

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



**ГАЛЛЯМОВ ДЕНИС ЭДУАРДОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ  
МОДУЛЬНО-КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ВОЛОЧЕНИЯ В  
РОЛИКОВЫХ И МОНОЛИТНЫХ ВОЛОКАХ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Харитонов Вениамин Александрович  
кандидат технических наук, профессор

Магнитогорск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1    СОВРЕМЕННОЕ    СОСТОЯНИЕ    И    НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ    ТЕХНОЛОГИИ    ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ    ПРОВОЛОКИ.....	9
1.1 Современные требования к свойствам холоднотянутой проволоки....	9
1.2 Влияние деформации на свойства проволоки .....	11
1.3. Действующие технологические способы изготовления проволоки ...	13
1.4 Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при различных способах изготовления проволоки .....	18
1.5 Применение совмещенных и комбинированных способов изготовле- ния проволоки.....	21
1.5.1 Совмещение технологических процессов и применение модульных технологий при производстве проволоки .....	22
1.5.2 Характеристика комбинированных процессов и их применение для изготовления проволоки .....	26
1.5.3 Резервы интенсификации процесса и энергосбережения при комбинированном волочении .....	30
1.6 Моделирование процессов пластической деформации с помощью ком- пьютерных прикладных программ.....	32
1.7 Цель и задачи исследования.....	33
2    РАЗРАБОТКА    СПОСОБА    МОДУЛЬНО-КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОЧЕНИЯ    НА    ОСНОВЕ    КОМПЬЮТЕРНОГО    МОДЕЛИРОВАНИЯ...	36
2.1 Выбор варианта комбинированного волочения .....	36
2.1.1 Моделирование процесса волочения в монолитных волокнах по схеме «круг-овал-круг» и анализ напряженно-деформированного состояния .....	37
2.1.2 Моделирование процесса волочения в роликовых волокнах по схеме «круг-овал-круг» и анализ напряженно-деформированного состояния...	39
2.1.3 Напряженно-деформированное состояние при изготовлении прово-	

локи способом «прокатка-волочение».....	41
2.2 Определение рациональной формы промежуточного профиля .....	43
2.3 Проработка сечения проволоки при традиционном и комбинированном волочении .....	45
2.4 Выбор способа комбинированной деформации.....	49
2.5 Схема комбинированного способа волочения .....	50
2.6 Исследование НДС комбинированного процесса с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе «DEFORM-3D».....	52
2.6.1 Особенности течения металла при волочении квадратного профиля в круг через монолитную волоку.....	53
2.6.2 Изменение напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении при волочении квадрата в круг .....	57
2.7 Сравнение традиционного волочения и комбинированного процесса .....	58
2.8 Выводы по главе.....	60
<b>3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВОЛОЧЕНИЯ В МОДУЛЕ «РОЛИКОВАЯ ВОЛОКА – МОНОЛИТНАЯ ВОЛОКА».....</b>	<b>62</b>
3.1 Разработка методики расчета маршрута волочения в модуле .....	62
3.1.1 Расчет параметров волочения в роликовой волоке .....	62
3.1.2 Выбор единичных обжатий при комбинированном волочении.....	66
3.1.3. Определение предельных значений коэффициента заполнения калибра $K_3$ .....	72
3.2 Определение ресурса энергосбережения при волочении .....	75
3.3 Расчет силовых условий комбинированного волочения в модуле .....	77
3.4 Методика расчета технологических маршрутов и энергосиловых режимов.....	85
3.5 Рациональные параметры комбинированного волочения .....	88

3.6 Выводы по главе.....	90
4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОМЫШЛЕННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОЧЕНИЯ И ОЦЕНКА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	92
4.1 Экспериментальное исследование влияния комбинированного волочения на свойства высокоуглеродистой проволоки.....	92
4.1.1 Сравнительная оценка свойств проволоки, изготовленной традиционным волочением и способом «прокатка-волочение».....	93
4.1.2 Сравнительная оценка свойств проволоки, изготовленной традиционным и комбинированным способом .....	97
4.2 Выбор диапазона диаметров проволоки изготавливаемой комбинированным волочением .....	103
4.3 Выбор технологической смазки при комбинированном волочении ...	107
4.4 Оборудование и инструмент для реализации комбинированного волочения .....	108
4.5 Сравнительная оценка эффективности способов волочения проволоки .....	114
4.6 Выводы по главе.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	141

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Стальная холодноотянутая проволока является наиболее массовым видом метизной продукции и находит широкое применение в машиностроении, строительстве и других отраслях народного хозяйства как полуфабрикат для дальнейшей переработки или в виде готового продукта. Номенклатура выпускаемой метизными предприятиями проволоки весьма обширна, как по назначению, так по сортаменту и свойствам. Вместе с тем производимая в настоящее время проволока по своим технологическим и эксплуатационным характеристикам не всегда удовлетворяет ожиданиям потребителей. Причина заключается в том, что возможность получения высококачественной холодноотянутой стальной проволоки существенно ограничена, что в значительной мере определяется способом ее производства – волочением в монолитных волокнах.

Современная рыночная экономика предъявляет принципиально новые требования к качеству выпускаемой продукции. В настоящее время выживаемость любого предприятия, его устойчивое положение на рынке товаров и услуг определяются уровнем конкурентоспособности. В свою очередь конкурентоспособность связана с двумя показателями - уровнем цены и уровнем качества продукции. Под конкурентоспособностью товара понимают совокупность его качественных и стоимостных характеристик, которая в определенный момент времени обеспечивает удовлетворение конкретной потребности покупателя и выгодно отличается от аналогичных товаров, производимых конкурентами.

Основной путь повышения конкурентоспособности проволоки заключается в привлечении инновационных разработок и технологий в действующее производство, которые позволили бы получать проволоку лучшего качества при меньших затратах. Поэтому стабильно возрастающий спрос на качественную стальную проволоку сегодня требует от ее производителей новых подходов к дальнейшему развитию и совершенствованию технологии волочения. Необходимость разработки и внедрения в производство инновационных технологических процессов производства стальной проволоки с высоким уровнем

прочностных и пластических свойств определяет актуальность проведения данной работы.

**Цель работы:** повышение эффективности процесса волочения стальной углеродистой проволоки на основе разработки модульно-комбинированного способа с применением роликовых и монолитных волок.

При выполнении работы решались **задачи:**

1. Обоснование и разработка модульно-комбинированного способа волочения с применением роликовых и монолитных волок, обеспечивающего повышенные механические свойства проволоки.

2. Исследование напряженно-деформированного состояния при модульно-комбинированном волочении и особенностей волочения проволоки круглого сечения из фасонного профиля.

3. Экспериментальные исследования процесса комбинированного волочения в модуле «роликовая волока-монолитная волока».

4. Разработка рекомендаций по применению модульно-комбинированного волочения и оценка эффективности его использования при промышленном производстве проволоки из углеродистой стали.

### **Научная новизна работы**

В результате теоретических и экспериментальных исследований, впервые предложенного модульно-комбинированного способа волочения проволоки в роликовой и монолитной волоках,

1. определены особенности деформации квадратного профиля в круглой монолитной волоке, заключающиеся в том, что на входе в очаг деформации образуется зона поперечно-продольного немонотонного течения металла и повышенной (до 10%) интенсивности радиального обжатия, что обеспечивает, по сравнению с классическим волочением, более благоприятное напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации круглой монолитной волоки: равномерную деформацию и полную проработку сечения проволоки.

2. выявлена противоположность распределения напряженного состояния проволоки в очаге деформации при волочении в монолитной и роликовой волоках, заключающаяся в том, что при деформации в монолитной волоке в центре

действуют преимущественно растягивающие напряжения, а в роликовой - сжимающие, и в результате их взаимодействия происходит снижение уровня растягивающих напряжений в объеме очага деформации монолитной волоки модуля и готовой проволоке на 50% при модульно-комбинированном способе волочения.

3. аналитически получена и экспериментально подтверждена зависимость коэффициента заполнения  $K_z$ , позволяющая определить степень заполнения промежуточного профиля и рациональное распределение обжатий между роликовой и монолитной волокой; уточнены методики расчетов энергосиловых условий и маршрутов волочения с применением модульной системы «круг – невыполненный квадрат – круг», основанные на определении частных вытяжек в роликовой и монолитной волоках и их распределении в модуле.

### **Практическая значимость работы**

1. Способ модульно-комбинированного волочения, базирующийся на традиционном способе многократного волочения с использованием действующего волочильного оборудования, и позволяющий повысить пластические свойства стальной углеродистой проволоки (по экспериментальным данным – число перегибов на 15% и число скручиваний на 17 %), повысить единичные обжатия до 35 % и на 6,5 % снизить энергозатраты.

2. Разработаны практические рекомендации по определению режимов волочения высокоуглеродистой проволоки и энергосиловых параметров процесса, позволяющие использовать модульно-комбинированный способ на действующем оборудовании при одновременном снижении энергозатрат; установлено, что способ модульно-комбинированного волочения наиболее эффективен при волочении проволоки диаметром более 4,0 мм.

3. Результаты диссертационных исследований использованы для разработки технологической схемы изготовления проволоки, принятой для опытного опробования на производственной площадке АО «БМК» и нашли применение в учебном процессе кафедры технологии обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» при подготовке обучающихся по направлению «Металлургия».

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Концепция применения модульно-комбинированного способа волочения в роликовой и монолитной волоках и определения области его применения при изготовлении стальной высокоуглеродистой проволоки.

2. Особенности волочения фасонного профиля в круг в монолитной волоке.

3. Уточненная методика расчета маршрутов волочения с применением модульной системы «круг – невыполненный квадрат – круг» и энергосиловых параметров процесса.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: VI научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» НТУ ХПИ. Харьков. 2012 г., 72-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 21 – 25 апреля 2014 г., X международная научно-практическая конференция «Новейшие научные достижения» (София. Болгария, 2014 г), X международная научная конференция «Дни науки - 2014» (Прага. Чехия), Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» (Магнитогорск, 15-17 июня 2015г), XIX международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет, 15-16 декабря 2015 г), 74-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 18-22 апреля 2016 г., XIII всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», г. Старый Оскол, МИСиС, 23-25 ноября 2016., 75-я Международная научно-техническая конференция «актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 17–21 апреля 2017 г.

# **1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ**

## **1.1 Современные требования к свойствам холодноотянутой проволоки**

Стальная высокоуглеродистая проволока является наиболее массовым видом метизной продукции и широко используется в качестве полуфабриката для изготовления канатов, металлокорда, пружин или в виде готового продукта во многих отраслях промышленности, современный уровень развития которых требует обеспечения все более высоких качественных и эксплуатационных ее характеристик. Поэтому в условиях рыночной экономики важнейшей задачей метизного производства является повышение конкурентоспособности стальной проволоки. Непрерывное стремление к улучшению качества, постоянный поиск путей усовершенствования существующих технологий и внедрение инноваций являются залогом повышения потребительских свойств и конкурентоспособности производимой проволоки. Целью внедрения инновационных разработок и технологий является повышение эффективности производства за счет повышения качества продукции, увеличения производительности оборудования, сокращения длительности производственного цикла, снижения металлоемкости и расширения сортамента продукции с качественно новым уровнем свойств. Снижение затрат на производство проволоки и возможность получения за счет внедрения мероприятия дополнительной прибыли позволяют повысить ее конкурентоспособность на рынке метизов.

Свойства проволоки зависят от многих факторов: химического состава стали и способа ее производства; методов прокатки катанки; особенностей термообработки, но основным является способ обработки давлением, определяющий качество проволоки и затраты на её изготовление, причем наиболее привлекательны усовершенствованные технологии на базе традиционного

процесса, не требующие капитального переоборудования имеющихся волочильных станов [1, 2].

Современные требования к качеству канатов, пружин и других изделий из проволоки, обеспечение их высоких рабочих характеристик, надежности и долговечности службы во многом определяются свойствами проволоки. Так уменьшение массы и увеличение срока службы автомобильных шин может быть обеспечено повышением прочности армирующего материала, т.е. за счет использования высокопрочного и сверхвысокопрочного металлокорда с пределом прочности более  $3600 \text{ Н/мм}^2$  [3, 4]. Тенденция повышения прочности характерна и для других видов проволоки из углеродистой стали: канатной, пружинной, арматурной. Высокопрочная стальная проволока, используемая в качестве напрягаемой арматуры при производстве железобетонных конструкций, подавляет растягивающие напряжения в бетоне и должна иметь высокие значения предела прочности и предела текучести, сопротивления релаксации напряжений, а также обладать достаточной пластичностью, чтобы обеспечить предварительно напряженным конструкциям стойкость против хрупкого разрушения [5]. Пружинная проволока дополнительно к перечисленным характеристикам должна обладать значительным сопротивлением малым пластическим деформациям. Канатная проволока, кроме того, должна иметь высокую стойкость к усталостным разрушениям.

Однако действующий способ производства высокопрочной проволоки имеет существенный недостаток, заключающийся в потере пластичности металла в процессе деформации, что значительно ограничивает предельно допустимые суммарные обжатия и является препятствием для достижения высокого уровня прочности. Изменение механических свойств в процессе волочения имеет наиболее важное значение т.к. от этого зависит получение заданного уровня прочностных и пластических характеристик готовой проволоки. В связи с этим для повышения комплекса свойств и, в первую очередь, сохранения запаса пластичности высокопрочной холоднотянутой проволоки необходим поиск новых и совершенствование существующих способов ОМД. Разработка

технологических приемов повышения пластичности не представляется возможной без понимания физической природы упрочнения холоднодеформированного металла.

## 1.2 Влияние деформации на свойства проволоки

Теория дислокаций объясняет механизм упрочнения при холодной обработке давлением резким возрастанием плотности дислокаций с увеличением степени деформации: от  $10^7 - 10^8$  на  $1 \text{ см}^2$  в отожженном металле до  $10^{11} - 10^{12}$  на  $1 \text{ см}^2$  в сильно деформированном. По мере деформирования происходит накопление дислокаций по границам зерен и блоков, на участках пересечения плоскостей скольжения. Взаимодействие их упругих полей препятствует продвижению новых дислокаций, происходит блокировка источников новых дислокаций, в результате сопротивление деформации и прочность повышаются. Кроме деформационного известны и другие механизмы упрочнения стали: твердорастворный, зернограницный и дисперсионный. В целом процесс упрочнения стали при холодной деформации является комплексным, сочетающим в той или иной степени все перечисленные механизмы. Основным фактором, определяющим прочностные характеристики стали, служит характер дислокационной структуры – длина пути скользящих дислокаций, размеры ячеек и зерен, легкость передачи деформации через их границы, а также геометрические размеры заготовки. Исследованиями установлено, что физические основы прочности стали главным образом определяются значением эффективной длины плоскостей скольжения. Природа барьеров, ограничивающих длину свободного пробега дислокаций, несущественна так как они выполняют одну и ту же функцию, а упрочнение зависит от межбарьерного расстояния. Чем меньше расстояние между барьерами, тем сильнее затрудняется движение дислокаций. Известное соотношение Петча-Холла показывает, насколько эффективным упрочняющим фактором является размер зерна [6, 7, 8, 9, 10, 11]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_T$  – напряжение течения сплава;

$\sigma_0$  – напряжение сопротивления движению дислокаций в сплаве за счет растворенных атомов, дислокационных взаимодействий, дисперсных фаз и т.д.;

$d$  – средний диаметр зерна и путь свободного пробега дислокаций;

$K$  – коэффициент, учитывающий необходимое напряжение для генерирования дислокаций в соседних зернах для развития макротрансляции дислокаций и формирования полос Людерса-Чернова.

С увеличением степени пластической деформации и ростом плотности дислокаций увеличиваются прочностные характеристики и одновременно снижаются показатели пластичности, т.е. теряется способность металла к формоизменению без разрушения. Обработка металлов давлением основывается именно на способности металла пластически деформироваться, т.е. на его свойстве необратимо изменять свою форму без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности. Причем влияние схемы напряженного состояния оказывается одним из важнейших факторов, определяющих пластичность металлов при холодной обработке давлением. Зависимость пластичности от схемы напряженного состояния показана в классических опытах П. Бриджмена, в работах С. И. Губкина, Г. А. Смирнова-Аляева, В. Л. Колмогорова. Помимо пластичности в практике ОМД используется еще одна характеристика металла – его деформируемость, и которая в отличие от пластичности зависит еще от процесса обработки [12, 13].

М.Я. Дзугутов [14, 15] рекомендует считать пластичность характеристикой металла, т.е. рассматривать ее как свойство металла, зависящее от его природных физико-химических констант: типа кристаллической структуры, химического состава, структурного состояния и др. Деформируемость металла является функцией не только пластичности, но и технологических факторов: скоро-

сти, дробности и равномерности деформации, поверхностного фактора, характеризующего схему напряженного состояния тела и зависящего от размера тела, его формы и формы деформирующего инструмента. Следовательно за счет изменения того или иного технологического фактора можно улучшать или ухудшать деформируемость металла. Эти факторы можно рассматривать как среду, в которой происходит деформирование тела из материала, обладающего некоторым ресурсом пластичности. Они оказывают значительное, а иногда даже решающее влияние на деформируемость.

Еще одна причина снижения пластичности заключается в том, что при холодной обработке давлением металла одновременно с внутрикristаллитной деформацией происходит и межкristаллитная. Пластическая деформация начинается в наиболее благоприятно расположенных зернах, в которых плоскости скольжения составляют с направлением усилия угол, близкий к  $45^\circ$ . В процессе деформации зерна с неблагоприятной пространственной ориентировкой постепенно разворачиваются и когда их плоскости скольжения составят с направлением действия усилия угол  $45^\circ$ , они также принимают участие в деформации. Постепенно ориентировка решетки изменяется так, что большинство зерен своими кристаллографическими элементами располагается одинаково, образуя текстуру деформации, приводящую к анизотропии механических и физических свойств металла. Искажение кристаллической решетки, происходящее в процессе деформации, приводит к межкristаллитным нарушениям. Субмикроскопические трещины увеличиваются с повышением степени деформации, а пластичность металла уменьшается. Когда степень деформации достигает предельной величины, дальнейшая холодная деформация без разрушения становится невозможной [16, 17].

### **1.3 Действующие технологические способы изготовления проволоки**

Основным способом производства стальной проволоки является волочение в монолитных волокнах, осуществляемое на волочильных машинах прямооч-

ного типа или с накоплением проволоки на вытяжных барабанах. Волочение обладает несомненными преимуществами, которые заключаются в отлаженности и изученности технологического процесса, стабильности размеров протянутой проволоки, наличии разнообразного серийно выпускаемого оборудования.

Деформация при волочении основана на принципе протягивания металла через конический канал волочильного инструмента. В результате взаимодействия деформируемого металла с конической рабочей зоной волоки возникают силы контактного трения, которые приводят к возникновению неоднородности деформации, снижают стойкость волочильного инструмента, как в результате непосредственного износа контактной поверхности, так и вследствие дополнительного ее нагрева. Одновременно происходящий разогрев проволоки в очаге деформации способствует протеканию деформационного старения протягиваемого металла и снижению его пластических свойств. Из-за действия контактных сил трения в рабочем конусе волоки периферийные слои проволоки отстают от внутренних слоев, происходит их дополнительный сдвиг, который увеличивает общую величину пластической деформации и упрочняет поверхность проволоки.

Поэтому совершенствование процесса волочения проволоки традиционно направлено на уменьшение отрицательного влияния трения и заключается в разработке и применении новых материалов и технологических приемов при изготовлении волок, изменении их конструкции и профиля, создании новых смазочных материалов и способов их подачи в очаг деформации, повышении качества подготовки металла к волочению и т.д.

Существенным недостатком волочения является его явно выраженная зависимость от масштабного фактора, проявляющаяся в снижении уровня прочностных и пластических характеристик с увеличением диаметра протягиваемой проволоки. Влияние масштабного фактора при пластической деформации металлов было подробно рассмотрено С.И. Губкиным, который установил зависимость изменения сопротивления пластической деформации от размера осаживаемых образцов. Изучение воздействия масштабного фактора на свойства

стальной проволоки получило дальнейшее развитие в работах М.Я. Дзугутова, Б.Б. Чечулина и др.

Природа масштабного эффекта до настоящего времени окончательно не выяснена. Существуют предположения, что причина его в ухудшении теплоотвода в процессе волочения, приводящего к разогреву и деформационному старению металла [18]. В работе [19] причина масштабного эффекта при волочении связывается с интенсивностью роста удельных сжимающих усилий, перпендикулярных оси канала волокна. По мнению С. И. Губкина, влияние диаметра обуславливается величиной отношения площади контактной поверхности к объему деформируемого тела [20].

В настоящее время влияние масштабного эффекта объясняется с помощью статистической теории дефектов. С увеличением диаметра проволоки повышается вероятность существования дефектов, облегчающих образование и развитие трещин при волочении [7, 21]. В работе [22] рост интенсивности раскрытия микротрещин и снижение пластичности при увеличении диаметра холоднодеформированной проволоки объясняется повышением неоднородности деформации проволоки крупных размеров. Поэтому для повышения пластических свойств проволоки необходимо применять такие способы ее изготовления, которые бы позволили обеспечить более однородную деформацию металла и компенсировать потерю пластичности, характерную для традиционного волочения.

Безусловно, любой способ ОМД должен обеспечивать наиболее высокие технико-экономические показатели процесса, которые в свою очередь связаны с характеристиками технологического процесса: количеством переходов, зависящим от допустимой деформации заготовки без разрушения  $\varepsilon_i$ , средней удельной силой  $q$  и гидростатическим давлением  $p$ . Наиболее обобщенным фактором, влияющим на эти параметры, является отношение площади контактной поверхности  $F_\kappa$  к площади свободной поверхности  $F_c$  заготовки, участвующей в пластической деформации. В зависимости от способа ОМД значение отношения  $n = F_\kappa / F_c$  может меняться в пределах  $0 \div \infty$  и растет с увеличением площа-

ди контактной поверхности. При этом возрастает средняя удельная сила и допустимая степень деформации. Гидростатическое давление претерпевает качественное изменение, переходя от схемы с растягивающими напряжениями для процессов с малым значением показателей к схеме с неравномерными сжимающими напряжениями для процессов с высоким значением показателя. Влияние масштабного фактора также можно учитывать через коэффициент  $C_\phi = 4/d$ , с уменьшением величины которого снижается доля растягивающих напряжений в поверхностных слоях протягиваемой проволоки [23, 24].

М.Я. Дзугутов [14, 15] для объяснения влияния размеров тела на его деформируемость предложил следующую трактовку понятия «поверхностный фактор» или фактора схемы напряженного состояния, который представлен в виде отношения площади контакта  $F$  к объему очага деформации  $V$ . Чем меньше размер сечения и чем больше совпадает его форма с формой деформирующего инструмента, тем больше величина поверхностного фактора и меньше доля растягивающих напряжений. О положительном влиянии охватывающего пластического деформирования на знак, уровень и характер распределения остаточных напряжений в деформируемом теле упоминает С.А. Зайдес [23, 25]. Следовательно, используя соответствующий способ ОМД, позволяющий увеличить значение  $F/V$ , можно снизить или исключить влияние масштабного фактора на пластичность холоднотянутой проволоки. Так как круг имеет минимальный периметр и, соответственно, круглая проволока имеет минимальную поверхность, увеличить величину  $F$  можно прокаткой или волочением в фасонных (овальных, квадратных или треугольных и др.) калибрах. Как отмечено в работах [7, 19] за счет изменения схемы деформации на всестороннее сжатие при прокатке возможно залечивание микродефектов и микропор, что способствует снижению влияния масштабного фактора и повышению пластичности металла.

Поэтому уже в течение нескольких десятилетий изучаются и внедряются новые способы изготовления проволоки, построенные по иному принципу. Так в отдельных случаях для изготовления проволоки из труднодеформируемых

материалов применяется безфильтрное волочение: растяжение предварительно нагретой заготовки, деформация металла методом знакопеременного изгиба – растяжения и др. [26, 27].

Наиболее эффективным способом, позволяющим качественно изменить технологический процесс изготовления проволоки, считается холодная прокатка. В отличие от многих других технологических процессов прокатка осуществляется благодаря силам трения, которое имеет благоприятное воздействие на металл [28, 29]. Прокатка устраняет многие недостатки волочения в монолитных волокнах: меняет на более благоприятную механическую схему деформаций, снижает контактное трение, улучшает условия охлаждения проволоки, повышает деформируемость проволоки, уменьшает кратность, сокращает время цикла обработки, упрощает операции подготовки металла к пластической деформации, повышает устойчивость процесса.

Однако на практике широкое распространение получила не прокатка, а волочение через неприводные роликовые клетки. Способ представляет сочетание процессов прокатки и волочения – деформация происходит в калибрах, образованных вращающимися роликами, которые приводятся в движение за счет приложенного к переднему концу проволоки вытягивающего усилия. При волочении в роликовых волокнах все вышеперечисленные достоинства, присущие прокатке, сохраняются. Исследования влияния напряженно-деформированного состояния этих способов ОМД на свойства проволоки выполнены в работах Ю.И. Коковихина, М. И. Бояршинова, М. Г. Полякова, Б. А. Никифорова, Г. С. Гуна, Б.Н. Красавина, В.И. Гулько, Р.Райта и др.

Но и у этих способов есть свои недостатки: сложность обеспечения высокой точности геометрических размеров проволоки, невозможность изготовления проволоки по схеме «круг-круг», что требует применения специальных систем калибров, тем самым усложняя перестройку с размера на размер. Кроме того, как показывает выполненный анализ, для них характерно наличие продольных растягивающих напряжений во внеконтактных областях в разъемах

калибров, увеличивающих вероятность возникновения разрушений в этих местах [30]

Влияние схемы напряженного состояния на свойства обрабатываемого металла при волочении в монолитных волокнах, прокатке и волочении в неприводных роликовых волокнах рассмотрено ниже.

#### **1.4 Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при различных способах изготовления проволоки**

При волочении основная деформация происходит в конической части монолитной волокни, в калибрующей зоне формируется конечный размер проволоки. Схема напряженного состояния при волочении - двухстороннее сжатие с одноосным растяжением. Характер течения металла через очаг деформации, его напряженное состояние неоднократно исследованы Э. Зибелем, П.И. Мининым, С.И. Губкиным, И.Л. Перлиным и др. с помощью метода измерения искажения координатной сетки. Результаты этих исследований показывают, что из-за действия контактных сил трения периферийные слои перемещаются с меньшей скоростью, чем центральные и эта разница увеличивается от центра к периферии. Величина сдвиговых деформаций во всех слоях возрастает с увеличением угла волокни  $\alpha$ , единичного обжатия, коэффициента трения, дробности деформации.

Уменьшение толщины периферийных и центральных слоев в канале проволоки происходит от нагрузок разного вида: периферийные слои утончаются под действием радиальных, окружных и осевых растягивающих напряжений, а центральные деформируются главным образом под действием осевых напряжений. Окружные и радиальные напряжения убывают в направлении от периферии к центральной оси. Продольные растягивающие напряжения при этом возрастают по мере приближения к выходу из волочильного канала.

На рисунке 1.1 показан характер изменения продольных и радиальных главных нормальных напряжений вдоль деформационной зоны. Первоначально

растягивающие напряжения выше в центральных слоях, но после выхода из волоки происходит перераспределение и они становятся меньше чем в периферийных. Это связано с резким изменением траектории периферийных слоев, а чем больше угол поворота линий скольжения, тем сильнее изменяется нормальное напряжение. На выходе из волоки радиальные напряжения падают до нуля, а растягивающие продольные напряжения растут от центра к периферии [31, 20, 32, 33].

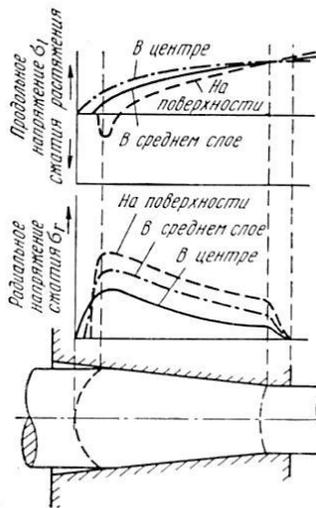


Рисунок 1.1 – Схема изменения радиальных и продольных напряжений в деформационной зоне

Следовательно, для обычного волочения характерно возникновение на всем протяжении очага деформации значительных растягивающих напряжений, способствующих образованию трещин, снижению запаса пластичности и деформируемости проволоки.

При прокатке очаг деформации разделен на две зоны: зону отставания и зону опережения. Между зонами отставания и опережения находится нейтральная точка, где скорости валков и полосы равны. На деформируемый металл со стороны валков действуют нормальные напряжения, направленные по радиусу, и силы трения, направленные по касательной к поверхности валка. Силы трения в зоне отставания обеспечивают захват полосы и непрерывное

движение ее между валками. Напряженное состояние полосы при прокатке характеризуется объемной схемой с тремя сжимающими напряжениями.

При наличии переднего натяжения, когда полоса принудительно вытягивается из валков, равновесие очага деформации достигается, если нейтральное сечение смещается в сторону, противоположную направлению прокатки, при этом зона опережения увеличивается, отставание уменьшается. В предельных случаях зона отставания может полностью исчезнуть, весь очаг деформации будет занят только зоной опережения. В этом случае равновесие очага деформации достигается за счет того, что проекции сил нормального давления и контактного трения полностью уравниваются тянущей силой. Для вращения валков не требуется привода, они будут вращаться за счет тянущей силы. В этом случае получается процесс волочения через валки [34, 35].

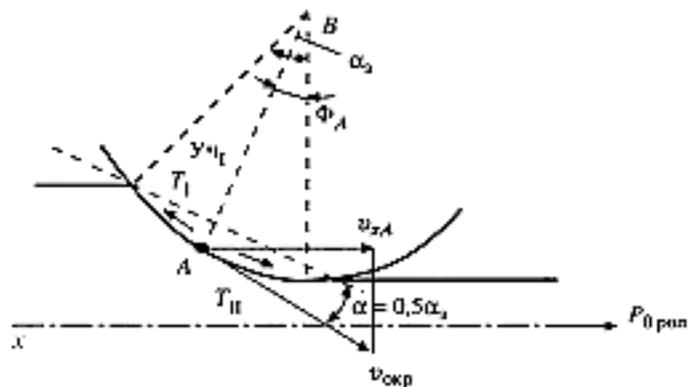


Рисунок 1.2 – Силовые условия при волочении в роликовой волоке

Поэтому в роликовых волоках очаг деформации также состоит из двух зон - отставания и опережения (рисунок 1.2), но зона опережения более развитая, а вращение роликов осуществляется за счет сил контактного трения в зоне опережения. В нейтральной точке радиальное напряжение максимально, а тангенциальное минимально. Напротив, в точках входа проволоки в роликовую волоку и выхода из нее, тангенциальное напряжение максимально, а радиальное минимально. Максимум усилия сжатия и, соответственно, усилия деформации, наблюдается в нейтральной точке. Отсюда следует, что при протяжке в роликовой волоке деформация более равномерно распределена по сечению, чем

при волочении в монолитных волокнах. Неоднородная же деформация при прокатке в роликах, напротив, меньше ввиду более низких касательных напряжений [31].

Для волочения в роликах характерно сочетание схем напряженного состояния прокатки и волочения, причем превалирование той или иной зависит в основном от условий контактного трения. При протягивании через вращающиеся неприводные валки почти по всему очагу деформации металл находится в состоянии всестороннего сжатия, и только у выхода из валков появляется зона растягивающих продольных напряжений. Чем больше коэффициент трения, тем больше протяженность участка продольных сжимающих напряжений. С увеличением диаметра валков и длины очага деформации возрастает величина продольных сжимающих напряжений и протяженность участка с продольными сжимающими напряжениями. Изменяя диаметр валков и условия трения на контакте, можно регулировать величину продольных сжимающих напряжений и создавать необходимые условия для бездефектного волочения малопластичных материалов [1, 36, 37, 38, 39].

Метод координатных сеток дает представление о характере течения металла. При прокатке и волочении через роликовую волоку поперечные линии координатной сетки на выходе из очага деформации имеют незначительную выпуклость в направлении вытяжки в отличие от волочения через монолитную волоку, где поперечные линии координатной сетки имеют значительный изгиб, причем средние и промежуточные слои деформируются в продольном направлении более интенсивно, чем контактные. Следствием этого является появление остаточных напряжений и неравномерности свойств металла по сечению проволоки, полученной традиционным волочением [36, 40].

### **1.5 Применение совмещенных и комбинированных способов изготовления проволоки**

Несмотря на имеющиеся недостатки, традиционное волочение остается вне конкуренции и является единственным массовым способом производства

проволоки. Непрерывное совершенствование волочения за счет применения новых волочильных смазок и конструкций волочильного инструмента, эффективности охлаждения проволоки и волок к явному качественному прорыву не привело. Решение проблемы заключается не только в совершенствовании самого способа волочения, но и в создании новых технологических процессов производства проволоки, причем на базе традиционного процесса, рассматривая эти процессы как следующий эволюционный этап развития волочения.

Необходимо отметить, что волочение через монолитные волокна является процессом консервативным, т.к. в процессе обработки практически отсутствует возможность активного управления напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации, которое в значительной степени определяет качество готовой продукции и эффективность процесса [41]. Разработка более совершенных процессов волочения, позволяющих за счет изменения технологических факторов процесса [14, 15] управлять пластичностью и деформируемостью металла является актуальной задачей.

### **1.5.1 Совмещение технологических процессов и применение модульных технологий при производстве проволоки**

Перспективным направлением совершенствования производства стальной проволоки являются совмещенные технологические процессы. Под совмещенным понимают непрерывный процесс, объединяющий несколько технологических операций разного рода. При совмещенном процессе участки движущейся проволоки одновременно подвергаются нескольким технологическим операциям, т.е. он осуществляется с перекрытием отдельных операций, при этом обеспечивается принцип равенства секундных объемов металла.

Современная тенденция реализации совмещенных процессов заключается в создании специализированных линий модульного типа, т.е. составленных из взаимозаменяемых блоков – модулей. Набор и количество модулей определяется конкретными задачами и условиями. Модульные технологии производства

массовой металлопродукции относятся к критическим технологиям федерального уровня, определяющим научно-технический потенциал страны [42]. При использовании модульного технологического процесса обеспечивается его высокая устойчивость и независимость каждой базовой операции, т.е. существует возможность прекращения одной из операций без остановки всего процесса [43, 44].

Подтверждением эффективности совмещенных модульных процессов является разработанная в конце 80-х годов в МГМИ (сейчас МГТУ) и успешно опробованная в условиях Белорецкого металлургического комбината технология изготовления пружинной проволоки способом прокатки заготовки в многовалковых калибрах с последующей калибровкой ее на готовый размер в монолитной волоке. Изготовленная по упомянутой технологии пружинная проволока диаметром 8,00 мм имела более высокий уровень и равномерность механических свойств, чем полученная волочением [45].

В практике метизного производства известно применение совмещенных технологий «прокатка-волочение», как для повышения точности геометрических размеров готовой проволоки, так и для повышения ее физико-механических свойств [46, 47, 48, 49].

Известен способ получения шестигранных и трапециевидных профилей высокой точности и качества поверхности с помощью калибровки в фасонной монолитной волоке шестигранных и трапециевидных прутков, изготовленных протяжкой в роликовых волоках [50, 51, 52, 53].

Их особенностью является получение способом прокатки в несколько проходов промежуточных профилей с калибровкой на готовый размер в монолитной волоке.

Вариантом совмещенного процесса можно считать принцип деформационного совмещения, когда в результате наложения одного процесса деформации на другой появляется возможность повышения пластических характеристик металла. Из практики обработки металлов давлением известно, что применение принципа чередования разноименных деформаций позволяет увеличить ресурс

пластичности металла за счет переориентации зерен, появления новых плоскостей скольжения, снижения энергии по границам зерен [54, 55]. Применение в потоке волочения процессов знакопеременного нагружения позволяет реализовать немонотонное воздействие и инициирует эффект Баушингера, механизм которого заключается в том, что сформированная при одной схеме деформации дислокационная структура нарушается в случае изменения схемы деформации. Такая деформационная обработка не снижает плотность дислокаций в металле, а перераспределяя их, изменяет дислокационную структуру. Задействование дополнительных плоскостей скольжения смещает момент полного охрупчивания холоднодеформированной стали в область повышенных суммарных обжатий. В результате достигается снижение предела текучести и увеличение пластичности проволоки [2, 31, 56].

Объясняется это тем, что пластичность и деформируемость во многом определяются плотностью накапливаемых по мере развития деформации дефектов кристаллического строения, прежде всего дислокаций, и характером их распределения по объему металла. Средний уровень запасаемой энергии наклепа даже в сильно деформированных металлах заметно ниже критического уровня и в общем объеме металла имеются локальные микрообъемы с различными уровнями запасенной энергии. При достижении значительной неоднородности распределения дислокаций и возникновении локальных перенапряжений, превышающих предел прочности материала, их релаксация происходит путем образования и развития трещин. Поэтому требуется создание таких деформационных условий, которые обеспечивали бы постоянную релаксацию локальных пиковых напряжений еще до образования трещин [2].

Перераспределяя средний уровень запасаемой энергии наклепа между различными объемами металла таким образом, чтобы снизить уровень энергии в объемах, имеющих энергию наклепа близкой к критической, и увеличить соответственно уровень энергии в менее наклепанных объемах, можно восстановить способность металла к холодной деформации, причем, не изменяя среднего уровня запасенной энергии (рисунок 1.3)

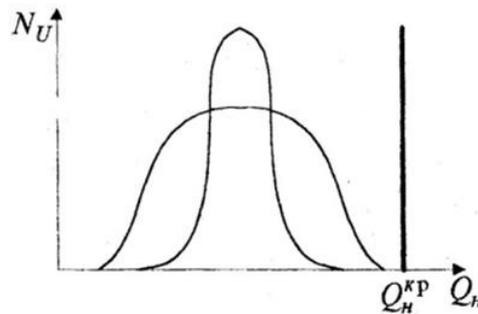


Рисунок 1.3 – Схема распределения запасенной энергии наклепа в металле:  $Q_H$  - запасаемая энергия наклепа;  $Q_H^{kp}$  - критическое значение запасаемой энергии наклепа;  $N_U$  - количество элементарных объемов в металле

Существуют очевидные физические предпосылки для возможности перераспределения дислокаций при изменении схемы деформации. Известно, что с точки зрения кристаллографии неравномерность в распределении дислокаций вызвана различной их плотностью:

- в активных системах скольжения для данной степени деформации;
- в системах скольжения с различным уровнем касательных напряжений;
- в плоскостях и направлениях, не являющимися системами скольжения.

На указанные первичные неоднородности накладываются неоднородности, обусловленные изменением дислокационных структур по мере развития деформации, а также связанные с неоднородностями микроструктуры, различным распределением неметаллических включений и ликвациями по химическому составу. Смена схемы деформации «включает» другие активные системы скольжения структурных элементов в металле, менее блокированные в процессе предварительной деформации, что и вызывает определенное разупрочнение и рост пластичности [57, 58].

Подобный принцип, заключающийся в смене схем деформации, применяется в методах интенсивной пластической деформации (ИПД), требующих сочетания следующих факторов – обеспечения высокого уровня накопленной деформации и ее немонотонности при температурах ниже порога рекристаллизации. Использование методов ИПД направлено на получение ультрамелкозерни-

стых и наноструктур. В качестве примера можно назвать разработанный в Карагандинском государственном индустриальном университете (Республика Казахстан) способ прессования в равноканальной ступенчатой матрице с последующим волочением в монолитной волоке, применяемый при изготовлении медной проволоки, рисунок 1.4 [59].

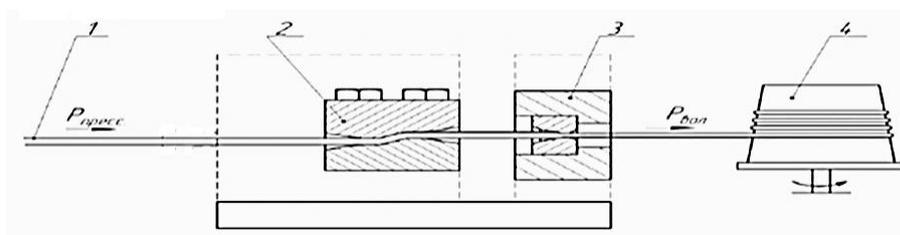


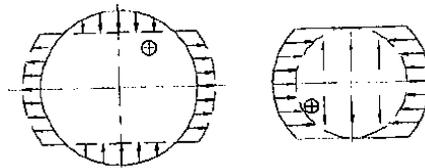
Рисунок 1.4 – Схема совмещенного процесса прессование – волочение:  
1 - проволока; 2 – равноканальная ступенчатая матрица; 3- волока; 4- вытяжной барабан

Методы ИПД не всегда удобны при производстве длинномерных изделий из-за несовершенства оснастки и сложности встраивания в действующее оборудование [60].

### 1.5.2 Характеристика комбинированных процессов и их применение для изготовления проволоки

Перспективным направлением повышения эффективности волочения проволоки является совмещение базовых способов ОМД с образованием комбинированных технологических процессов. Базовые процессы (прокатка, прессование, волочение, осадка) характеризуются определенной схемой напряженно-деформированного состояния с одной из основных схем деформации. Под комбинированным процессом понимают новый процесс, образованный в результате объединения базовых операций, в котором происходит интегральное наложение нагрузок в очаге деформации, в отдельных случаях со сменой течения металла [20, 61, 62, 63, 64]. Подобное объединение разных способов ОМД в

единый технологический процесс для сталепроволочного производства представляет особый интерес. Происходящая в этом случае смена схем деформации позитивно влияет на напряженно-деформированное состояние заготовки: смена направления течения металла, появление новых плоскостей скольжения способствуют повышению пластических характеристик проволоки. Комбинирование позволяет существенно расширить технологические возможности традиционных способов обработки металлов давлением т.к. в результате получается новый интегральный процесс, обладающий в силу синергетического эффекта новым комплексом свойств. Под синергетическим эффектом (от греческого «синергос» — совместно действующий) подразумевается комбинированное действие различных процессов, суммарный эффект которых превышает действие, оказываемое каждым процессом в отдельности.



Двухвалковая клеть

Монолитная волока

Рисунок 1.5 - Схема распределения деформаций по сечению проволоки

Схема, приведенная на рисунке 1.5, поясняет процессы, происходящие при комбинированном наложении нагрузки. При плющении круглой заготовки на гладких валках образуются потоки вытеснения металла в поперечном направлении, которые находятся преимущественно под действием растягивающих напряжений. В процессе волочения плющенной заготовки в монолитной волоке потоки вытеснения сменяются на потоки сжатия, а потоки сжатия – на потоки вытеснения. Последовательное изменение схемы деформации, сопровождаемое взаимнообратным течением металла, инициирует эффект Баушингера, использование которого даже на промежуточных протяжках способствует снижению

сопротивления пластической деформации и улучшению пластических свойств стальной проволоки [55, 58, 65].

Следует отметить, что комбинированные процессы получили ограниченное применение, преимущественно при производстве изделий из высокопластичных металлов, например, алюминия и меди. Однако в настоящее время ведутся работы в направлении использования таких способов и для изготовления стальной проволоки, например, разработанный в МГТУ непрерывный метод комбинированной деформационной обработки волочением углеродистой стальной проволоки со знакопеременным изгибом с кручением, рисунок 1.6 [66].

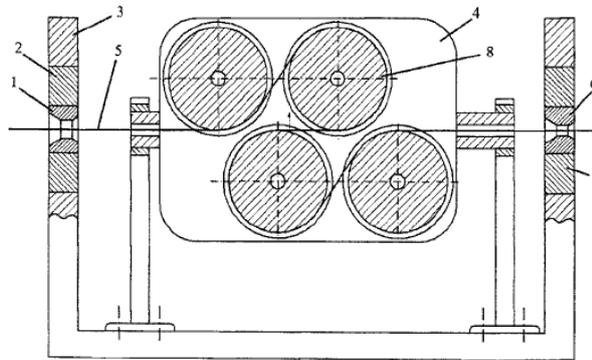


Рисунок 1.6 – Устройство для реализации непрерывного метода получения УМЗ проволоки: 1, 6 – волокни; 2, 7- волокодержатели; 3 – рама; 4 – приводной механизм; 5-заготовка; 8-обводные ролики

За рубежом также большое внимание уделяется разработке процессов с комбинированным нагружением. Свидетельством актуальности является информация, представленная в работе [67], в которой на основании численной модели и экспериментального исследования показано, что волочение через чередующиеся монолитные волокни с круглым и некруглым рабочим каналом (процесс non-circular drawing или NCD, рисунок 1.7) позволяет достигнуть большей равномерности распределения пластической деформации по сечению проволоки в сравнении с обычным волочением. Из-за изменения геометрии канала волок при NCD-волочении происходит комбинированное нагружение с

чередованием растягивающих и сжимающих напряжений. Несмотря на то, что приведенные результаты исследований касаются производства среднеуглеродистой проволоки и имеют цель за счет накопления энергии деформации ускорить сфероидизацию перлита при конечной операции отжига, авторы отмечают, ссылаясь на работу [68] о возможности получения высокопрочной углеродистой проволоки способом NCD.

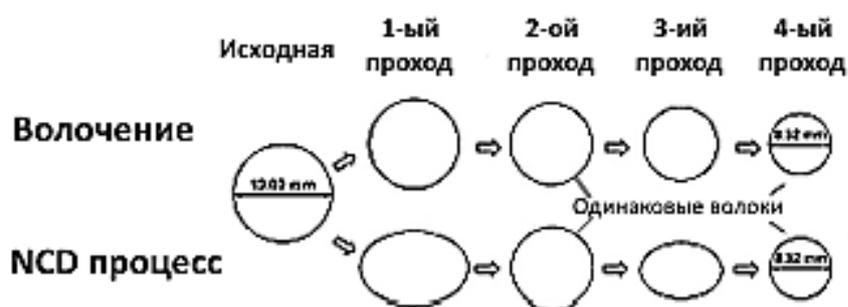


Рисунок 1.7 – Схема обычного волочения и процесса NCD

Таким образом, в настоящее время разрабатываются специальные ресурсосберегающие способы ОМД, позволяющие интенсифицировать процесс производства проволоки и повысить ее качественные и эксплуатационные характеристики. Эти способы преимущественно строятся на базе традиционного волочения, что вполне объяснимо, принимая во внимание его теоретическую и практическую изученность, простоту реализации и наличие разнообразного оборудования. Поэтому дальнейшее эволюционное развитие процесса волочения возможно за счет комбинирования его со способами ОМД, имеющими другую схему напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. В связи с этим для повышения комплекса свойств стальной проволоки необходимо найти такой вариант совмещения, при котором будут сведены к минимуму, как недостатки традиционного волочения, так и совмещаемого с ним другого базового способа ОМД, а преимущества их будут использованы максимально.

### 1.5.3 Резервы интенсификации процесса и энергосбережения при комбинированном волочении

В комбинированных процессах появляется возможность реализовывать более высокие единичные деформации, что должно учитываться при построении маршрутов волочения.

Как известно маршрут волочения представляет собой ряд последовательных операций протяжки через волокни, при которых поперечное сечение проволоки постепенно уменьшается от начального диаметра до конечного. Его расчёт заключается в определении единичных деформаций для каждой протяжки. Соответственно число протяжек зависит от начального и конечного диаметра проволоки (т.е. суммарной деформации) и выбранных единичных обжатий, формы поперечного сечения и др. факторов [69]. Существуют различные способы расчета маршрутов волочения проволоки, их анализ выполнен в работе [70]. Наиболее широкое распространение получили убывающие маршруты, когда наибольшее обжатие дают на первом проходе, пока прочность металла еще не высока, и затем постепенно уменьшают их на последующих проходах. Высокое обжатие на первом проходе ограничивает неоднородную деформацию в поверхностных участках проволоки и влияет и на распределение напряжений в проволоке таким образом, что в центральных слоях не возникают растягивающие напряжения. Это положительно сказывается на проволоке при волочении на последующих проходах [31]. На практике первоначально применяют единичные обжатия от 22 до 17% до достижения суммарного порядка  $65 \div 75\%$ , затем единичные обжатия снижают до  $16 \div 12\%$ . В зарубежной практике при расчете маршрутов волочения принято учитывать значения рабочего угла волокни, т.к. несоблюдение этого требования может привести к снижению качества проволоки, в частности, к потере пластичности из-за появления растягивающих напряжений в поверхностных слоях проволоки. Поэтому для уменьшения неравномерности деформации по сечению при волочении необходимо ис-

пользовать волокни с определенными углами рабочего конуса, соответствующими установленным единичным степеням деформации [9, 31, 71, 72, 73, 74].

Волочение с малыми единичными деформациями приводит к увеличению числа протяжек, в этом случае технологически трудно обеспечить сохранение волоочильной смазки и получение проволоки с качественной поверхностью. Поэтому для повышения эффективности волочения необходимо увеличение единичных деформаций [75]. По Г.Э. Аркулису [76] в зависимости от угла волокни и коэффициента трения могут быть достигнуты весьма высокие единичные деформации (коэффициент вытяжки  $\mu$  более 2). При идеальных условиях волочения, когда коэффициент трения близок к нулю и осуществляется качественное охлаждение волок и проволоки, предельная единичная деформация может достигать 66% ( $\mu = 3$ ). По данным И.А. Юхвеца и М.Н. Петрова максимальное единичное обжатие может достигать 60% [69]. Анализ, выполненный в работе [77], подтверждает, что при волочении в случае отсутствия внешнего трения предельный коэффициент вытяжки  $\mu$  находится в диапазоне от 2 до 2,7. Все авторы делают вывод, что применяемые в практике волочения единичные обжатия значительно меньше максимально возможных. Величина единичных обжатий ограничивается пластичностью металла, его структурой, предшествующим наклепом, остаточными напряжениями и условиями деформации (волоочильный инструмент, смазка, температура, скорости, способ волочения и другие факторы).

Комбинирование традиционного волочения с другим способом ОМД позволяет существенно увеличить допустимую степень единичной деформации и уменьшить число переходов, интенсифицируя тем самым технологический процесс. Известно, что с точки зрения затрат энергии волочение с большими обжатиями за меньшее число проходов более экономично, чем волочение с малыми обжатиями за большее число проходов [78]. Анализ, выполненный в работе [79], свидетельствует, что при традиционном волочении загрузка двигателей волоочильной машины характеризуется достаточно низким КПД, и мощность оборудования позволяет вести волочение с более высокими, чем принято,

единичными обжатиями. Кроме того, имеется дополнительный ресурс оптимизации энергозатрат за счет правильного подбора геометрии волок, повышения единичных обжатий и улучшения контактного трения в рабочей зоне волокна [80, 81].

С точки зрения рациональной загрузки двигателей волочильной машины и оптимизации энергозатрат при проектировании комбинированного процесса необходимо знание его силовых параметров – напряжения и усилия волочения через сдвоенный инструмент. Напряжение и усилие волочения зависят от ряда технологических факторов: прочностных свойств деформируемого металла, величины частной и суммарной деформации, геометрии инструмента, контактного трения между металлом и инструментом, вида подмазочного слоя и типа смазки, противонапряжения, скорости волочения, масштабного фактора. Только на преодоление сил трения даже в случае использования качественной волочильной смазки затрачивается 30 – 50% общего усилия волочения. Но именно силовые условия волочения являются одной из основных характеристик технологического процесса т.к. определяют стабильность пластического формоизменения и производительность волочильного стана, расход энергии и требуемую мощность оборудования [78, 82, 83, 84].

### **1.6 Моделирование процессов пластической деформации с помощью компьютерных прикладных программ**

Компьютерное моделирование позволяет детально исследовать процесс пластического течения металла в условиях деформации, напряженно-деформированное состояние, подобрать оптимальную конструкцию деформирующего инструмента. К числу наиболее известных компьютерных пакетов прикладных программ, относятся ABAQUS, FORGE, QFORM и др. Несмотря на достоинства и возможности перечисленных программ, в последние годы наиболее широко стало применяться моделирование в программе DEFORM-3D, которая предоставляет широкие возможности для анализа напряженно-

деформированного состояния и течения металла в очаге деформации, распределения полей напряжений и деформаций, получать наглядное трёхмерное изображение модели. Программный комплекс DEFORM-3D, в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ), разработан компанией Scientific Forming Technology Corporation (США) и предназначен специально для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением. Результаты включают в себя графики усилия, поля распределения напряжений, деформаций и температуры, причем они могут быть представлены как графически, так и в виде таблиц.

### **1.7 Цель и задачи исследования**

В сталепроволочном производстве способ ОМД является главным фактором, определяющим как свойства и качество проволоки, так и затраты на ее изготовление. Промышленное производство стальной проволоки основано на волочении в монолитных волокнах. Этот способ ОМД наиболее эффективен, теоретически изучен и достаточно прост, а для его реализации имеется промышленно изготавливаемое высокоскоростное оборудование, инструмент, смазочные материалы и т.д. Проволока, изготовленная волочением, отличается большой точностью геометрических размеров и высоким качеством поверхности. Однако однопоточное течение металла и действие растягивающих напряжений в очаге деформации, высокое контактное трение, а также деформационное старение металла вызывают интенсивное понижение пластичности проволоки.

Из альтернативных методов распространение получило только волочение через неприводные роликовые волокна, которое достаточно широко используется для производства низкоуглеродистой проволоки и, особенно, холоднодеформированной арматурной низкоуглеродистой проволоки. Более благоприятная схема НДС, определяемая преимущественно напряжениями сжатия, использование активных сил трения положительно сказывается на деформируемости и пластичности проволоки.

В настоящее время распространение получило еще одно направление изготовления проволоки – создание комбинированных процессов, объединяющих способы обработки металлов давлением с различной схемой напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. Смена направления течения металла, появление новых систем скольжения способствуют повышению пластических характеристик проволоки. В результате получается новый интегральный процесс, обладающий новым комплексом свойств. При комбинированном нагружении за счет изменения схем деформации появляется возможность управления напряженно-деформированным состоянием заготовки и получения свойств проволоки, которые недоступны при традиционном способе.

Создание комбинированных высокоэффективных ресурсосберегающих технологий волочения стальной проволоки, обеспечивающих ее высокие качественные характеристики, является сложной и актуальной задачей. Для разработки эффективного метода изготовления углеродистой проволоки целесообразно использовать в качестве базовой операцию волочения, комбинируя ее с другими видами деформирования для формирования сложного НДС и управления им для получения заданных механических свойств. Однако для промышленной реализации комбинированной технологии волочения необходимо исследование напряженно-деформированного состояния, как определяющего пластичность и деформируемость металла, а также разработки технологии и методики определения силовых параметров процесса, выполнения анализа энергозатрат, разработки требований к оборудованию.

Основываясь на анализе литературных данных, обозначим **цель работы как повышение эффективности процесса волочения стальной углеродистой проволоки на основе разработки модульно-комбинированного способа с применением роликовых и монолитных волок.**

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обоснование и разработка модульно-комбинированного способа волочения с применением роликовых и монолитных волок, обеспечивающего повышенные механические свойства проволоки.

2. Исследование напряженно-деформированного состояния при модульно-комбинированном волочении и особенностей волочения проволоки круглого сечения из фасонного профиля.

3. Экспериментальные исследования процесса комбинированного волочения в модуле «роликовая волока-монолитная волока».

4. Разработка рекомендаций по применению модульно-комбинированного волочения и оценка эффективности его использования при промышленном производстве проволоки из углеродистой стали.

## 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МОДУЛЬНО-КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1 Выбор варианта комбинированного волочения

Возможность реализации комбинированного нагружения с использованием традиционных процессов ОМД изучалась с помощью компьютерного моделирования. Учитывая достаточность ресурсов для решения поставленных задач, а также удобный интерфейс, позволяющий получать выходные данные в виде графиков, изображений с высокой точностью вычислений, в данной работе исследования проводились в программном комплексе DEFORM-3D. Геометрические модели прокатных валков, неприводных роликов и монолитных волок были созданы с применением программы трехмерного моделирования КОМПАС 3D. Затем они были экспортированы в предпроцессор программы DEFORM-3D и аппроксимированы сеткой конечных элементов. С помощью моделирования изучены варианты получения промежуточных профилей с различным заполнением калибра и их волочения в круг через монолитную волоку.

Для решения задач были приняты следующие допущения:

- процесс является симметричным;
- заготовка цилиндрическая, материал проволоки – пластический, изотропный и однородный;
- рабочий инструмент абсолютно жесткий, теплообмен между проволокой и инструментом не учитывается;
- геометрия волоки по ГОСТ 9453-75 с полууглом рабочего конуса волоки  $\alpha = 6^\circ$ , диаметр роликов 200 мм;
- закон трения Амонтона-Кулона постоянен на всей области контакта, величина коэффициента трения в волоке 0,08 и роликах 0,003;
- скорость волочения — 1,0 м/с.

В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь AISI 1070 из стандартной библиотеки «DEFORM» (аналог стали марки 70). Длина проволо-

ки составляла 100 мм, что обеспечивало обработку в установившейся фазе с наличием внешних жестких зон. Сетка с ячейками тетраэдрической формы в количестве 75000 конечных элементов генерировалась в препроцессоре «DEFORM» («tetrahedral mesh»). Для изучения течения металла в очаге деформации в продольном сечении проволоки нанесли координатную сетку с ячейкой 1,0 мм.

Для оценки адекватности модели волочения были сопоставлены величины усилия волочения при моделировании в «DEFORM-3D», полученные расчетным путем и измеренные в условиях производства на волочильной машине KGT47/9. Полученные значения усилия волочения проволоки с диаметра 5,60 мм на диаметр 5,00 мм и с диаметра 4,50 на диаметр 4,00 мм с достаточно высокой точностью совпадают: максимальная разница составила 5,45% и 7,27% соответственно, что позволяет использовать полученные модели для изучения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

### **2.1.1 Моделирование процесса волочения в монолитных волокнах по схеме «круг-овал-круг» и анализ напряженно-деформированного состояния**

Возможность использовать чередование растягивающих и сжимающих напряжений при волочении стальной проволоки способом NCD, т.е. по схеме «круг-овал-круг» для получения равномерной пластической деформации по сечению и мелкозернистой структуры свидетельствуют, что получить в какой-то степени комбинированное нагружение можно в рамках одного способа [67]. Взяв за основу это формоизменение, выполним моделирование и рассмотрим возникающее при этом напряженно-деформированное состояние при волочении в монолитных волокнах и неприводных роликовых волокнах.

На рисунке 2.1 приведены эпюры распределения средних напряжений и значений критерия разрушения Cockroft-Latham в поперечных сечениях при во-

лочении круга в овал в монолитной волоке с овальным рабочим конусом и затем овала в круг в стандартной монолитной волоке.

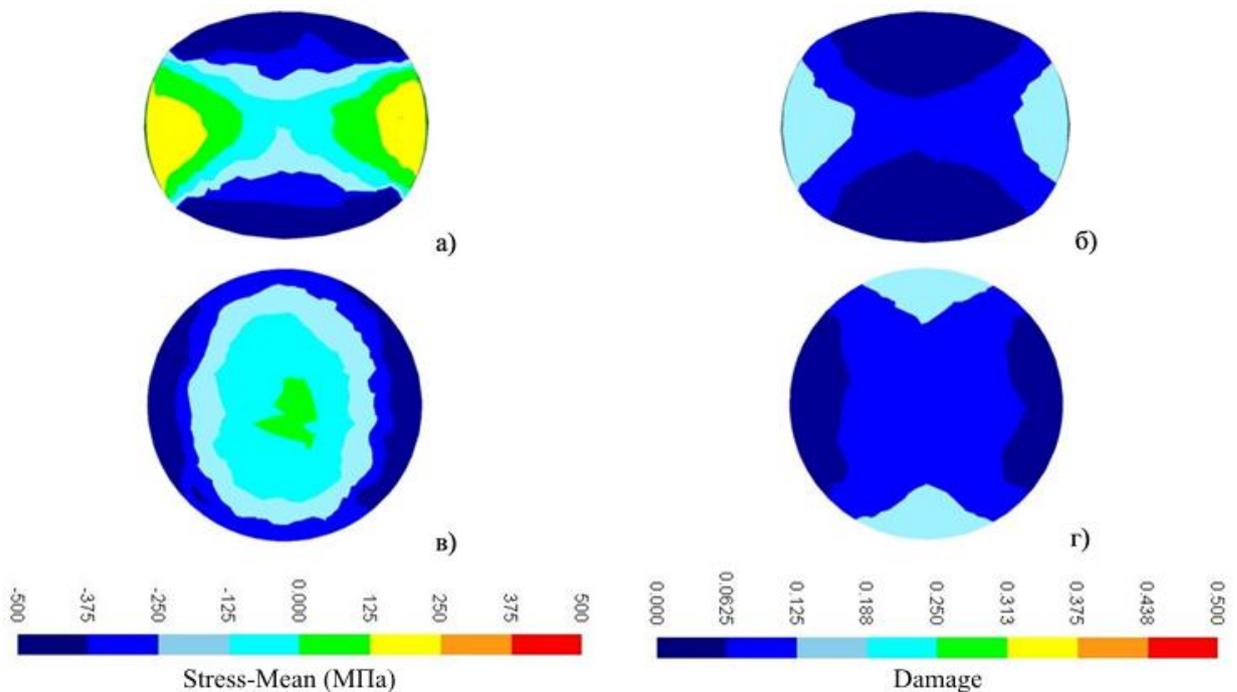


Рисунок 2.1 – Напряженно-деформированное состояние в овальном и круглом конусе монолитной волоки (а, в) и распределение критерия Cockroft-Latham (б,г)

При волочении круглого профиля в овальный реализуется сложная схема напряженно-деформированного состояния, для которой характерна явно выраженная неравномерность деформации. Отмечены достаточно высокие сжимающие напряжения по толщине овального профиля достигающие  $500 \text{ Н/мм}^2$ . До момента заполнения канала волоки по ширине овала имеется зона внеконтактной деформации. Для нее характерна достаточно большая область растягивающих напряжений до  $250 \text{ Н/мм}^2$ , которая не исчезает даже после заполнения овального канала волоки по ширине.

Но при волочении в следующей волоке овального профиля в круглый схема напряженно-деформированного состояния вполне благоприятная и определяется сжимающими напряжениями. Лишь в центральной области есть небольшая область с растягивающими напряжениями, по-видимому, от вытяги-

вающего усилия создаваемого волочильным барабаном. Значения критерия разрушения Cockroft-Latham невелики в обеих волоках.

Следовательно, моделированием подтверждается, что при волочении способом NCD существует возможность создания комбинированного нагружения. Но при этом остаются все недостатки присущие волочению: монотонность деформации, определяемая однопоточным течением металла, постоянное действие растягивающих напряжений в очаге деформации, высокое контактное трение. Кроме того, для реализации данного способа волочения необходим сложный волочильный инструмент – волоки с фасонной формой рабочего канала.

### **2.1.2 Моделирование процесса волочения в роликовых волоках по схеме «круг-овал-круг» и анализ напряженно-деформированного состояния**

Характерная для волочения в роликовых волоках картина распределения напряжений и величины критерия напряжения одинакова и приведена на рисунке 2.2.

При формировании овального профиля в калибре валков в зоне свободного уширения также образуются растягивающие напряжения, но область их мала по сравнению с волочением и ограничивается поверхностью кромок. По величине они примерно одинаковы как при волочении в монолитных волоках, так и в роликовых и не превышают  $250 \text{ Н/мм}^2$ . Но, как показывает анализ, выполненный в работах [30, 85, 86], продольные растягивающие напряжения во внеконтактных областях в разъемах калибров увеличивают вероятность возникновения разрушений в этих местах. Для всего остального сечения характерны сжимающие напряжения и по сравнению с волочением обеспечивается более благоприятная схема напряженного состояния в очаге деформации, способствующая повышению деформируемости металла.

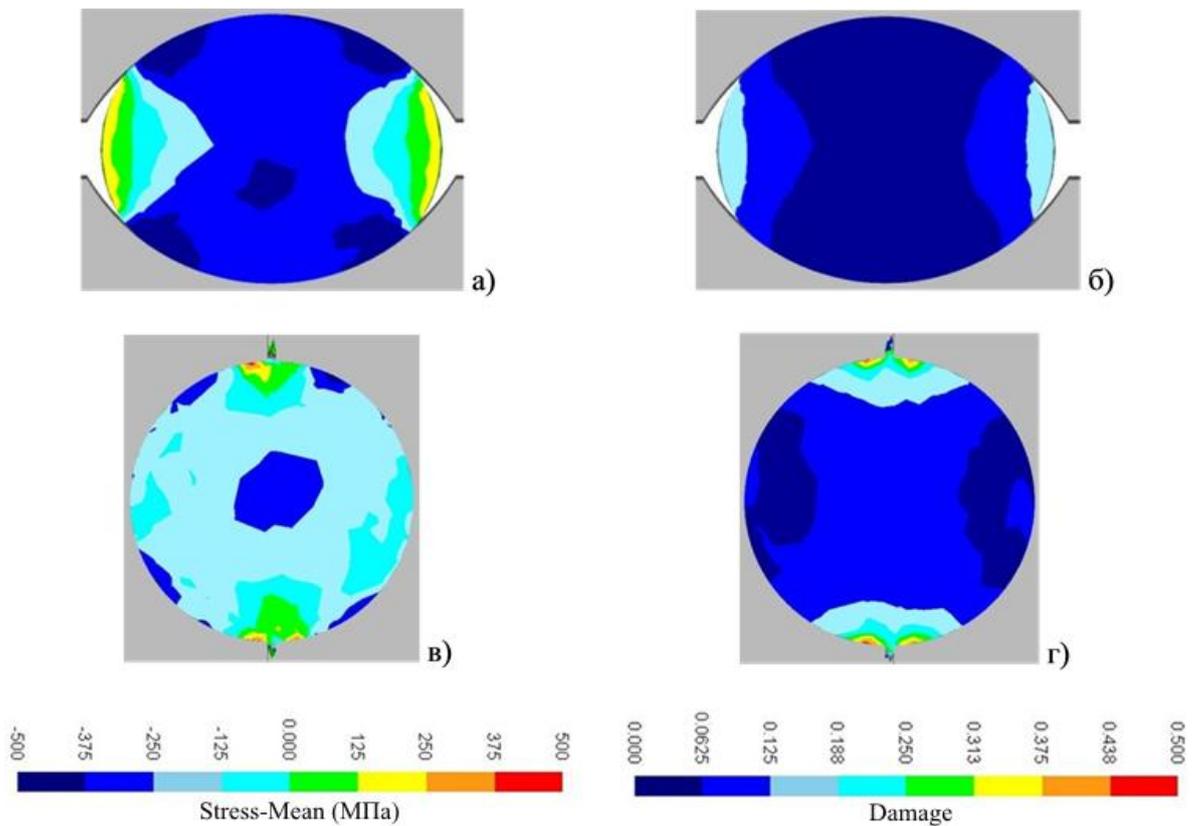


Рисунок 2.2 – Напряженно-деформированное состояние в неприводных валках (а, в) и распределение критерия Cockroft-Latham (б, г)

Исследования напряженно-деформированного состояния при волочении металла в роликовой волоке, выполненные на АО «БМК» с помощью метода нанесения координатных сеток, показывают, что в центральной части поперечного сечения имеется развитая область, в которой ячейки сетки подвергаются интенсивному обжатию. Установлено, что из-за всестороннего обжатия в роликовой головке в металле возникают сжимающие напряжения, небольшие области растяжения остаются только в местах разъемов валков. Причину возникновения продольных растягивающих напряжений в этих областях связывают с тем, что при прокатке через приводные валки или при волочении в роликовой волоке значительные смещенные объемы металла, запертые в замкнутом пространстве калибра, устремляются в вытяжку, увлекая за собой внеконтактные участки, расположенные в разъемах калибра. Важно, что эти два способа ОМД обеспечивают в металле состояние всестороннего сжатия почти по всему очагу деформации. Проволока, протянутая через роликовые волокна, обладает более

равномерным распределением твердости по поперечному сечению и низким уровнем остаточных напряжений [36, 37].

Кроме того при волочении в роликовых волоках существует необходимость точной калибровки валков и дозированной подачи металла в калибр т.к. возможно образование заусенцев в местах разъемов калибров, особенно при формировании круглого профиля. Эти участки уже со значительными растягивающими напряжениями и разрушение здесь более вероятно, чем в первой паре валков при формировании овала т.к. там большая область для уширения а во второй паре валков ее нет. Это подтверждается высокими значениями критерия Cockroft-Latham. Отсюда следует, что и при прокатке и волочении в неприводных валках также есть возможность чередования схем сжатия и растяжения. Недостатки способов – области высокого растяжения в разъемах, образование заусенцев, сложная калибровка и невысокая точность геометрических размеров получаемой проволоки в сравнении с традиционным волочением.

### **2.1.3 Напряженно-деформированное состояние при изготовлении проволоки способом «прокатка-волочение»**

Обеспечить более эффективное комбинированное воздействие на металл и устранить указанные выше недостатки можно при совмещении этих стандартных процессов и за счет немоного воздействия расширить возможности как волочения в монолитных волоках, так и волочения в неприводных роликах. То есть для уменьшения растягивающих напряжений овальный профиль изготавливать в роликовой волоке, а волочение овала в круг осуществлять в монолитной волоке. Объединив положительные стороны обоих способов волочения, обеспечим чередование различных схем напряженно-деформированного состояния с периодической сменой зон растяжения и сжатия, причем зоны растяжения будут менее значительные, чем при волочении в монолитной волоке, и к микроразрушениям не приведут.

Выполним компьютерное моделирование процесса прокатки заготовки в двухвалковой клетке с последующим волочением плющеной полосы в монолитной волоке и проведем сравнительный анализ напряженного состояния этого способа деформации и стандартного волочения проволоки того же диаметра через монолитную волоку [87].

Анализ полей действующих напряжений в продольных сечениях очага деформации, представленных на рисунке 2.3, показал, что, несмотря на несколько более интенсивную проработку сечения проволоки при стандартном волочении в монолитных волоках, во внеконтактных областях действуют более значительные растягивающие напряжения, чем в случае «прокатка-волочение», что увеличивает вероятность повреждения поверхностного слоя проволоки.

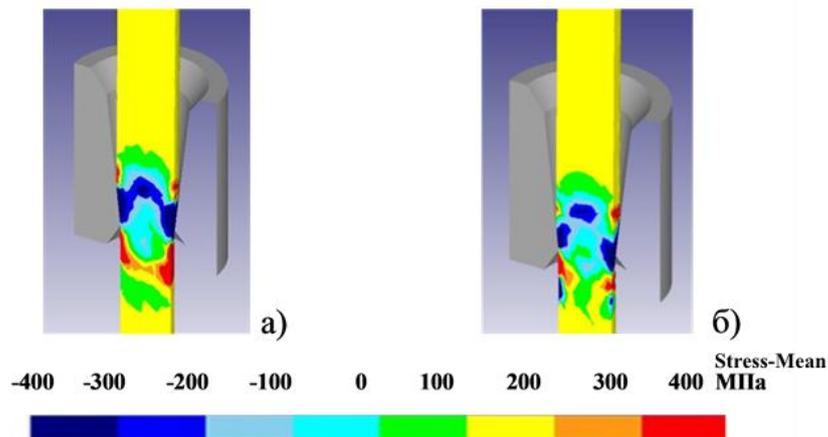


Рисунок 2.3 – Напряженное состояние проволоки при волочении в монолитных волоках (а) и при совмещенном процессе «прокатка-волочение» (б)

Установлено, что волочение плющеной полосы через конус монолитной волоки сопровождается значительным давлением кромок на стенки инструмента. Это давление на волочильный инструмент по величине сопоставимо с прочностью твердого сплава при изгибе, характеризующей сопротивление нормальным растягивающим напряжениям при нагружении [87, 88], и может привести к разрушению волоки.

Волочение при этом характеризуется повышенной неравномерностью деформации по сечению проволоки. Неравномерность деформации при волочении плющеной полосы в монолитной волоке подтверждена в ходе промышленного эксперимента, проведенного одновременно с моделированием, результаты которого подробно изложены в главе 4. Поэтому для большей равномерности деформации промежуточная полоса должна изготавливаться с многосторонним обжатием, например, в многовалковых калибрах. В многовалковых калибрах происходит осесимметричное воздействие на проволоку по периметру, что оказывает положительное влияние на ее качество.

## **2.2 Определение рациональной формы промежуточного профиля**

Для выбора рациональной формы получаемого промежуточного профиля и соответствующей ему калибровки валков выполнен анализ влияния формы поперечного сечения на напряженное состояние в конусе монолитной волоке при волочении в круг [89].

С этой целью выполнено моделирование четырех вариантов изготовления круглой проволоки по схемам: круг – овал – круг; круг – треугольник – круг; круг – квадрат – круг, круг – шестиугольник – круг.

Приняты следующие условия: промежуточные профили (овальный, треугольный и квадратный и шестиугольный), равновеликие по площади, протягиваются в монолитной волоке в круглую проволоку одного и того же диаметра. В этом случае частные и суммарные деформации для всех вариантах одинаковы. Для каждого варианта выполнялся анализ напряжённого состояния в металле и в волоке. В качестве оптимального принят тот вариант, где напряжения в металле и в инструменте ниже.

Напряженное состояние в очаге деформации при волочении промежуточных профилей в монолитной волоке приведено на рисунке 2.4. Отмечено, что во всех четырёх вариантах наблюдается интенсивная проработка сечения протягиваемой полосы в монолитной волоке. Однако при волочении треугольного

и овального профилей на выходе из деформационной зоны наблюдается рост напряжения волочения, причем для овального профиля оно выше.

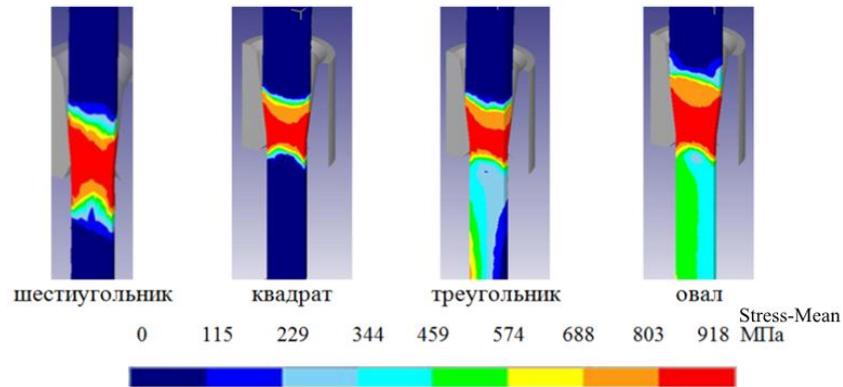


Рисунок 2.4 – Напряженное состояние при волочении промежуточных профилей в круглой монолитной волоке

Вероятность разрушения проволоки для всех вариантов волочения минимальна, т. к. определенные при моделировании величины критерия Cockroft-Latham не превышают критических значений, практически одинаковы при волочении квадратного и треугольного профилей и незначительно выше в случае волочения овального профиля и находятся в интервале 0,21-0,36.

В результате моделирования установлено, что в инструменте создается сложное объемно-напряженное состояние, которое характеризуется высокими контактными нагрузками, растягивающими напряжениями и силами трения. Отмечено, что наибольших значений напряжения в стенках монолитной волоки достигают при волочении овального профиля, несколько снижаются при волочении треугольного профиля и минимальны в случае волочения квадратного и шестиугольного профиля, приближаясь к варианту стандартного волочения «круг в круг». Следовательно, с увеличением числа сторон протягиваемого промежуточного профиля градиент напряжений в волочильном инструменте будет уменьшаться, рисунок 2.5. Напряжение в стенках волоки при волочении овального и треугольного профилей превышает прочность при изгибе твердого сплава ВКЗМ и приближается к аналогичной характеристике для сплава ВК6М.

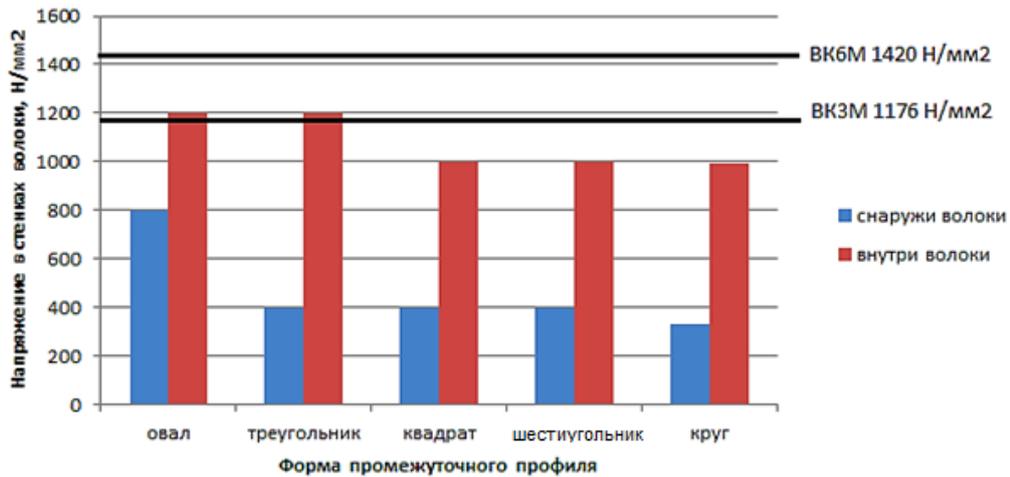


Рисунок 2.5 – Напряжение в стенках волокна при волочении профилированной заготовки в круг

Поэтому при изготовлении промежуточной полосы в традиционных 2-х или 4-х валковых неприводных клетях рациональной формой промежуточного профиля является невыполненный квадрат.

### 2.3 Проработка сечения проволоки при традиционном и комбинированном волочении

Одним из условий получения качественной проволоки является проработка ее сечения. В противном случае возникающая неравномерность деформации приводит возникновению значительных остаточных напряжений, способствующих образованию трещин, снижению пластичности и деформируемости проволоки. Известно, что волочение в монолитных волоках не обеспечивает полной проработки сечения проволоки. По этой причине в осевой области проволоки возникают растягивающие напряжения и тем более значительные, если зона пластической деформации в рабочем конусе волокна, обусловленная сжимающими напряжениями, не достигает оси, рисунок 2.6. Вследствие этого при волочении накапливается высокое растягивающее напряжение вдоль осевой линии, которое может спровоцировать разрушение [74, 90, 91, 92, 93, 94].

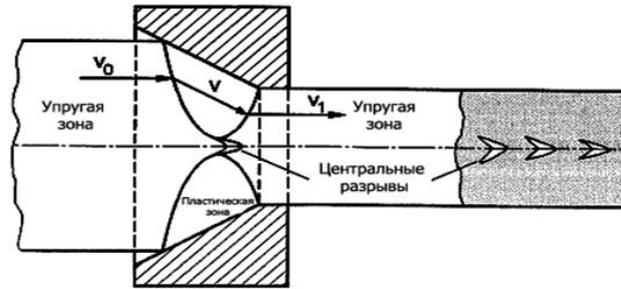


Рисунок 2.6 – Формирование центральных надрывов при неполном про-  
никновении деформации по сечению

Распределение внутренних напряжений в тянутой проволоке зависит от комбинации угла волокна и обжатия в каждой протяжке. В зарубежной практике распространение пластической зоны по высоте очага деформации оценивают по величине параметра  $\Delta$ , который рассчитывается как

$$\Delta = \frac{\alpha}{\delta} (1 + \sqrt{1 - \delta})^2, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  - полуугол рабочего конуса волокна, рад;

$\delta$  – обжатие за проход, для круглого профиля;

$$\delta = 1 - \left( \frac{d_i}{d_j} \right)^2. \quad (2.2)$$

Деформацию принято считать равномерной при значении  $\Delta$  не превышающим 1,5. Поэтому для снижения неравномерности деформации необходимо или уменьшать рабочий угол волокна или увеличивать обжатие.

При волочении проволоки в монолитной проволоке радиальные напряжения оказывают большее влияние на поверхностные слои, чем на центральные, что и объясняет более интенсивную проработку поверхностных слоев [95]. Накопление деформации в поверхностном слое проволоки при волочении в монолитных проволоках подтверждают исследования в работе [67]. По данным [93] при воло-

чении в первую очередь упрочняются поверхностные слои проволоки, а в случае ее прокатки – наоборот, центральные слои получают большее упрочнение. Большая проработка центральной части полосы при протяжке в многовалковых клетях подтверждается как теоретическими, так и экспериментальными исследованиями [36, 37]. Компьютерное моделирование также свидетельствует о проработке поверхностных слоев в монолитной волоке и центральных – в роликовой волоке, рисунок 2.7.

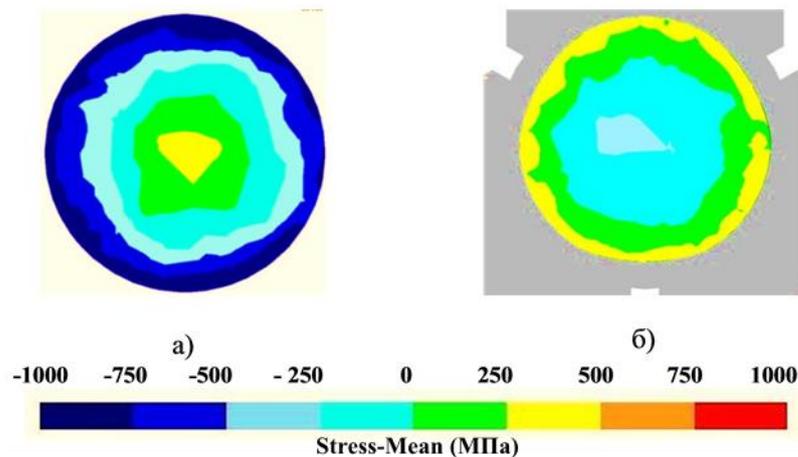


Рисунок 2.7 – Проработка поверхностных слоев в монолитной волоке (а) и центральных – в роликовой волоке (б)

Следовательно, объединив волочение в неприводной клети и волочение в монолитной волоке можно за счет более глубокой деформации обеспечить полную проработку сечения и тем самым повысить деформируемость и снизить уровень остаточных напряжений в проволоке. На рисунке 2.8 приведено распределение напряжений в поперечном сечении очага деформации при стандартном волочении через монолитную волоку и при комбинированном волочении последовательно через роликовую, а затем монолитную волоку. При волочении через монолитную волоку в поверхностных слоях действуют напряжения сжатия, а остальная часть сечения проволоки (примерно 80%) находится под воздействием растягивающих напряжений, достигающих максимальных значений в центральных слоях, рисунок 2.8 а. Распределение напряжений при

комбинированном волочении показано на рисунке 2.8 б, в. В роликовой волоке основное сечение полосы (примерно 90%) находится под напряжениями сжатия и лишь в поверхностных приконтактных областях напряженно-деформированное состояние определяется растягивающими напряжениями. При последующем волочении полосы, полученной в роликовой волоке, через монолитную волоку в центральной области сечения проволоки появляются растягивающие напряжения, но величина их незначительна. Большая часть сечения (до 75%) находится под действием напряжений сжатия.

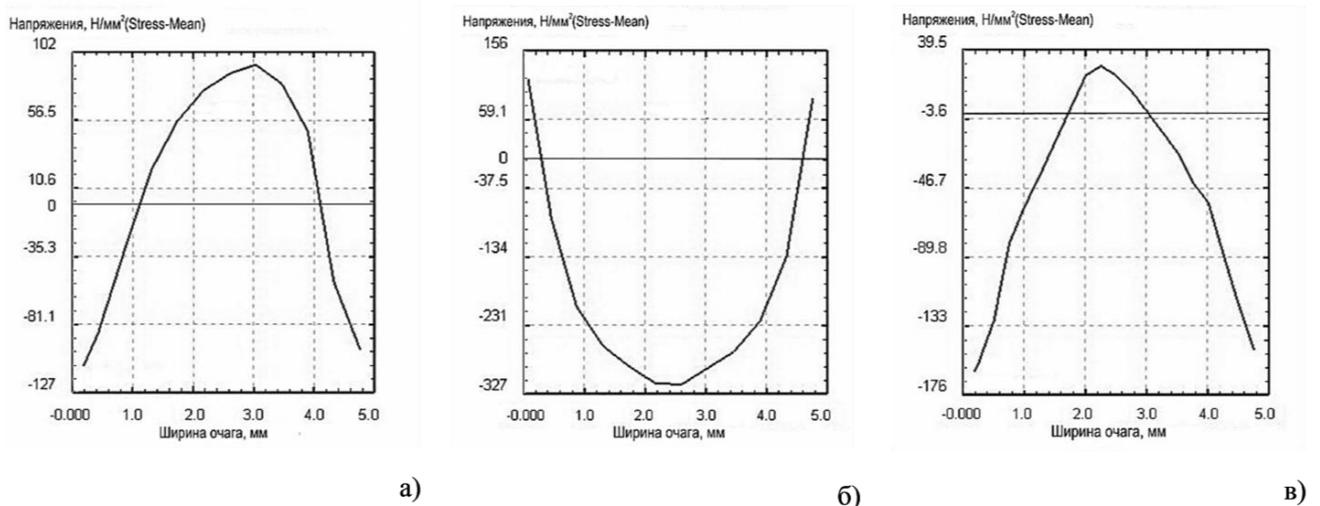


Рисунок 2.8 – Распределение напряжений в поперечном сечении очага деформации при волочении в монолитной волоке (а) и при комбинированном волочении (б- в роликовой волоке), (в – в монолитной волоке)

Таким образом, при комбинированном волочении квадратного промежуточного профиля достигается более полная проработка сечения протягиваемой проволоки. Такая картина характерна для комбинированного волочения независимо от калибровки и количества валков в роликовой волоке, рисунок 2.9. Это означает, что можно применять роликовые волокна любой конструкции.

Таким образом, комбинированное волочение в сумме обеспечивает более полную проработку сечения проволоки, чем обычное волочение. Это позволяет подавить образование локальных областей, в которых происходит накопление внутренних дефектов и микротрещин, а за счет повышения уровня сжимающих

напряжений, при минимизации растягивающих, будет резервом повышения деформируемости и пластичности металла.

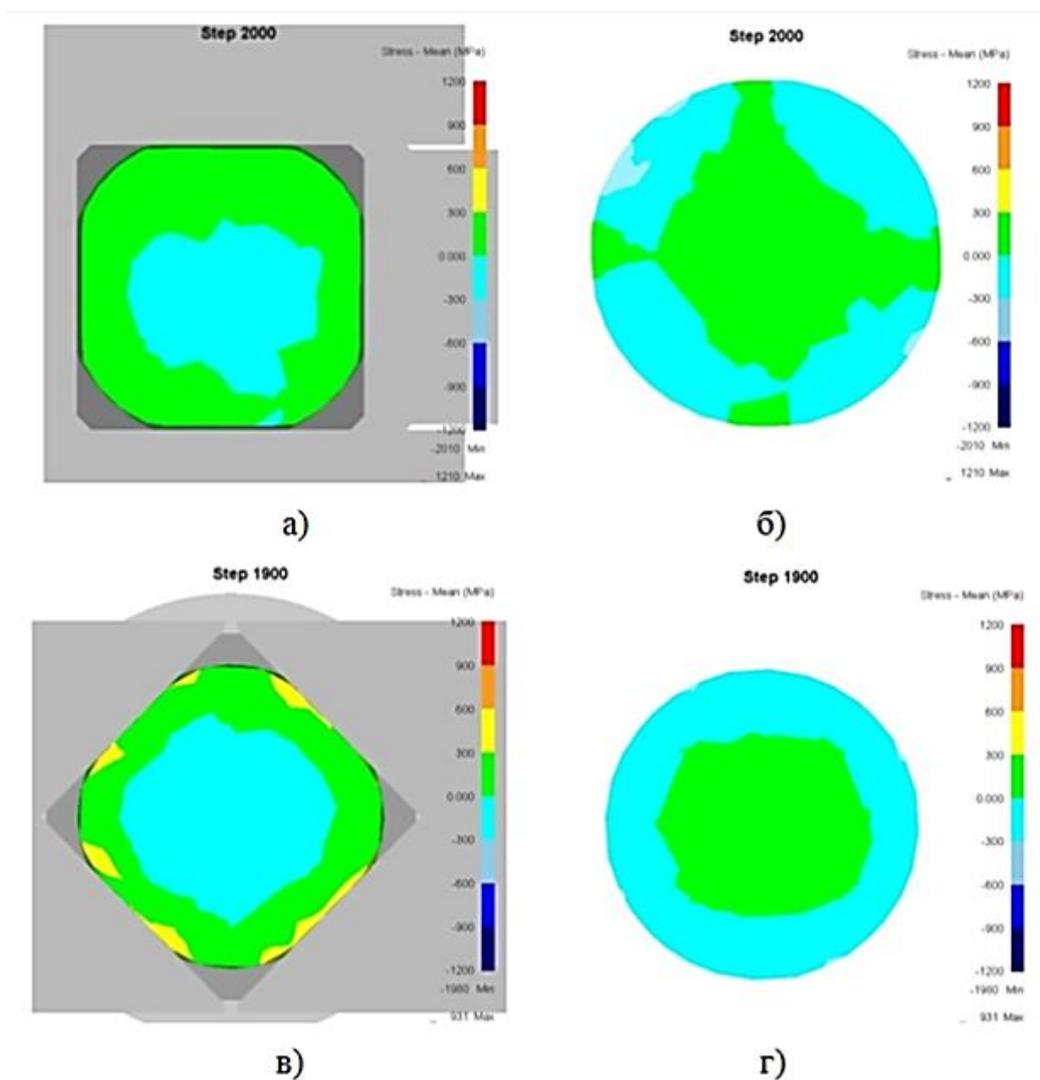


Рисунок 2.9 – Распределение полей напряжений при комбинированном волочении в 4-х роликовой – монолитной волоке (а, б) и 2-х роликовой волоке – монолитной волоке (в, г)

#### 2.4 Выбор способа комбинированной деформации

В результате компьютерного моделирования установлено, что совмещение волочения в роликовой и монолитной волоке позволяет за счет более глубокой интенсивной деформации улучшить проработку сечения проволоки, осуществ-

лечь ее изготовление с применением комбинированного нагружения. При волочении в роликовой волоке происходит более полный охват проволоки в калибре и уменьшается величина растягивающих напряжений в разъемах калибров [30, 86]. Уширение при волочении в многовалковых калибрах незначительно, а течение металла имеет характер, приведенный на рисунок 2.10 [36].

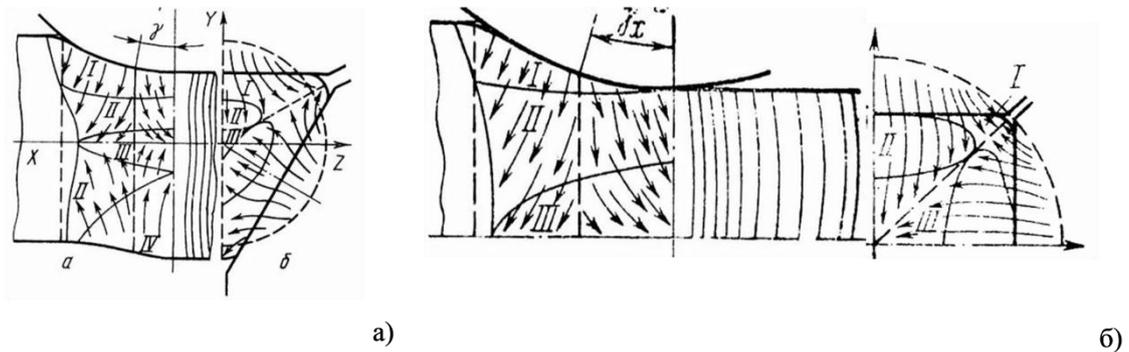


Рисунок 2.10 – Течение металла в продольном и поперечном сечениях трехвалкового (а) и четырехвалкового калибров (б)

При комбинированном волочении, как и вышеприведенном примере [58, 65], будет осуществляться течение взаимообратных потоков металла с периодическим изменением напряжений сжатия и растяжения.

Учитывая вышеизложенное, и то, что наиболее привлекательны в плане совершенствования технологии, основывающиеся на базе традиционного процесса, в данном случае волочения, для решения задачи производства высококачественной стальной проволоки предложен способ, заключающийся в комбинировании волочения через неприводную роликовую и монолитную волоки и позволяющий за счет изменения НДС в очаге деформации управлять деформируемостью и свойствами металла [87, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104].

## 2.5 Схема комбинированного способа волочения

Схема предлагаемого комбинированного совмещенного процесса волочения приведена на рисунке 2.11.

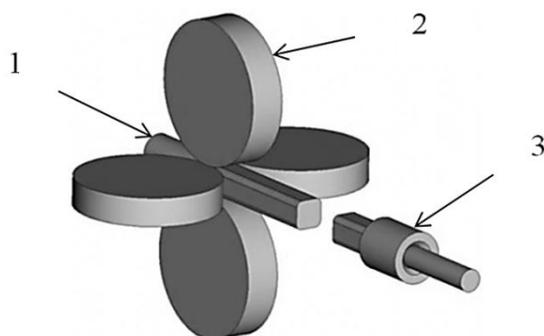


Рисунок 2.11 – Схема комбинированного способа волочения

Деформируемая заготовка (1) протягивается через калибр, образованный четырьмя неприводными роликами с гладкой бочкой (2). В роликовой волоке формируется промежуточный профиль, в приведенном варианте это профиль квадратного сечения. Затем полученная в роликовой волоке профилированная полоса протягивается через монолитную волоку (3) и получает сечение в виде круга. Основным решением является разделение общей деформации за проход на две части, имеющие разные схемы напряженного состояния [105]. Подана заявка №2017113168 от 17.04.2017 года на модульно-комбинированный способ волочения круглой проволоки из углеродистой стали (Приложение А).

Таким образом, предложенный способ представляет собой последовательную деформацию волочением в роликовой и монолитной волоках, осуществляемую за счет приложенного к переднему концу проволоки вытягивающего усилия. Обжатие за проход распределено между неприводной роликовой волокой, где преобладает схема напряженного состояния всестороннего сжатия, и монолитной волокой с двухсторонним сжатием и одноосным растяжением, причем основным процессом является стандартное волочение. При использовании комбинированного волочения можно распределить частные обжатия между монолитной и роликовой волоками так, чтобы можно было повысить частные обжатия и уменьшить число переходов, интенсифицируя тем самым технологический процесс. При этом процесс изготовления проволоки, как и в случае традиционного волочения, остается многократным, но с установкой на каждом блоке волочильной машины специализированных волочильных модулей. Под-

готовка поверхности заготовки осуществляется химическим способом или механическим в линии волочильной машины.

Замена традиционного волочения на комбинацию волочения через неприводные валки и в монолитную волоку позволяет считать процесс модульно-комбинированным. Предложенный модульно-комбинированный процесс отличается простотой конструкции деформирующего узла, легко встраивается в линию любой волочильной машины без значительного переоборудования. При этом нет необходимости использования дополнительного привода для вращения валков и синхронизации скоростей т.к. используется единый вытяжной барабан.

## **2.6 Исследование НДС комбинированного процесса с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе «DEFORM-3D»**

Если процесс волочения круглых профилей в монолитных волоках и профилей в роликовых волоках хорошо изучен в трудах С.И. Губкина, И.А. Юхвца, И.Л. Перлина, Ю.И. Коковихина, М. И. Бояршинова, М. Г. Полякова, Б. А. Никифорова, Г. С. Гуна, В.И. Гулько, Э. Зибеля, Р. Райта и др., то описание закономерности волочения квадратного профиля через монолитную волоку в круглую проволоку в технической литературе отсутствует. Поэтому имеется необходимость описания напряженно-деформированного состояния в конусном очаге деформации монолитной волоки, определения характера течения металла при волочении проволоки квадратного сечения в проволоку круглого сечения. Обычно при анализе нестандартного процесса рассматривается волочение круглой проволоки в конической волоке, т.к. этот процесс наиболее прост и в аналитическом описании и в экспериментальной проверке. Практически все определяющие факторы этого процесса имеют место и при других его разновидностях, что позволяет путем внесения соответствующих уточнений перейти к анализу более сложных процессов волочения [32, 106].

Моделирование способов волочения проволоки проводили методом конечных элементов в среде программного комплекса «DEFORM-3D».

При моделировании введены следующие данные: процесс является симметричным; рабочий инструмент (волоки, валки и тянущие шайбы) является абсолютно жестким; на контакте проволоки с инструментом действует постоянный коэффициент трения по закону Амонтона-Кулона, равный 0,08; материал проволоки считается идеально пластическим, однородным и изотропным. Температурные условия приняты изотермические. Рабочий угол волок -  $12^\circ$ , диаметр валков клетки «дуо» равен 160 мм; диаметр неприводных роликов – 100 мм. Обработываемый материал - сталь AISI 1070 из стандартной библиотеки «DEFORM».

### **2.6.1 Особенности течения металла при волочении квадратного профиля в круг через монолитную волоку**

Формоизменение полосы квадратного сечения при волочении через конический канал монолитной волоки изучалось методом координатной сетки. Изменение формы и линейных размеров ячеек и линий координатной сетки позволяют судить о взаимном перемещении частиц металла в деформационной зоне при волочении. Для решения данной задачи координатная сетка с ячейкой размером 0,1x0,1 мм была нанесена с помощью компьютерного моделирования на сечение параллельное одной из сторон квадратной полосы, на ее сечение по диагонали, а также на поперечное сечение. Изменение координатной сетки рассматривалось как в продольном направлении, так и в поперечном.

На рисунке 2.12 приведены варианты нанесения координатной сетки на продольное сечение и выполнен анализ ее формоизменения при волочении.

В отличие от традиционного волочения «круг в круг», при волочении полосы, имеющей сечение в виде квадрата, в круглую проволоку, течение металла в рабочем конусе монолитной волоки носит более сложный характер.

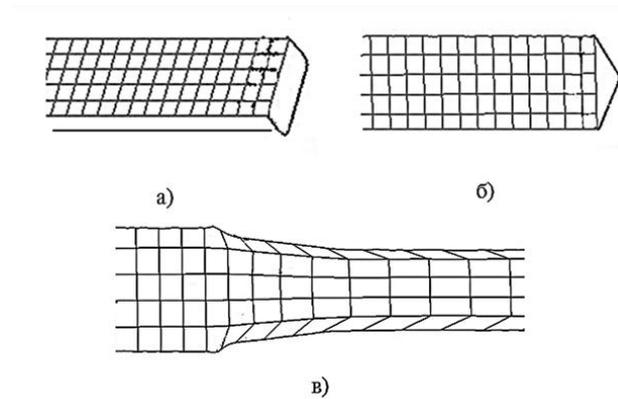


Рисунок 2.12 – Варианты нанесения координатной сетки:

а – параллельно стороне квадрата, б – по диагонали квадрата и ее изменение при волочении (в)

Исследование течения металла по двум плоскостям показало, что деформация происходит неравномерно. Искажения сетки, нанесенной в сечении параллельном стороне квадратной полосы, незначительны. Ячейки координатной сетки, имеющие изначально форму квадрата, после волочения становятся прямоугольными в центральных слоях, а в периферийных – близкими параллелограммам. Поперечные линии координатной сетки, которые до волочения были прямые, изгибаются в направлении волочения. Однако малая величина изгиба говорит о незначительном сдвиге металла в поверхностных слоях, рисунок 2.13.

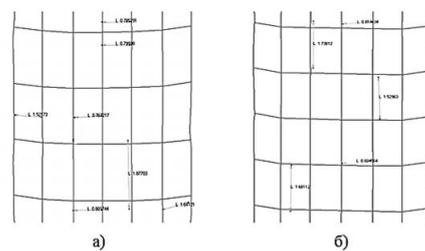


Рисунок 2.13 – Изменение ячеек координатной сетке при волочении в конусе монолитной волоки (а - по плоскости, б - по диагонали)

Большая деформация накапливается в конусной части волоки по диагоналям квадрата и возрастает в осевом направлении по длине очага деформации. Ячейка сетки с периферии приобретают четко выраженную форму параллело-

грамма, т.е. в поверхности происходят дополнительные сдвиги металла. Поперечные линии, прямые до волочения, изгибаются и вытягиваются в сторону волочения, т.е. скорость в центральных слоях выше, чем в периферийных.

В обоих сечениях прямые линии, параллельные оси канала, после волочения остаются прямыми, но расстояние между ними уменьшается.

Далее было изучено формоизменение полосы в поперечном сечении. Деформация квадратного профиля в конусе волокни начинается по его вершинам, т.е. по диагоналям квадрата. На рисунке 2.14 показано поперечное сечение проволоки с искаженной координатной сеткой после волочения через монолитную волоку.

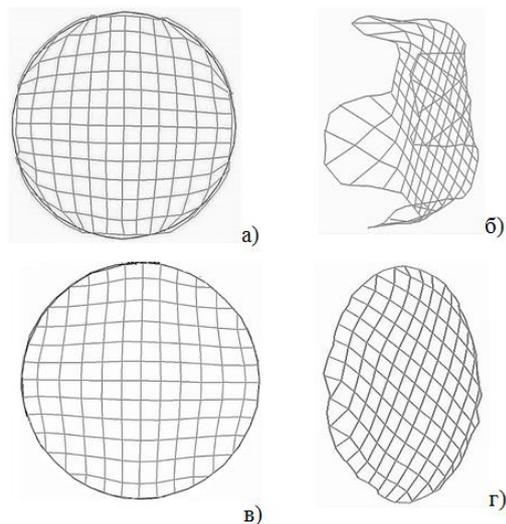


Рисунок 2.14 – Искажение координатной сетки, нанесенной на поперечное сечение

В углах квадрата первоначально прямые углы ячеек координатной сетки сдвигаются, что свидетельствует о наличии в этих слоях металла сдвиговых деформаций. Наибольшие сдвиги отмечаются в приконтактных слоях, а в осевой зоне проволоки они практически равны нулю.

Участки, прилегающие к сторонам квадратного сечения, в начальный момент испытывают лишь внеконтактную деформацию под действием сдвигающегося металла из вершин и приобретают форму прямоугольников. При выходе этих слоев на контактную поверхность конуса волокни начинается их деформа-

ция в радиальном направлении, но из-за значительного давления металла из деформируемых вершин форма их по-прежнему остается прямоугольной.

В осевой области ячейки практически мало искажены, т.е. испытывают достаточно равномерное воздействие окружающих слоев металла и незначительную радиальную деформацию в этой области. Здесь преобладает течение металла в направлении вытяжки (к выходу из волокна).

В продольном сечении наибольший сдвиг металла также происходит в областях деформируемых вершин квадрата, сдвиг по сторонам квадрата незначителен. Это говорит о значительной неравномерности деформации при волочении. Однако это чётко выражено в случае волочения практически полностью сформированного квадрата, рисунок 2.14 б. Для невыполненного квадрата (с заполнением калибра примерно 90%), картина имеет вид близкий к волочению «круг в круг», но закономерность изменения поперечной сетки не меняется, остается постоянной.

Величина продольных и поперечных сдвиговых деформаций возрастает с увеличением угла волокна, коэффициента трения, а также обжатия. Несмотря на то, что величину деформации относят к числу косвенных факторов внешнего трения, влияние этого фактора может быть значительным, поскольку от величины обжатия зависят контактные давления [107].

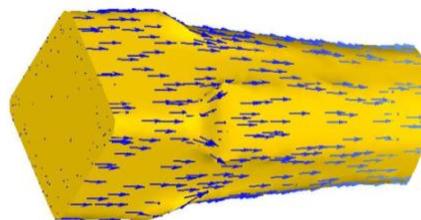


Рисунок 2.15 – Векторное поле скоростей узлов сетки

На рисунке 2.15 показано поперечное смещение слоев металла из вершин квадрата и в результате компьютерного моделирования получено векторное поле скоростей узлов сетки протягиваемой полосы. В поперечных сечениях с

увеличением обжатия происходит перетекание металла из зон с повышенной деформации в зоны с меньшей деформацией (рисунок 2.16), затем деформация по сечению выравнивается и определяется сжимающими напряжениями. Для невыполненного квадрата напряженно-деформированное состояние в очаге деформации имеет вид близкий к волочению по схеме «круг в круг».

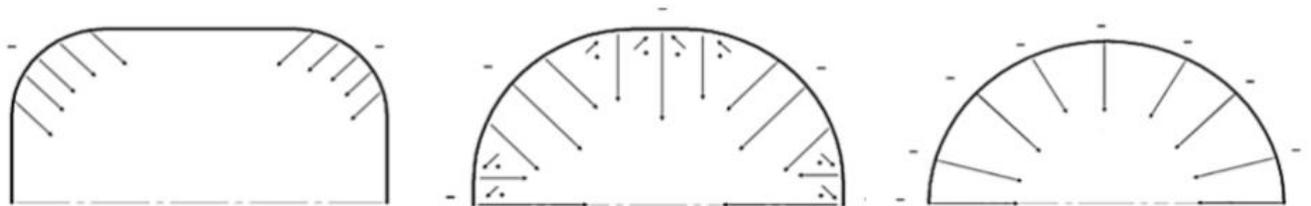


Рисунок 2.16 – Схема течения металла при волочении квадратного профиля в монолитной волоке

### 2.6.2 Изменение напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении при волочении квадрата в круг

На рисунке 2.17 проиллюстрировано изменение напряженного состояния в поперечных сечениях при протягивании квадратной полосы через рабочий конус монолитной волоки. Так как пластическая деформация в конусе волоки начинается с вершин квадратной полосы, в этих областях (по диагонали) отмечается наибольшая ее интенсивность. В поперечном сечении по вершинам квадрата наблюдаются сжимающие напряжения.

Напряженное состояние по сторонам квадрата, пока они не приходят в контакт с конусом волоки и не участвуют в деформации, определяется наличием растягивающих напряжений. Это, по-видимому, связано с тем, что эти участки в отличие от вершин не испытывают сдвига и из-за целостности полосы растягиваются в большей степени. Поэтому в начальный момент волочения характер напряжений изменяется от максимально сжимающих по вершинам квадратного профиля до участков по сторонам с растягивающим напряжением.

Как только начинается деформация по сторонам квадрата, происходит снижение величины растягивающих напряжений.

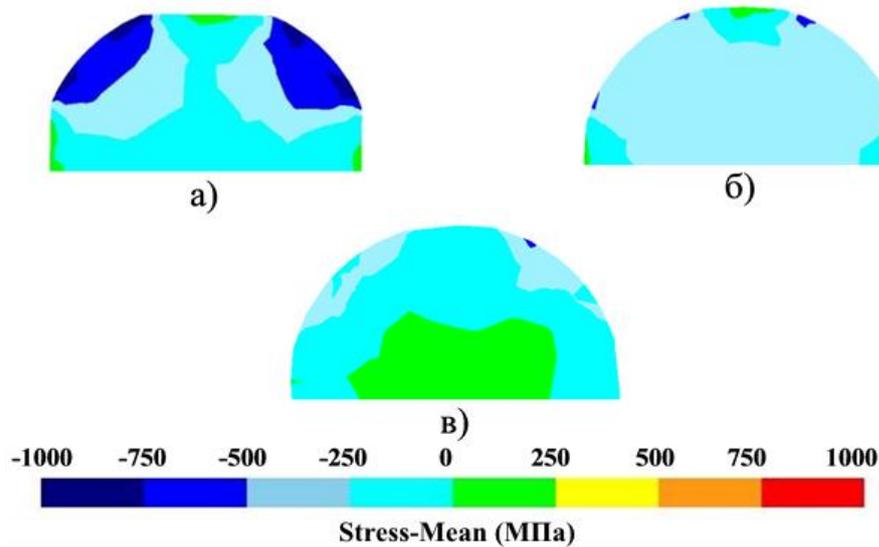


Рисунок 2.17 – Напряженно-деформированное состояние в конусе монолитной волоки

При этом обжатия по сторонам и диагоналям выравниваются, и проработка металла определяется напряжением сжатия, рисунок 2.17 б. Так как периферийные слои вытягиваются медленнее, чем центральные, в осевой области появляются продольные растягивающие напряжения, рисунок 2.17в.

## 2.7 Сравнение традиционного волочения и комбинированного процесса

Сравнение традиционного волочения и комбинированного процесса выполнено в работах [96, 97]. Рассмотрим на примере проволоки диаметром 4,0 мм, изготовленной обоими способами.

На рисунке 2.18 приведено распределение полей действующих напряжений в поперечном сечении проволоки на входе в рабочий конус волоки и выходе из него для случаев традиционного (а, в) и комбинированного волочения (б, г).

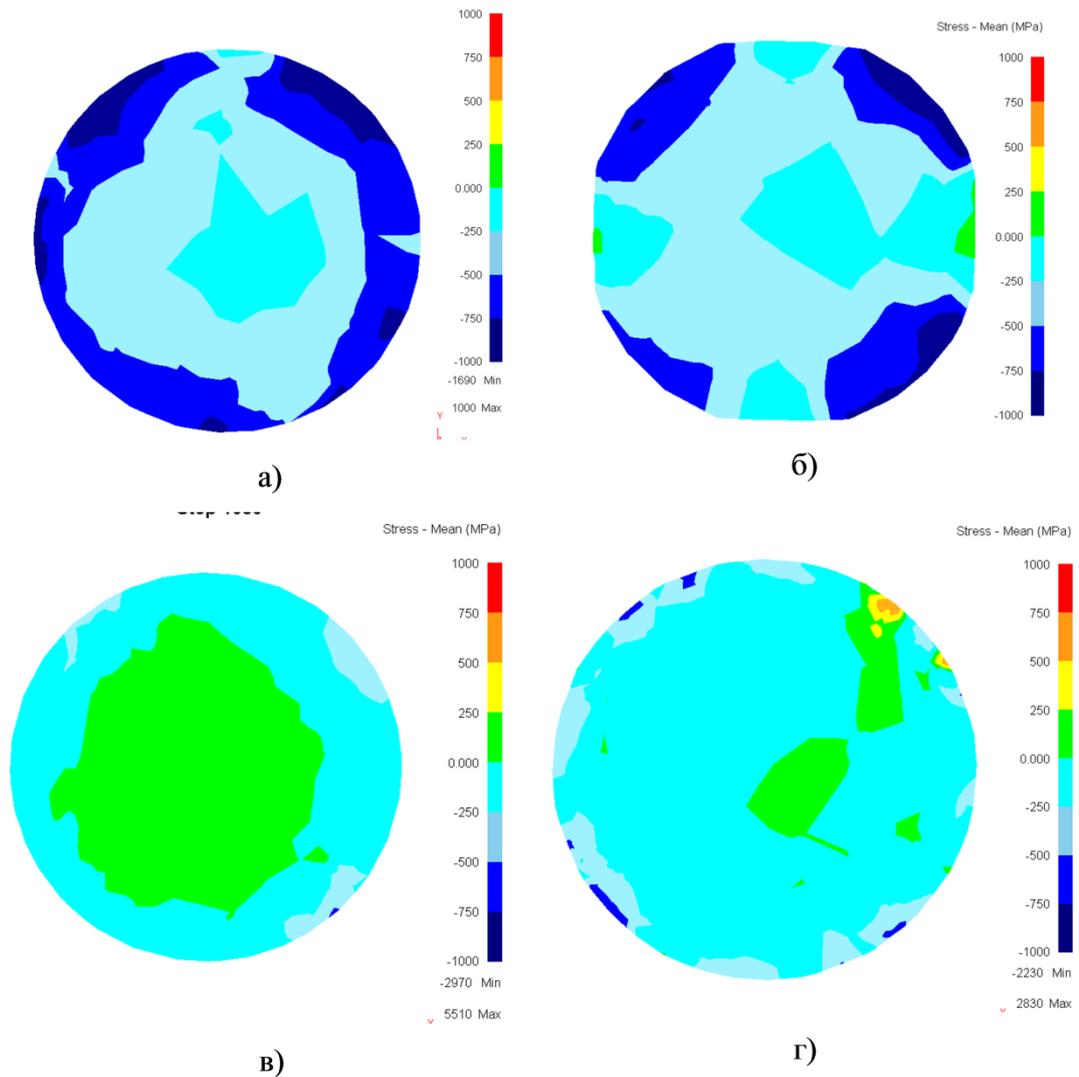


Рисунок 2.18 – Распределение напряжений по сечению проволоки на входе в волоку, в волоке и выходе из волоки для случаев традиционного волочения (а, в) и комбинированного волочения (б, г)

Напряженное состояние при обжатии квадратной проволоки в монолитной волоке характеризуется значительными по величине и интенсивности сжимающими напряжениями в области вершин деформируемого квадратного профиля, рисунок 2.18 б. Между участками с высокими сжимающими напряжениями имеются области, в которых деформация отсутствует. Отсюда следует, что начальная стадия протяжки квадратного профиля через монолитную волоку отличается достаточно высокой неоднородностью деформации. При традиционном волочении область максимальных сжимающих напряжений охватывает практически весь периметр проволоки, но в обоих случаях сечение проволоки

находится под действием напряжений сжатия. По мере увеличения степени деформации в центральной зоне проволоки появляются растягивающие напряжения, но при волочении в монолитных волокнах их уровень значительно выше. При этом результаты моделирования свидетельствуют об отсутствии условий для образования внутренних надрывов и расслоения проволоки.

## 2.8 Выводы по главе

1 Показана осуществимость комбинированного воздействия на металл как при волочении в монолитных или роликовых волокнах, так и при их объединении в единый процесс. В случае объединения возможности способа расширяются из-за синергетического эффекта. Наиболее просто создать комбинированный процесс на базе стандартного волочения, объединив его с волочением через неприводные ролики.

2 При комбинированном процессе форма промежуточного профиля определяет устойчивость процесса волочения и стойкость волочильного инструмента. С увеличением числа сторон промежуточного профиля нагрузка на стенки волокна снижается. В случае использования 2-х и 4-х роликовых неприводных клеток оптимальной формой промежуточного профиля является невыполненный квадрат.

3 Установлено, что при комбинированном волочении в роликовой волоке осуществляется проработка центральных, а при волочении в монолитной волоке - поверхностных областей проволоки, что обеспечивает более полную суммарную проработку ее сечения.

4 Предложен комбинированный способ многократного волочения, в котором единичное обжатие на каждом блоке волочильной машины распределяется между роликовой и монолитной волокнами.

5 Анализ результатов компьютерного моделирования позволяет сделать следующее заключение о положении зон интенсивного течения металла:

- наиболее интенсивная деформация происходит по диагоналям квадратной полосы;

- в поперечных сечениях с увеличением обжатия происходит перетекание металла из зон с повышенной деформации в зоны с меньшей деформацией, затем деформация по сечению выравнивается и определяется сжимающими напряжениями;

- в целом, несмотря на разницу в степени деформации по сторонам и диагоналям квадратного сечения, сильного искривления координатной сетки и интенсивных сдвигов не наблюдается, что говорит о достаточно равномерной и глубокой проработке металла по сечению.

### **3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВОЛОЧЕНИЯ В МОДУЛЕ «РОЛИКОВАЯ ВОЛОКА – МОНОЛИТНАЯ ВОЛОКА»**

#### **3.1 Разработка методики расчета маршрута волочения в модуле**

Комбинированный процесс изготовления проволоки, как и обычное волочение, остается многократным. По этой причине технологическая схема изготовления проволоки не меняется. Так как в модуль поступает заготовка круглого сечения, а на выходе из модуля проволока также круглого сечения, то маршрут волочения может быть рассчитан по методикам принятым для традиционного волочения [90]. При построении технологической схемы учтены общеизвестные закономерности:

- единичная деформация должна обеспечивать минимальную кратность волочения, рациональную загрузку двигателей для снижения расхода электроэнергии, отсутствие обрывности проволоки, максимальный срок службы технологического инструмента;

- единичные обжатия должны создать условия для устойчивости (безобрывность) процесса волочения, отсутствия надрывов поверхности и затяжек, достаточной однородности деформации.

##### **3.1.1 Расчет параметров волочения в роликовой волоке**

При разработке новых технологических процессов из-за отсутствия достаточно простых и обоснованных методов расчета построение маршрутов зачастую выполняется по аналогии с подобными процессами либо эмпирическим путем. Принимая за основу процесс волочения через монолитные волокна, мы дополняем его частичной деформацией в роликовой волоке.

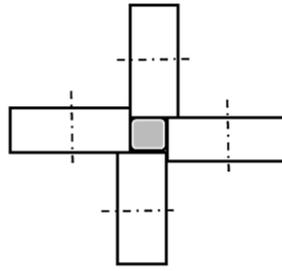


Рисунок 3.1 – Универсальная сборка четырехвалкового калибра

В отличие от традиционного волочения, где проволока протягивается последовательно через несколько волок с последовательно уменьшающимися отверстиями, при волочении через многовалковые калибры используется их универсальность, рисунок 3.1. Разведением и сведением роликов можно регулировать деформацию в калибре (вытяжку) и при этом получать профили с требуемой степенью заполнения калибра. Каждый ролик может перемещаться относительно заготовки в радиальном и осевом направлениях одновременно. Можно производить настройку роликов до и в процессе волочения. Поэтому в 4-х роликовых калибрах можно изготавливать фасонную проволоку в широком диапазоне размеров.

При расчете параметров волочения в роликовых калибрах решается задача определения диаметра и площади проволоки-заготовки, площади квадрата с различной степенью заполнения калибра, а также величины коэффициента вытяжки.

В работе [36] использован метод расчета систем многовалковых калибров и определения основных параметров калибровки из геометрии вписанных фигур. Предложена методика определения частных вытяжек и площади поперечных сечений в зависимости от обжатия или соотношения размеров заготовки и готовой полосы с учетом различного заполнения по площадям геометрических фигур, образующих эти сечения. Отмечено, что изготовление промежуточных профилей необходимо вести с незаполнением, что повышает устойчивость полосы в калибрах, снижает неравномерность деформации и износ валков. Для системы круг – квадрат эти параметры приведены на рисунке 3.2.

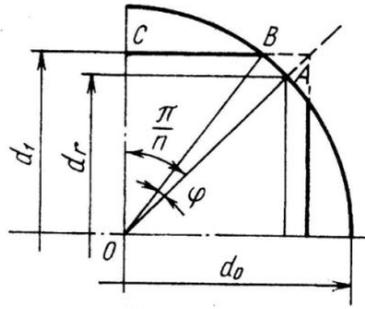


Рисунок 3.2 – К выводу параметров калибровки для системы «круг - квадрат»

Площадь поперечного сечения исходной круглой заготовки

$$F_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 . \quad (3.1)$$

Площадь поперечного сечения полосы на выходе из калибров определяется как

$$F_1 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \alpha . \quad (3.2)$$

Коэффициент вытяжки за проход

$$\mu_{np} = \frac{1}{\alpha} . \quad (3.3)$$

При этом степень заполнения калибра может быть вычислена из выражения

$$K_3 = \frac{\frac{\pi}{4}}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4}} \cdot \frac{\alpha}{\left(\frac{d_{11}}{d_0}\right)^2} , \quad (3.4)$$

где  $d_0$  – диаметр исходной заготовки;

$d_1$  – сторона квадратной полосы;

параметр  $\alpha$  для четырехвалкового калибра рассчитывается как

$$\alpha = 1 - \frac{\pi}{4} \left[ \arccos \frac{d_1}{d_0} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \left( \frac{d_1}{d_0} \right)^2} \right]. \quad (3.5)$$

Авторы [37] предлагают использовать для расчета требуемых параметров волочения квадратной проволоки следующие соотношения

$$d_0 = \frac{a_{\max}}{1 - 0,01\delta_\varepsilon}; \quad (3.6)$$

$$\delta_\varepsilon = 15,4 - 0,02K_3 + \frac{83,36}{K_3}; \quad (3.7)$$

$$K_3 = \frac{R}{a_{\max}} 100\%; \quad (3.8)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\pi d_3^2}{4a_{\max}}, \quad (3.9)$$

где  $\delta$  – суммарное обжатие;

$d_0$  – диаметр исходной заготовки;

$K_3$  – коэффициент заполнения калибра;

$\lambda_\varepsilon$  – суммарная вытяжка;

$a_{\max}$  – максимальное значение стороны квадрата,

$R$  – радиус закругления кромки.

По Ю.И. Коковихину система калибровки «круг-квадрат» может быть использована в качестве промежуточной при производстве круглых профилей. Причем деформироваться промежуточная полоса должна с незаполнением калибра. Поэтому в работе [10] решается задача определения зависимостей между стороной квадратного калибра  $h=2a$ , радиусом исходной заготовки круглого сечения  $r$ , вытяжкой за проход  $\mu$  и геометрией профиля при различном заполнении калибра металлом, характеризуемым соотношением  $a/r$ . Для определения конечной площади поперечного сечения профиля и коэффициента вытяж-

ки при различном заполнении калибра Ю.И. Коковихин предлагает следующие зависимости

$$F_1 = 4r^2 \left[ \frac{a}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2} + \arccos \frac{\frac{a}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2}}{\sqrt{2}} \right]; \quad (3.10)$$

$$\mu = \frac{\pi}{4} \left[ \frac{a}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2} + \arccos \frac{\frac{a}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2}}{\sqrt{2}} \right]. \quad (3.11)$$

Приведенные выше методики позволяют рассчитать геометрические параметры исходной круглой заготовки и прокатываемого профиля, коэффициент вытяжки и величину заполнения калибра. Но при этом предполагается, что размеры прокатываемого профиля заранее известны.

При протягивании полосы через комбинированное устройство, включающее в себя протяжку в роликах и волочение через монолитную волоку, определить стороны промежуточного профиля, радиусы закругления и степень заполнения калибра заранее невозможно. А эти параметры определяют распределение величины деформации между прокаткой и волочением в модуле. Эту задачу можно решить с помощью дополнительных исследований.

### 3.1.2 Выбор единичных обжатий при комбинированном волочении

Объединение протяжки через роликовую волоку с волочением через монолитную волоку в единый модуль дает возможность выполнять волочение проволоки с большими единичными обжатиями за меньшее число проходов в сравнении с традиционным волочением. Величина единичного обжатия, число

протяжек ограничиваются мощностью двигателей, а также жесткостью клетки и стойкостью валков и прочностью переднего конца [108]. При использовании модульной технологии единичное обжатие в каждом модуле распределяется между роликовой и монолитной волоками. Деформация в роликах происходит в более мягких условиях и при низком контактном трении. По сравнению с процессом волочения процесс протяжки через неприводную клетку из-за эффекта вращения валков имеет большие потенциальные возможности в реализации повышенных частных обжатий [1, 36, 37, 109]. Изменением диаметра валков и увеличением обжатия можно легко добиться параметров очага деформации, обеспечивающих равномерную деформацию [110].

С учётом вышесказанного необходимо определить, какова максимально возможная деформация может быть выполнена в модуле. Целесообразно определить ее через коэффициент вытяжки  $\mu$ . Так как деформация в модуле распределяется между протяжкой в неприводных валках и волочением в монолитной волоке, то суммарная вытяжка в модуле будет определяться как

$$\mu_{\text{сум}} = \mu_{\text{пр}} \cdot \mu_{\text{волоч}} \quad (3.12)$$

Для обеспечения производительности процесса необходимо, чтобы получаемый профиль имел максимальную вытяжку и минимальное уширение. Как правило, простейшие профили (овальные, треугольные, квадратные) получают в 2-х, 3-х и 4-х валковых калибрах. Из них наибольшей фактической вытяжной способностью, меньшей склонностью к переполнению калибра и меньшим уширением при равных деформациях обладают 4-х валковые калибры. Эти калибры благоприятны и с точки зрения схемы напряженного состояния и повышения КПД деформации и получения высокой точности профиля [36]. Выполненные исследования [89] подтверждают, что наиболее рационально получение промежуточного профиля в виде невыполненного квадрата с большим радиусом закругления, чтобы снизить нагрузку на монолитную волоку при последующем протягивании полосы.

Для успешного волочения через модуль необходимо знать, как определять параметры невыполненного квадрата: площадь, размеры сторон, величину радиуса закругления, рисунок 3.3. Это позволит правильно распределить обжатия при протяжке в роликах и монолитной волоке, при этом

$$\mu_1 = F_{\text{заготовки}} / F_{\text{невып.кв.}}, \quad (3.13)$$

$$\mu_2 = F_{\text{невып.кв.}} / F_{\text{кругл.проволоки}}, \quad (3.14)$$

а суммарная вытяжка

$$\mu = \mu_1 \cdot \mu_2. \quad (3.15)$$

Поэтому для вычисления этих параметров примем:

$R$  – радиус закругления,

$a$  – величина незаполнения калибра,

$h$  – сторона квадрата.

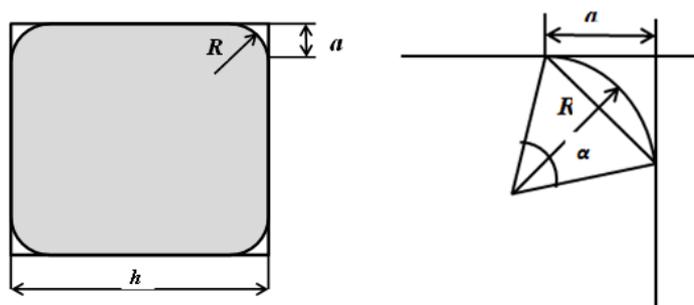


Рисунок 3.3 – К определению параметров невыполненного квадрата

Радиус  $R$  определяем по формуле, полученной на основе аппроксимации экспериментальных данных, полученных на АО «БМК», по замерам на квадратной и прямоугольной проволоке, изготовленной в неприводной 4-х роликковой клетки типа TURKS HEAD.

$$R = 2a \left( 1 - \frac{a}{h} \right); \quad (3.16)$$

$$\lim_{a \rightarrow 0} \frac{R}{a} = 2 ; \quad (3.17)$$

$$a \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow 0;$$

$$a \rightarrow \frac{h}{2} \Rightarrow R \rightarrow \frac{h}{2}.$$

Фактическая площадь квадратного профиля может быть рассчитана по формуле

$$F_{\text{кв.факт}} = h^2 - 4 \left( \frac{a^2}{2} - F_{\text{сегм}} \right), \quad (3.18)$$

где площадь сегмента определяется как

$$F_{\text{сегм}} = \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha \right), \quad (3.19)$$

а угол  $\alpha$  рассчитан по формуле

$$\alpha = 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{a}{R} \right). \quad (3.20)$$

После подстановки площадь  $F_{\text{кв.факт}}$  определяется из выражения

$$F_{\text{кв.факт}} = h^2 - 2a^2 \left\{ 1 - 4 \left( 1 - \frac{a}{h} \right)^2 \left[ 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{2}}{4 \left( 1 - \frac{a}{h} \right)} \right) - \sin \left( 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{2}}{4 \left( 1 - \frac{a}{h} \right)} \right) \right) \right] \right\}. \quad (3.21)$$

Заполнение калибра можно определить из выражения

$$K_3 = \frac{F_{\text{кв.факт}}}{F_{\text{кв.геометр.}}}, \quad (3.22)$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения калибра.

Фактическая площадь квадратного профиля с учетом незаполнения калибра  $F_{кв. факт}$  рассчитана по вышеприведенной формуле, геометрическая площадь калибра  $F_{кв. геометр}$  – как квадрат стороны калибра (стороны квадратного профиля). Величина  $K_3$  в зависимости от степени незаполнения калибра приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Соотношение между величиной незаполнения и коэффициентом заполнения

Величина незаполнения $a$ , мм	0,4	0,8	1,4	1,5	1,6	2,0	2,4
Коэффициент заполнения $K_3$	0,99	0,97	0,92	0,91	0,9	0,85	0,81

Следующий этап заключается в определении коэффициента вытяжки  $\mu_1 = F_{заготовки} / F_{невып.кв.}$ , т.е. нахождении диаметра проволоки-заготовки и величины деформации, обеспечивающей получение квадратного профиля с той или иной степенью заполнения  $K_3$ . Эта зависимость необходима для вычисления обжатий в роликовой волоке, разделения деформации за проход между роликовой и монолитной волоками при построении маршрутов волочения, а также определения величины энергозатрат и др.

Определим эту зависимость с помощью экспериментальных данных, полученных замером профилей, прокатанных на АО «БМК» на неприводных валках 4-х роликовой клетки стана «Маршалл Ричардс». В ходе эксперимента из проволоки диаметрами 2,46 мм и 4,24 мм из стали марки 70 были изготовлены профили квадратного и прямоугольного сечений с разной величиной заполнения калибра и разной степенью обжатия. Весовым методом, используемым в практике АО «БМК», определены фактические площади каждого из профилей, размеры калибра (размеры полос), рассчитаны вытяжки (деформация) и степень заполнения  $K_3$ . Результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные и расчетные данные

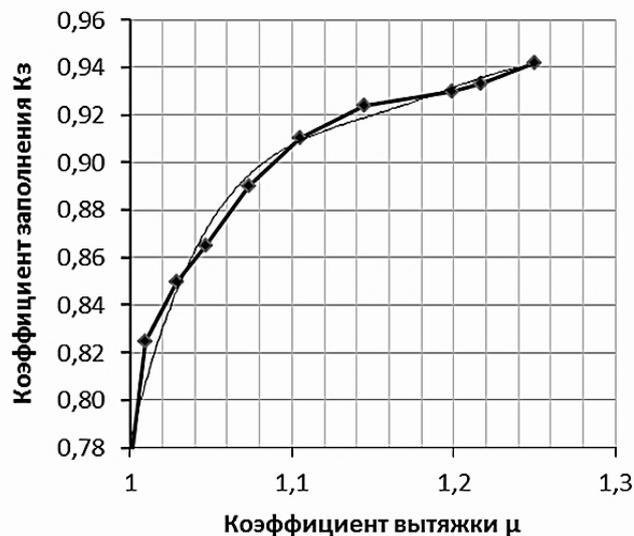
Размеры калибра, мм	Расчетная площадь калибра, мм <sup>2</sup>	Фактическая площадь сечения полосы, мм <sup>2</sup>	Коэффициент вытяжки $\mu$	Коэффициент заполнения $K_z$
2,27x2,50	5,675	4,708	1,0096	0,83
2,12x2,57	5,448	4,620	1,029	0,85
2,035x2,59	5,271	4,54	1,0469	0,86
2,035x2,44	4,965	4,428	1,0734	0,89
2,03x2,33	4,73	4,301	1,105	0,909
2,03x2,21	4,486	4,152	1,145	0,926
2,025x2,085	4,222	3,963	1,199	0,939
2,04x2,035	4,15	3,905	1,217	0,941
3,19x4,73	15,09	13,296	-	0,881
2,97x4,73	14,05	12,499	1,0638	0,89
2,77x4,72	13,07	11,896	1,118	0,911
2,63x4,71	12,39	11,416	1,165	0,921
2,42x4,71	11,54	10,621	1,252	0,92

По полученным данным построен график зависимости коэффициента заполнения  $K_z$  от вытяжки  $\mu$ , рисунок 3.4.

Полученная графическая зависимость с высокой степенью достоверности ( $R^2=0,98$ ) аппроксимируется уравнением регрессии

$$K_z = -137,28\mu^4 + 643,13\mu^3 - 1129,3\mu^2 + 881,17\mu - 256,935 \quad (3.23)$$

где  $\mu$  – коэффициент вытяжки в роликовой волоке модуля.

Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента заполнения  $K_z$  от вытяжки  $\mu$ .

### 3.1.3. Определение предельных значений коэффициента заполнения калибра $K_3$

Необходимо уточнить, для каких значений коэффициента заполнения  $K_3$  последующее волочение через монолитную волоку будет устойчивым и без обрывным и распирающее воздействие квадратного профиля на стенки рабочего конуса волоки будет минимальным. Для решения поставленной задачи выполнили в DEFORM-3D моделирование волочения квадратного профиля 5,7x5,7 мм с различным коэффициентом заполнения  $K_3$  через коническое отверстие монолитной волоки в проволоку диаметром 5,0 мм.

Вероятность разрушения проволоки оценивали с помощью критерия Cockroft–Latham. Данный критерий обеспечивает хорошее согласование прогнозирования разрушения при наличии растягивающих напряжений. Модель основана на уравнении:

$$\int_0^{\varepsilon} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_i} d\varepsilon = C, \quad (3.24)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное главное растягивающее напряжение;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений;

$\varepsilon$  – интенсивность деформаций;

$C$  – константа материала.

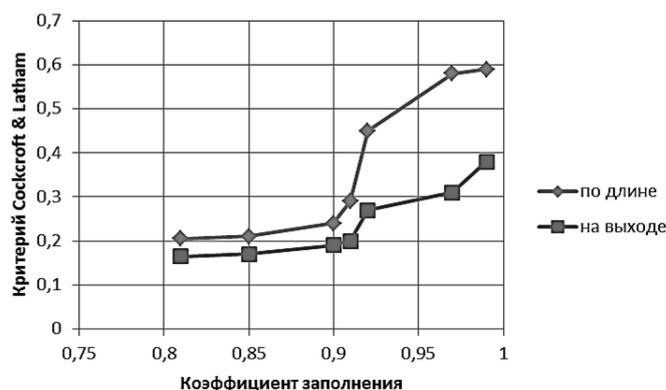


Рисунок 3.5 – Вероятность разрушения проволоки при волочении в монолитной волоке квадратной полосы с разной степенью заполнения

Значения критерия Cockroft–Latham по длине очага деформации изменяются в зависимости от коэффициента  $K_3$  в пределах от 0,2 до 0,6. На выходе из волоки величина критерия увеличивается от 0,17 до 0,38. Высокие значения этого показателя при  $K_3 \geq 0,9$  говорят о неблагоприятной схеме напряжённо-деформированного состояния при волочении квадратного профиля с высокой степенью заполнения и возможном разрушении и обрыве проволоки, рисунок 3.5.

На графике, рисунок 3.6 показано изменение напряжения волочения в центре проволоки и в ее поверхностных слоях в зависимости от коэффициента  $K_3$ . Видно, что интенсивный рост их начинается при заполнении калибра более 0,90.

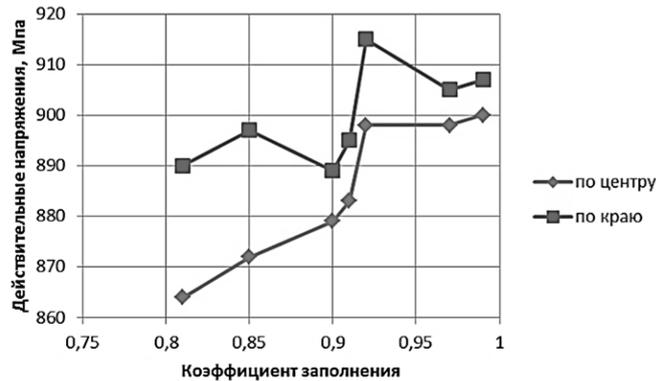


Рисунок 3.6 – Изменение напряжения волочения

Интенсивный рост напряжения волочения начинается при протягивании через монолитную волоку квадратного профиля, прокатанного с заполнением калибра более примерно 0,9.

Распределение напряжения волочения по длине очага определено с помощью метода сечений, рисунок 3.7.

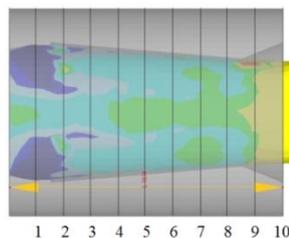


Рисунок 3.7 – Схема нанесения сечений

При  $K_3 = 0,99$  наибольшее напряжение волочения до  $900 \text{ Н/мм}^2$  отмечается в сечении 7, при  $K_3 = 0,91$  – в сечении 9 и уровень напряжения волочения ниже (до  $730 \text{ Н/мм}^2$ ), при  $K_3 = 0,81$  напряжение волочения снижается до  $550 \text{ Н/мм}^2$  а и отмечается только в сечении 10.

Результаты моделирования показали, что наиболее благоприятные условия волочения в монолитной волоке можно обеспечить при прокате промежуточного квадратного профиля о степенью заполнения калибра  $K_3$  не более  $0,90$  –  $0,93$ .

На рисунке 3.8 приведено распределение действительных напряжений в монолитной волоке при волочении квадратного профиля с разной степенью заполнения: 1 -  $K_3 = 0,91$ ; 2 -  $K_3 = 0,9$ ; 3 -  $K_3 = 0,85$ ; 4 -  $K_3 = 0,81$ .

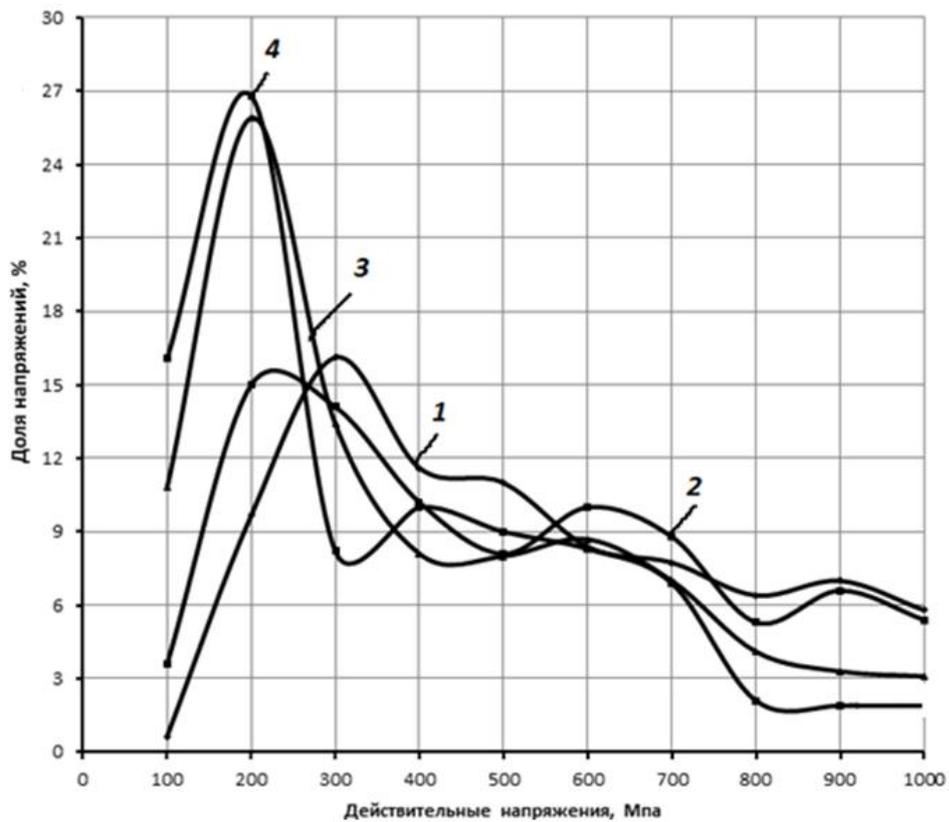


Рисунок 3.8 – Распределение действительных напряжений в волоке при волочении квадратного профиля с разной степенью заполнения: 1 -  $K_3 = 0,91$ ; 2 -  $K_3 = 0,9$ ; 3 -  $K_3 = 0,85$ ; 4 -  $K_3 = 0,81$

Так как для волочения промежуточного профиля через монолитную волоку наиболее благоприятно значение  $K_3$  не более  $0,9-0,93$  то ограничимся вытяж-

кой до 1,14 и выполним расчет. Полученные результаты приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета коэффициента заполнения калибра  $K_3$  от вытяжки  $\mu$

Вытяжка $\mu$	$K_3$	Вытяжка $\mu$	$K_3$	Вытяжка $\mu$	$K_3$
1,00	0,785	1,05	0,879	1,10	0,913
1,01	0,811	1,06	0,889	1,11	0,917
1,02	0,833	1,07	0,897	1,12	0,920
1,03	0,851	1,08	0,904	1,13	0,923
1,04	0,867	1,09	0,909	1,14	0,925

Приведенные в таблице 4.3 данные позволяют рассчитывать диаметр проволоки-заготовки, из которой можно прокатать полосу квадратного сечения с определённой степенью заполнения калибра  $K_3$ .

### 3.2 Определение ресурса энергосбережения при волочении

Одной из приоритетных задач, решаемых при создании новых способов волочения, является снижение энергозатрат. С целью определения имеющегося ресурса энергосбережения с помощью программы [79] рассчитаем энергозатраты при волочении по стандартным маршрутам и определим возможность их снижения при уменьшении числа проходов и увеличении частных обжатий. Рекомендуемые параметры для расчета маршрутов волочения пружинной проволоки 1 класса по ГОСТ 9389-75 в соответствии с СТИ 173-МТ.ПР-166 -2011 АО «БМК» приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Рекомендуемые параметры для расчета маршрутов волочения

Диаметр, мм	Временное сопротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	Диаметр заготовки, мм	Содержание углерода, %	Кратность	Единичное обжатие, %
3,00	1720 - 1960	6,50	0,76-0,80	7	20
4,00	1620 – 1860	8,00	0,66 – 0,70	6	20
5,00	1470 – 1720	8,00	0,71 – 0,75	4	21

В таблице 3.5. приведены результаты расчета энергозатрат при волочении на машине типа 2500/7 с мощностью двигателей 55 КВт патентированной заготовки диаметром 6,50 мм из стали марки 80 в проволоку диаметром 3,00 мм по стандартному режиму, а также с повышенными единичными обжатиями. По указанным вводным параметрам программа вычислила начальную прочность патентированной заготовки ( $1219 \text{ Н/мм}^2$  в данном случае), маршрут волочения, частные и суммарные обжатия, скорость на каждом блоке, текущее временное сопротивление разрыву, а также энергосиловые параметры.

Таблица 3.5 – Результаты расчета параметров волочения

№ п/п	Частное обжатие	Суммарное обжатие	Диаметр, мм	Временное сопротивление разрыву, $\text{Н/мм}^2$	Скорость, м/мин	Затраченная мощность, КВт	Коэф-т загрузки	Затраченная работа, $\text{КВт}\cdot\text{ч}$
Стандартный маршрут								
1	0,22	0,22	5,74	1297	55	24,61	0,36	37,29
2	0,21	0,38	5,10	1376	69	24,84	0,36	37,64
3	0,20	0,51	4,56	1455	86	25,02	0,37	37,91
4	0,20	0,61	4,08	1538	108	25,64	0,38	38,86
5	0,19	0,68	3,67	1622	133	25,78	0,38	39,06
6	0,19	0,74	3,30	1709	165	26,38	0,39	39,97
7	0,18	0,79	3,00	1796	200	26,47	0,39	40,11
Сум	0,79					178,7		270,84
Маршрут с повышенными частными обжатиями								
1	0,31	0,31	5,39	1339	62	28,63	0,44	43,37
2	0,28	0,51	4,56	1456	87	28,63	0,44	43,37
3	0,26	0,63	3,92	1571	117	28,63	0,44	43,37
4	0,24	0,73	3,41	1684	155	28,63	0,44	43,37
5	0,22	0,79	3,00	1795	200	28,63	0,44	43,37
Сум	0,79					143,14		216,85

Полученные результаты говорят о том, что при волочении по стандартному маршруту двигатели мощностью 55 Квт загружены недостаточно, коэффициент загрузки двигателей составляет 36 – 39%. Его повышение и снижение энергозатрат возможно за счет уменьшения числа протяжек. В случае волочения в 5 протяжек наблюдается снижение энергозатрат на 19,9%, а коэффициент загрузки двигателей увеличивается до 0,44. Аналогичные расчеты, выполнен-

ные для волочения проволоки диаметром 4,00 мм и 5,00 мм показывают, что сокращение на одну протяжку позволяет снизить энергозатраты на 11% и 17% и увеличить коэффициент загрузки двигателей с 0,49 до 0,53 и с 0,63 до 0,71 соответственно. Следовательно, мощность оборудования позволяет вести волочение с более высокими, чем принято, единичными обжатиями, но при стандартном волочении они ограничиваются требованиями по уменьшению нагрева и деформационного старения, снижения расслаиваемости.

### 3.3 Расчет силовых условий комбинированного волочения в модуле

Известно, что волочение в роликовых волоках позволяет уменьшить усилие волочения по сравнению с традиционным волочением. Это подтверждают расчеты усилия волочения, выполненные в работе [111]. На рисунке 3.9 приведены результаты расчетов суммарного усилия волочения в роликовых волоках (1) и в монолитных (2) проволоки диаметром 6,0 мм из заготовки диаметром 12,0 мм.

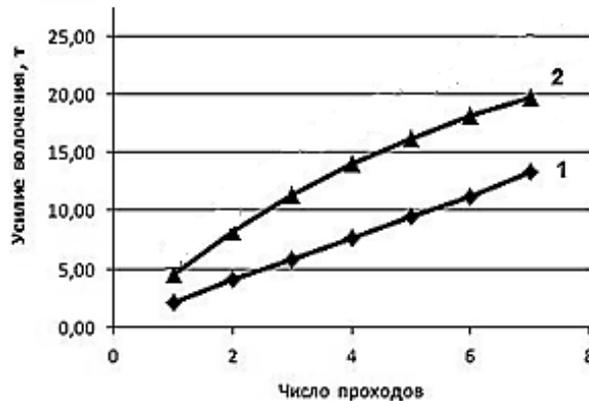


Рисунок 3.9 – Суммарное усилие волочения в роликовых волоках (1) и в монолитных (2)

Возможность существенного снижения усилия волочения при комбинированном волочении стальной проволоки была подтверждена результатами компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D [108]. На рисунке 3.10 приведены диаграммы изменения усилия волочения для случая

волочения проволоки диаметром 4,70 мм из катанки диаметром 6,00 мм в два прохода традиционным и в один проход модульно-комбинированным способом. Суммарное усилие волочения при комбинированном процессе на 19,9% ниже, чем суммарное при традиционном волочении, что позволяет снизить энергозатраты, а при многократном волочении повысить единичные обжатия и снизить число протяжек.

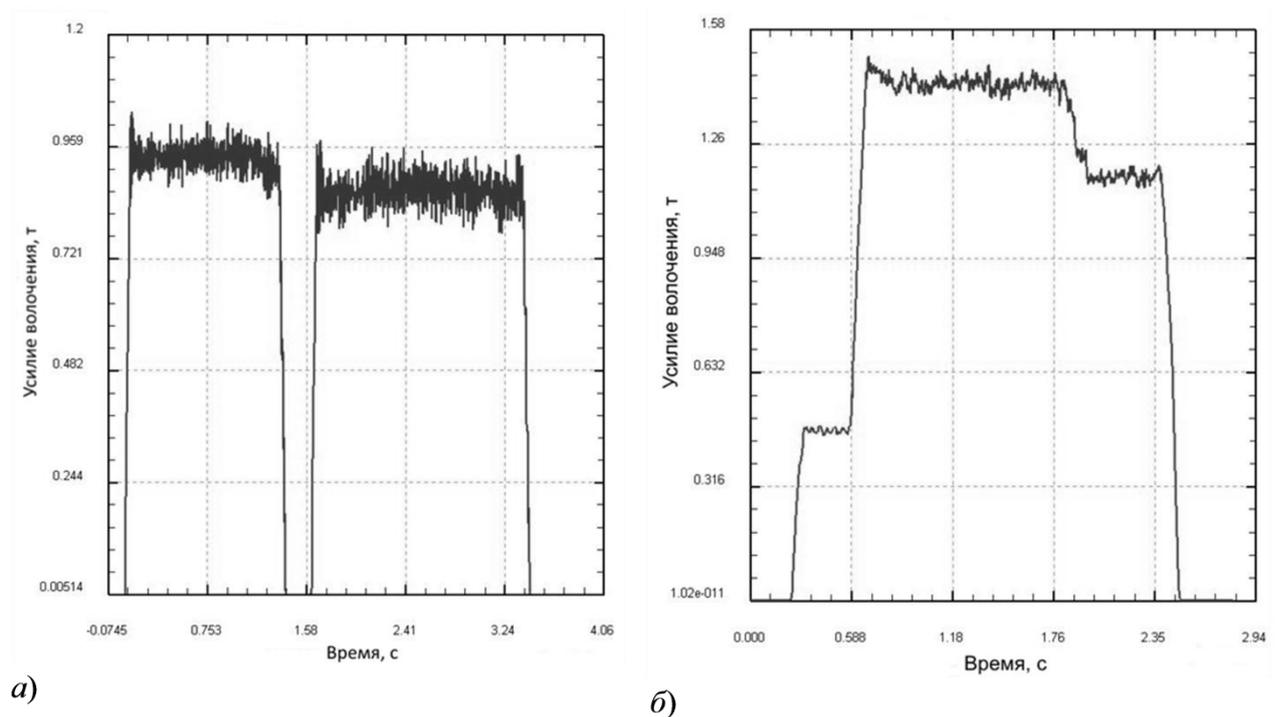


Рисунок 3.10 – Усилие волочения при традиционном волочении (а) и комбинированном волочении (б)

При исследовании процесса комбинированного волочения на первое место выдвигается задача расчета усилия волочения в модуле, а также сравнение его с усилием волочения при обычном методе волочения [1, 112, 113, 114, 115].

Для расчета энергосиловых параметров процесса волочения воспользуемся зависимостями, изложенными в работах [1, 9, 32, 34].

Усилие волочения для случая волочения в традиционных волоках можно записать как

$$P_{0вол} = F_2 \cdot \Phi_{дон} \cdot \bar{S}_T \cdot \ln(F_1 / F_2) \cdot (1 + f \cdot \text{ctg } \alpha), \quad (3.25)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  - начальная и конечная площадь поперечного сечения проволоки при каждом обжатии;

$\Phi_{дон}$  - коэффициент, учитывающий дополнительную работу пластической деформации сдвига;

$\bar{S}_T$  - среднее значение сопротивление пластической деформации за обжатие, зависящие от величины предшествующей деформации;

$f$  - коэффициент трения;  $\alpha$  - полуугол рабочего конуса волокна.

Для случая волочения в роликовых волокнах эта формула принимает вид:

$$P_{0рол} = F_1 \cdot \Phi_{дон}^* \cdot \bar{S}_T \cdot \ln(F_0 / F_1) \cdot (1 + f^* \cdot \text{ctg } \bar{\alpha}), \quad (3.26)$$

где  $F_0$  и  $F_1$  - начальная и конечная площадь поперечного сечения проволоки при каждом обжатии;

$P_{0рол}$  - усилие протяжки через роликовые волокна;

$\bar{\alpha}$  - приведенный угол роликовой волокна;

$\Phi_{дон}^*$  - коэффициент, учитывающий дополнительную работу пластической деформации сдвига при волочении в роликах;

$f^*$  - коэффициент трения в роликовой волокне.

Следует учитывать, что  $F_0$  - площадь заготовки, входящей в модуль,  $F_1$  - площадь невыполненного квадрата, получаемого в роликовой волокне,  $F_2$  - площадь круглой проволоки на выходе из модуля.

Усилие волочения в модуле

$$P_{мод.} = P_{0вол} + P_{0рол}. \quad (3.27)$$

Величина  $\Phi_{дон}$  ( $\Phi_{дон}^*$ ) зависит от геометрии зоны деформации и учитывает дополнительную работу пластической деформации сдвига при волочении. Ее

можно использовать для оценки неравномерности деформации. Для случая осесимметричной деформации предложена следующая формула расчета коэффициента, учитывающего дополнительную работу пластической деформации сдвига при волочении:

$$\Phi_{\text{дон}}(\Phi_{\text{дон}}^*) \approx 1 + 0,12(\Delta - 1), \quad (3.28)$$

При волочении в монолитных волокнах параметр  $\Delta$  вычисляется по формуле:

$$\Delta = \frac{\alpha}{\delta} (1 + \sqrt{1 - \delta})^2, \quad (3.29)$$

где  $\alpha$  - полуугол рабочего конуса волокна;

$\delta$  - единичное обжатие.

Параметр  $\Delta$  при протяжке круглой проволоки в роликах определяется из выражения [73]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{d_0}{4R\delta}} \cdot (2 - \delta), \quad (3.30)$$

где  $d_0$  - диаметр заготовки на входе в ролики;

$R$  - радиус ролика

Профиль калибра роликовой волокна приведен к виду, подобному геометрии стандартной волокна, и условно выражен через приведенный средний угол  $\bar{\alpha}$  для каждого прохода обжатия:

$$\bar{\alpha} = \arcsin \frac{1}{2} \left[ \frac{\sqrt{R(d_0 - h_1)}}{2D} + \frac{\sqrt{R(b_1 - d_1)}}{2D} \right], \quad (3.31)$$

где  $D$  и  $R$  - диаметр и радиус ролика в проходе обжатия;

$d_0$  - начальный диаметр проволоки;

$d_1$  - ее конечный диаметр;

$h_1$  - высота ее промежуточного сечения;

$b_1$  - ее ширина.

Промежуточное сечение представляет собой невыполненный квадрат и  $h_1 = b_1$ . Величину  $h_1$  определим по формуле для средней толщины полосы [34]. Для нашего случая

$$h_1 = \sqrt{d_0 \cdot d_1}, \quad (3.32)$$

где  $d_0$  - начальный диаметр проволоки, а  $d_1$  приняли как сторону квадратного профиля, получаемого в роликовой волоке.

В роликовых волоках заметно уменьшаются силы внешнего трения на участке контакта проволоки и роликов. Поэтому для определения усилия волочения коэффициент трения можно рассчитать как

$$f^* = A^* f, \quad (3.33)$$

где  $A^*$  определяется из выражения

$$A^* = \frac{\mu - 1}{2(\mu + 1)}, \quad (3.34)$$

Эта формула показывает, что коэффициент  $A^*$  значительно меньше единицы, что и выражает снижение потерь на внешнее трение в роликовой волоке по сравнению с обычной [1, 32].

Так как обычно используется для вычисления упрочнения патентованной проволоки формула Туленкова – Злотникова

$$\sigma_B = \sigma_n \left( \frac{D}{d} \right)^{0.5} \quad (3.35)$$

дает погрешность при больших деформациях, принята зависимость, разработанная на АО «БМК» для расчета временного сопротивления разрыву готовой

проволоки в зависимости от содержания углерода, диаметра и прочности катанки.

$$\sigma_{Впр} = \sigma_{Вкат} + (450 \cdot C + 85) \ln \mu, \quad (3.36)$$

где  $\sigma_{Впр}$  и  $\sigma_{Вкат}$  – соответственно временное сопротивление разрыву готовой проволоки и сорбитизированной катанки (патентированной передельной заготовки);

$C$  – содержание углерода, %;

$\mu$  – вытяжка.

Коэффициент запаса  $\gamma_B$  определяется по следующему выражению:

$$\gamma_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_{вол}} \geq 1,4 \div 2,3, \quad (3.37)$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву проволоки после волочения;

$\sigma_{вол}$  – напряжение волочения.

Напряжение волочения рассчитываем как отношение усилия волочения к площади поперечного сечения проволоки

$$\sigma_{вол} = \frac{P_{мод}}{F_{пр}}, \quad (3.38)$$

Мощность  $N$  определяем по формуле

$$N = \frac{P_{мод} \cdot v}{102 \cdot \eta}, \quad (3.39)$$

где  $P$  – усилие волочения, Н;

$v$  – скорость волочения, м/с  $v_n = v_{n-1} \cdot \mu$ ;  $\mu$  – единичная вытяжка;

$\eta$  – коэффициент полезного действия двигателя (принимаем 0,85).

Для выявления преимуществ комбинированного способа по приведенной методике были выполнены расчеты показывающие влияние основных технологических параметров (коэффициента трения, диаметра роликов и рабочего полуугла волокна) на энергозатраты (по суммарной потребляемой мощности) при предлагаемом процессе и в случае стандартного волочения, таблица 3.5. Для определения маршрута стандартного волочения была использована методика, изложенная в работе [90]. При проектировании комбинированных маршрутов волочения были использованы повышенные частные обжатия и на единицу снижено число проходов.

Выполненные расчёты показывают, что влияние диаметра валков на энергозатраты незначительно и не превышает 0,5%. Следовательно, приведенный средний угол  $\bar{\alpha}$ , определяемый диаметром ролика, необходим для получения определенных параметров очага деформации, обеспечивающих равномерную деформацию [110], но значительной экономии энергозатрат не способствует.

Величина полуугла рабочего конуса достаточно сильно влияет на энергозатраты: для малых значений характерны повышенные энергозатраты, а с увеличением угла рабочего конуса они понижаются. Для комбинированного волочения величина энергозатрат меньше чем при традиционном, что вполне объясняется лучшими условиями контактного трения, рисунок 3.11.

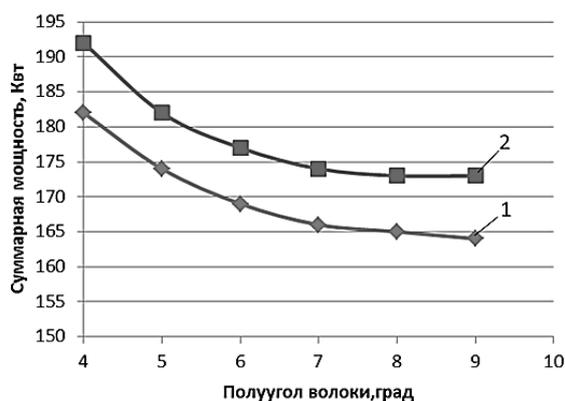


Рисунок 3.11 – Изменение суммарной потребляемой мощности при волочении проволоки с 8,0 мм в проволоку 4,0 мм при коэффициенте трения 0,05. 1 –комбинированный способ, 2-волочение в монолитных волокнах

Расчеты показывают, что наиболее высокие энергозатраты приходится на преодоление сил трения, рисунок 3.12. Для стандартного волочения эта зависимость имеет более резкий характер, что также можно объяснить более низким трением в модуле при комбинированном способе (т.к. часть сил трения в роликах приходится на трение качения в подшипниках, а другая часть носит активный характер и способствует втягиванию металла в калибр).

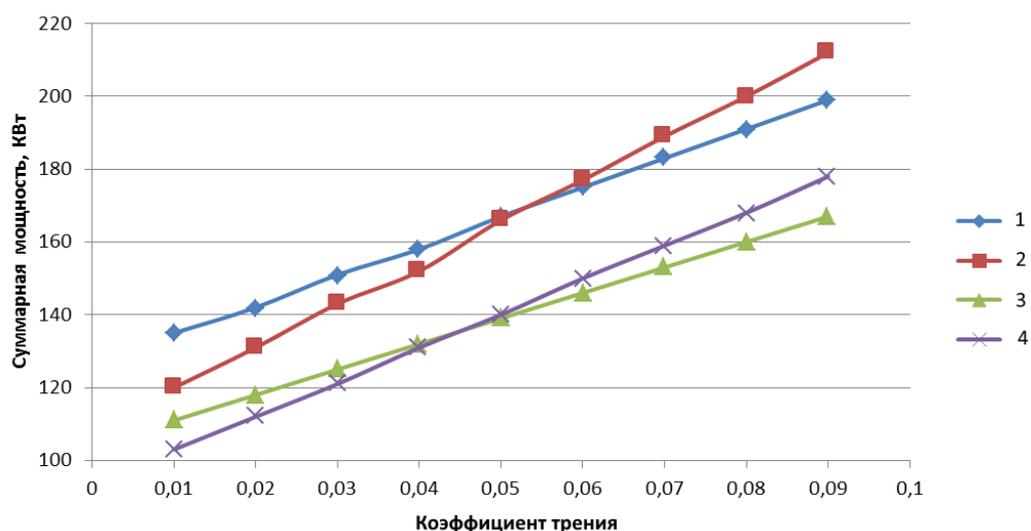


Рисунок 3.12 – Изменение суммарной потребляемой мощности от коэффициента трения:

- 1 – волочение с 8,0 под 4,0 мм комбинированным способом в 5 протяжек;
- 2 – волочение с 8,0 под 4,0 мм стандартным способом в 6 протяжек;
- 3 - волочение с 6,5 под 3,0 мм комбинированным способом в 5 протяжек;
- 4 - волочение с 6,5 под 3,0 мм стандартным способом в 7 протяжек.

Расчеты энергозатрат при волочении проволоки разных диаметров при равных суммарных обжатиях (75%), одной марки стали (сталь 70), при одинаковом коэффициенте трения (0,05) и величине полуугла рабочего конуса ( $6^\circ$ ) показали, что при комбинированном способе они растут медленнее, однако при любом способе волочения с увеличением диаметра протягиваемой проволоки усилие волочения и, соответственно, потребляемая мощность привода значительно возрастает, рисунок 3.13.

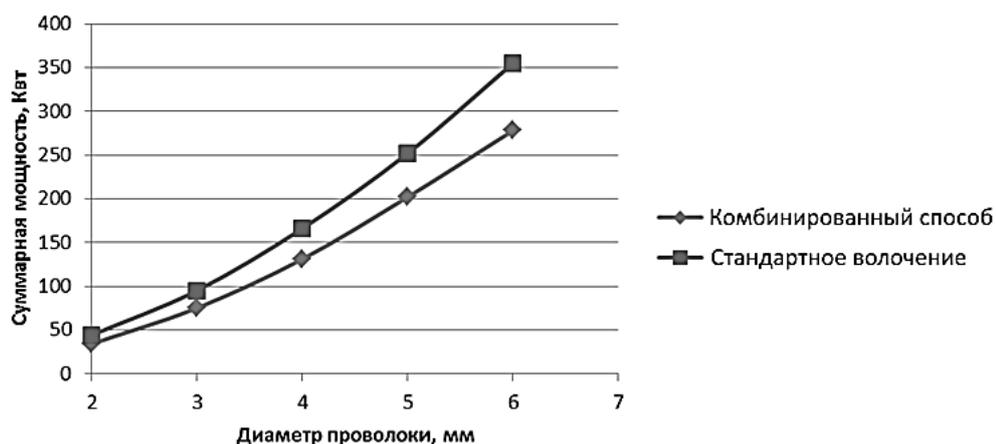


Рисунок 3.13 – Изменение суммарной потребляемой мощности от диаметра протягиваемой проволоки

Вместе с тем, наиболее высокая разница в потребляемой мощности наблюдается при волочении проволоки средних и больших диаметров, что подтверждает сделанные ранее выводы об экономической целесообразности применения комбинированного способа для изготовления именно этой проволоки [87, 116]. При этом проволока сохраняет высокий коэффициент запаса прочности в сравнении с волочением в монолитных волокнах.

### 3.4 Методика расчета технологических маршрутов и энергосиловых режимов

Предлагаемая методика позволяет выполнить расчет геометрических параметров промежуточного профиля, распределение деформации между роликовой и монолитной волокнами, упрочнение проволоки, энергосиловые параметры волочения, как на каждом блоке, так и для всего маршрута волочения. Алгоритм решения указанных задач приведен на блок-схеме, рисунок 3.14.

После расчета маршрута волочения необходимо выполнить расчеты в каждом модуле. Определяются площадь сечения проволоки на входе в модуль и выходе из него, а также площадь поперечного сечения промежуточного профи-

ля. Располагая значениями площадей сечения, можно вычислить величины вытяжек в роликовой и монолитной волоках.

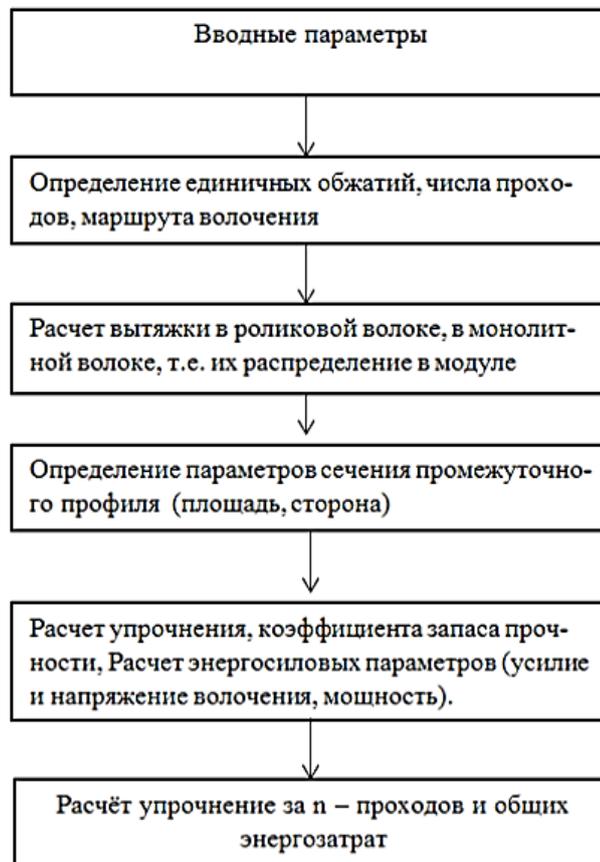


Рисунок 3.14 – Блок-схема расчета параметров комбинированного волочения

Последовательность выполнения расчетов обжатий в модуле.

- выполняется общий расчет маршрута волочения;
- выбирается величина коэффициента заполнения  $K_z$  и по таблице принимается коэффициент вытяжки  $\mu_{P.G.}$  ;
- рассчитывается площадь  $F_0$  круглой заготовки входящей в модуль и проволоки на выходе из модуля  $F_1$ ;
- с учетом коэффициента вытяжки  $\mu_{P.G.}$  определяем площадь невыполненного квадрата как  $F_0 / \mu_{P.G.} = F_{кв.}$  ;
- извлекаем квадратный корень и определяем сторону квадрата при полном заполнении;

- методом последовательного приближения по формуле площади определяем стороны квадратного профиля с заданной величиной  $K_3$ ;

- коэффициент вытяжки  $\mu_{М.В.} = F_{кв.} / F_1$ .

В такой же последовательности определяем параметры промежуточного профиля и обжатия в модуле на каждом из  $n$  проходов.

Упрочнение проволоки рассчитываем по формуле (3.36)

$$\sigma_{Впр} = \sigma_{Вкат} + (450 \cdot C + 85) \ln \mu,$$

где  $\sigma_{Впр}$  и  $\sigma_{Вкат}$  – соответственно временное сопротивление разрыву готовой проволоки и сорбитизированной катанки (патентированной передельной заготовки);

$C$  – содержание углерода, %;

$\mu$  – вытяжка.

Расчет энергосиловых параметров по методике, приведенной в п.3.3.

Пример расчета параметров в модуле.

Рассмотрим волочение проволоки диам. 6,5 мм на диаметр 5,45 мм.

- принимаем  $K_3 = 0,917$  и по таблице коэффициент вытяжки  $\mu = 1,11$ .

- заготовка диам. 6,5мм имеет площадь сечения равную  $33,16 \text{ мм}^2$ .

- с учетом вытяжки  $\mu = 1,11$  площадь квадрата с коэффициентом заполнения калибра  $K_3 = 0,917$  будет равна  $33,16 / 1,11 = 29,88 \text{ мм}^2$ .

- в этом случае при полном заполнении калибра сторона квадрата  $\sqrt{29,88} = 5,47 \text{ мм}$ .

- затем методом последовательного приближения по формуле площади определяем, что сторона квадрата при  $K_3 = 0,917$  будет равна  $5,71 \text{ мм}$ .

- проволока диаметром 5,45 мм имеет площадь сечения равную  $23,32 \text{ мм}^2$ .

- коэффициент вытяжки в монолитной волоке  $29,88 / 23,32 = 1,28$ .

Таким образом, при волочении в модуле заготовки диаметром 6,5 мм на диаметр 5,45 мм в роликовой волоке необходимо получить квадратный профиль со стороной 5,71 мм с заполнением калибра 0,917.

### 3.5 Рациональные параметры комбинированного волочения

На основе вышеизложенного определены значения вытяжки и обжатий, соответствующие различным значениям коэффициента заполнения калибра  $K_z$ . Результаты приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчета оптимальных обжатий при комбинированном волочении

Роликовая волока			Монолитная волока*		Доля обжатий в роликовой волоке	Примечание
Вытяжка ( $\mu$ )	Обжатие, %	Коэффициент заполнения $K_z$	Вытяжка ( $\mu$ )	Обжатие, %		
1,00	0,0	0,785	1,55	35,0	0,00	Малое обжатие в роликовой волоке и большое в монолитной волоке
1,01	1,0	0,811	1,53	34,6	0,029	
1,02	2,0	0,833	1,52	34,2	0,058	
1,03	2,9	0,851	1,50	33,3	0,087	
1,04	3,8	0,867	1,49	32,9	0,115	
1,05	4,8	0,879	1,48	32,4	0,148	
1,06	5,7	0,889	1,46	31,5	0,181	
1,07	6,5	0,897	1,45	31,0	0,210	
1,08	7,4	0,904	1,44	30,6	0,242	
1,09	8,3	0,909	1,42	29,6	0,280	
1,10	9,1	0,913	1,41	29,1	0,313	
1,11	9,9	0,917	1,40	28,6	0,346	
1,12	10,7	0,920	1,38	27,5	0,389	
1,13	11,5	0,923	1,37	27,0	0,426	
1,14	12,3	0,925	1,36	26,5	0,465	
1,15	13,0	0,928	1,35	25,9	0,503	
1,16	13,8	0,931	1,33	24,8	0,556	
1,17	14,5	0,933	1,32	24,2	0,599	
1,18	15,3	0,936	1,31	23,7	0,645	
1,19	16,0	0,939	1,30	23,1	0,694	
1,20	16,7	0,942	1,29	22,5	0,741	

Примечание\* Значения приведены для суммарного обжатия 35% ( $\mu = 1,55$ ).

Принято, что если  $K_z < 0,90$ , то проработка сечения проволоки будет недостаточна. При величине  $K_z > 0,93$  резко увеличивается напряжение волочения и нагрузка на волоку, что может привести к её разрушению.

Основная часть обжатия в каждом сдвоенном проходе осуществляется в монолитной волоке. Проведенные исследования показали, что для достижения преимуществ предлагаемого способа, доля обжатия в роликовой волоке должна составлять 0,24 – 0,50 от величины обжатия за проход.

На основе выполненных расчетов для ранее установленного оптимального интервала значений коэффициента заполнения калибра  $K_z$  определено отноше-

ние диагоналей промежуточного квадратного профиля к диаметру круга при волочении в монолитной волоке.

Расчет выполнен для отношения диагонали невыполненного квадрата ( $C_{н.кв.}$ ) к диаметру вписанного круга ( $D$ ), т.е. для минимальной деформации при волочении профиля в виде невыполненного квадрата в круг в монолитной волоке. Полученное соотношение зависит от размеров квадрата ( $h$ ) и радиуса закругления ( $R$ ), рисунок 3.15.

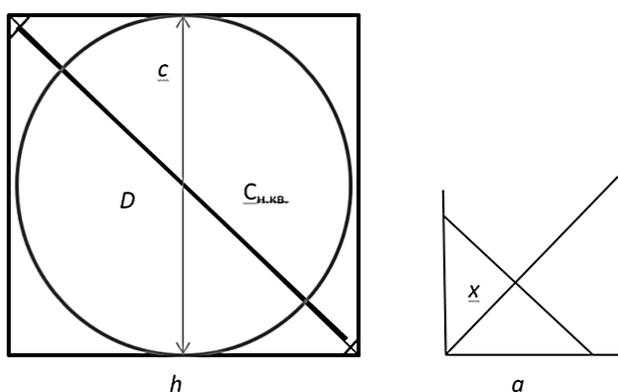


Рисунок 3.15. - К определению величины  $C_{н.кв.}/D$

Если упростить скругление до фаски под  $45^\circ$ , то

$$x = a\sqrt{\frac{1}{2}}, \quad (3.40)$$

$$C = \sqrt{2h^2} = h\sqrt{2}, \quad (3.41)$$

Тогда диагональ невыполненного квадрата можно определить из выражения

$$C_{н.кв.} = C - 2x = h\sqrt{2} - 2a\sqrt{\frac{1}{2}}, \quad (3.42)$$

Учитывая, что диаметр вписанного круга  $D = h$  отношение диагонали невыполненного квадрата к диаметру вписанного круга (для минимальной де-

формации при волочении профиля в виде невыполненного квадрата в круг в монолитной волоке) рассчитаем как

$$C_{н.кв.}/D = (h\sqrt{2}-2a\sqrt{1/2})/h, \quad (3.43)$$

В таблице 3.7. приведен расчет отношения  $C_{н.кв.}/D$  для оптимального интервала значений коэффициента заполнения калибра  $K_3$  нескольких невыполненных квадратных профилей.

Таблица 3.7 – Отношение  $C_{н.кв.}/D$  для различного коэффициента заполнения калибра  $K_3$

$H$ , мм	$R$ , мм	Отношение $C_{н.кв.}/D$	Коэффициент заполнения калибра $K_3$
5	1.70	1,10	0,93
	1.80	1,07	0,92
	1.90	1,05	0,91
	2.00	1,02	0,9
4	1.40	1,10	0,93
	1.50	1,06	0,92
	1.55	1,04	0,91
	1.60	1,02	0,9
3	1.07	1,08	0,93
	1.13	1,06	0,92
	1.17	1,04	0,91
	1.20	1,02	0,9

Установлено, что оптимальное отношение диагоналей промежуточного квадратного профиля к диаметру круга при волочении в монолитной волоке составляет 1,02 – 1,10.

### 3.6 Выводы по главе

1. Разработана методика определения частных вытяжек, их распределения в модуле между операциями протяжки в роликах и монолитной волоке, а также площади поперечного сечения промежуточного профиля.

2. Получено уравнение устанавливающее зависимость коэффициента заполнения калибра  $K_3$  от величины коэффициента вытяжки  $\mu$ . С помощью моде-

лирования в DEFORM-3D установлены максимально возможные значения коэффициента заполнения калибра  $K_z$ .

3. Выполнены расчеты энергозатрат при волочении по стандартным маршрутам, которые показывают, что существуют значительные резервы энергосбережения. Как правило, мощность оборудования позволяет вести волочение с более высокими, чем принято, единичными обжатиями, но они ограничиваются требованиями по уменьшению нагрева и деформационного старения, снижения расслаиваемости и др.

4. В результате моделирования в DEFORM-3D подтверждено, что при изготовлении проволоки комбинированным способом возможно значительное снижение усилия волочения. Это позволяет осуществлять волочение с большими единичными обжатиями, уменьшить число проходов и, соответственно, снизить энергозатраты.

5. Предложена методика расчета энергосиловых параметров комбинированного волочения (усилие волочения, напряжение волочения, мощность затрачиваемая).

6. Выполнены расчеты, показывающие влияние основных технологических параметров (коэффициента трения, диаметра роликов и рабочего полуугла волокни) на энергозатраты (по суммарной потребляемой мощности). Они показывают, что влияние диаметра валков на энергозатраты незначительно и не превышает 0,5%. Величина полуугла рабочего конуса достаточно сильно влияет на энергозатраты: для малых значений характерны повышенные энергозатраты, а с увеличением угла рабочего конуса они понижаются. Для комбинированного волочения величина энергозатрат меньше чем при традиционном, что вполне объясняется лучшими условиями контактного трения. Наиболее высокие энергозатраты приходится на преодоление сил трения, но для стандартного волочения они больше, что также можно объяснить более низким трением в модуле при комбинированном способе.

## **4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОМЫШЛЕННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЛОЧЕНИЯ И ОЦЕНКА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **4.1 Экспериментальное исследование влияния комбинированного волочения на свойства высокоуглеродистой проволоки**

Для определения влияния волочения с комбинированным нагружением на свойства стальной проволоки были проведены два эксперимента на промышленном оборудовании АО «БМК».

В первом случае проволока была изготовлена способом «прокатка-волочение» а также стандартным волочением в монолитных волокнах. Этот эксперимент проводился при выборе способа получения промежуточного профиля и одновременно с компьютерным моделированием процесса, результаты которого приведены в разделе 2.1.3.

Во втором эксперименте проволока была получена также двумя способами: традиционным волочением в монолитных волокнах и комбинированным волочением, представляющим собой чередование операций протяжки в неприводных роликах и волочения в монолитной волоке [96].

Волочение осуществлялось в твердосплавных волокнах с полууглом рабочего конуса  $6^\circ$  на волочильной машине типа UDZSA 2500. Прокатку в первом эксперименте осуществляли на плющильном стане СКМЗ 3х2/160. При выполнении второго эксперимента протяжку выполняли в клети с неприводными четырехроликowymi калибрами и диаметром валков 110 мм на стане фирмы «МАРШАЛЛ РИЧАРДС». По данным [112] ролики этого диаметра обеспечивают угол входа 7 – 8 градусов. Протяжку проводили с неполным заполнением калибра, в результате получали в сечении невыполненный квадрат. Затем полученные профили подвергали волочению в монолитной волоке. Предварительно была выполнена стандартная операция подготовки поверхности заготовки: травление в растворе серной кислоты, промывка, бурирование и сушка.

После изготовления проволоки комбинированным и стандартным способом был выполнен сравнительный анализ механических свойств, а также микротвердости и микроструктуры.

Механические свойства проволоки оценивались путем испытаний на растяжение, перегиб и скручивание. Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 10446-80 на разрывной машине ZD-20, испытания на перегиб по ГОСТ 1579-93 на приборе ИХ 5111. Число скручиваний определяли по ГОСТ 1545-80 на приборе К-3 на образцах длиной 100d и нагрузке 2% от разрывного усилия Р.

Распределение деформации в металле определяли замером микротвердости по сечению проволоки на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76.

Для изучения микроструктуры были подготовлены шлифы образцов проволоки. Исследования проводили на микроскопе «OLYMPUS GX51» при увеличении 500.

#### **4.1.1 Сравнительная оценка свойств проволоки, изготовленной традиционным волочением и способом «прокатка-волочение»**

При проведении эксперимента [87] проволока была изготовлена из сорбизированной катанки диаметром 5,50 мм ст. М70 по двум схемам:

1. Катанка прокатана в 2-х валковой клети плющильного стана на размер 4,92 x 5,72мм. После травления и нанесения буры лента протянута через две волокна по маршруту:

5,20 – 4,55 мм.

2. Катанка после подготовки поверхности протянута по маршруту 5,5 – 5,20 – 4,55 мм без операции плющения.

Схема эксперимента приведена на рисунке 4.1.

После выполнения этих операций провели сравнение механических свойств, микротвердости и микроструктуры полученной проволоки.

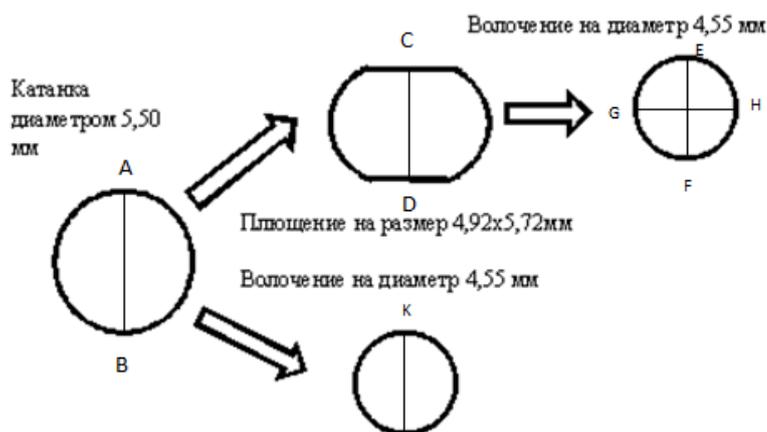


Рисунок 4.1 – Схема эксперимента «прокатка-волочение»

Для определения отсутствия ликвации основных химических элементов определили химический состав стали на поверхности и в середине проволоки. В таблице 4.1 приведен фактический химический состав исследуемой проволоки.

Таблица 4.1 – Химический состав стали по сечению

Содержание элементов, %							
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Поверхность							
0,69	0,60	0,31	0,018	0,017	0,02	0,04	0,02
-	0,60	0,33	0,020	0,016	0,01	0,04	0,02
Середина							
0,70	0,64	0,35	0,010	0,017	0,01	0,03	0,02
-	0,65	0,35	0,010	0,017	0,02	0,03	0,02

В таблице 4.2 представлены результаты измерения механических свойств проволоки, изготовленной по двум схемам.

Таблица 4.2 – Механические свойства проволоки диаметром 4,55 мм из стали марки 70

№ варианта	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Удлинение $\delta_{100}$ , %	Сужение $\phi$ , %	Число перегибов	Число скручиваний
1	<u>1265 – 1280</u> 1270	<u>4 – 5</u> 4,5	<u>44 – 48</u> 46	<u>5 – 6</u> 5,5	<u>15 – 30</u> 23
2	<u>1260 – 1300</u> 1280	<u>4 – 5</u> 4,6	<u>45 – 47</u> 46	<u>8 – 9</u> 8,5	<u>7 – 7</u> 7

Примечание: при скручивании образцов, подготовленных по варианту 2, наблюдается локализация деформации в месте разрушения.

Как видно из представленных данных проволока независимо от способа изготовления имеет практически равные значения временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и сужения. Однако проволока, изготовленная способом «прокатка-волочение», имеет большее число скручиваний, т.е. имеет больший ресурс пластичности. Но из-за неравномерности деформации при волочении полосы в круг (относительное обжатие по толщине 7,5%, по ширине 20,5%) вероятно появление остаточных растягивающих напряжений в поверхностных слоях проволоки, снижающих предел выносливости и вызывающих уменьшение числа перегибов.

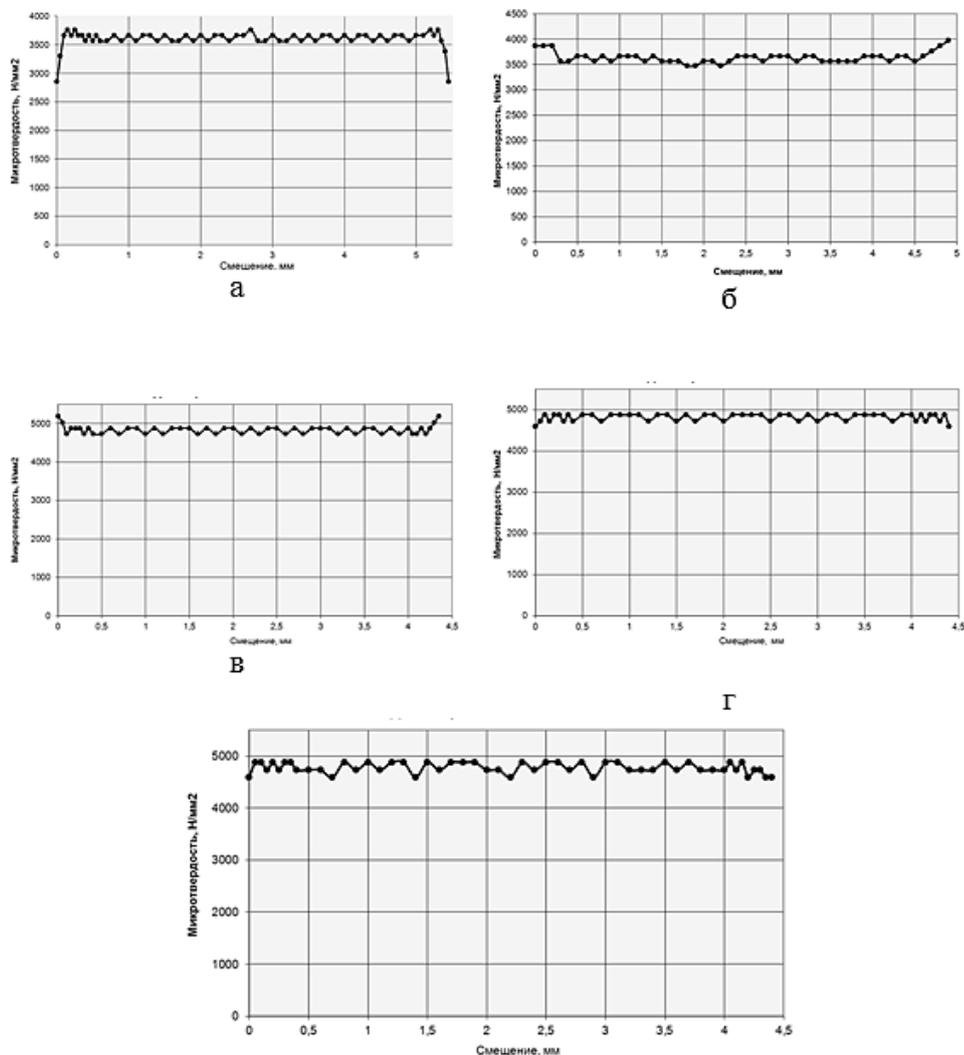


Рисунок 4.2 – Распределение микротвердости по сечению катанки диам. 5,50 мм (а), по сечению CD после плющения (схема 1) (б), по сечению EF после волочения (схема 1) (в), по сечению GH после волочения (схема 1) (г), по сечению KL после волочения (схема 2) (д).

Измерения микротвердости проводились по диаметру сечения катанки и проволоки. Для обоих вариантов картина изменения твердости примерно одинакова. Распределение микротвердости на поперечных сечениях катанки и проволоки приведено на рисунке 4.2.

Можно отметить, что распределение микротвердости по сечению проволоки не имеет значительных отличий. Однако в направлениях CD и EF в поверхностных слоях микротвердость выше и, следовательно, больше деформация. В направлениях GH (схема 1) и KL (схема 2) характер распределения микротвердости практически одинаков. Это говорит о большей неоднородности деформации при волочении плющеного подката, чем при стандартном волочении, что подтверждается результатами компьютерного моделирования.

На рисунке 4.3 приведены фотографии микроструктуры проволоки изготовленной по двум вариантам. В виду малой суммарной деформации заметных изменений в микроструктуре не отмечено.

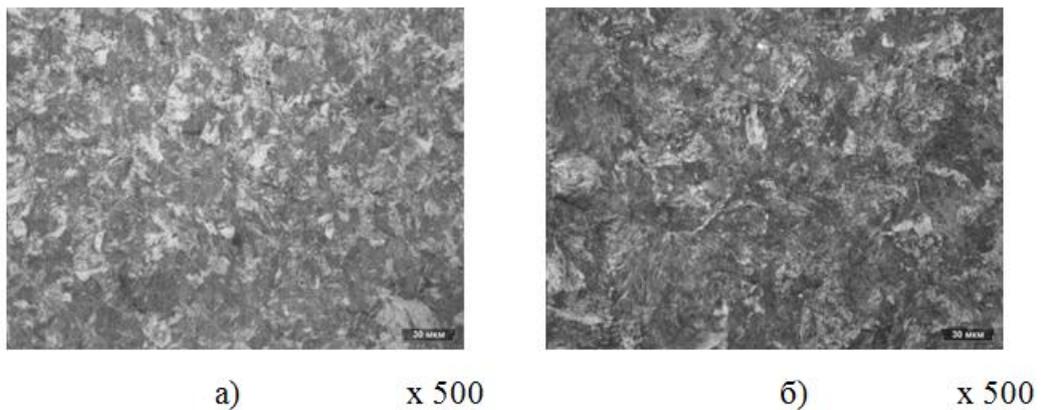


Рисунок 4.3 – Микроструктура проволоки:

а) прокатка-волочение; б) волочение в монолитных волоках.

По результатам данного эксперимента можно сделать вывод, что число скручиваний выше у проволоки полученной по схеме 1. Разрушение при скручивании происходит без локализации, что говорит о большей накопленной деформации. Волочение плющеной полосы в монолитной волоке характеризуется повышенной неравномерностью деформации по сечению.

#### 4.1.2 Сравнительная оценка свойств проволоки, изготовленной традиционным и комбинированным способом

По результатам первого эксперимента и компьютерного моделирования было выбрано направление разработки комбинированного процесса, в котором для снижения неравномерности деформации было предложено изготовление промежуточного профиля осуществлять волочением в многовалковых калибрах [87]. Поэтому в ходе второго эксперимента волочение квадратного профиля с неполным заполнением калибра выполняли в неприводной роликовой волоке с четырехроликовым калибром. Полученные невыполненные квадратные профили протягивали в круг через монолитные волокна, рисунок 4.4. Для сравнения аналогичную проволоку изготовили традиционным способом волочения в монолитных волокнах.



Рисунок 4.4 – Четырехроликовая волока (а) для волочения промежуточной проволоки квадратного сечения (б) и монолитная волока (в) для волочения готовой проволоки (г)

Для проведения исследований была изготовлена проволока диаметрами 3,20 мм, 4,00 мм и 5,00 мм.

Проволока диаметром 3,20 мм была изготовлена из патентованной передельной проволоки диаметром 5,60 мм ( $\sigma_B = 1190 \text{ Н/мм}^2$ ) из стали марки 70. Заготовкой для проволоки диаметром 4,00 мм являлась сорбитизированная катанка диаметром 6,50 мм из стали марки 70 с временным сопротивлением разрыву  $1080 \text{ Н/мм}^2$ . Проволока диаметром 5,00 мм была изготовлена из патентованной заготовки диаметром 7,10 мм из стали марки 75 с временным сопротивлением разрыву  $1190 \text{ Н/мм}^2$ .

Микроструктура сорбитизированной катанки представляла собой сорбитообразный перлит 1 балла с редкими обрывками ферритной сетки. Микроструктура патентованной заготовки: сорбит с наличием мелких участков феррита. Химический состав изготовленной проволоки приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Химический состав проволоки диаметром 3,2 мм 4,0 мм и 5,0 мм

Диаметр, мм	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
3,20	0,73	0,48	0,34	0,016	0,015	0,06	0,03	0,05
4,00	0,70	0,52	0,25	0,014	0,017	0,04	0,02	0,02
5,00	0,75	0,50	0,29	0,005	0,012	0,04	0,03	0,03

Ниже приведены маршруты изготовления проволоки.

Проволока диаметром 3,20 мм.

Вариант 1– волочение в монолитных волоках по маршруту

$$5,60 \rightarrow 5,10 \rightarrow 4,50 \rightarrow 4,00 \rightarrow 3,55 \rightarrow 3,20 \text{ мм}$$

Вариант 2– волочение в роликовых и монолитных волоках по маршруту

$$5,60 \rightarrow [5,00 \times 5,00 \rightarrow 4,60] \rightarrow [4,10 \times 4,10 \rightarrow 3,80] \rightarrow [3,50 \times 3,50 \rightarrow 3,20] \text{ мм}$$

Проволока диаметром 4,00 мм.

Вариант 1 – волочение в монолитных волокнах по маршруту

$$6,50 \rightarrow 5,90 \rightarrow 5,15 \rightarrow 4,50 \rightarrow 4,00 \text{ мм}$$

Вариант 2 – волочение в роликовых и монолитных волокнах по маршруту

$$6,50 \rightarrow 5,90 \rightarrow [5,50 \times 5,00 \rightarrow 4,70] \rightarrow [4,30 \times 4,30 \rightarrow 4,00] \text{ мм}$$

Проволока диаметром 5,00 мм

Вариант 1 - волочение в монолитных волокнах по маршруту

$$7,10 \rightarrow 6,60 \rightarrow 5,80 \rightarrow 5,00 \text{ мм.}$$

Вариант 2 - волочение в роликовых и монолитных волокнах по маршруту

$$7,10 \rightarrow 6,60 \rightarrow [5,70 \times 5,70 \rightarrow 5,00] \text{ мм.}$$

Стандартными заводскими исследованиями с помощью оптического микроскопа заметных различий в микроструктуре при 500-кратном увеличении выявлено не было. Анализ микроструктуры проволоки диаметрами 3,20 мм, 4,00 мм и 5,00 мм не подтверждает каких-либо качественно значимых изменений микроструктуры в результате пластической деформации - сохраняется исходная микроструктура, но с явно выраженной текстурой деформации, рисунок 4.5. Следует отметить, что задача получения мелкозернистых структур при проведении экспериментов изначально не ставилась т.к. в предложенном способе ИПД с деформацией сдвига не реализуется. Однако близкие по исполнению эксперименты [67] позволяют предполагать, что методами электронной микроскопии может быть выявлено разрушение и измельчение пластин цемента.

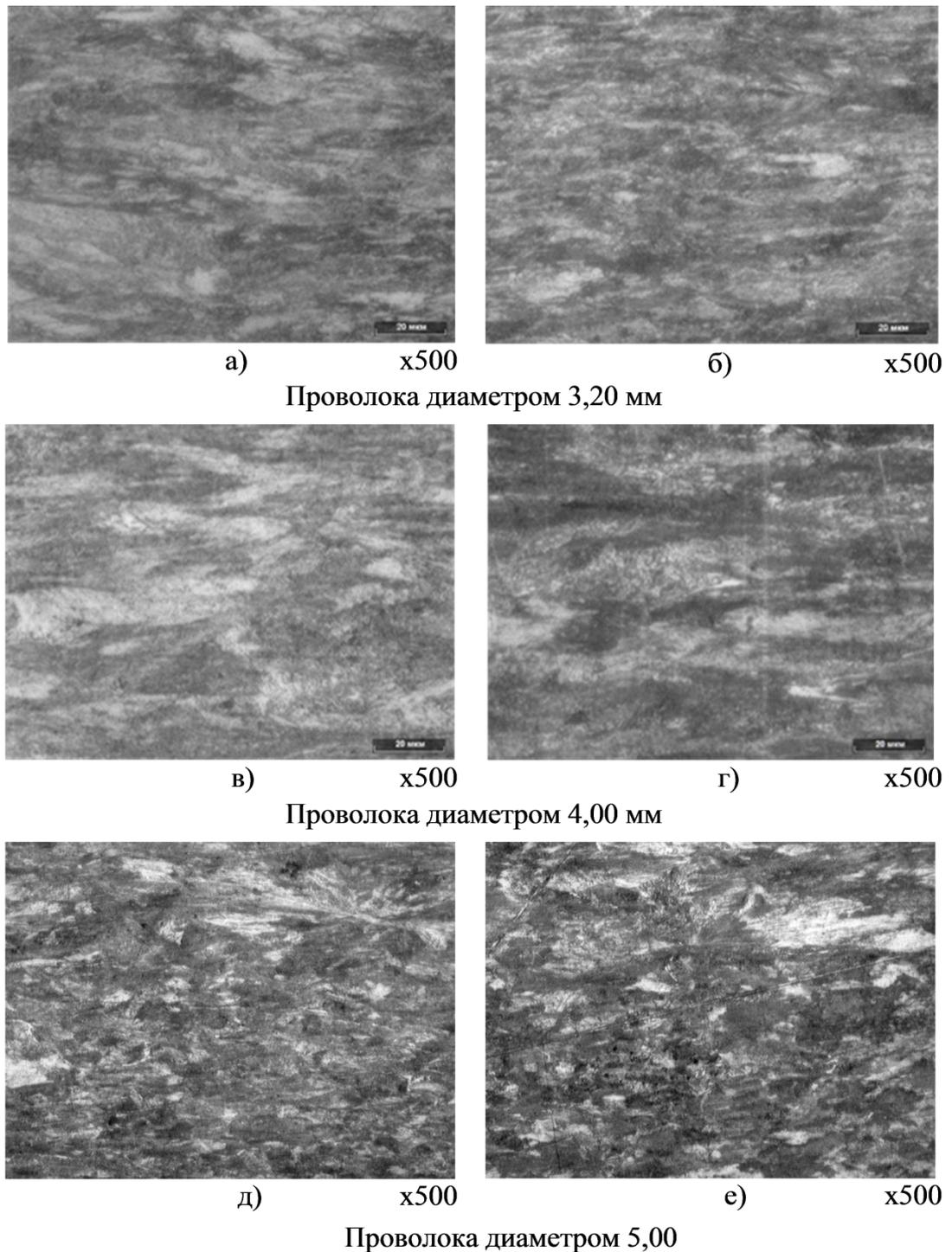


Рисунок 4.5 – Микроструктура проволоки, изготовленной традиционным (а,в,д) и комбинированным способами (б,г,е)

Распределение микротвердости по сечению проволоки, характеризующее равномерность деформации, определяли на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76. Результаты измерений представлены на рисунке 4.6.

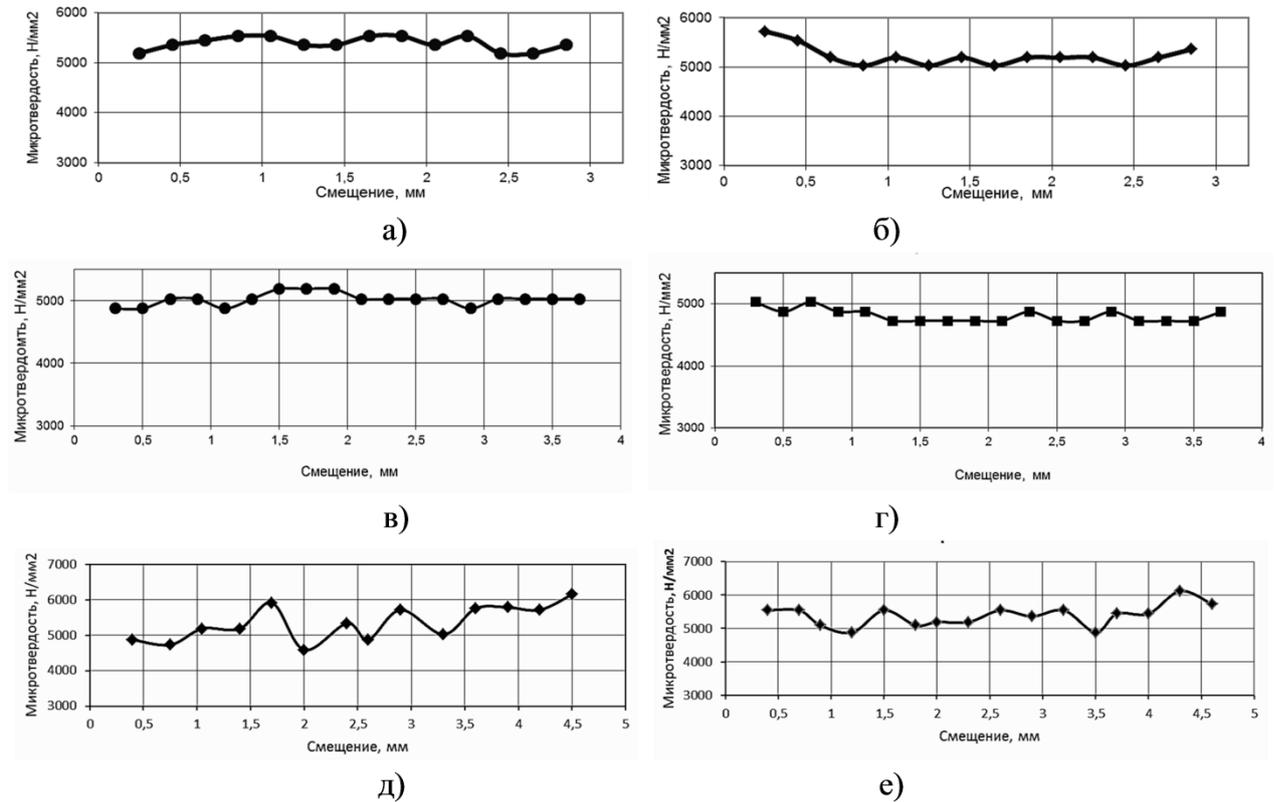


Рисунок 4.6 – Распределение микротвердости по сечению проволоки  
 а – диам. 3,20 мм (традиционный способ); б – диам. 3,20 мм (комбинированный способ); в – диам. 4,0 мм (традиционный способ); г – диам. 4,0 мм (комбинированный способ); д – диам. 5,0 мм (традиционный способ); е – диам. 5,0 мм (комбинированный способ)

В таблице 4.4 представлены результаты испытаний механических свойств проволоки диаметрами 3,2 мм 4,0 мм и 5,0 мм различных способов изготовления.

У проволоки диаметром 3,20 мм, изготовленной как стандартным, так и комбинированным волочением, практически нет разницы по прочностным и пластическим свойствам.

Наоборот, у проволоки диаметром 4,00 мм эта разница весьма существенна. Данная проволока независимо от способа изготовления имеет практически одинаковое распределение микротвердости по сечению. Однако среднеарифметическая величина микротвердости несколько выше у проволоки изготовлен-

ной стандартным волочением и равна  $5023 \text{ Н/мм}^2$ . Средняя величина микротвердости проволоки изготовленной комбинированным способом составляет  $4803 \text{ Н/мм}^2$ . Вероятная причина – повышенное деформационное старение при традиционном волочении в монолитных волокнах. По этой причине у проволоки, изготовленной традиционным способом выше временное сопротивление разрыву (на 6,9%). При этом у проволоки, изготовленной комбинированным волочением, наблюдается значительное увеличение пластических характеристик: удлинение выше на 33,3%, сужение - на 11,1% число перегибов – на 15,9% и число скручиваний выше на 17,1%. Это свидетельствует о лучшей проработке по сечению и большей равномерности механических свойств по длине проволоки диаметром 4,00 мм, изготовленной комбинированным способом.

Таблица 4.4 – Механические свойства проволоки диаметрами 3,2 мм 4,0 мм и 5,0 мм

Способ изготовления	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , $\text{Н/мм}^2$	Удлинение $\delta_{100}$ , %	Сужение $\varphi$ , %	Число перегибов	Число скручиваний
Диаметр 3,20 мм (относительное обжатие 67 %)					
Традиционный	$\frac{1670 - 1690}{1683}$	$\frac{3 - 4,5}{3,8}$	—	$\frac{22 - 25}{23,3}$	$\frac{32 - 43}{39}$
Комбинированный	$\frac{1670 - 1680}{1673}$	$\frac{3 - 4,5}{3,8}$	—	$\frac{21 - 24}{22,7}$	$\frac{37 - 41}{38,7}$
Диаметр 4,00 мм (относительное обжатие 62 %)					
Традиционный	$\frac{1540 - 1550}{1545}$	$\frac{3,2 - 3,4}{3,3}$	49,5	$\frac{10 - 11}{10,7}$	$\frac{27 - 34}{31}$
Комбинированный	$\frac{1440 - 1450}{1445}$	$\frac{4,1 - 4,4}{4,3}$	55,0	$\frac{12 - 13}{12,4}$	$\frac{34 - 38}{36,3}$
Диаметр 5,00 мм (относительное обжатие 50,4 %)					
Традиционный	$\frac{1538 - 1534}{1536}$	$\frac{3,5 - 3,9}{3,7}$	51,0	$\frac{12 - 15}{13,3}$	$\frac{24 - 27}{25,7}$
Комбинированный	$\frac{1561 - 1544}{1552,5}$	$\frac{3,6 - 3,8}{3,7}$	50,0	$\frac{12 - 13}{12,7}$	$\frac{26 - 31}{28}$

Для проволоки диаметром 5,00 мм характерно неравномерное распределение микротвердости по сечению, что объясняется значительно меньшей деформацией и слабой проработкой сечения. Средняя величина микротвердости при

обоих способах изготовления практически одинакова и составляет  $5350 \text{ Н/мм}^2$  и  $5370 \text{ Н/мм}^2$  соответственно при стандартном волочении и комбинированном. При равных значениях удлинения, сужения и предела прочности проволока, полученная традиционным волочением, выдержала большее число перегибов (на 4,7%). Но и в этом случае комбинированный процесс позволяет повысить число скручиваний на 8,9%.

При испытании на скручивание контролировали наличие расслоения проволоки. Его отсутствие говорит о том, что значительных повреждений в объеме металла нет. Проволока, выдержавшая большее число скручиваний, имеет более равномерную структуру и механические свойства. Так как испытание на кручение является наиболее точным методом определения пластичности и повреждаемости металла при пластической деформации [117], можно говорить о том, что комбинирование волочения в неприводных валках и в монолитных волоках в единый процесс является эффективным резервом повышения эксплуатационных свойств стальной проволоки.

#### **4.2 Выбор диапазона диаметров проволоки изготавливаемой комбинированным волочением**

Выполненные расчеты [116] показали, что использовать комбинированное волочение целесообразно при изготовлении проволоки средних и больших диаметров, т.к. на практике с увеличением диаметра протягиваемой проволоки применяют пониженные частые обжатия. Это достаточно просто подтверждается с помощью поверхностного фактора  $F/V$  [97, 118], о котором упоминалось в главе 1.

Рассмотрим влияние этого фактора подробнее. В процессе волочения проволоки происходит постоянное уменьшение ее диаметра и, соответственно, увеличение соотношения  $F/V$ . Определим диаметр проволоки, для которого поверхностный фактор  $F/V = 1$ . Тогда при дальнейшем волочении с уменьшением диаметра проволоки площадь контакта  $F$  будет превышать объем металла

в очаге деформации  $V$ , т.е.  $F/V > 1$ . Логично предположить, что в этом случае при оптимальных величинах углов волок и единичных обжатий наряду с растягивающим напряжением в очаге деформации будет преимущественно определяться сжимающими напряжениями. С уменьшением диаметра протягиваемой проволоки эти сжимающие напряжения будут только увеличиваться. Известно, что сжимающие напряжения в большей мере способствуют пластичности, чем растягивающие.

Площадь поверхности контакта металла с деформирующим инструментом может быть выражена зависимостью:

$$F = \frac{\pi \cdot (d_0 - d_1) \cdot (d_0 + d_1)}{4 \cdot \alpha} , \quad (4.29)$$

где  $d_0$  - диаметр проволоки на входе в волоку, мм

$d_1$  - диаметр проволоки на выходе из волоки, мм

$\alpha$  - рабочий угол волоки, рад.

Объем металла в очаге деформации определяется выражением:

$$V = \frac{\pi \cdot (d_0 - d_1) \cdot (d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2)}{24 \cdot \alpha} . \quad (4.30)$$

Тогда отношение поверхности контакта к объему:

$$\frac{F}{V} = \frac{6 \cdot (d_0 + d_1)}{d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2} . \quad (4.31)$$

Из полученного выражения видно, что соотношение  $F/V$  зависит от начального диаметра заготовки и степени деформации (вытяжки  $\mu$  или относительно обжатия  $\delta$ ).

Приняв маршрут волочения заготовки большого диаметра в тонкую проволоку по равным вытяжкам, вычислим для него значения  $F$ ,  $V$  и  $F/V$ . Результаты расчетов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчетные величины поверхностных параметров проволоки

Маршрут	8,0	7,1	76,3	5,7	5,0	4,5	4,0	3,6	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0
Вытяжка, $\mu$		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Площадь $F$ , мм <sup>2</sup>		196	156	123	99	78	62	45	40	35	23	17	15
Объем $V$ , мм <sup>3</sup>		371	264	185	132	93	65	43	34	26	15	10	8
$F/V$ , мм <sup>-1</sup>		0,53	0,59	0,67	0,75	0,84	0,94	1,06	1,19	1,33	1,49	1,68	1,89

На рисунке 4.7 приведены распределение  $F$ ,  $V$  и  $F/V$  по маршруту волочения

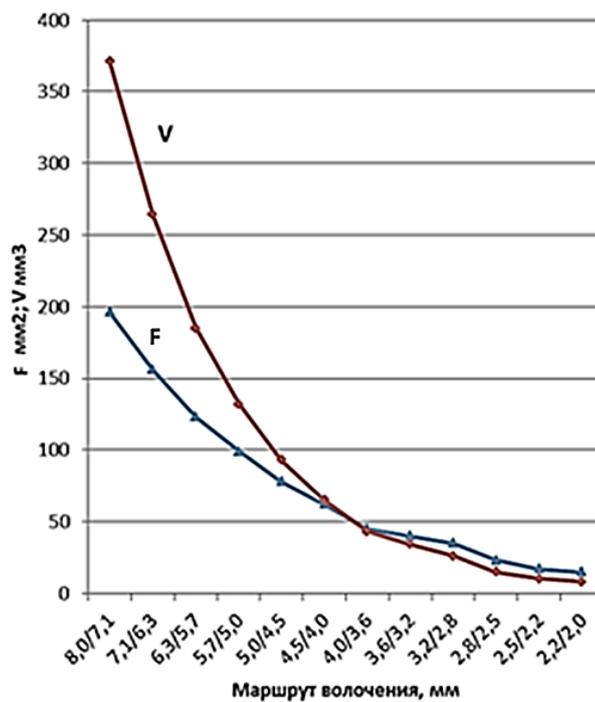


Рисунок 4.7 – Изменение параметров  $F$ ,  $V$  и  $F/V$  по маршруту волочения

Видно, что условию  $F/V = 1$  отвечает диаметр  $\sim 4,0$  мм, т.е. при дальнейшем волочении с уменьшением диаметра отношение  $F/V$  будет расти. Для слу-

чая волочения в монолитной волоке равномерная деформация и хорошая деформируемость металла могут быть обеспечены для проволоки диаметром менее 4,0 мм. А при волочении проволоки диаметром более 4,0 мм деформируемость металла будет снижаться. Способ модульно-комбинированного волочения позволяет сдвинуть эту величину в сторону больших значений. Полученные результаты согласуются с выводами, приведенными в работе [111], в которой на основе анализа энергозатрат было установлено, что достаточно равномерная деформация обеспечивается при волочении в монолитных волоках проволоки диаметром менее 4,0 мм.

Выразив отношение (3) через коэффициент вытяжки  $\mu$  получим:

$$\frac{F}{V} = \frac{6 \cdot (\sqrt{\mu} + 1)}{d_1 \cdot (\mu + \sqrt{\mu} + 1)} \quad \text{или} \quad \frac{F}{V} = \frac{6 \cdot (\sqrt{\frac{1}{\mu}} + 1)}{d_0 \cdot (\frac{1}{\mu} + \sqrt{\frac{1}{\mu}} + 1)}. \quad (4.32)$$

Для случая, когда отношение  $F/V = 1$

$$d_1 = \frac{6 \cdot (\sqrt{\mu} + 1)}{\mu + \sqrt{\mu} + 1} \quad \text{или} \quad d_0 = \frac{6 \cdot (1 + \sqrt{\frac{1}{\mu}})}{1 + \sqrt{\frac{1}{\mu}} + \frac{1}{\mu}}. \quad (4.33)$$

Рисунок 4.8 иллюстрирует, как будет изменяться диаметр проволоки (начальный и конечный) от степени деформации при условии  $F/V = 1$ .

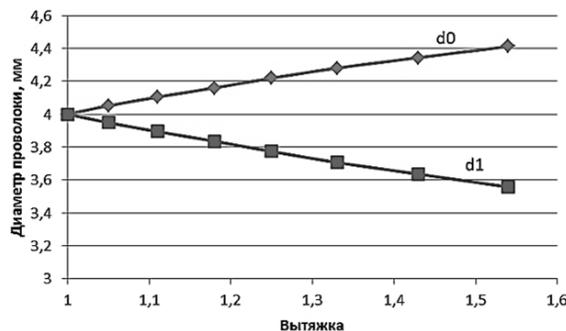


Рисунок 4.8 – Изменение начального и конечного диаметра проволоки в зависимости от вытяжки при значении поверхностного фактора  $F/V = 1$

Следовательно, при выполнении условия  $F/V = 1$  с увеличением деформации будет происходить постепенное увеличение начального диаметра и уменьшение конечного диаметра. Это доказывает, что величина  $d_l$  не является константой и с ростом деформации уменьшается: для принятых в практике волочения единичных обжатий от 10% до 25% ( $\mu=1,1$  и  $1,3$  соответственно) она меняется от 3,9 мм до 3,7 мм. Другими словами, диаметр  $d_l$  зависит от схемы напряженного состояния и является некой критической величиной, определяющей способ деформации. Если диаметр протягиваемой в монолитной проволоке проволоки больше  $d_l$ , деформируемость металла снижается, причем тем сильнее, чем больше диаметр заготовки под волочение. В этом случае необходимо применять комбинированное волочение, увеличивая при этом площадь контакта металла и инструмента  $F$ , соответственно поверхностный фактор  $F/V$ , и снизить влияние масштабного фактора на пластичность проволоки. Для проволоки диаметром менее  $d_l$  равномерная деформация и удовлетворительная деформируемость металла может быть обеспечена при традиционном волочении в монолитной проволоке.

#### **4.3 Выбор технологической смазки при комбинированном волочении**

Важным резервом снижения усилия волочения и энергозатрат является правильный выбор технологической смазки и эффективного способа ее ввода в очаг деформации с целью снижения контактного трения.

Из практики ОМД известно, что существенно снизить трение может гидродинамический эффект, а процесс прокатки исключительно благоприятен для создания условий гидродинамического трения, т.к. смазка захватывается полосой и валками и нагнетается в очаг деформации [83]. В этом случае возможно достижение высоких давлений смазки и создание гидродинамического эффекта, например, на порошкообразном мыле. Таким образом, применение валков с оптимальной геометрией калибровки, использование смазки с определенными

реологическими свойствами и скоростей прокатки, обеспечивающих нагнетание смазки, может осуществить прокатку в условиях гидродинамического трения. За счет формирования на поверхности проволоки плотного слоя технологической смазки значительно улучшаются условия трения при последующем волочении в монолитной волоке, особенно после механического удаления окалины, когда свежеччищенная поверхность плохо захватывает технологическую смазку [109]. Так использование при стандартном волочении метода прижимных роликов позволяет создать хорошие условия смазывания и эффективное увлечение смазки катанки в канал волоки. Метод заключается в обкатывании катанки роликами, которые принудительно механически наносят и фиксируют смазку на поверхности проволоки [26].

Следовательно, при комбинированном волочении в неприводных роликах будет обеспечиваться запрессовка смазки во все впадины шероховатой поверхности проволоки, что позволит увеличить плотность подсмазочного слоя и адгезию технологической смазки к поверхности протягиваемого материала. Чем больше будет плотность смазки на выходе из роликов, тем выше эффективность нагнетания смазки в последующую монолитную волоку.

В виду того, что смазки с высоким содержанием стеарата кальция склонны к налипанию на ролики, их применение может привести к блокированию вращения роликов и поломке оборудования. Поэтому для роликовых волок, а, следовательно, и при комбинированном волочении рекомендуется использовать смазки на основе стеарата натрия [31, 83, 119].

#### **4.4 Оборудование и инструмент для реализации комбинированного волочения**

Предлагаемый для внедрения в производство комбинированный способ волочения легко реализуется как на новом оборудовании, так и при модернизации морально устаревшего, но еще функционирующего оборудования. Практически все модели роликовых волок достаточно технически просто и без зна-

чительных затрат могут быть установлены на действующие волочильные машины в одну линию с мыльницами и волокодержателями, рисунок 4.9. Вода, поступающая для охлаждения волок, частично будет использована для охлаждения осей и подшипников роликовых волок. В остальном волочильная машина сохранит традиционную комплектацию: размотка, волочильные блоки, намоточное устройство. Но при создании более сложных многооперационных волочильных машин, она может быть дополнена модулями механического удаления окалины, нанесения сухих подмазочных покрытий и дополнительной технологической смазки.

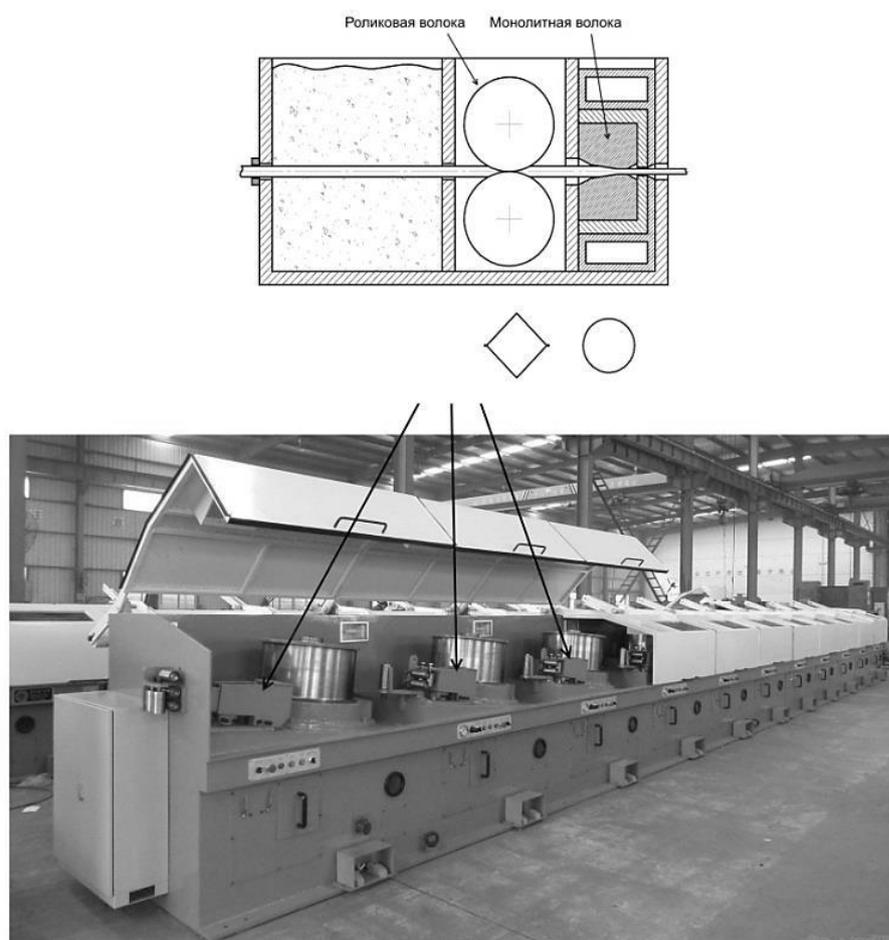


Рисунок 4.9 – Схема модуля и место его установки на волочильной машине

На основе анализа выполненных исследований, а также литературных данных [1, 120] сформулированы общие требования и принципы создания модуль-

ного оборудования для изготовления проволоки на основе применения совмещенных методов обработки металлов:

- непрерывность технологического процесса для достижения наибольшей производительности;
- максимальные степени деформации за один проход;
- заданная точность размеров готовой проволоки;
- низкая энергоемкость процесса обработки;
- гибкость перехода от одного размера к другому;
- модульность оборудования;
- экономическая целесообразность.

Предложенный способ по аналогии с традиционным позволяет осуществлять волочение в непрерывном режиме, но позволяет получить проволоку более высокого качества по уровню свойств и с меньшими энергозатратами.

Известно, что практически все виды обработки металлов давлением характеризуются многопроходностью. В нашем случае за счет комбинированного волочения мы имеем возможность применения более высоких единичных обжатий, что позволяет сократить дробность деформации и уменьшить кратность машины.

Точность диаметра готовой проволоки при комбинированном волочении, как и при стандартном волочении, обеспечивается за счет использования монолитных волок, т.к. основная деформация происходит именно в них, а волочение в роликах выполняет функцию дополнительной деформации.

Металлообрабатывающее оборудование, как правило, характеризуется высоким энергопотреблением. При волочении это связано с малыми обжатиями, высокой дробностью, недозагрузкой двигателей привода. В нашем случае, как было установлено исследованиями выше, комбинированное волочение с использованием активных сил трения делает энергетические затраты минимальными с точки зрения загрузки оборудования и высокого КПД. Достаточен привод в 55 квт для грубо – среднего волочения даже при высоких единичных обжатиях.

Одним из ключевых требований к современному волочильному оборудованию является гибкость, т.е. возможность быстрого перехода с одного размера производимой проволоки на другой. Предложенный способ комбинированного волочения, как и при стандартном волочении, позволяет изготавливать проволоку в любом диапазоне диаметров, в зависимости от технических характеристик волочильной машины. Преимуществом роликовых волок является их возможность регулировки калибра за счет сведения и разведения роликов, что позволяет менять размеры промежуточного профиля, монолитные волокна просто заменяются на требуемые по маршруту волочения.

Следует отметить, что требованию гибкости перехода от одного размера к другому наилучшим образом отвечает модульная конструкция волочильной машины, т.к. их можно соединять в нужном количестве и последовательности в зависимости от размера заготовки и готовой проволоки. Предлагаемый процесс как раз и представляет собой модульный процесс т.к. процесс волочения проволоки осуществляется за счет чередования необходимого для получения требуемого диаметра количества прокатно-волочильных модулей.

Экономическая целесообразность комбинированного волочения обосновывается снижением затрат на изготовление проволоки в виду того, что осуществляется рациональная загрузка волочильного оборудования и снижение многопроходности из-за увеличения частных обжатий.

Таким образом, предложенный способ улучшает качество проволоки, уменьшает энергозатраты, расширяет технологические возможности машины, позволяет наиболее полно использовать установленную мощность электропривода. При комбинированном волочении в виду использования стандартного волочильного оборудования сохраняется высокая скорость волочения, обеспечивается высокая надежность и долговечность всех элементов и узлов машины.

В отличие от других аналогичных разработок, например совмещения кручения и волочения, при использовании комбинированного волочения отсутствует необходимость синхронизации скорости волочения в роликовой и монолитной волоках. В предложенном процессе осуществляется единое управление

всеми операциями в линии. К другим достоинствам можно отнести низкую стоимость переоборудования машины, ее эксплуатации и обслуживания. Вместе с тем данный способ волочения, несмотря на относительную простоту эксплуатации, требует для обслуживания специалистов достаточно высокой квалификации, обладающих навыками работы на волочильном и прокатном оборудовании.

Для проведения комбинированного волочения возможно использование роликовых волок любой конструкции, как с регулируемой настройкой калибров, так и с точной настройкой калибра на определенный размер профиля. В первом случае – это 3-х, 4-х роликовые универсальные волокни с гладкой бочкой валков. Настройка их отличается тем, что каждый ролик может перемещаться относительно заготовки в радиальном и осевом направлениях одновременно. Поэтому калибры в форме квадрата, прямоугольника, шестиугольника можно получать в широком диапазоне размеров без смены роликов или роликовых волок. На рисунке 4.10 приведена схема роликовой волоки классического исполнения. Волока состоит из корпуса 1 с крестообразными пазами, в которых установлены четыре подушки 2 с роликами 3. радиальное перемещение подушек осуществляется нажимными винтами 4. Осевая регулировка осуществляется перемещением ролика с осью в пазах подушек и перемещением самой подушки при помощи специальных винтовых пар [37, 121].

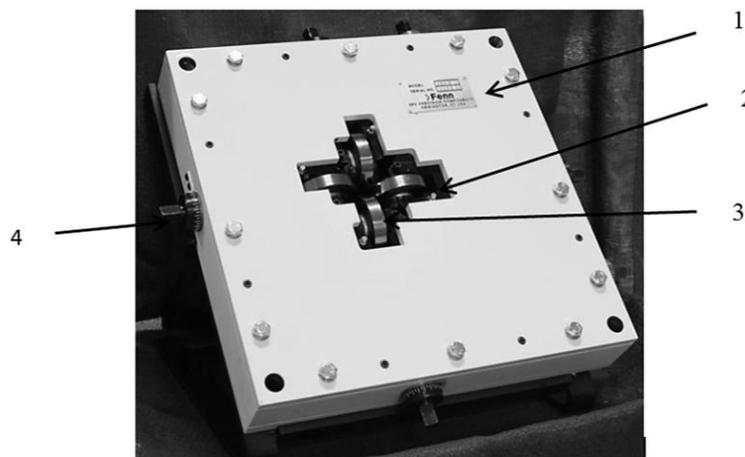


Рисунок 4.10 – Четырехроликовая волока типа TURKS HEAD

Во втором случае роликовые волокни, настроенные на специальном стенде, на требуемый размер профиля устанавливаются на соответствующий блок волоочильной машины совместно с монолитной волокой. Здесь вполне уместно применение роликовых волок, серийно выпускаемых ведущими европейскими производителями оборудования, такими как «Eurolls», «DEM» «Karl Fuhr» и др. В качестве примера на рисунке 4.11 приведена волока производства «Eurolls» [122].

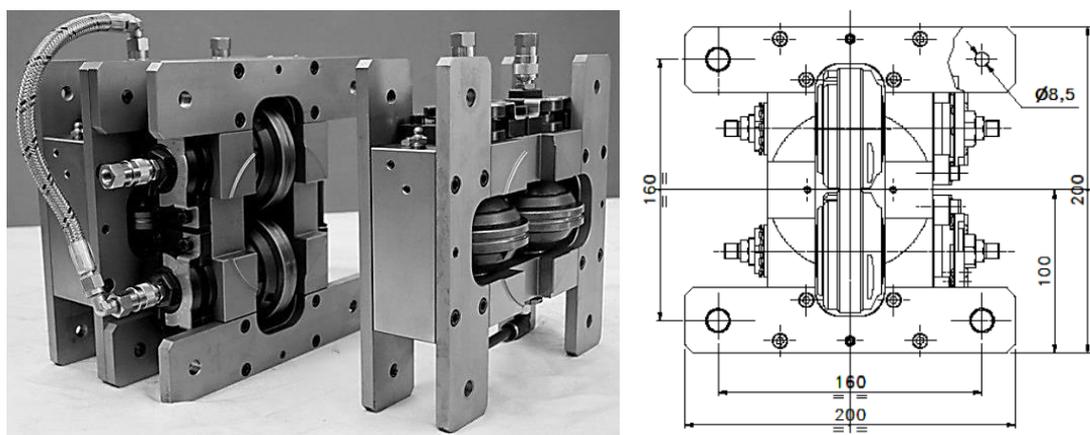


Рисунок 4.11 – Роликовая волока Eurolls

В результате проведения промышленных экспериментов по изготовлению стальной высокопрочной проволоки методом комбинированного волочения можно сделать вывод, что предлагаемый способ пригоден для промышленной эксплуатации. Качество проволоки получаемой комбинированным способом выше за счет более высокой пластичности. Проволока соответствует требованиям нормативной документации и пригодна для дальнейшей переработки, например, в канаты, пружины и т.д. Внедрение в промышленное производство нового комбинированного способа волочения позволяет осуществлять более интенсивную деформацию и позволяет снизить кратность волочения, снизить при этом энергозатраты, повысить качество проволоки. На АО «БМК» получен акт внедрения результатов диссертационной работы (Приложение Б).

## 4.5 Сравнительная оценка эффективности способов волочения проволоки

Для определения эффективности предложенного комбинированного способа выполним расчет параметров волочения проволоки толстых, средних и тонких диаметров при различных способах изготовления. По ГОСТ 2333-80 толстая проволока выпускается диаметрами 6,0 – 8,0 мм, средняя – 1,6 – 6,0 мм, тонкая – 0,4 – 1,6 мм. Расчет для комбинированного волочения выполним по методике, приведенной в п. 3.3.-3.4, для волочения в монолитных волоках и роликах кассетах соответственно по методикам, изложенным в работах [90] и [1].

Сравнительная оценка выполнена для волочения проволоки различных диаметров из сорбитизированной катанки стали марки 80. Характеристики материала и процесса приняты одинаковые как для вариантов волочения, так и для заготовки разных диаметров. Результаты расчетов приведены в таблицах 4.6–4.8.

Таблица 4.6 – Расчетные параметры волочения проволоки больших диаметров

Параметр	Изготовление проволоки		
	В монолитных волоках	В роликовых волоках	В модуле
Маршрут	12.00-10.78-9.69-8.73-7.87-7.11-6.43-6.00	12.00-10.09-8.49-7.14-6.00	12.00-10,45-9.09-7.92-6.89-6.00
Кратность	7	4	5
Обжатия единичные	0.19	0.29	0.24
Обжатие суммарное	0.75	0.75	0.75
Прочность, Н/мм <sup>2</sup>	1647	1600	1706
Равномерность ( $\Delta$ -фактор)	1.50	1 клеть: 1,05-1,12-1,30-2,05	Роликовая волока: 1,56-1,45-1,35-1,26-1,18
		2 клеть: 0,85-0,72-0,61-0,52	Монолитная волока: 1,68-1,72-1,77-1,81-1,60
Коэффициент трения	0,05	1 клеть: 0,036-0,027-0,017-0,006	Роликовая волока: 0,0013-0,0013-0,0013-0,0023
		2 клеть: 0,050-0,0059-0,069-0,080	Монолитная волока: 0,05-0,05-0,05-0,05-0,05
Усилие волочение по блокам, т	3.81-3.22-2.73-2.32-1.97-1.68-1.44	3,99-3,04-2,33-1,76	4.48-3.61-2.90-2.33-2.24
Усилие волочения суммарное, т	17.17	11,12	15.56
Мощность, кВт	436	409	408
Коэффициент запаса по блокам	2,43-2,44-2,45-2,46-2,47-2,48-2,49	2,45-2,47-2,48-2,51	2,60-2,65-2,72-2,78-2,36
Характер деформации	Монотонная	Не монотонная	Не монотонная

Таблица 4.7 – Расчетные параметры волочения проволоки средних диаметров

Параметр	Изготовление проволоки				
	В монолитных волоках	В роликовых во- локах	В модуле	В монолитных волоках	В модуле
Маршрут	8,00-7,07-6,28- 5,60-5,02-4,52- 4,00	8,00-6,70-5,60- 4,70-4,00	8,00-6,72-5,66- 4,75-4,00	5,50-4,86-4,31- 3,84-3,44-3,09- 2,78-2,50	5,50-4,66-3,97- 3,39-2,91-2,50
Кратность	6	3	4	7	5
Обжатия единич- ные	0,20	0,38	0,29	0,20	0,27
Обжатие суммар- ное	0,75	0,75	0,75	0,79	0,79
Прочность, Н/мм <sup>2</sup>	1698	1637	1772	1860	1890
Равномерность (Δ- фактор)	1,50	1 клеть: 0,99-1,40- 2,00	Роликовая волока: 1,27-1,16-1,07- 0,98	1,50	Роликовая волока: 1,06-0,96-0,90- 0,83-0,77
		2 клеть: 0,51-0,42- 0,33	Монолитная во- лока: 1,37-1,40- 1,43-1,46		Монолитная во- лока: 1,48-1,52- 1,55-1,59-1,40
Коэффициент тре- ния	0,05	1 клеть: 0,028- 0,011-0,004	Роликовая волока: 0,0013-0,0013- 0,0013-0,0013	0,05	Роликовая волока: 0,0013-0,0013- 0,0013-0,0013- 0,0013
		2 клеть: 0,087- 0,105-0,135	Монолитная во- лока: 0,05-0,05- 0,05-0,05		Монолитная во- лока: 0,05-0,05- 0,05-0,05-0,05
Усилие волочение по блокам, т	1,91-1,56-1,28- 1,06-0,88-0,74	2,17-1,52-1,35	2,42-1,86-1,43- 1,09	0,94-0,77-0,63- 0,52-0,43-0,36- 0,31	1,11-0,87-0,68- 0,53-0,50
Усилие волочения суммарное, т	7,42	5,04	6,80	3,96	3,7
Мощность, кВт	182	247	181	89,0	89,5
Коэффициент за- паса по блокам	2,20-2,24-2,28- 2,32-2,37-2,41	1,80-1,79-1,46	2,16-2,20-2,23- 2,27	2,16-2,19-2,22- 2,24-2,27-2,29- 2,31	2,33-2,37-2,41- 2,46-2,04
Характер дефор- мации	Монотонная	Не монотонная	Не монотонная	Монотонная	Не монотонная

Таблица 4.8 – Расчетные параметры волочения тонкой проволоки

Параметр	Изготовление проволоки	
	В монолитных волоках	В модуле
Маршрут	3,00-2,65-2,35-2,10-1,88-1,69-1,50	
Кратность	6	
Обжатия единичные	0,20	
Обжатие суммарное	0,75	
Прочность, Н/мм <sup>2</sup>	1830	
Равномерность (Δ-фактор)	1,50	
Коэффициент трения	0,05	
	Роликовая волока: 0,78-0,71-0,65-0,60 Монолитная волока: 1,37-1,40-1,43-1,46	
Усилие волочение по блокам, т	0,29-0,24-0,19-0,16-0,13-0,11	
Усилие волочения суммарное, т	1,12	
Мощность, кВт	27,7	
Коэффициент запаса по блокам	2,07-2,09-2,10-2,12-2,13-2,14	
Характер деформации	Монотонная	

Из результатов расчета видно, что наименьшее значение усилия волочения достигается при протягивании металла через роликовые кассеты. Однако для

волочения в роликовых кассетах необходима более сложная калибровка. При этом точность размеров получаемой проволоки ниже, чем при других способах волочения. Кроме того при волочении и в монолитных волокнах и в роликовых кассетах нет изменения схемы напряженно-деформированного состояния т.е. отсутствует возможность управлять свойствами металла. А при комбинированном такая возможность есть.

Усилие волочение при комбинированном процессе ниже, чем при стандартном, но снижение энергозатрат достигнуто только для толстой проволоки. Снижение энергозатрат примерно на 6,5 %, но для массового производства проволоки при этом может быть достигнута существенная экономия электроэнергии. Для проволоки средних и тонких диаметров затрачиваемая мощность двигателей практически одинакова для всех способов волочения. Но кратность волочения при комбинированном способе меньше, чем при стандартном.

Значение коэффициента запаса прочности, характеризующего устойчивость процесса волочения и гарантирующего безобрывность проволоки, не опускается ниже критического значения для всех способов волочения, но он минимален при стандартном волочении.

В таблице 4.9 приведена сравнительная оценка эффективности способов волочения проволоки.

Таблица 4.9 – Сравнительная оценка эффективности способов волочения

Волочение в монолитных волокнах	Волочение в роликовых волокнах	Комбинированное волочение
Схема НДС - двухстороннее сжатие с преобладающим одноосным растяжением.	Схема НДС - преимущественно сжимающие напряжения	Комбинированная схема – чередование сжатия в роликовых и растяжения в монолитных волокнах.
Высокое контактное трение.	Контактное трение уменьшается.	Контактное трение уменьшается.
Не позволяет изменять характер течения металла и управлять напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации.	Не позволяет изменять характер течения металла и управлять напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации.	Позволяет изменять направление течения металла и управлять напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации.

Продолжение таблицы 4.9

Волочение в монолитных волоках	Волочение в роликовых волоках	Комбинированное волочение
Величина единичных обжатий ограничена до 25%. Волочение осуществляется на волочильных машинах большой кратности	Позволяет осуществлять деформацию с большими, чем при волочении в монолитных волоках, обжатиями до 30%. Кратность волочильных машин снижается.	Позволяет осуществлять деформацию с большими, чем при волочении в роликовых волоках, обжатиями до 35%. Кратность волочильных машин снижается.
Высокая прочность и недостаточная пластичность проволоки	Высокая прочность и пластичность проволоки	Высокая прочность и пластичность проволоки.
Не прорабатывается центральная область сечения проволоки.	Не прорабатываются поверхностные слои проволоки.	Обеспечивает глубокую и равномерную проработку сечения проволоки
Значительная зависимость свойств проволоки от масштабного фактора.	Зависимость свойств проволоки от масштабного фактора сохраняется	Влияние масштабного фактора незначительно для проволоки диаметром более 4,0 мм
Высокие энергозатраты.	Снижение энергозатрат.	Снижение энергозатрат за счет лучшей загрузки и снижения кратности.
Низкая стоимость инструмента	Высокая стоимость инструмента	Стоимость инструмента усредняется

#### 4.6 Выводы по главе

1 Проведены промышленные эксперименты по определению влияния комбинированного волочения на механические свойства высокопрочной стальной проволоки. Получено практическое подтверждение, что оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств проволоки может быть достигнуто объединением волочения в неприводных валках и традиционного волочения в монолитных волоках в единый технологический процесс. Изменением напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при изготовлении стальной проволоки, можно обеспечить существенное повышение пластических свойств, что особенно важно при изготовлении проволоки больших диаметров.

2 С помощью поверхностного фактора  $F/V$  установлена область применимости предложенного комбинированного волочения и показана целесообразность комбинированного волочения проволоки толстых диаметров: при традиционном волочении проволоки диаметром более 4,0 мм снижается равномерность деформации и деформируемость металла, а способ модульно-комбинированного волочения позволяет сдвинуть эту величину в сторону больших значений. Получено теоретическое подтверждение результатов эксперимента.

3 На основе анализа процесса сформулированы требования к оборудованию, технологическому инструменту и рекомендации по подбору технологических смазок.

4. На АО «БМК» получен акт внедрения результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый способ модульно-комбинированного волочения, в котором единичное обжатие на каждом блоке волочильной машины распределяется между роликовой и монолитной волоками, позволяющий за счет изменения направления течения металла управлять напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации и обеспечить повышение механических свойств проволоки. Преимуществом способа является легкая встраиваемость в существующее оборудование с минимальными затратами, совместимость со скоростями грубого и среднего волочения проволоки, отсутствие необходимости синхронизации скорости волочения в роликовой и монолитной волоках. Подана заявка №2017113168 от 17.04.2017 года на модульно-комбинированный способ волочения круглой проволоки из углеродистой стали.

2. Впервые сделано описание закономерностей течения металла при волочении заготовки, имеющей сечение в виде невыполненного квадрата, через конус круглой монолитной волоки, заключающихся в том, что первоначально происходит продольно-поперечное смещение поверхностных слоев металла от вершин к сторонам квадрата и затем сменяется по всему сечению только продольным; растягивающие напряжения минимальны и сохраняются только в центральных слоях проволоки. Выполнено компьютерное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния в рабочем конусе монолитной волоки при волочении проволоки по схеме «невыполненный квадрат - круг».

3. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили адекватность теоретических исследований напряженно-деформированного состояния проволоки. В ходе экспериментальных исследований доказано, что применение разработанного комбинированного способа волочения позволяет обеспечить повышенный комплекс пластических и прочностных свойств изготавливаемой углеродистой стальной проволоки. Так, при изготовлении модульно-комбинированным способом проволоки диаметром 4,0

мм из высокоуглеродистой стали марки 70 получено значительное увеличение пластических характеристик по сравнению с традиционным волочением: удлинение выше на 33,3%, сужение - на 11,1% число перегибов – на 15,9% и число скручиваний выше на 17,1%, а проволоки диаметром 5,0 мм из стали марки 75 – при равных значениях удлинения, сужения и предела прочности отмечен рост числа скручиваний на 8,9%. Аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что предложенный способ модульно-комбинированного волочения наиболее эффективен при волочении проволоки больших диаметров, более 4,0 мм, и снижает отрицательное влияние масштабного фактора на пластичность холоднотянутой проволоки.

4. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов разработаны практические рекомендации по режимам волочения стальной высокоуглеродистой проволоки и энергосиловым параметрам процесса. Показано, что комбинированный способ позволяет осуществлять волочение с большими единичными обжатиями и уменьшить число проходов. Установлено, что при модульно-комбинированном волочении проволоки больших диаметров возможно снижение энергозатрат на 6,5 % и в условиях массового производства может быть достигнута существенная экономия электроэнергии. Уточнена методика расчёта маршрутов комбинированного волочения, включающая определение параметров промежуточного профиля, частных вытяжек и их распределения в модуле между операциями протяжки в роликовой и монолитной волоках. Для расчета обжатий в модуле на основе экспериментальных данных получена зависимость коэффициента заполнения калибра роликовой проволоки  $K_z$  от коэффициента вытяжки  $\mu$ .

5. Результаты диссертационных исследований были использованы для разработки технологической схемы изготовления проволоки, принятой для опытного опробования на производственной площадке АО «БМК». Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры технологии обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический уни-

верситет им. Г.И. Носова» при подготовке бакалавров, магистрантов и аспирантов по направлению «Металлургия».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Битков, В.В. Технология и машины для производства проволоки / В.В. Битков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 343 с.
2. Фетисов, В.П. Пластичность высокопрочной проволоки / В.П. Фетисов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2011. – 128 с.
3. Галлямов, Д.Э. О причинах расслаиваемости холоднотянутой проволоки / Д.Э. Галлямов // Молодежь. Наука. Будущее: сборник научных трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2012. – Вып. 11. – С. 105 -107.
4. Желтков, А.С. Оценка склонности к расслоению тонкой высокопрочной проволоки / А.С. Желтков // Сталь. – 2000. – №2. – С. 54-57.
5. Юхвец, И.А. Производство высокопрочной проволочной арматуры / И.А. Юхвец. – М.: Металлургия, 1973. – 264 с.
6. Сычков, А.Б. Высокоуглеродистая катанка для изготовления высокопрочных арматурных канатов / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.М. Нестеренко и др. – Бендеры: Полиграфист, 2010. – 280 с.
7. Полухин, П.И. Физические основы пластической деформации / П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. – М.: Металлургия, 1982. – 84 с.
8. Золоторевский, С.М. Механические свойства металлов: Учебник для вузов / С.М. Золоторевский. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
9. Бэкофен, В. Процессы деформации / В. Бэкофен. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
10. Коковихин, Ю.И. Технология сталепроволочного производства / Ю.И. Коковихин. – Киев. – 1995. – 608 с.
11. Гриднев, В.А. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.А. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 230 с.
12. Огородников, В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке металлов давлением / В.А. Огородников. – Киев. Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 1983. – 176 с.

13. Зильберг, Ю.В. Теория обработки металлов давлением: Монография / Ю.В. Зильберг. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 434 с.
14. Дзугутов, М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М.Я. Дзугутов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., Metallurgiya, 1977. – 480 с.
15. Дзугутов, М.Я. Пластичность, ее прогнозирование и использование при ОМД / М.Я. Дзугутов. – М.: Metallurgiya, 1984. – 64 с.
16. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
17. Беньковский, М.А. Технология прокатного производства / М.А. Беньковский, К.Н. Богоявленский, А.И. Виткин и др. – В 2-х книгах. Кн.1. Справочник. – М.: Metallurgiya, 1991. – 440 с.
18. Зубов, В.Я. О масштабном факторе при разрушении стальной проволоки / В.Я. Зубов, Л.А. Мальцева // Термическая обработка и физика металлов. – Свердловск: Изд. УПИ, 1976. – Вып. 27. – С. 116-119.
19. Рукер, В.Н. Масштабный эффект при волочении / В.Н. Рукер, С.А. Барышев, Э.Ф. Галлямов // Моделирование и развитие технологических процессов обработки металлов давлением: Сб. науч. тр. – Магнитогорск. – 1999. – 206 с.
20. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
21. Гаврилюк, В.Г. О причинах пониженной прочности и пластичности проволоки больших диаметров / В.Г. Гаврилюк, Ю.Я. Мешков, Ф.И. Машленко // Стальные канаты. – Киев: Техника, 1973. – Вып. 10. – С. 286-287.
22. Машленко, Ф.И. Изучение влияния масштабного фактора на пластичность холоднотянутой арматурной проволоки / Ф.И. Машленко // Высокопрочная проволочная арматура и ее применение в железобетонных конструкциях: Сб. науч. тр. – Волгоград. – 1977. – С. 36-43.
23. Харитонов, В.А. Классификация способов ОМД по технологическим признакам при производстве проволоки / В.А. Харитонов // Моделирование и

развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – С. 49-59.

24. Лясников, А.В. Основы разработки технологических процессов обработки металлов давлением / А.В. Лясников // Кузнечно-штамповое производство. – 2002. – № 3. – С. 6-9.

25. Зайдес, С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование / С.А. Зайдес. – Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 312 с.

26. Метизное производство. Технология производства проволоки в Японии. Технология волочения // ОАО Череметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2007. – 1. – С. 75-88.

27. Сравнительные свойства проволоки в совмещенном процессе безфильерного волочения и очистки поверхности / К.Г. Пашенко, Ю.Ф. Бахматов, А.А. Кальченко, В.В. Рузанов, С.В. Михайлицин, А.В. Ярославцев, К.К. Ярославцева, Д.В. Терентьев, М.А. Шекшеев, Н.Ш. Тютеряков, Д.А. Шашкин, А.А. Кальченко // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 2. – С.107-111.

28. Харитонов, В.А. Проволочное производство метизной отрасли и перспективы его развития / В.А. Харитонов // Метизы. – 2004. – № 3. – С. 25-27.

29. Харитонов, В.А. Направления развития технологических процессов производства проволоки / В.А. Харитонов // Метизное производство в 21-ом веке (Теория и практика): межвуз. сб. науч. тр.: под ред. Харитонova В.А. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2001. – С. 4-15.

30. Харитонов, В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния и разрушения металла при прокатке круглого профиля в квадратном калибре / В.А. Харитонов, И.В. Таранин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – №1. – С. 20-26.

31. Enghag P. Steel Wire Technology. – Sweden: Örebro University, 2010. – P. 351.

32. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

33. Рудской, А. И. Волочение: учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев, О. П. Шаболдо. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.

34. Грудев, А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

35. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства: учеб. пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – СПб.: Наука, 2005. – 540 с.

36. Поляков, М.Г. Деформация металла в многовалковых калибрах / М.Г. Поляков, Б.А. Никифоров, Г.С. Гун. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.

37. Гулько, В.И. Производство проволоки и профилей в роликовых волоках / В.И. Гулько, В.А. Войцеховский, А.К. Григорьев. – Ижевск: Удмуртия, 1989. – 132 с.

38. Рузанов, В.В. Влияние степени деформации катанки при механическом удалении окалины на свойства передельной проволоки / В.В. Рузанов, А.А. Кальченко // Теория и практика производства метизов. Межвузовский сборник. – Свердловск: изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1982. – 160 с.

39. Харитонов, В.А. Совершенствование режимов деформации и инструмента при волочении круглой проволоки. Монография / В.А. Харитонов, А.Ю. Манякин, М.В. Чукин и др. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос.техн.ун-та им Г.И.Носова, 2011. – 174 с.

40. Исследование формоизменения при обычном волочении, протяжке и прокатке в многовалковых калибрах / М. И. Бояршинов, М. Г. Поляков, Ю. И. Коковихин, Б. А. Никифоров, Г. С. Гун. // Стальные канаты. – Киев: Техника, 1968. – Сб. № 5. – С. 269-271.

41. Харитонов, В.А. Процессы волочения проволоки с комбинированным нагружением: Методическая разработка / В.А. Харитонов, Л.В. Родионова, В.И. Зюзин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 1999. – 36 с.

42. Сивак, Б.А. Развитие отечественного металлургического оборудования на основе модульных технологий / Б.А. Сивак // Сталь. – 2000. – № 8. – С. 54-57.

43. Недовизий, И.Н. Совмещение процессов производства проволоки / И.Н. Недовизий, С.И. Петрухин, А.Г. Комаров. – М.: Metallurgia, 1979. – 224 с.
44. Минаев, А. А. Совмещенные металлургические процессы / А. А. Минаев. – Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
45. А.с 1424900 СССР, МКНЗ В21С1/00. Способ производства стальной проволоки или прутков / Б.А. Никифоров, Вен. А. Харитонов, Вик. А. Харитонов и др. (СССР). – опубл. 23.09.88, Бюл. № 35. – 10 с.
46. Антропов, В.Н. Совмещение процессов волочения и холодной прокатки при изготовлении прямоугольной медной проволоки / В.Н. Антропов, И.Щ. Берин, В.А. Воробушкин // Электротехническая промышленность, Серия Кабельная техника. – 1983. – №10. – С. 4-5.
47. Ohlwein Klaus. Wickeln, Spulen, Walzen, Ziehen // Draht. – 1984. – Bd 35. – № 10. – P. 537-540.
48. Cold-rolling /drawing process yields near-net profiles // Wire Technol. Int. – 1987. – № 6. – P. 18.
49. Способ пластической обработки медных прутков. Sposob przerobki plastycznej pretow miedzianych: Пат. 143368 ПНР, МКИ С 22 F 1/08 / Grabianowski Andrzej, Danda Antoni, Ortner Balder; Polska Akademia Nauk, Instytut Podstaw Metallurgii. – № 242005; Заявл. 16.05.83; Опубл. 28.02.89.
50. Железков, О.С. Компьютерное моделирование процесса калибрования шестигранного прутка из исходной заготовки круглого сечения / О.С. Железков, С.А. Малаканов, В.Г. Дампilon // Черные металлы. – 2011. – № 6. – С. 65-66.
51. Железков, О.С. Исследование процесса формирования трапециевидного профиля волочением в монолитных и роликовых волоках / О.С. Железков, С.А. Малаканов, И.Ш. Мухаметзянов // Тезисы доклада Международного форума «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении. – Челябинск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 51-55.

52. Железков, О.С. Компьютерное моделирование напряженного состояния в монолитной волоке при калибровании фасонных профилей / О.С. Железков, С.А. Малаканов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2. – С.46-49.

53. Компьютерное моделирование процесса формирования трапецеидального профиля волочением в монолитных и роликовых волоках / О.С. Железков, С.А. Малаканов, И.Ш. Мухаметзянов, В.В. Карпец // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-ой международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2013. – т. 1. – С. 360-362.

54. Фельдман, А.И. Использование принципа чередования разноименных деформаций для интенсификации производства холоднодеформированных труб / А.И. Фельдман, М.Г. Каплун // Сталь. – 1988. – № 9. – С. 61-64.

55. Демидов, А.В. Способы изготовления холоднотянутой проволоки повышенной пластичности путем дополнительных радиальных деформаций / А.В. Демидов // Метизы. – 2008. – № 1(17). – С. 34-36.

56. Рациональная область применения эффекта Баушингера в комбинированных методах волочения / А.В. Щедрин, А.А. Бекаев, В.Н. Скоромнов, В.В. Ульянов, Г.С. Кембу, А.Ю. Козлов // Автомобильная промышленность. – 2012. – № 36. – С. 35-37.

57. Грачев, С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению / С.В. Грачев. – М.: Металлургия, 1976. – 152 с.

58. Разработка и реализация конкурентоспособных технологий производства низкоуглеродистой арматурной проволоки в условиях ОАО ММК-Метиз / А.Д. Носов, Е.П. Носков, В.Е. Семенов, Б.А. Коломиец, В.А. Харитонов, М.В. Зайцева. – Магнитогорск. – 2008. – 103 с.

59. Получение высококачественной медной проволоки с ультрамелкозернистой структурой совмещенным способом «прессование-волочение» / А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, А.В. Волокитин, И.Е. Волокитина // Труды X конгресса прокатчиков. – Липецк, 2015. – Т. 1. – С. 225-230.

60. Харитонов, В.А. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – № 3. – С. 69-73.

61. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: конспект лекций [Электронный ресурс]. – Версия 1.0 / С. Б. Сидельников, Р. И. Галиев, Д. Ю. Горбунов и др. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 95 с.

62. Данилин, Г.А. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения / Г.А. Данилин, В.П. Огородников. – Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2004. – 304 с.

63. Перспективные методы комбинированного волочения / А. В. Щедрин, В. В. Ульянов, В. М. Скоромнов, А. А. Бекаев, И. С. Милохов, Н. Ю. Чихачева // Производство проката. – 2007. – № 10. – С. 25-28.

64. Семенов, А.В. Рациональный выбор материалов и эффект синергии междисциплинарных подходов при выборе технологии производства точной фасонной заготовки из алюминиевого сплава / А.В. Семенов, Б.И. Семенов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 9. – С. 3-10.

65. Харитонов, В.А. Повышение эффективности технологического процесса изготовления низкоуглеродистой арматурной проволоки / В.А. Харитонов, А.Г. Корчунов, М.В. Зайцева // Производство проката. – 2005. – № 8. – С. 21-25.

66. Гулин, А. Е. Разработка процесса изготовления углеродистой проволоки с повышенными механическими свойствами методом комбинированной пластической деформации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Гулин Александр Евгеньевич. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2014.

67. Ho Seon Joo, Sun Kwang Hwang, Hyun Moo Baek, Yong-Taek Im, Il-Heon Son, Chul Min Bae. The effect of a non-circular drawing sequence on spheroidization of medium carbon steel wires // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – 216. – P. 348 – 356.

68. Lee, J.W., Baek, H.M., Hwang, S.K., Son, I.H., Bae, C.M., Im, Y.T. The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and

microstructure evolution of low-carbon steel // Mater. Des. – 2014. – 55. – P. 898-904.

69. Красильников, Л. А. Волочи́льщик проволоки. Учеб. пособие для СПТУ / Л. А. Красильников, А. Г. Лысенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.

70. Желтков, А.С. Расчет маршрута грубо-среднего волочения высокопрочной проволоки / А.С. Желтков, А.Н. Савенок // Сталь. – 1998. – № 11. – С. 46-49.

71. Харитонов, В.А. Оценка неравномерности в очаге деформации при волочении проволоки / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова // Процессы и оборудование металлургического производства: Сб.науч.тр. – Вып.3. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2000. – 192 с.

72. Харитонов, В.А. Неравномерность деформации при волочении в монолитной волоке: Методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Основы технологических процессов ОМД» и «Новые технологические решения в процессах ОМД» для студентов специальности 150106 / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. – С. 26.

73. Roger N. Wriugh. Wire technology. Process engineering and metallurgy. – 2011. – P. 320.

74. Rodger N. Wright. Center Bursts – a review of criteria // Wire Journal International. – 2009. – № 2. – P. 80 – 84.

75. Соколов, Н.В. Методы расчета единичной деформации и расхода энергии от упрочнения стальной проволоки при волочении / Н.В. Соколов // Бюллетень НТО. – Белорецк, 1967. – № 7. – С.12-28.

76. Аркулис, Г.Э. О максимальной вытяжке при волочении / Г.Э. Аркулис // Труды конференции по метизному производству. – Магнитогорск: изд. ЦБТИ Челябинского совнархоза, 1961.

77. Гурьянов, Г. Н. Оценка максимальной вытяжки и запаса прочности при волочении проволоки / Г. Н. Гурьянов // Металлург. – 2008. – № 10. – С. 73-75.

78. Полухин, П.И. Технология процессов обработки металлов давлением / П.И. Полухин, А. Хензель, В.П. Полухин и др.; под ред. Полухина П.И. – М.: Металлургия, 1988. – 408 с.

79. Зюзин, В.И. Ресурсосбережение в метизном производстве. Коллективная монография / В.И. Зюзин, Н.А. Клековкина, В.А. Харитонов и др. – Магнитогорск, 2001. – 163 с.

80. Гурьянов, Г.Н. Резервы экономии электроэнергии при холодном волочении стальной проволоки / Г.Н. Гурьянов // Сталь. – 2009. – № 12. – С. 53-54.

81. Гурьянов, Г.Н. Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Монография / Г.Н. Гурьянов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 358 с.

82. Буравлев, И.Б. Математические модели и алгоритм комбинированных процессов волочения / И.Б. Буравлев. – Донецк, 1995. – 57 с.

83. Колмогоров, В. Л. Гидродинамическая подача смазки / В. Л. Колмогоров, С. И. Орлов, Г. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1975. – 256 с.

84. Фастыковский, А.Р. Развитие научных основ и разработка совмещенных методов обработки металлов давлением, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов: дис. ... д-ра техн.х наук: 05.16.05 / Фастыковский Андрей Ростиславович. – Новокузнецк, 2012. – 387 с.

85. Харитонов, В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прокатке катанки в различных системах калибровки на основе моделирования методом конечных элементов / В.А. Харитонов, И.В. Таранин // Изв.вузов. Чер.металлургия. – 2013. – № 2. – С. 26-30.

86. Харитонов, В.А. Анализ систем калибров для холодной прокатки проволоки / В.А. Харитонов, И.В. Таранин // Производство проката. – 2014. – № 11. – С. 26-32.

87. Харитонов, В.А. Исследование совмещенного процесса «прокатка-волочение» при изготовлении стальной проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Производство проката. – 2014. – № 4. – С. 18-23.

88. Самойлов, В.С. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: справочник / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.: ил.

89. Харитонов, В.А. Выбор рациональной формы промежуточного профиля при волочении стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Производство проката. – 2015. – № 3. – С. 30-33.

90. Харитонов, В.А. Производство пружинной проволоки: учебное пособие / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 151 с. (<http://elibrary.ru/item.asp?id=28190012>).

91. Melander A. Criteria for breaks during wire drawing. Development in the drawing of metals / A. Melander, A. Thuvander. – 1983. – P. 46-54.

92. Zompi A., Levi R. Drawing process improvement of operating parameters // Wire. – 2008. – № 5. – P. 28-33.

93. Харитонов, В.А. Влияние режимов и способов производства на качество стальной холодноотянутой проволоки / Харитонов В.А., Дегтярев А.В. // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр.; под ред. М.В. Чукина. – Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2008. – Вып. 35. – С. 78-85.

94. Zeev Zimmerman. Making quality steel wire at optimum productivity // Wire Journal International. – 1988. – # 8 (tom21). – P. 50-51, 53-54, 57-61.

95. Технология производства арматурных канатов для предварительно напряженных железобетонных конструкций: Монография / А.Д. Носов, В.П. Манин, И.Г. Шубин, С.В. Адамчук. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – С. 107.

96. Харитонов, В.А. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 12. – С. 15-21.

97. Харитонов, В.А. Анализ влияния способа деформации на уровень свойств стальной проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 1. – С. 42-48.

98. Харитонов, В.А. Повышение эффективности волочения на основе применения совмещенно-комбинированных процессов / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2016. – № 8. – С. 71-76.

99. Харитонов, В.А. Эффективность применения модульно комбинированного волочения по схеме «квадрат-круг» при производстве углеродистой проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции. – Старый Оскол: МИСиС, 2016. – Т. 1. – С.188-191.

100. Харитонов, В.А. Исследование модульно-комбинированного процесса волочения углеродистой проволоки по схеме «квадрат-круг» / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2016. – № 2. – С. 61-64.

101. Харитонов, В.А. Способ изготовления стальной проволоки с повышенными пластическими характеристиками / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Найновите научни постижения – 2014: материали за X международна научна практична конференция. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014. – Т. 32. – С. 10-13.

102. Галлямов, Д.Э. Повышение конкурентоспособности проволоки на основе комбинирования способов ОМД / Д.Э. Галлямов, В.А. Харитонов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 73-ей международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2015. – Т. 1. – С. 108-111.

103. Харитонов, В.А. Совершенствование технологии производства проволоки на основе разработки модульно-комбинированных процессов волочения / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Металлургия: технологии, инновации, качест-

во: труды XIX международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Ч. 2. – С. 102-106.

104. Харитонов, В.А. Совершенствование процесса волочения высокоуглеродистой проволоки на основе применения модульно-комбинированного способа / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2017. – № 1. – С. 31-35.

105. Харитонов, В.А. Повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещенно-комбинированного способа волочения / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2016. – № 1. – С. 43-48.

106. Аргунов, В.Н. Калибрование фасонных профилей / В.Н. Аргунов, М.З. Ерманок, А.И. Петров, М.В. Харитонович. – М.: Металлургия, 1989. – 208 с.

107. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справ. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

108. Харитонов, В.А. Энергосбережение при производстве стальной проволоки совмещенным способом «протяжка-волочение» / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2014. – Вып. 20. – С. 231-236.

109. Коковихин, Ю.И. Предельные условия волочения в монолитных и роликовых волокнах / Ю.И. Коковихин. – Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1994. – № 12. – С. 15-19.

110. Никифоров, Б.А. Повышение эффективности производства проволоки применением модульной технологии «холодная прокатка-волочение» / Б.А. Никифоров, В.А. Харитонов // Производство проката. – 2004. – № 7. – С. 31-35.

111. Харитонов, В.А. Влияние способа волочения на конкурентоспособность стальной проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. – С. 191-199.

112. Зинутти А. Преимущества роликовых волок при волочении проволоки / А. Зинутти, Дж. Саро // *Метизы*. – 2009. – 1 (20) . – С. 37-41.

113. Моделирование с помощью метода конечных элементов процесса волочения проволоки в роликовых волоках / А. Миленин, Х. Дья, З. Мускальски, Я. Пилярчик // *Метизы*. – 2006. – № 2 (12) . – С. 30-33.

114. Харитонов, В.А. Исследование эффективности способов волочения стальной проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // *Вестник Национального Технического Университета «ХПИ»*. – 2012. – №46 (952). – С. 192-198.

115. Зинутти А. Преимущества роликовых волок для производства проволоки / А. Зинутти, Дж. Саро // *Метизы*. – 2004. – 1 (05) . – С. 42-46.

116. Харитонов, В.А. Влияние масштабного фактора на выбор способа волочения проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2014. – № 3. – С. 34-37.

117. Бернштейн, М.Л. Механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. – М.: *Металлургия*, 1979. – С. 495.

118. Харитонов, В.А. Выбор способа изготовления стальной проволоки с учетом масштабного фактора / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов // *Dny vědy – 2014: materiály X mezinárodní vědecko – praktická conference*. – Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o. – 2014. – Díl 33. – P. 3-6.

119. Труханович, А.А. Основные характеристики смазок для сухого волочения проволоки / А.А. Труханович, А.А. Леднева // *Сталь*. – 2009. – № 6. – С. 58-59.

120. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: *МАКС Пресс*, 2005. – 344 с.

121. Костокрызов, И.Д. Многороликовые волокна для производства проволоки и калиброванного металла / И.Д. Костокрызов, Е.И. Герасимов, В.С. Славин. – М.: *Обзорная информация/ ин-т «Черметинформация», сер. «Метизное производство»*, 1984. – Вып. 2. – С. 30.

122. Special wire microcassettes Type D [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.eurolls.com/en/main/products/wire-products/item/26-wire-rolling-cassettes/50-special-wire-microcassettes-type-d>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение

**Ф** «Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

## УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЁМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

17.04.2017	023077	2017113168
Дата поступления	Входящий №	Регистрационный №

<b>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (или приема)</b> дата приема документа заявки <b>17 АПР 2017</b>	<b>(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</b>	<b>ВХОДЯЩИЙ №</b>
<b>(85) ДАТА ПЕРЕВОДА</b> интеллектуальной собственности на интеллектуальную собственность		
<input type="checkbox"/> <b>ФИПС ОУДЛНТ</b> (интеллектуальная собственность изобретения, патент на изобретение, патент на полезную модель, патент на промышленный образец) <input type="checkbox"/> (47) (патент на изобретение) <input type="checkbox"/> (96) (патент на полезную модель) <input type="checkbox"/> (97) (патент на промышленный образец)	<b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> (полный адрес, включая индекс и название или наименование адресата) Филиал ФГУП «ФИПС» 125993, Москва, Г-59, ГСП-3, Российская Федерация Т. (8-499) 240-60-15 Факс: Адрес электронной почты: <a href="mailto:info@fips.ru">info@fips.ru</a> <b>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ</b> (полный адрес, включая индекс и название или наименование адресата)	
<b>ЗАЯВЛЕНИЕ</b> в выдаче патента Российской Федерации на изобретение		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация
<b>(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ</b> Способ изготовления круглой проволоки из углеродистой стали волочением		
<b>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физическое лицо или наименование юридического лица (полное наименование юридического лица, включая наименование его организационно-правовой формы и юридический адрес)) Галлимов Денис Эдуардович ул. Крупской, д. 62, кв. 8, Белорецк, РФ, 453500 <input type="checkbox"/> Изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнителем работ (указать наименование) <input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ (указать наименование) Контракт от _____ № _____		<b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</b> ОГРН КПП ИНН 028000374308 СВИАС 12906463261 ДОКУМЕНТ (серия, номер) 8005 603305 КОД СТРАНЫ (исключая) RU
<b>(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, исполняющего обязанности заявителя для подачи документов на интеллектуальную собственность или исполнения заявки на патент в государственной службе по интеллектуальной собственности или исполняющего полномочия в силу закона) Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) Адрес Срок представительства (если в заявлении проведена доверенность, представляющая заявителя, срок действия не указывается)		<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input type="checkbox"/> представитель по доверенности <input type="checkbox"/> представитель по закону Телефон: Факс: Адрес электронной почты: Регистрационный номер легитимного поверенного

07 Д 111  
19 АПР 2017  
1240 60 15

Best

28/2

Общее количество документов в листах	28	Лицо, зарегистрировавшее документы Сергеева Н.Н.
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	
Количество платежных документов	2	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу « <a href="http://www.fips.ru">www.fips.ru</a> » в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры»		

Федеральная служба по интеллектуальной  
собственности  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение



«Федеральный институт  
промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993  
Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

Форма N 91 ИЗ-2015  
910,371

Галлямову Денису Эдуардовичу  
ул. Крупской, 52, кв. 8  
г. Белорецк  
Респ. Башкортостан  
453500

На № - от -

Наш № 2017113168/02(023077)

*При перепишке просим ссылаться на номер заявки и  
сообщить дату получения настоящей*

*корреспонденции от 16.06.2017*

## УВЕДОМЛЕНИЕ

о положительном результате формальной экспертизы  
заявки на изобретение

(21) Заявка № 2017113168/02(023077)

(22) Дата подачи заявки 17.04.2017

(71) Заявитель(и) Галлямов Денис Эдуардович, RU

(54) Название изобретения Способ изготовления круглой проволоки из углеродистой стали  
волочением

1

ППД 17.04.2017

200119



По результатам формальной экспертизы заявитель уведомляется о том, что формальная экспертиза заявки на изобретение, проведенная в соответствии со ст. 1384 Кодекса\*\*, завершена с положительным результатом.

Дополнительно заявитель уведомляется о том, что:

- ходатайство о проведении экспертизы заявки по существу поступило 17.04.2017.

Результаты рассмотрения ходатайства будут сообщены дополнительно.

Заместитель заведующего  
отделом формальной  
экспертизы заявок на  
изобретения ФИПС

Документ подписан электронной подписью  
Сведения о сертификате ЭП  
Сертификат 382AFBA300020000115A  
Владелец Мурзина  
Екатерина Павловна  
Срок действия с 18.10.2016 по 01.04.2030

Е. П. Мурзина  
8(499)240-34-76

Хапсириков М С  
8(499)240-34-86

Обращаем внимание на то, что:

- \* информация о состоянии делопроизводства по заявке может быть получена по телефону 8 (499) 240 60 15;
- \*\* сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу «www.fips.ru» в разделе «Информационные ресурсы/Открытые реестры»;
- \*\*\* при изменении адреса для переписки необходимо сообщить об этом незамедлительно.

\* Гражданский кодекс Российской Федерации в редакции 2008 года (применяется к заявкам, поданным до 01.10.2014).

\*\* Гражданский кодекс Российской Федерации в редакции 2014 года (применяется к заявкам, поданным с 01.10.2014).

\*\*\* Положение о патентных и иных пошлинах за совершение юридически значимых действий, связанных с патентом на изобретение, полезную модель, промышленный образец, с государственной регистрацией товарного знака и знака обслуживания, с государственной регистрацией и предоставлением исключительного права на наименование места происхождения товара, а также с государственной регистрацией отчуждения исключительного права на результат интеллектуальной деятельности или средство индивидуализации, залога исключительного права, предоставления права использования такого результата или такого средства по договору, перехода исключительного права на такой результат или такое средство без договора, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 10.12.2008 N 941 с изменениями.

\*\*\*\* Административный регламент исполнения Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам государственной функции по организации приема заявок на изобретение и их рассмотрению, экспертизы и выдачи в установленном порядке патентов Российской Федерации на изобретение утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 октября 2008 г. N 327, зарегистрированным Министерством юстиции Российской Федерации 20 февраля 2009 г. N 13413 (Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, 2009, N 21).

Федеральная служба по интеллектуальной  
собственности  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение  
«Федеральный институт  
промышленной собственности»  
(ФИПС)  
Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993  
Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

Галлямову Денису Эдуардовичу  
ул. Крупской, 52, кв. 8  
г. Белорецк  
Респ. Башкортостан  
453500

На № - от 05.04.2017

Наш № 2017113168/02(023077)

При переписке просим ссылаться на номер заявки и  
сообщить дату получения настоящей корреспонденции  
от 22.06.2017

### УВЕДОМЛЕНИЕ

о рассмотрении ходатайства о проведении экспертизы заявки на изобретение по существу

По результатам рассмотрения Вашего ходатайства о проведении экспертизы заявки № 2017113168/02(023077) по существу, поступившего 17.04.2017, уведомляем Вас о том, что экспертиза заявки по существу будет проведена в отношении 1-го независимого(ых) пункта(ов) формулы изобретения, принятой к рассмотрению по результатам проведения формальной экспертизы.

#### Обращаем Ваше внимание на то, что:

информация о состоянии делопроизводства по заявкам на выдачу патента на изобретение, поданным после 01.01.2007, размещена на сайте Роспатента по адресам: «[www.rupto.ru](http://www.rupto.ru)», «[www.fips.ru](http://www.fips.ru)».

Главный специалист  
отдела учета патентных  
пошлин ФИПС

Документ подписан электронной подписью  
Сертификат  
356CB40E0002000012A1  
Владелец Климова  
Лидия Владимировна  
Срок действия с 25.01.2017 по 01.04.2030

Л. В. Климова  
8(499)243-76-92

(см. на обороте)

01	ЭСЗ 17.04.2017	026025
----	----------------	--------

При изменении адреса для переписки просим своевременно сообщать об этом.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Белорет металлургия комбинаты

Белорецкий металлургический комбинат



Утверждаю  
 Главный инженер АО «БМК»  
 В.А. Ульянов  
 \_\_\_\_\_  
 2017 г

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Галлямова Дениса Эдуардовича по теме: «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЬНО-КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ВОЛОЧЕНИЯ В РОЛИКОВЫХ И МОНОЛИТНЫХ ВОЛОКАХ».

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Галлямова Д.Э. по теме «Совершенствование технологии изготовления высокоуглеродистой проволоки на основе разработки модульно-комбинированного способа волочения в роликовых и монолитных волокнах» обладают актуальностью, представляют практический интерес и могут быть внедрены в технологическом процессе сталепроволочного производства.

Основными достоинствами предложенного модульно-комбинированного способа волочения проволоки являются:

- \* легкая встраиваемость модульного устройства в действующее оборудование, что стало возможным за счет выбора в качестве базового процесса классической операции волочения стальной проволоки;
- \* совместимость со скоростями грубого и среднего волочения проволоки;
- \* улучшение механических свойств и эксплуатационных характеристик проволоки;
- \* более полная проработка сечения проволоки по сравнению с обычным волочением;
- \* увеличение частных и суммарных обжатий при волочении;
- \* снижение энергозатрат.

Указанные преимущества позволяют повысить эффективность и производительность процесса волочения, снижают себестоимость продукции и способствуют росту конкурентоспособности проволоки.

Перспективность предложенного способа волочения подтверждают и результаты промышленных экспериментов, выполненных соискателем Галлямовым Д.Э. на оборудовании АО «БМК», в результате которых изготовлены образцы проволоки с повышенным комплексом механических свойств.

Начальник технического управления

О.Н. Мелешин

Начальник ЦЗЛ

Л.Э. Пыхов

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
О.Л. Назарова  
» \_\_\_\_\_ 2017

АКТ  
об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы  
Галлямова Дениса Эдуардовича

Результаты диссертационной работы Галлямова Дениса Эдуардовича «Совершенствование технологического процесса изготовления стальной высокоуглеродистой проволоки на основе разработки и применения модульно-комбинированного волочения», выполненной на кафедре технологий обработки материалов ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова» внедрены в учебный процесс на основании решения методической комиссии института металлургии, машиностроения и материалообработки.

Материалы диссертационных исследований, в том числе отраженные в учебном пособии Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Производство пружинной проволоки: учеб. пособие. Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. 151 с. (электронная версия <http://elibrary.ru/item.asp?id=28190012>) и методических указаниях к практическим занятиям В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. Неравномерность деформации при волочении в монолитной волоке: Методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Основы технологических процессов ОМД» и «Новые технологические решения в процессах ОМД» для студентов специальности 150106. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 26 с. используются при чтении лекционных курсов и проведении практических и лабораторных занятия по дисциплинам: «Технология производства проволоки» и «Новые технологические решения в процессах ОМД» для обучающихся по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия, профиль «Обработка металлов и сплавов давлением (метизное производство)», а также в научно-исследовательских и выпускных квалификационных работах бакалавров и магистрантов по направлению «Металлургия».

Использование материалов диссертационной работы Галлямова Д.Э., методических указаний и учебного пособия позволяет более полно и наглядно раскрыть обучающимся физику процесса волочения, а также особенности применения и преимущества модульных и модульно-комбинированных способов деформации по сравнению с классическими способами обработки металлов давлением.

Председатель методической комиссии  
института металлургии, машиностроения  
и материалообработки

А.С. Савинов

Заведующий кафедрой технологии  
обработки материалов

М.В. Чукин