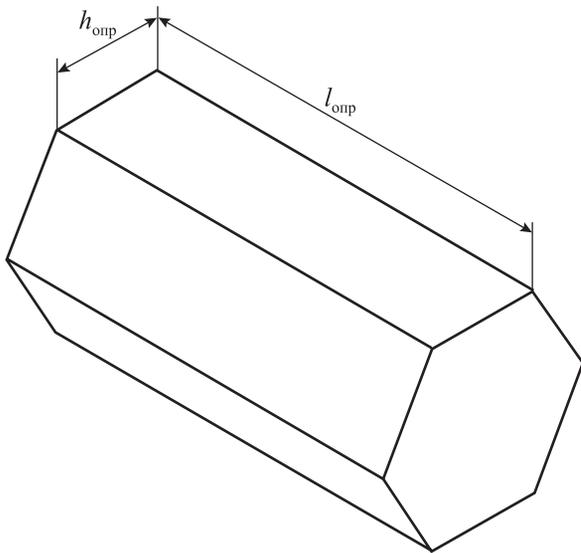


Рис. 6. Короткая оправка для волочения шестигранных труб

Остальные элементы поверхности оправки также определяются линейным преобразованием поворота вокруг осевой линии (2).

С использованием вышерассмотренных математических моделей были спроектированы и подготовлены объемные (3D) модели посредством пакета твердотельного моделирования «Solid-Works» для исследования профилирования шестигранных труб на неподвижной оправке. В качестве заготовки взяли круглую трубу с исходным диаметром  $D_0 = 18$  мм и толщиной стенки  $S_0 = 2,5$  мм, выполненную из латуни Л-63. Указанная трубная заготовка при входе в шестигранную волоку испытывает радиальное обжатие. Готовая шестигранная труба имеет размеры  $D_0 = 16,24$  мм (диаметр описанной окружности),  $D_k = 14,2$  мм (размер под ключ),  $S_0 = 2,0$  мм — толщина стенки готовой трубы.

Дальнейшее моделирование очага деформации проводилось в программном комплексе DEFORM-3D [6]. При моделировании деформируемый материал трубы приняли упруго-пластичным и изотропным, материал волоки и оправки — абсолютно жестким. Для оценки величины трения на контактных поверхностях трубы с инструментом был использован закон Кулона [7]. Для инструмента, изготовленного из карбида вольфрама с последующим шлифованием и полировкой алмазной пастой, трубной заготовки, выполненной из латуни Л-63, и жидкой смазки типа растительного масла коэффициент трения принимался равным 0,75.

В процессе моделирования очага деформации с применением рассмотренных выше математических моделей было выявлено незатекание металла в вершины ребер, что приводит к появлению радиусов скруглений, особенно на наружной стенке трубы.

В результате моделирования процесса волочения шестигранной трубы рассмотренным способом выяснилось, что геометрия обжимной части волоки значительно влияет на величину радиусов скруглений. Было установлено, что наименьшая величина наружных радиусов скруглений (0,9 мм у готового профиля) наблюдается при волочении на волоке с пирамидальным входом в обжимную зону. При волочении шестигранной трубы на волоках с конической обжимной частью наружный радиус скругления составил 1,3 мм, а для волок с конической обжимной частью — 2,1 мм.

В результате моделирования очага деформации, возникающего в процессе волочения профильных многогранных труб с использованием всех видов рассмотренных волок, было выявлено, что наилучший результат с наименьшими радиусами скругления достигается у волок с пирамидальным входом в обжимную зону. В этом случае можно выделить две характерные особенности, которые способствуют получению минимальных радиусов скругления:

- рост радиуса стенки трубы на гранях волоки, что суммарно приводит к образованию плоских поверхностей;
- уменьшение радиусов деформируемой трубы на плоских поверхностях, что обуславливает формирование ребер профильной трубы и лучшую обработку углов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные математические модели волок позволяют оценивать возможности изготовления профильных многогранных труб из цветных металлов и сплавов, а также оптимизировать форму инструмента для совершенствования технологии получения указанных изделий.

В результате дальнейшего совершенствования указанных моделей в перспективе можно определить:

- рациональную геометрию волочильного канала;
- энергосиловые параметры процесса с целью

повышения эффективности использования технологических машин;

— напряженно-деформированное состояние в очаге деформации;

— оценку поврежденности металла;

— неустойчивые режимы формоизменения, приводящие к браку (незатекание металла в вершины ребер, возникновение бочкообразности и выпуклости граней профиля, в некоторых случаях появление вогнутости или даже потери устойчивости граней).

Таким образом, моделирование трубоволоочильного инструмента на основе векторно-матричного аппарата может быть применено для совершенствования существующих и разработки новых процессов профилирования труб, повышения точности готовой продукции для процесса волочения с заданными типоразмерами инструмента, а также достижения более высокой эффективности процесса с точки зрения его энергосиловых параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. Производство профильных труб. М.: Интермет Инжиниринг, 2003.
2. Шурупов А.К., Фрейберг М.А. Производство труб экономичных профилей. Свердловск: Metallurgizdat. Свердл. отд-ние, 1963.
3. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1983.
4. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
5. Митюшов Е.А., Митюшова Л.Л. Математические основы компьютерной геометрии: Уч. пос. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2007.
6. Паршин В.С., Карамышев А.П., Некрасов И.И. и др. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: Уч. пос. Екатеринбург: УрФУ, 2010.
7. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. М.: Машгиз, 1962.

УДК 621.774.37 : 539.319

## ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

© 2013 г. Г.Л. Колмогоров, Е.К. Кобелева, М.В. Снигирева, Т.В. Чернова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Предлагается методика расчета энергосиловых характеристик при волочении триметаллической заготовки. Определяются напряжения в ее отдельных слоях и суммарные напряжения волочения. Выявляется оптимальная геометрия волоочильного инструмента, включающая основные параметры технологического процесса.

**Ключевые слова:** волочение, триметаллическая заготовка, сверхпроводник, оптимизация.

A design procedure of energy-power characteristics is proposed for the trimetallic raw part drawing process. Stresses in separate layers of trimetallic raw parts and total stresses of drawing are determined. The optimum geometry of drawing tool including key parameters of the process is found.

**Key words:** drawing, trimetallic raw part, superconductor, optimization.

**Колмогоров Г.Л.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). Тел.: (342) 239-13-40. Email: dpm@pstu.ru.

**Кобелева Е.К.** – студентка этой кафедры.

**Снигирева М.В.** – ст. препод. этой кафедры.

**Чернова Т.В.** – канд. техн. наук, доцент этой кафедры.