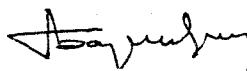


05.16.05
Б 249

На правах рукописи

Баричко Борис Владимирович



**МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2006

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Выдрин Александр Владимирович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гун Геннадий Семенович,
кандидат технических наук, с.н.с.
Яковлев Виктор Васильевич.

Ведущее предприятие – ОАО «Златоустовский металлургический завод».

Защита состоится 24 мая 2006 г., в 14.00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76. ЮУрГУ, зал для защиты диссертационных работ (ауд. 1001)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «_____» 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Мирзаев Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное развитие техники невозможно представить без применения проволочной металлопродукции, к которой предъявляют высокие требования по разнообразию и качеству, а к процессам производства проволоки – гибкости технологии, высокой эффективности и экономичности, безопасности труда и автоматизации. Необходимость деформации новых материалов с повышенными служебными свойствами диктует появление новых технологических процессов производства прутков и проволоки. Одним из них является процесс волочения металла в роликовых волоках, соединивший в себе особенности двух методов обработки давлением – прокатки и волочения.

Применение роликового волочения эффективно в условиях производства прутков и проволоки фасонного сечения, в черновых проходах при волочении катанки, листовой и других видов заготовки, при производстве арматурной проволоки и проволоки из труднодеформируемых материалов.

Широкое использование способа волочения в роликах сдерживается рядом факторов, главными из которых являются отсутствие надежных, компактных конструкций роликовых волок и методик проектирования технологий роликового волочения. Последнее обстоятельство обусловлено недостаточным знанием закономерностей этого процесса, что связано с ограниченным числом его теоретических и экспериментальных исследований. Все сказанное, а также интерес, проявляемый изготовителями проволочной продукции к процессам волочения в роликовых волоках, является свидетельством актуальности тематики данной работы.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены в рамках грантов Министерства образования РФ (1999–2000 и 2003–2004 гг.) и договоров на проведение научно-исследовательских работ с рядом предприятий в России и за рубежом.

Целью работы является развитие методов моделирования процессов деформации металла, создание и практическая реализация на их основе промышленных технологий и оборудования для производства проволоки различного назначения волочением в роликовых волоках.

Научная новизна. На основе теоретических и экспериментальных исследований получен комплекс расчетных моделей впервые позволяющих:

- описать характер напряженного состояния металла при волочении в роликовой волоке;
- определить уровень напряжений в межчаговом промежутке при волочении в роликовой волоке со смешенными парами роликов;
- повысить точность определения параметров формоизменения металла в очаге деформации при волочении в роликах.

Уточнена методика определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при волочении в роликах, обеспечивающая высокую сходимость алгоритма численного решения задачи и позволяющая осуществить комплексный анализ процесса волочения в роликовой волоке.

Выявлены физические закономерности формоизменения металла, позволяющие за счет оптимизации режимов деформации в парах роликов решать различные технологические задачи, в том числе, повышение точности получаемых профилей, обеспечение максимального обжатия профиля без потери его устойчивости в роликах.

Практическая значимость и реализация результатов работы в промышленности. Математическая модель процесса реализована в виде комплекта программных продуктов и методик, позволяющих определять основные технологические параметры процесса волочения в роликовых волоках, проектировать маршруты волочения и оборудование для производства проволоки. Результаты теоретического и экспериментального исследования использованы при разработке технологических процессов волочения проволоки различного назначения. Созданные на уровне изобретений технологии внедрены на ряде отечественных и зарубежных предприятий, в числе которых находятся ОАО «Златоустовский металлургический завод» (г. Златоуст), ОАО «Верхне-Салдинское металлургическое производственное объединение» (ВСМПО, г. Верхняя Салда), предприятие «Челябэнергомонт» (г. Челябинск), ЗАО «ЖБИ-2» (г. Челябинск) и другие. Спроектированы и успешно эксплуатируются на ряде отечественных предприятий и за рубежом роликовые волоки и другое оборудование для производства проволоки, пущен в эксплуатацию специализированный участок роликового волочения проволоки из сплавов на основе титана.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на: Всесоюзной научно-технической конференции «Деформация металла в много-валковых калибрах» (г. Магнитогорск, 1987 г.), Всесоюзной научно-технической конференции «Новые технологические процессы прокатки, как средство интенсификации производства и повышения качества продукции» (г. Челябинск, 1989 г.), Республиканском научно-техническом семинаре «Технология и оборудование волочильного производства» (г. Алма-Ата, 1989 г.), Всесоюзном научно-техническом совещании «Пути ускорения научно-технического прогресса в метизном производстве» (г. Магнитогорск, 1990 г.), Международной конференции по сплавам на основе титана «Xi'an International Titanium Conference» (г. Сиань, КНР, 1998 г.), III Международном конгрессе прокатчиков (г. Липецк, 1999 г.), V Международном конгрессе прокатчиков (г. Череповец, 2003 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Непрерывные процессы обработки давлением» (Москва, 2004 г.), VI Международном конгрессе прокатчиков (г. Липецк, 2005 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 20 опубликованных работах, в числе которых пять изобретений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Полный объем работы составляет 173 страницы машинописного текста, в том числе 41 рисунок и 18 таблиц. Список используемой литературы содержит 150 наименований.

На защиту выносятся:

- конечно-элементная математическая модель очага деформации при волочении в роликовой волоке;
- результаты экспериментальных исследований, выражющиеся в проверке разработанной математической модели и используемых аналитических формул, а также полученные эмпирические зависимости, характеризующие формоизменение металла;
- экспериментально установленные физические закономерности формоизменения металла, определяемые режимами обжатия металла;
- выполненные на уровне изобретений конструкции роликовых волок, обеспечивающие повышение эффективности процесса волочения;
- методика проектирования маршрутов волочения, предусматривающая использование многоуровневой модели процесса и учет особенностей конкретных проходов;
- режимы деформации и новые технологические схемы роликового волочения проволоки прямоугольного, шестиугранного и круглого сечения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель, научная новизна результатов работы и практическая значимость.

В первой главе приведен анализ существующих способов получения проволочной продукции, который показал, что в настоящее время основным процессом производства проволоки является волочение в монолитных волоках, эффективность которого может быть повышена использованием роликовых волок.

Анализ известных технологий роликового волочения показал, что до настоящего времени применение роликовых волок ограничивалось получением проволоки фасонного, преимущественно квадратного, сечения и калибровкой катанки. В первом случае используются волоки с многороликовыми калибраторами, во втором – волоки со смещенными парами вертикальных и горизонтальных роликов с применением схемы калибровки «овал – круг».

Имеющиеся сведения об исследовании процесса волочения в роликовых волоках свидетельствуют о том, что для теоретического описания очага деформации можно использовать методы, известные для описания очага деформации при прокатке с учетом при этом характерных граничных условий. Силовые параметры процесса определяются, как правило, с использованием метода энергетического баланса, ограничена информация об экспериментальных исследованиях процесса, а данные о параметрах формоизменения при волочении в роликовых волоках со смещенными парами роликов практически отсутствуют. С другой стороны, уровень развития современной вычислительной техники позволяет с высокой точностью определять напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, используя прогрессивные методы, к которым следует отнести, в частности, метод конечных элементов (МКЭ).

Возможности волок со смешенными парами рабочих роликов не ограничиваются получением проволоки круглого сечения, поэтому их использование при разработке новых процессов производства проволоки различного назначения потребовала точного определения основных технологических параметров, что обусловило необходимость проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

На основе сделанного в главе анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена многоуровневая модель процесса волочения в роликовой волоке. При разработке режимов деформации в процессах роликового волочения для определения силовых параметров и формоизменения металла предложен иерархический подход, предусматривающий последовательное использование различных моделей процесса в направлении возрастания их сложности. Оценка реологических свойств металла, распределение обжатий в парах роликов и предварительное определение параметров поперечного течения металла выполняются по эмпирическим зависимостям, полученным математической обработкой результатов экспериментальных исследований. Особенность модели на этом уровне заключается в использовании при назначении режимов обжатия металла в парах роликов системы критериев, определяемых местом данного прохода на маршруте волочения и предъявляемыми к нему технологическими требованиями. Основными критериями, использованными при разработке технологических процессов, выступали: получение максимальной вытяжки (при использовании универсальных схем волочения проволоки круглого сечения), получение стабильного размера готового сечения (чистовые проходы, калибровка катанки), обеспечение устойчивого положения профиля в ребровых проходах (при получении прямоугольных сечений, волочения в ребровых калибрах). Данные для формулировки этих критериев были получены в результате проведения экспериментальных исследований процесса. Полученная на первом уровне информация использована для расчета силовых параметров процесса посредством зависимостей, определенных аналитическими методами на основе законов равновесия и энергобаланса. Полученные на этих двух уровнях сведения позволяют откорректировать параметры заготовки, распределение обжатий в парах роликов, уточнить характеристики роликовой волоки. Проектирование калибровки роликов и прогнозирование характеристик качества получаемой проволоки требует более точного определения параметров напряженно-деформированного состояния металла. Для этого на третьем уровне предложено использовать математическую модель процесса волочения в роликовой волоке, ориентированную на использование МКЭ.

Для численного решения задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при волочении в роликовой волоке предложено использовать метод Ритца, который позволяет достаточно просто удовлетворить граничное условие на контактной поверхности (отсутствие момента на рабочем ролике). При решении краевой задачи $A\vec{\varphi} = \vec{f}$ с использованием МКЭ общая форма записи алгоритма этого метода имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} [(A\bar{\varphi}, \bar{\varphi}) - 2(\bar{f}, \bar{\varphi})] = 0, \quad (1)$$

где A – оператор краевой задачи; $\bar{\varphi}$ – вектор искомых функций; \bar{f} – вектор известных функций; ψ_α – узловые значения искомых функций, являющиеся параметрами приближенного решения в соответствии с МКЭ.

Необходимость вычисления скалярного произведения вида $(A\bar{\varphi}, \bar{\varphi})$ требует наличия одинаковой размерности всех компонент вектора неизвестных $\bar{\varphi}$, поэтому предложено вектор $\bar{\varphi}$ задавать в виде

$$\bar{\varphi} = \{V_x, V_y, V_z, x_4\}, \quad (2)$$

$$\text{где } x_4 = V_1 \frac{\sigma}{T}.$$

В выражении (2) V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости материальных частиц деформируемого металла; V_1 – скорость металла на выходе из роликов; σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений.

Тогда краевая задача $A\bar{\varphi} = \bar{f}$ по расчету напряженно-деформированного состояния будет представлять собой следующую систему дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T}{H} \operatorname{div} (\overline{\operatorname{grad}} v_x) + \frac{1}{V_1} \frac{\partial}{\partial x} (x_4 T) = 0; \\ \frac{T}{H} \operatorname{div} (\overline{\operatorname{grad}} v_y) + \frac{1}{V_1} \frac{\partial}{\partial y} (x_4 T) = 0; \\ \frac{T}{H} \operatorname{div} (\overline{\operatorname{grad}} v_z) + \frac{1}{V_1} \frac{\partial}{\partial z} (x_4 T) = 0; \\ \operatorname{div} (\bar{v}) = 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

где H – интенсивность скоростей деформаций сдвига.

Поскольку условие несжимаемости учитывается при построении кинематически возможного поля скоростей, последнее уравнение системы (3) в дальнейшем можно не учитывать. В результате применения метода Ритца получен следующий вид минимизируемого выражения, ориентированного на использование в дальнейшем метода конечных элементов

$$(A\bar{\varphi}, \bar{\varphi}) - 2(\bar{f}, \bar{\varphi}) = \sum_{e=1}^p \int_{V^{(e)}} \left\{ \frac{1}{V_1} (\bar{v}^{(e)}, \overline{\operatorname{grad}}(\hat{x}_4 T)^{(e)} - \left(\frac{T}{H} \right)^{(e)} [(\overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_x^{(e)}, \overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_x^{(e)}) + (\overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_y^{(e)}, \overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_y^{(e)}) + (\overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_z^{(e)}, \overline{\operatorname{grad}}\hat{v}_z^{(e)})]) \right\} dV + \sum_{s=1}^t \int_{S^{(s)}} \left(\frac{T}{H} \right)^{(e)} (\bar{v}^{(e)}, \frac{\partial \bar{v}^{(e)}}{\partial n}) dS,$$

где $V^{(e)}$ – объем конечного элемента с номером « e » ($e = 1, 2, 3, \dots, p$); $S^{(s)}$ – площадь

площадки с номером «s», принадлежащей конечному элементу с номером «e» и являющейся частью поверхности очага деформации ($s = 1, 2, 3, \dots, t$).

Анализ граничных условий на поверхности геометрического очага деформации с учетом отсутствия искривления профиля на входе и выходе из очага деформации и сдвиговых деформаций на вертикальной и горизонтальной плоскостях симметрии позволил записать минимизируемое выражение в виде

$$\begin{aligned}
 J = & \sum_{e=1}^p \int \left\{ \frac{1}{v_1} (\bar{v}^{(e)}, \overline{\text{grad}} (x_4 T)^{(e)}) - \left(\frac{T}{H}\right)^{(e)} [(\overline{\text{grad}} v_x^{(e)}, \overline{\text{grad}} v_x^{(e)}) + \right. \\
 & + (\overline{\text{grad}} v_y^{(e)}, \overline{\text{grad}} v_y^{(e)}) + (\overline{\text{grad}} v_z^{(e)}, \overline{\text{grad}} v_z^{(e)})] \} dV + \\
 & + \sum_{s=1}^{t_0} \int [\frac{1}{2} v_x^{(s)} (\sigma_0 - \sigma^{(s)}) + \frac{\tau_{s0} (v_{y0}^{(s)2} + v_{z0}^{(s)2})}{\sqrt{v_{y0}^{(s)2} + v_{z0}^{(s)2}}}] dS + \\
 & + \sum_{s=1}^{t_k} \int \frac{\mu v_y^{(s)2} [1 + (\frac{dz_k}{dy})^2] \sigma_{nn}^{(s)}}{\sqrt{v_x^{(s)2} (1 + tg^2 \alpha) + v_y^{(s)2} [1 + (\frac{dz_k}{dy})^2]}} dS + \sum_{s=1}^{t_1} \int \frac{1}{2} v_1 (\sigma_{xx}^{(s)} - \sigma^{(s)}) dS,
 \end{aligned} \quad (4)$$

где t_0 – число граней конечных элементов, принадлежащих плоскости входа в очаг деформации; t_1 – число граней конечных элементов, принадлежащих плоскости выхода из очага деформации, t_k – число граней конечных элементов, принадлежащих контактной поверхности полосы; $S_0^{(s)}, S_1^{(s)}, S_k^{(s)}$ – площади площадок элементов, принадлежащих соответственно плоскостям входа в очаг деформации, выхода из очага деформации и контактной поверхности полосы; σ_0 – напряжение противонатяжения; τ_{s0} – сопротивление пластической деформации сдвига металла полосы на входе в очаг деформации; σ_{xx} – компонента тензора напряжений; $v_{y0}^{(s)}, v_{z0}^{(s)}$ – соответствующие компоненты вектора скорости на поверхности S_0 ; μ – коэффициент трения на поверхности контакта металла с роликом; α – угол между касательной поверхностью и осью OX ; $z_k(y)$ – функция, описывающая профиль калибра.

Для удовлетворения условия несжимаемости искомые функции были представлены в следующем виде

$$v_x = \frac{\partial \psi_1}{\partial z}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi_2}{\partial z}; \quad v_z = \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial y} - \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \right).$$

Если обозначить $\sigma = \psi_3$ и $x_4 = \frac{v_1}{T} \psi_3$, то после глобальной аппроксимации будем иметь

$$\hat{v}_x^{(e)} = \sum_{\beta=1}^q \psi_{1\beta} \frac{\partial N_{1\beta}^{(e)}}{\partial z}; \quad \hat{v}_y^{(e)} = -\sum_{\beta=1}^q \psi_{2\beta} \frac{\partial N_{2\beta}^{(e)}}{\partial z}; \quad \hat{v}_z^{(e)} = \sum_{\beta=1}^q \left(\psi_{2\beta} \frac{\partial N_{2\beta}^{(e)}}{\partial y} - \psi_{1\beta} \frac{\partial N_{1\beta}^{(e)}}{\partial x} \right);$$

$$\hat{\sigma}^{(e)} = \sum_{\beta=1}^q \psi_{3\beta} N_{3\beta}^{(e)}; \quad \hat{x}_4^{(e)} = \frac{v_1}{T^{(e)}} \sum_{\beta=1}^q \psi_{3\beta} N_{3\beta}^{(e)}. \quad (5)$$

Из условия минимума выражения (4) с учетом (5) была получена система $3q$ уравнений линейных относительно $\Psi_{1\beta}, \Psi_{2\beta}, \Psi_{3\beta}$ ($\beta = 1, \dots, q$), которая с использованием правил тензорных обозначений может быть записана следующим образом

$$k_{ij}^{\alpha\beta} \psi_{j\beta} = B_{i\alpha}, \quad (\alpha, \beta = 1, \dots, q; \quad i, j = 1, 2, 3). \quad (6)$$

Решение этой системы с применением метода Гаусса позволяет определить корни системы линейных уравнений, являющиеся узловыми значениями искомых функций.

Ввиду симметрии очага деформации при волочении простых профилей, при дискретизации рассматривалась только его четвертая часть (рис. 1), которая была подвергнута разбиению на 20 конечных элементов (т.е. весь очаг деформации разбивается на 80 конечных элементов) в виде тетраэдров с пятью узлами, для которых были определены координаты узлов конечно-элементной сетки.

При описании неизвестных функций $\Psi_{1\beta}, \Psi_{2\beta}, \Psi_{3\beta}$ последние первоначально представлялись в виде выражений

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_1^{(e)} &= a_0^{(e)} + a_1^{(e)}z + a_2^{(e)}x^2 + a_3^{(e)}y + a_4^{(e)}xyz^2; \\ \hat{\psi}_2^{(e)} &= b_0^{(e)} + b_1^{(e)}y + b_2^{(e)}z + b_3^{(e)}x + b_4^{(e)}xyz^2; \\ \hat{\psi}_3^{(e)} &= c_0^{(e)} + c_1^{(e)}x + c_2^{(e)}y + c_3^{(e)}z + c_4^{(e)}xy. \end{aligned} \quad (7)$$

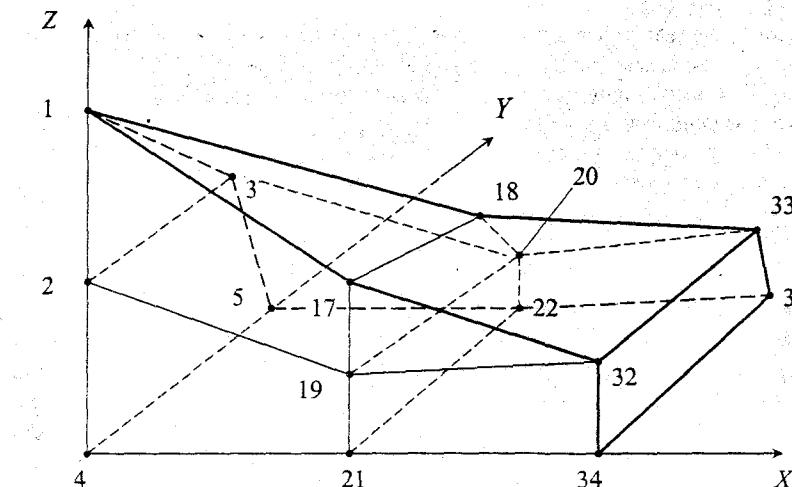


Рис. 1. Разбиение очага деформации на конечные элементы

Указанные выражения, при сравнительной простоте, обеспечивают существование производных требуемого порядка и, тем самым, обеспечивают сходимость выбранного алгоритма. С учетом этого можно записать итоговую систему уравнений

$$\begin{aligned}\hat{\psi}_1^{(e)} &= \sum_{q=1}^m \left(\frac{\Delta_{10q}^{(e)}}{\Delta_1^{(e)}} + \frac{\Delta_{11q}^{(e)}}{\Delta_1^{(e)}} z + \frac{\Delta_{12q}^{(e)}}{\Delta_1^{(e)}} x^2 + \frac{\Delta_{13q}^{(e)}}{\Delta_1^{(e)}} y + \frac{\Delta_{14q}^{(e)}}{\Delta_1^{(e)}} xyz^2 \right) \psi_{1q}^{(e)}, \\ \hat{\psi}_2^{(e)} &= \sum_{q=1}^m \left(\frac{\Delta_{20q}^{(e)}}{\Delta_2^{(e)}} + \frac{\Delta_{21q}^{(e)}}{\Delta_2^{(e)}} y + \frac{\Delta_{22q}^{(e)}}{\Delta_2^{(e)}} z + \frac{\Delta_{23q}^{(e)}}{\Delta_2^{(e)}} x + \frac{\Delta_{24q}^{(e)}}{\Delta_2^{(e)}} xyz^2 \right) \psi_{2q}^{(e)}, \\ \hat{\psi}_3^{(e)} &= \sum_{q=1}^m \left(\frac{\Delta_{30q}^{(e)}}{\Delta_3^{(e)}} + \frac{\Delta_{31q}^{(e)}}{\Delta_3^{(e)}} x + \frac{\Delta_{32q}^{(e)}}{\Delta_3^{(e)}} y + \frac{\Delta_{33q}^{(e)}}{\Delta_3^{(e)}} z + \frac{\Delta_{34q}^{(e)}}{\Delta_3^{(e)}} xy \right) \psi_{3q}^{(e)},\end{aligned}$$

или

$$\hat{\psi}_1^{(e)} = \sum_{q=1}^m N_{1q}^{(e)} \psi_{1q}; \quad \hat{\psi}_2^{(e)} = \sum_{q=1}^m N_{2q}^{(e)} \psi_{2q}; \quad \hat{\psi}_3^{(e)} = \sum_{q=1}^m N_{3q}^{(e)} \psi_{3q}. \quad (8)$$

В связи с тем, что форма очага деформации заранее не определена, решение сформулированной краевой задачи осуществлялось методом последовательных приближений, принимая в нулевом приближении значения величины уширения, полученные с использованием эмпирических зависимостей. Процедура поиска конечного решения при этом продолжалась до тех пор, пока два последовательных приближения узловых значений функций Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 не приобретали достаточно близкие друг к другу значения.

Описанная модель очага деформации при роликовом волочении была реализована в виде программы расчета параметров напряженно-деформированного состояния на ЭВМ, выполненной с использованием языка «Visual Basic for EXCEL». При работе с конечными элементами в виде тетраэдра использовались объемные L -координаты, что облегчило проведение операций интегрирования путем применения известных квадратурных формул с учетом соответствующих весовых коэффициентов. Сравнение расчетных, полученных с использованием модели, и экспериментальных данных показало высокую сходимость разработанного алгоритма.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса волочения проволоки в роликовых волоках. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной волочильной машине, приспособленной для установки различных типов волок и оборудованной комплексом измерительной аппаратуры, регистрирующей силовые и кинематические параметры процесса. В главе имеются данные о параметрах экспериментальной установки и исследованных материалов заготовки, приведены сведения об использованном измерительном инструменте и последовательности тарировки аппарата.

Исследования показали достаточно высокую сходимость экспериментальных данных величины напряжения волочения и усилия металла на роли с расчет-

ными значениями этих силовых параметров процесса, полученными по аналитическим зависимостям. Например, для определения напряжения волочения использована зависимость, полученная решением уравнения энергетического баланса

$$\sigma_1 = n\sigma_{sc} \ln \frac{h_0}{h_1} + \sigma_{sc} b_c \sqrt{R_k \Delta h} \frac{2f}{S_1} \left(\frac{R_c}{R_k} + \frac{2}{1+\lambda} \right) + \sigma_0, \quad (9)$$

где σ_1, σ_0 – соответственно напряжение в переднем и заднем концах полосы; n – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации; σ_{sc} – средняя по очагу величина сопротивления деформации; h_0, h_1 – соответственно высота заготовки и получаемого профиля; R_c, R_k – соответственно средний и катающий радиусы калибра; $\Delta h = (h_0 - h_1)$ – абсолютное обжатие металла; b_c – средняя по очагу деформации ширина профиля; S_1 – площадь поперечного сечения профиля после очага деформации; f – коэффициент трения; λ – коэффициент вытяжки.

При расчете усилия металла при волочении в роликах с гладкой рабочей поверхностью использована зависимость, полученная энергостатическим методом

$$P = \frac{\sigma_1 h_1 - \sigma_0 h_0}{\Delta h} \cdot \frac{b_c}{2} \sqrt{R \Delta h}, \quad (10)$$

где R – радиус ролика.

При определении величины напряжения волочения в одной паре роликов средняя относительная ошибка не превышала 4,3%, а при определении усилия металла на ролики – 7,5%.

Анализ экспериментальных данных показал, что основными факторами, определяющими величину уширения при волочении в двухроликовой волоке являются обжатие металла и заднее натяжение. Для математического описания зависимости изменения величины уширения при изменении величины обжатия, последняя аппроксимировалась полиномом второй степени, коэффициенты которого определялись для различных материалов и условий трения с использованием метода наименьших квадратов. При определении характера влияния на величину уширения заднего натяжения использовался метод планирования эксперимента, а полученная с учетом физических закономерностей процесса эмпирическая зависимость имела вид

$$\frac{b_1}{d_0} = \left(\frac{d_0}{h_1} \right)^{0,549 - 0,94 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{s0}} \right) \ln \left(\frac{d_0}{h_1} \right)}, \quad (11)$$

где d_0 – диаметр заготовки; h_1 – высота поперечного сечения плющеного профиля; b_1 – ширина поперечного сечения плющеного профиля; σ_0 – напряжение, создаваемое приложением заднего усилия; σ_{s0} – сопротивление деформации материала заготовки. Проверка равноточности измерений проводилась по критерию Кохрана.

Для случая волочения в калибрах простой формы математической обработкой данных планируемого эксперимента аналогично получена зависимость для ширины сечения после деформации, дополнительно учитывающая фактор влияния радиуса рабочего инструмента

$$b_1 = b_0 \left[1 + 2,248 \left(\frac{h_1}{R} \right)^{0,617} \left(\frac{h_0}{h_1} - 1 \right)^{0,745 \ln \frac{h_1}{R} + 3,373} - 0,74 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{s0}} \right)^{1,73} \right], \quad (12)$$

где b_0 – ширина сечения до деформации; h_0 , h_1 – высота сечения до и после деформации; R – радиус ролика по дну калибра; σ_0 – напряжение противонатяжения; σ_{s0} – сопротивление металла пластической деформации перед рассматриваемым проходом.

Проведены исследования процесса волочения по схеме, представленной на рис. 2, которые позволили выявить влияние распределения обжатия металла в парах роликов на величину свободного уширения металла во втором по ходу волочения очаге деформации, которая в конечном итоге определяет величину и стабильность одного из размеров получаемого профиля. Полученное факторное пространство (рис. 3) проанализировано с использованием процедуры Бокса–Уилсона на предмет определения наименьших отклонений величины уширения $\Delta h_2/h_1$, взятой в качестве функции отклика, в результате чего был сделан вывод о том, что минимальные отклонения уширения (следовательно, и размера профиля) наблюдаются в окрестностях максимума уширения. На основе этого предложено при проектировании процессов использовать следующее распределение обжатий в парах роликов

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_\Sigma}{\varepsilon_1} - 1, \quad (13)$$

где ε_1 , ε_2 – величина относительного обжатия металла, соответственно в первой и второй парах роликов; ε_Σ – суммарная величина относительного обжатия металла, обеспечивающая при заданном значении величины ε_1 максимальное уширение металла во второй паре роликов.

Применительно к процессу волочения проволоки из стали 65Г, величина ε_Σ , определение которой проводилось методом наименьших квадратов, составила 0,46 ... 0,53.

Проведенные исследования данной схемы (см. рис. 2) позволили также определить величину максимального обжатия полосы в ребровых проходах, обеспечивающую устойчивое положение профиля во второй паре роликов, которое характеризовалось величиной разности диагоналей прямоугольного сечения проволоки. Полученные результаты использованы при определении обжатий в технологических процессах волочения проволоки прямоугольного сечения в некалиброванных роликах. Другим результатом исследований является определение характера влияния обжатия в парах роликов на величину радиусов закруглений сечения получаемого профиля, что обеспечило разработку технологических процессов с учетом необходимости получения острой кромки прямоугольного сечения. Полученные данные позволили также решать обратную задачу – прогнозировать появление нежелательной острой кромки сечения, например, при волочении проволоки круглого сечения с использованием универсальных схем калибровки роликов.

Результаты экспериментальных исследований использованы при проектировании оборудования и технологий волочения проволоки различного назначения.

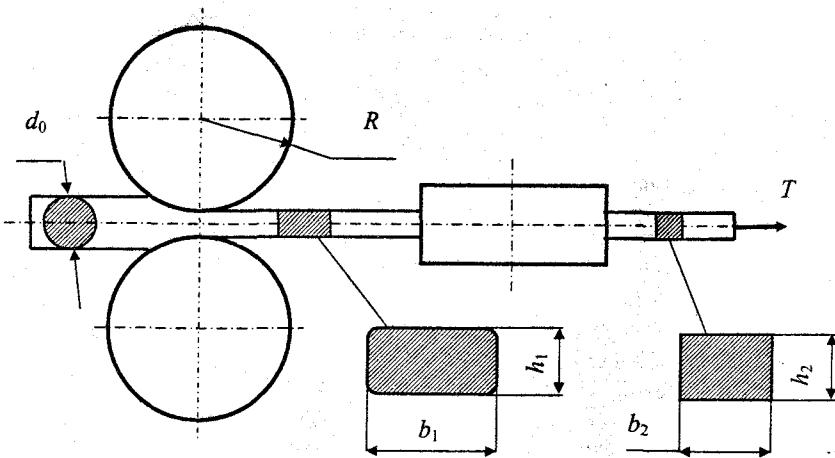


Рис. 2. Схема процесса волочения в смещенных парах роликов

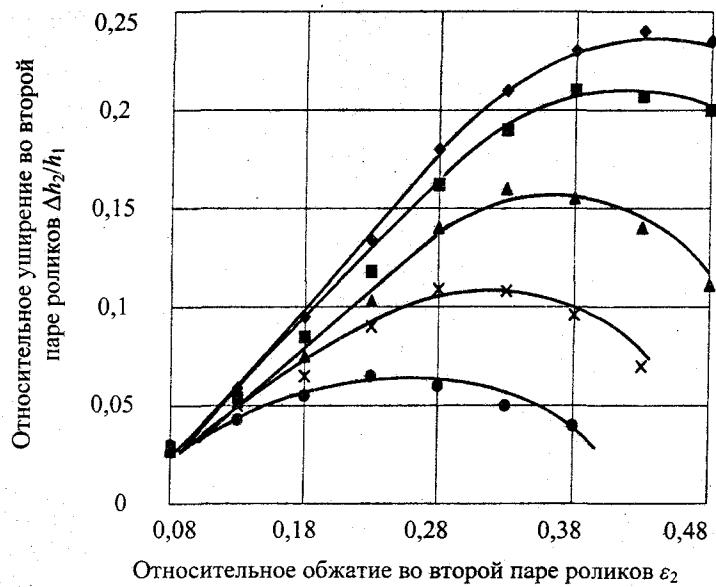


Рис. 3. Зависимость величины уширения во второй паре роликов от обжатий в парах роликов

◆ – $\varepsilon_1 = 0,155$; ■ – $\varepsilon_1 = 0,206$; ▲ – $\varepsilon_1 = 0,250$; ✕ – $\varepsilon_1 = 0,295$; ● – $\varepsilon_1 = 0,346$

Четвертая глава посвящена вопросам разработки конструкций роликовых волок и оборудования для производства проволоки. Сформулированы требования, предъявляемые к конструкциям роликовых волок, основными из которых являются: простота конструкции волоки и изготовления ее деталей, малые габариты, легкая замена роликов, высокая жесткость конструкции, наличие регулировки роликов, обеспечение подшипниковых узлов смазкой без разборки волоки.

Приведено описание конструкции роликовых волок ВР-2/2.180, ВР-2/2.125 и ВР-4.180, разработанных в Южно-Уральском государственном университете, особенностью которых является установка роликов на двух опорах в массивной станине и наличие механизмов клинового типа для радиальной и осевой регулировки роликов*. Эти волоки использованы при проведении экспериментальных исследований и с успехом эксплуатируются рядом предприятий в России и за рубежом, обеспечивая получение широкого ассортимента продукции с высокой, для этого класса оборудования, точностью размеров сечения проволоки.

Описаны конструкции созданных автором на уровне изобретений волок с консольными роликами, волок с роликами на поворотных цапфах, волок с промежуточной удерживающей арматурой и волок с многороликовыми калибрами, применение которых на отдельных стадиях технологического процесса позволяет существенно повысить его эффективность.

Существующее волочильное оборудование, как правило, не рассчитано на применение роликовых волок, что создает ряд трудностей при их использовании в специализированном производстве. Для ОАО «Верхне-Салдинское металлургическое производственное объединение» разработан комплекс оборудования участка роликового волочения проволоки из сплавов на основе титана, включающий бунтодержатели консольного типа, разматыватель, волочильный блок с роликовой волокой, систему охлаждения роликов волоки, грузоподъемное устройство для монтажа волоки на кронштейны волочильного блока, стенд для перевалки роликовых волок. Достоинства участка – компактность и возможность самостоятельного изготовления металлургическим предприятием с использованием минимального набора металлоконструкций оборудования. Волочильный блок обеспечивает работу со всеми типами конструкций роликовых волок ЮУрГУ в широком диапазоне размеров получаемой проволоки, для чего предусмотрена установка быстросменных барабанов разного диаметра. Привод блока обеспечивает реверсивный режим работы в диапазоне изменения скорости волочения в пределах 0 ... 4 м/с.

В пятой главе приведены сведения о разработанных технологических процессах получения проволоки в роликовых волоках.

Результаты теоретического и экспериментального исследований использованы при определении технологических параметров процесса плющения проволоки с противоватяжением, создаваемым монолитной волокой. При разработке технологии решалась задача определения соотношения между диаметром исходной заготовки и обжатием в монолитной волоке, обеспечивающего получение

*В разработке и внедрении роликовых волок принимали участие инженеры Попов Ю.Н. и Штер А.А.

заданного допуска на размер по ширине плющеного профиля. Определение неизвестных параметров проводилось методом последовательного приближения с использованием эмпирической зависимости (11). Например, при получении плющенной проволоки сечением $1,0_{-0,04} \times 2,0 \pm 0,1$ мм, по разработанной для ОАО «Златоустовский металлургический завод» технологии, рекомендовано использовать исходную заготовку круглого сечения диаметром 1,68 мм, а перед роликовой волокой – устанавливать монолитную волоку с диаметром калибрующей зоны 1,65 мм, что обеспечит в ней коэффициент вытяжки 1,036.

При получении проволоки прямоугольного сечения в ряде случаев целесообразно использовать процесс волочения в роликовых волоках со смещенными парами горизонтальных и вертикальных роликов с гладкой бочкой. В этом случае существенно сокращаются расходы на изготовление роликов. Для предприятия «Челябэнергоремонт» с учетом полученных экспериментальных данных по устойчивости полосы в ребровых проходах разработана технология производства проволоки прямоугольного сечения медных шин в диапазоне размеров прямоугольного сечения $1,5 \dots 7,0 \times 5,5 \dots 12,5$ мм из заготовки двух типов: с круглым сечением диаметром 8,0 мм и прямоугольным сечением $4,4 \times 12,35$ мм. Реализация данного процесса сопряжена с усложнением операции заправки исходной заготовки в роликовую волоку, для чего автором разработан способ волочения, защищенный патентом РФ №2112615.

Схема волочения проволоки прямоугольного сечения в роликах с гладкой бочкой характеризуется наличием неконтролируемого размера по одной из сторон прямоугольного сечения получаемой проволоки. Стабильность этого размера играет важную роль для получения качественной продукции. При проектировании режимов обжатий в парах роликов в процессах волочения проволоки прямоугольного сечения в условиях ОАО «Златоустовский металлургический завод» использованы результаты экспериментального исследования в виде зависимости (13). Например, для проволоки стали 65Г сечением $4,50 \times 6,0$ мм, отклонения размера большей стороны сечения удалось уменьшить на 0,02 мм и обеспечить, тем самым, получение заданного поля допуска $\pm 0,05$ мм.

На этом же предприятии внедрен технологический процесс получения проволоки шестигранного сечения, предусматривающий для деформации заготовки круглого сечения комбинацию гладкой бочки и ромбического калибра. Эта схема, по сравнению с другой схемой «ромбический калибр – гладкая бочка», обеспечивает более точное выполнение геометрии шестигранного профиля (меньшие отклонения в размерах углов при вершинах профиля и меньшая разность в диагоналях шестигранного сечения) при схожей величине радиусов закруглений, точности абсолютных геометрических размеров сечения и значений усилия волочения. По предложенной технологии освоено производство проволоки шестигранного сечения размером $4,0_{-0,10}$ мм с радиусами закруглений вершин не более 0,45 мм и отклонениями в размерах диагоналей не превышающими $\pm 0,03$ мм. Параметры процесса и калибровка роликов определялись с использованием разработанной модели процесса роликового волочения.

Использование роликовых волок перспективно для калибровки катанки, при этом важно обеспечить высокую точность получаемого круглого сечения и стойкость рабочего инструмента. Исследования по калибровке катанки из стали 50 в роликовой волоке ВР-2/2.180, проведенные на Магнитогорском калибровочном заводе, позволили определить оптимальную форму калибров и определить стойкость роликов. Катанка диаметром 6,5 мм с овальностью 0,8 мм деформировалась по схеме «ковал – круг» в проволоку диаметром 6,0 мм с величиной овальности не более 0,05 мм и предельными отклонениями размеров $\pm 0,03$ мм. При этом на одном комплекте роликов до первой переточки было получено 60 тонн калиброванной проволоки.

Другое направление использования роликовых волок при производстве проволоки круглого сечения – обработка труднодеформируемых материалов, например, сплавов на основе титана. В соответствии со спецификой выпускаемой продукции для ОАО «Верхне-Салдинское металлургическое производственное объединение» разработан технологический процесс получения проволоки в диапазоне размеров сечения 2,0 ... 6,0 мм из сплавов на основе титана ВТ1-0, ВТ16, предусматривающий 12 проходов роликового волочения, что обеспечило получение заданных сечений проволоки с минимальным количеством промежуточных операций термообработки.

Разработаны варианты технологии получения проволоки круглого сечения с использованием универсальных схем калибровки, предусматривающие использование в промежуточных проходах бескалибрового волочения квадратных или шестиугольных (по схеме «гладкая бочка – ромбический калибр») сечений проволоки, что позволило значительно повысить эффективность процесса за счет сокращения расходов на изготовление рабочего инструмента.

Разработанный автором технологический процесс производства проволоки круглого сечения (патент РФ №2147259) предусматривает продольную резку исходной заготовки на прямоугольные полосы и их последующую деформацию в роликовой волоке. На первом этапе обжатие производится с использованием системы ребровых калибров, обеспечивающих одновременно с уменьшением размера большей стороны сечения прямоугольной заготовки скругление ее кромок. Окончательное формирование круглого сечения выполняется в роликовой волоке по схеме «ковал – круг». При необходимости на финальной стадии процесса может быть использовано волочение в монолитных волоках. Для увеличения развеса бунтов готовой проволоки заготовки соединяютсястык сваркой. Разработанная технология позволяет успешно перерабатывать полосу некондиционной ширины в проволоку круглого сечения. Последнее обстоятельство делает технологический процесс востребованным в условиях современного металлургического производства, ориентированного на максимальное использование отходов и улучшение экологической обстановки. Технология реализована на предприятии ЗАО «ЖБИ-2» (г. Челябинск) для получения проволоки диаметром 1,9 мм из обрези полосы стали 08kp с цинковым покрытием. При разработке режимов деформации, определении технологических параметров и калибровки роликов использованы все уровни модели процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

В работе рассмотрены теоретические и технологические аспекты получения проволоки с использованием высокоэффективных процессов волочения в роликовых волоках. Эффективность применения роликовых волок заключается: в возможности обработки труднодеформируемых, малопластичных материалов, снижении расходов на изготовление рабочего инструмента, подготовку поверхности металла, технологические смазки и уменьшении затрат на проведение технологических операций. Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Предложенная многоуровневая математическая модель, предусматривающая использование эмпирических, аналитических и численных методов определения параметров напряженно-деформированного состояния металла, позволяет осуществить комплексный анализ процесса волочения в роликовой волоке.

2. Для точного определения параметров процесса на основе вариационных методов разработана математическая модель очага деформации, численная реализация которой проведена с использованием метода конечных элементов. Проверка адекватности разработанной математической модели при волочении в роликовой волоке подтвердила хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Использование модели позволяет уточнять калибровку рабочего инструмента при разработке технологических процессов роликового волочения.

3. Для получения предварительной информации о деформируемом материале и параметрах процесса волочения проведены экспериментальные исследования, позволившие оценить влияние более широкого набора различных факторов на формоизменение металла и силовые параметры процесса.

4. В результате проведенных экспериментальных исследований произведена проверка правомочности использования полученных аналитических зависимостей, математической обработкой эмпирических данных получены выражения для определения параметров процесса, использованные в качестве первого приближения в численной модели, определены оптимальные режимы обжатий металла, обеспечивающие точность получаемого профиля и его устойчивость в ребровых проходах.

5. Данные теоретического и экспериментального исследования процесса волочения использованы при проектировании и модернизации роликовых волок. Создана серия волок с жесткой станиной и двухпорными узлами рабочих роликов, имеющих радиальную и осевую регулировки. Проведены промышленные испытания роликовых волок, определены технология изготовления и ресурс работы роликов.

6. С учетом специфики процесса и на основе его всестороннего исследования разработано и пущено в эксплуатацию оборудование участка роликового волочения проволоки из сплавов на основе титана в условиях ОАО «ВСМПО» (г. Верхняя Салда).

7. На основе полученных теоретических и экспериментальных данных создан комплекс программных продуктов, построен методика проектирования маршрутов волочения и разработаны технологические процессы получения:

- стальной плющеной ленты и проволоки прямоугольного, квадратного и шестиугольного сечения;
- электротехнической медной проволоки прямоугольного сечения;
- калибровки стальной катанки для производства канатной проволоки;
- проволоки круглого сечения из сплавов на основе титана;
- проволоки круглого сечения из полосовой заготовки.

8. Разработанные процессы внедрены в промышленных условиях на различных предприятиях России и за рубежом с составлением соответствующей нормативно-технической документации в виде технологических инструкций, таблиц калибровки, инструкций по эксплуатации оборудования, технических проектов оборудования, рабочих чертежей волочильного инструмента и других документов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Получение прямоугольной проволоки в роликовой волоке со смещенными парами роликов / В.Г. Шеркунов, А.А. Штер, Б.В. Баричко и др. // Теория и технология прокатки: Сб. научн. тр. Челяб. политехн. ин-та. – Челябинск, 1987. – С. 119–127.

2. А.с. 1424901 СССР, МКИ В 21 С 3/08. Устройство для волочения круглых профилей / В.Г. Шеркунов, Б.В. Баричко, А.А. Штер. – №4138267/31 – 02; Заявлено 17.06.86; Опубл. 23.09.88. – Бюл. №35.

3. Роликовые волоки / В.Г. Шеркунов, В.С. Токарь, Б.В. Баричко, В.В. Панов. – Каменск-Уральский, 1989. – 40 с.

4. А.с. 1554999 СССР, МКИ В 21 В 13/00. Прокатная (роликовая) клеть / В.В. Гайдабура, Б.В. Баричко, В.Г. Шеркунов и др. – №4447735/31 – 02; Заявлено 23.06.88; Опубл. 07.04.90. – Бюл. №13.

5. А.с. 1586807 СССР, МКИ В 21 В 13/10. Прокатная (роликовая) клеть / В.В. Гайдабура, Б.В. Баричко. – №4494113/31 – 02; Заявлено 17.10.88; Опубл. 23.08.90. – Бюл. №31.

6. Баричко Б.В., Шеркунов В.Г. Получение пружинной проволоки квадратного сечения в четырехроликовой волоке со смещенными парами роликов / Челяб. политехн. ин-т. – Челябинск. – 1990. – 10 с., Деп. в ин-те «Черметинформация» 30.11.90, №5635.

7. Экспериментальное исследование процесса плющения проволоки / Б.В. Баричко, В.Г. Шеркунов, В.П. Катрюк, А.Н. Рубчинский; Челяб. госуд. техн. ун-т. – Челябинск, 1991. – 22 с. – Деп. в ин-те «Черметинформация» 30.11.91, №5830.

8. Патент 2112615 РФ, МКИ В 21 С 1/00, 5/00. Способ волочения прямоугольного профиля / Б.В. Баричко – №96118570/02; Заявл. 18.09.96; Опубл. 10.06.98. – Бюл. №16.

9. Production of precision sections from titanium and titanium-based alloys / A.А. Штер, Ю.Н. Попов, В.С. Нагорнов, Б.В. Баричко Б.В. // Тезисы докладов между-

народной конференции «Xi'an International Titanium Conference». – Сиань (КНР). – 1998. – С. 86–87.

10. Штер А.А., Попов Ю.Н., Баричко Б.В. Получение проволоки и фасонных профилей из сплавов на основе титана в роликовых волоках // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. Г.С. Гуна. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – С. 88–92.

11. Уширение металла при плющении проволоки / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин, Б.В. Баричко и др.; ЮУрГУ. – Челябинск. – 1999. – 11 с. – Деп. в ВИНИТИ 17.11.99, №3398.

12. Баричко Б.В. Оптимальные соотношения обжатий при волочении прямоугольных профилей в смешенных парах роликов / ЮУрГУ. – Челябинск. – 1999. – 11 с. – Деп. в ВИНИТИ 11.03.99, №732.

13. Новая технология и оборудование для производства высококачественных металлоизделий / В.Г. Дукмасов, В.В.Панов, А.Г. Новиков, Б.В. Баричко // Труды третьего конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2000. – С. 504 – 505.

14. Патент 2147259 РФ, МПК⁷ B 21 B 1/16, B 21 C 1/00. Способ производства проволоки / В.В. Панов, В.Г. Дукмасов, Б.В. Баричко. – №99105905/02; Заявл. 23.03.99; Опубл. 10.04.2000. – Бюл. №10.

15. Дукмасов В.Г., Выдрин А.В., Баричко Б.В. Математическая модель формоизменения в очаге деформации при плющении проволоки в роликовой волоке // Метизное производство в XXI веке (теория и практика): Межвуз. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, – 2001. – С. 54–59.

16. Выдрин А.В., Баричко Б.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния металла при волочении в роликовой волоке // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2002. – С. 237–242.

17. Выдрин А.В., Баричко Б.В., Баричко В.С. Теоретический анализ формоизменения при непрерывном волочении в роликовых волоках // Непрерывные процессы обработки давлением: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвящ. 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 376–380.

18. Повышение эффективности процессов волочения в роликовых волоках / А.В. Выдрин, А.А. Штер, Ю.Н. Попов, Б.В. Баричко // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2004. – С. 385–387.

19. Панов В.В., Баричко Б.В. Создание технологии и оборудования для переработки полосовой обрези // Непрерывные процессы обработки давлением: Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.И. Целикова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 78–83.

20. Выдрин А.В., Баричко Б.В., Баричко В.С. Разработка рациональных режимов деформации металлов в роликовых волоках с использованием методов моделирования // Труды шестого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2005. – С. 475–480.